

De la arquitectura moderna a la arquitectura digital: La influencia de la revolución industrial y la revolución informacional en la producción y la cultura arquitectónica

David Humberto Abondano Franco

<http://hdl.handle.net/10803/664655>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. The access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

TESIS DOCTORAL

Título

De la arquitectura moderna a la arquitectura digital

La influencia de la revolución industrial y de la revolución
informacional en la producción y la cultura arquitectónica

Realizada por

David Humberto Abondano Franco

en el Centro

La Salle
Universidad Ramón Llull

y en el Departamento **Arquitectura**

Dirigida por

Dr. Leandro Madrazo

Resumen

La arquitectura contemporánea está sometida a un proceso de transformación a causa del desarrollo e integración de las tecnologías digitales en los procesos de diseño y de construcción; un proceso que evoca al que tuvo lugar durante la revolución industrial, que cristalizó en la arquitectura moderna. Hoy nos encontramos inmersos en un período histórico en que está emergiendo una arquitectura sin precedentes, como consecuencia de la progresiva asimilación de los nuevos materiales y técnicas de producción digital, tal como sucedió en los inicios del siglo veinte, cuando la mecanización, la estandarización, y la producción en masa de nuevos materiales y componentes constructivos sentaron las bases de la arquitectura moderna.

Con el advenimiento de las tecnologías digitales, la arquitectura ha entrado en un *periodo de transición*, que abarca el tiempo que se requiere para traducir en *hechos arquitectónicos* las consecuencias de la nueva revolución tecnológica. Además de transformar los procesos de producción material, el desarrollo tecnológico conlleva cambios en los procesos y en los conceptos que determinan tanto el diseño como el valor estético de las obras de arquitectura. En esta tesis se explora la influencia de los nuevos procesos de diseño y fabricación asistidos por ordenador (CAD/CAM) en la arquitectura actual: en la manera de concebir, construir e interpretar las producciones de la arquitectura.

La investigación parte de la premisa de que la arquitectura se encuentra en un período de transición en plena efervescencia, un período que cabe entender como un estado de flujo, un devenir. En este contexto de cambio, un análisis centrado en el estado actual de la arquitectura corre el riesgo de caer rápidamente en la obsolescencia, ya que cualquier técnica, herramienta o teoría relativa a los procesos de diseño y fabricación digital puede verse superada por la velocidad de los cambios tecnológicos.

Para comprender los cambios que están teniendo lugar en la actualidad, se propone un análisis simultáneo de las dos revoluciones tecnológicas que han transformado la manera de concebir y construir la arquitectura en los dos últimos siglos: la revolución industrial y su influencia en la arquitectura moderna, y la actual revolución digital, y la arquitectura a la que está dando lugar. Este análisis paralelo se lleva a cabo atendiendo a los materiales, herramientas, y procesos de producción, así como a los conceptos, principios e ideales que en ambos períodos –la revolución industrial, y la revolución digital– han forjado una cultura arquitectónica propia de cada época.

La contraposición entre la arquitectura moderna y la arquitectura digital se realiza a partir de un análisis histórico de los procesos de producción en las revoluciones tecnológicas que subyacen tras cada una –industrial e informacional-. Así, contrariamente a la historiografía que plantea una relación de causalidad entre ideas y formas arquitectónicas, una de las premisas de esta tesis es que tanto las ideas como las

formas que caracterizan la arquitectura de un determinado periodo histórico, responden en gran medida a los medios y los modos de producción de su tiempo.

Al contraponer la arquitectura moderna y la arquitectura digital se plantea una relación de continuidad entre ambas, de manera que la arquitectura moderna sería el precedente de la arquitectura digital, en tanto que fue la primera en integrar la tecnología en los procesos de creación arquitectónica. Por ello, este estudio de la arquitectura digital parte de los inicios de la era moderna, o de la modernidad, la época en la cual la arquitectura empieza a adoptar los métodos de producción basados en principios técnicos y científicos.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer al director de esta tesis, Dr. Leandro Madrazo, su dedicación a lo largo de estos años, por guiar esta investigación y revisar las sucesivas versiones de este documento, y por haberme transmitido –además de su amplio conocimiento– el valor y la importancia del rigor y el método en la investigación.

Agradezco a Emiliano Scotti, Selami Gürel, Riccardo Ferrari, Esra Enke, Jonathan Minchin, Alexander Walzer, Alberto Pugnale y Francesc Bardera, su asistencia y apoyo en el análisis de los casos de estudio, y a Juan Maldonado por las correcciones de este texto. Igualmente, el conocimiento que he compartido a través de conversaciones y en congresos académicos con Camilo Cifuentes, Carlos Cortina, Affonso Orciuolli, Miquel Rodríguez, Rodrigo Carbajal, y Francesco Anselmo, me ha sido de gran ayuda.

Gracias a Ángel, Marco, Gonçal, y al resto de compañeros del grupo de investigación ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle, por los momentos que hemos compartido, y a Carlos Alberto, Juan, Kenzo, Elina, Rodolfo, Francesca, Gabriele, y Sebastián, porque gracias a su amistad he logrado superar las dificultades que ha conllevado la realización de este trabajo.

En especial quiero agradecer a Manuela, por la fuerza que ha tenido y que me ha dado a lo largo de este camino, y a mi familia, por estar siempre a mi lado, a pesar de la distancia.

Esta tesis ha sido posible gracias a una ayuda para la contratación de personal investigador novel FI-DGR otorgada por la Secretaría de Universidades e Investigación, del Departamento de Economía y Conocimiento de la Generalitat de Cataluña, cofinanciada con los Fondos Sociales Europeos (2012FI_B 00284, 2013FI_B1 00014, 2014FI_B2 00138).

Índice

Introducción

1. Hipótesis: Periodos de transición: de la Industrialización al Informacionalismo	2
2. Marco teórico: del materialismo histórico a la materialidad digital.....	6
3. Metodología: la relación dialéctica entre la arquitectura moderna y la arquitectura digital.....	15
4. Estructura de la investigación	18
5. Consideraciones metodológicas: la construcción de un marco teórico para el análisis comparado de la arquitectura moderna y la arquitectura digital	
5.1 Objetivos de la investigación.....	19
5.2 Pertinencia de la investigación.....	20
5.3 Estado del debate actual sobre la arquitectura digital.....	20
Bibliografía	27

Capítulo 1

La concepción histórico-materialista de la arquitectura

Introducción.....	30
1.1 La historiografía como el estudio de los procesos de trabajo y su influencia en la cultura arquitectónica	31
1.1.1 Historiografía: del idealismo al materialismo.....	31
1.1.2 Hacia un análisis histórico materialista de la arquitectura digital	33
1.2 Contexto histórico de la arquitectura moderna y la arquitectura digital	37
1.2.1 Producción: del diseño a la construcción	37
1.2.2 Tecnología: de las máquinas a los ordenadores	40
1.2.3 Materias primas: de la materia a la información.....	45
1.2.4 Técnica: de la conservación al bienestar	46
1.2.5 Ciencia: del mecanicismo al pensamiento sistémico	50
1.2.6 Filosofía: de la maquinaria a las máquinas abstractas	55
Conclusiones.....	58
Bibliografía	61

Capítulo 2

Materialidad: del hierro al bit

Introducción.....	64
2.1 Materialidad industrial: hierro, hormigón, y vidrio.....	66
2.1.1 Los orígenes de la aplicación del hierro como material constructivo	66
2.1.2 La aplicación del hierro en el siglo XIX	68
2.1.3 Desarrollo y aplicación del hormigón	69
2.1.4 Aportaciones plásticas de los nuevos materiales estructurales	71
2.1.5 Influencia del esqueleto estructural y la transparencia del vidrio en la concepción del espacio moderna	74
2.1.6 Paradigma de la industrialización arquitectónica: el Palacio de Cristal	76
2.1.7 Materialidad y pensamiento arquitectónico	81

2.2 Materialidad digital: información, fenómenos, y materia	83
2.2.1 De la transparencia física a la mediática.....	85
2.2.1.1 Del entorno físico a los entornos digitales.....	87
2.2.1.2 El fenómeno como material arquitectónico	90
2.2.1.3 La arquitectura como interfaz	92
2.2.1.4 El espacio como “campo”	93
2.2.2 Del dibujo en papel al modelo digital	96
2.2.2.1 Comunicación de la información sobre el proyecto	97
2.2.2.2 Dibujos de diseño, presentación, y producción	98
2.2.2.3 El modelo digital	99
2.2.2.3.1 La información como materia prima	100
2.2.2.3.2 De la descripción a la predicción	100
2.2.2.3.3 La eficiencia del modelo digital	102
2.2.2.4 El paradigma de la digitalización arquitectónica: el Guggenheim de Bilbao	103
2.2.2.4.1 Representación y modelado	103
2.2.2.4.2 Racionalización y evaluación	105
2.2.2.4.3 Fabricación remota y comunicación a distancia	107
2.2.2.4.4 Productividad y libertad plástica.....	109
2.2.3 Del bit al átomo	111
2.2.3.1 Continuum digital	114
2.2.3.2 Re-conceptualización de los materiales constructivos	118
2.2.3.3 Estructuración digital de materiales.....	125
2.2.4 Del creacionismo al materialismo digital	127
2.3 Procesos de diseño y fabricación digital del Tornado	133
2.3.1 El Bory Mall y la fachada estructural del Tornado	133
2.3.2 Modelado, racionalización y evaluación de la malla estructural	134
2.3.3 Diseño y fabricación de los elementos estructurales	137
2.3.4 Hibridación de las cualidades del hierro, el vidrio y el hormigón	141
Conclusiones	143
Bibliografía	146

Capítulo 3 **Procesos de producción: de lo mecánico a lo digital**

Introducción.....	152
3.1 Del diseño compositivo al diseño paramétrico	153
3.1.1 Racionalización y sistematización del diseño	153
3.1.2 De la composición elemental al algoritmo.....	158
3.1.3 De lo geométrico a lo paramétrico	161
3.1.3.1 De lo figurativo lo diagramático y lo topológico	162
3.1.3.2 De lo estático a lo dinámico.....	168
3.1.4 De la computarización a la computación.....	171
3.2 De la mecanización a la fabricación digital.....	176
3.2.1 De lo estándar a lo no-estándar	176
3.2.2 De la complejidad plástica a la simplicidad constructiva.....	178
3.2.2.1 Fabricación digital sustractiva	179
3.2.2.2 Fabricación digital aditiva	185
3.2.3 De la forma a la función, la economía y la producción	191

3.3 De la producción en serie a la plataforma on-line.....	193
3.3.1 El proyecto de viviendas WikiHouse	195
3.3.2 La plataforma y la comunidad WikiHouse	196
3.3.3 Realización del prototipo WikiHouse/NZ en Barcelona.....	198
3.3.3.1 Acceso a los archivos	199
3.3.3.2 Adaptación del modelo de diseño	200
3.3.3.3 Preparación de archivos para mecanizado y montaje.....	204
3.3.4 Del técnico industrial al artesano digital	207
Conclusiones.....	209
Bibliografía	212

Capítulo 4

Cultura arquitectónica: del rechazo al retorno de la naturaleza

Introducción.....	218
4.1 De la máquina al sistema	221
4.1.1 De la naturaleza a la máquina.....	221
4.1.1.1 De la imitación al rechazo de la naturaleza.....	221
4.1.1.2 De la representación a la abstracción	223
4.1.1.3 De la belleza a la economía	227
4.1.1.4 De la decoración a la forma y el material	230
4.1.2 De lo estético a lo operativo	234
4.1.2.1 De lo extrínseco a lo intrínseco	234
4.1.2.1.1 De la copia a la imitación.....	234
4.1.2.1.2 De la forma sensible a la conceptual	235
4.1.2.2 De la abstracción a la simulación	238
4.1.2.2.1 De lo visual a lo operacional	240
4.1.2.2.2 De la imagen al código.....	244
4.1.2.3 Del nacimiento al crecimiento.....	248
4.1.2.3.1 De la evolución natural a la computacional	249
4.1.2.3.2 De lo controlable a lo incontrolable	254
4.1.3 Del modelo mecánico al modelo sistémico	262
4.2 Del ornamento plástico al interactivo	267
4.2.1 Del mensaje democrático al ecológico.....	268
4.2.2 De la utopía a la e-topía	273
4.2.3 De lo lineal a lo no-lineal	277
4.2.4 De la superficie a la interfaz	285
4.2.5 De la productividad a la performatividad	292
4.3 Del diseño digital a la fabricación tradicional	296
4.3.1 De la tradición a la innovación	296
4.3.2 Del high-tech al low-tech	297
Conclusiones.....	300
Bibliografía	304

Capítulo 5
Conclusiones

5.1 Aportación de una metodología de análisis que reconstruye la relación histórica entre la arquitectura moderna y la arquitectura digital	310
5.2 Sistema de cambios que fundamenta las expresiones formales, funcionales y culturales que caracterizan la arquitectura digital.....	313
5.3 Innovación y hechos arquitectónicos en la arquitectura digital	316
5.4 De la arquitectura moderna a la arquitectura digital: continuidades y discontinuidades.....	318
5.5 El periodo de transición hacia la arquitectura digital	318
Listado de ilustraciones	325

Introducción

1. Hipótesis: Períodos de transición: de la Industrialización al Informacionalismo

“Los requisitos científicos, económicos y culturales se han modificado por completo. Tanto la tecnología como la economía se enfrentan a problemas radicalmente nuevos. [...] Nos encontramos inmersos en un transformación que modificará el mundo.”¹

Mies van der Rohe

“Architecture is on the cusp of a systemic change, driven by the dynamics of climate and economy, of new technologies and new means of production.”²

Michael Weinstock

En 1928, Mies van der Rohe reconocía que la arquitectura estaba inmersa en un cambio de época derivado de los cambios tecnológicos, económicos y culturales inherentes a la revolución industrial. Comprender la naturaleza de estos cambios, que afectaron los procesos de trabajo y los objetivos de la arquitectura, era fundamental para Mies: “El conocimiento de la época, de sus tareas y sus medios, es un requisito imprescindible de la creación arquitectónica.”³ Ochenta años más tarde, a la luz de los cambios desencadenados por las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), Michael Weinstock consideraba que la arquitectura estaba experimentando un cambio sistémico. Según Weinstock, los factores de este cambio había que encontrarlos en las tecnologías de producción digital y en las dinámicas económicas que giran en torno al cambio climático. Así, observando simultáneamente las declaraciones de Mies y Weinstock, se puede concluir que la arquitectura contemporánea se encuentra en un período de transición, en el que debe adaptarse de nuevo a los cambios productivos y culturales fomentados por el desarrollo tecnológico, al igual que hizo la arquitectura de los inicios del siglo XX.

En el proceso de adaptación a los cambios de cada época, y mientras se produce esta actualización, existe una separación entre la sociedad de cada época –industrial, informacional– y su manifestación arquitectónica. Mies y Weinstock perciben esta escisión y, por ello, aluden a un momento de crisis en la arquitectura que, en términos de José Ortega y Gasset, “no es sino el tránsito que [se] hace de vivir prendido a unas cosas y apoyado en ellas a vivir prendido y apoyado en otras”⁴. Bajo este punto de vista, la arquitectura contemporánea se encuentra en una crisis como resultado de la transición que las sociedades industrializadas de finales del siglo XX están llevando a cabo en su camino hacia lo que Manuel Castells denominó “Informacionalismo”, un período que se

¹ MIES VAN DER ROHE, L. Sobre el tema: exposiciones. En NEUMEYER, F. *La palabra sin artificio*:

² WEINSTOCK, M. Metabolism and Morphology. *Architectural Design*, 78 (2), 2008, p. 26

³ NEUMEYER, F. *La palabra sin artificio: reflexiones sobre arquitectura 1922/1968*. Op.cit. p. 459

⁴ ORTEGA Y GASSET, J. *Ensimismamiento y alteración. Meditación de la técnica y otros ensayos*.

Madrid: Alianza, 2014, p. 160

caracteriza por “la nueva base tecnológica material de la actividad económica y la organización social”⁵, y por “la reestructuración del modo capitalista de producción”⁶.

Con el Informacionalismo, los ámbitos de la actividad humana que una vez fueron transformados por la industrialización –formas de trabajo, producción, ocio, consumo, socialización, comunicación, pensamiento, cultura–, hoy están siendo de nuevo afectados por las tecnologías digitales. Está emergiendo una nueva civilización, una nueva era que transmuta la sociedad industrial de la misma forma en que ésta lo hizo con la civilización artesanal. Estas revoluciones tecnológicas, tanto en el pasado como en el presente, dan lugar a una intensa transformación de los modos de producción durante un período de tiempo, lo cual da paso a nuevos tipos de organización productiva, económica, política y social.

Con la revolución industrial cambiaron las fuentes de energía que alimentaban los procesos de producción: el viento, el agua y la fuerza animal fueron remplazadas por el vapor y después por la electricidad y el uso de combustibles fósiles. Las nuevas fuentes de energía facilitaron la producción mecanizada que sustituyó a la artesanal. Por otra parte, la revolución informacional no solo ha reconducido la producción de materiales y productos a la información y a los servicios, sino que ha modificado la organización productiva: en la época industrial se concentraba en la fábrica, ahora está distribuida y conectada por redes telemáticas. Así, las revoluciones tecnológicas determinan la actividad humana en la medida que reconfiguran la organización social en torno a un sistema productivo, estableciendo nuevas relaciones entre los seres humanos y el entorno que reestructuran los vínculos del individuo con la naturaleza y la sociedad.

La arquitectura no se encuentra al margen de estas transformaciones en los ámbitos de actividad humana, siendo la construcción del entorno su principal razón de ser. En la actualidad, las tecnologías digitales están dando lugar a un proceso de transición desde una *arquitectura industrial* hacia una *arquitectura digital*, motivado por los cambios acaecidos en los procesos y los medios tecnológicos empleados para su producción. Así, desde la década de 1990 está surgiendo una arquitectura que integra las herramientas,

⁵ CASTELLS, M. *La era de la información: economía, sociedad y cultura* (Segunda ed., Vol. I. La sociedad red). Madrid: Alianza, 2000, p. 44

⁶ Ibídem. Lo que Castells definió como “Informacionalismo” fue descrito por Daniel Bell como “sociedad post-industrial”, o por Alvin Toffler como “la tercera ola”. La sociedad, según Daniel Bell, se puede dividir en tres partes: la estructura social, la política y la cultural. La estructura social comprende la economía, la tecnología y el sistema de trabajo; la política regula la distribución del poder; y la cultura, es el reino del simbolismo expresivo y los significados. El concepto de “sociedad post-industrial” remite en primer lugar a cambios en la estructura social, a la manera como está siendo transformada la economía y remodelado el sistema de empleo, y las nuevas relaciones entre la teoría y la actividad empírica, en particular entre la ciencia y la tecnología. BELL, D. *El advenimiento de la sociedad post-industrial*. Madrid: Alianza, 2006. La historia, según Alvin Toffler, se desarrolla a partir de “olas de cambio”, desde las cuales surgen nuevas civilizaciones que remplazan las viejas fórmulas, dogmas e ideologías, gracias a sus nuevos valores y tecnologías, a sus nuevas relaciones geopolíticas, o a sus nuevos estilos de vida y modos de comunicación. Hasta el momento, la humanidad ha experimentado dos grandes olas de cambio: la primera, la revolución agrícola, que tardó miles de años en desplegarse; la segunda, la revolución industrial, que necesitó sólo trescientos años. Actualmente nos encontramos ante una nueva civilización. TOFFLER, A. *La Tercera Ola* (Decimosexta ed.). Barcelona: Plaza & Janés, 1999.

los procesos, y los principios que rigen en los sistemas de producción basados en las tecnologías digitales. Pero la emergencia de esta arquitectura digital no debe entenderse como una revolución en términos de ruptura violenta con el pasado o como implantación de un nuevo orden. Más bien, la asimilación por parte de la arquitectura de los efectos producidos por las revoluciones tecnológicas requiere de un *período de transición* para que ésta pueda traducir en *hechos arquitectónicos* el influjo de las nuevas fuerzas condicionantes del progreso económico y productivo.

Un hecho arquitectónico paradigmático de la arquitectura moderna fue el rascacielos: su altura fue posible por el esqueleto estructural construido con hierro y hormigón armado; los componentes constructivos fueron fabricados industrialmente gracias a las nuevas fuentes de energía; las innovaciones tecnológicas como el ascensor o el aire acondicionado hicieron posible su funcionamiento; su configuración formal-espacial responde a la necesidad de racionalizar, optimizar y rentabilizar el suelo urbano; y, en su conjunto, representa el ideal de progreso de la sociedad moderna.

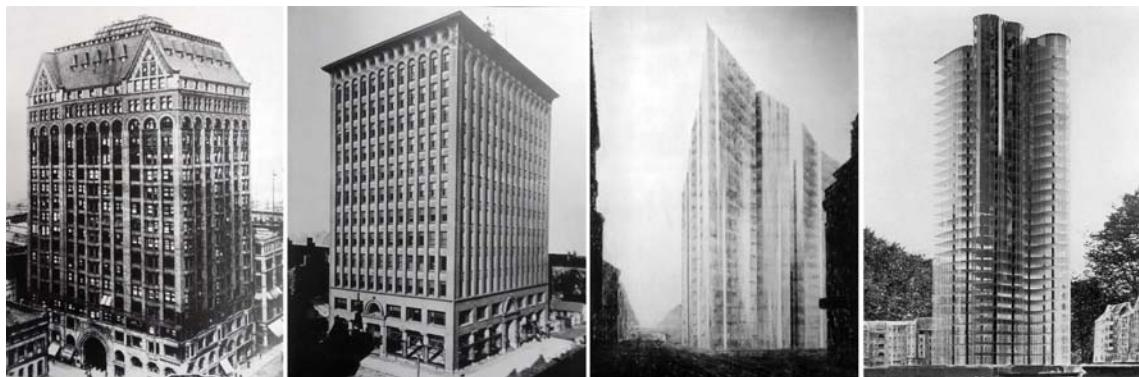


Figura 1 Templo Masónico, de Burnham y Root; Guaranty Building, de Sullivan y Alder; Proyectos de rascacielos, de Mies van der Rohe.

Al comparar las propuestas de rascacielos que Mies lleva a cabo en los inicios 1920, cuya simplicidad en el uso del vidrio contrasta con el uso del hierro que se hace en el Templo Masónico y el Guaranty Building, para producir elementos ornamentales que imitan estilos del pasado, se llega a la conclusión de que la traducción de los materiales y procesos industriales en un nuevo lenguaje arquitectónico requirió de un período de tiempo que abarcó la segunda mitad del siglo XIX y las primeras décadas del siglo XX (Figura 1). Al igual que los arquitectos del siglo XIX emplearon los materiales y los procesos industriales para reproducir una arquitectura basada en los estilos precedentes, las herramientas de diseño digital actuales aún se utilizan para diseñar edificios basados en la estandarización industrial y la regularidad formal que caracterizó el estilo moderno.

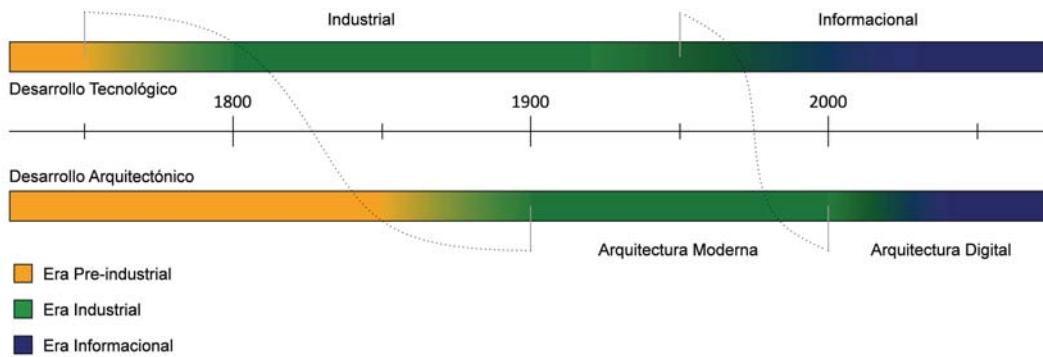


Figura 2 Períodos de transición y desfase entre el desarrollo tecnológico y el arquitectónico
(diagrama de elaboración propia)

Al reconocer que la arquitectura requiere de un período de transición, implícitamente se reconoce la existencia de un desfase entre el desarrollo tecnológico y el arquitectónico (Figura 2). Por ejemplo, la producción en masa del hierro que hizo posible la estructura metálica, permitió la construcción de vías férreas que a su vez facilitaron la circulación de materias primas y la distribución de mercancías. Estos raíles derivaron en las primeras vigas de hierro⁷. Asimismo, los modelos digitales que hoy facilitan la intervención simultánea de los diferentes actores que participan en un proyecto – arquitectos, ingenieros, contratistas, gestores– desde lugares distantes, tienen su origen en los estudios de Claude Shannon presentados en 1937, en los que demostró que la codificación de operaciones lógicas servía para describir el comportamiento de circuitos eléctricos.⁸ Gracias a estos estudios, no solo fue posible construir sistemas complejos de señales eléctricas, sino que sentaron la base para fabricar el primer ordenador electrónico digital en 1945.⁹ Este lapso de tiempo entre desarrollo tecnológico y la creación de nuevas formas fue reconocido por el crítico Joseph A. Lux en su ensayo “Estética de la ingeniería” (1910), quien lo describió en los siguientes términos:

“Cada vez que se descubre un nuevo material, las cosas se desarrollan regularmente en este modo: las formas tradicionales y acostumbradas se repiten, por un cierto tiempo, en ese material, hasta que las leyes estilísticas inmanentes de la nueva materia son comprendidas y reconocidas, y encuentran su expresión artística en formas específicas y peculiares. La experiencia enseña que la conquista material y técnica de la materia siempre prevalece, y que la energía creadora de nuevas formas puede encontrar sólo paulatinamente la expresión funcional o artística adecuada a las propiedades del material.”¹⁰

⁷ FRAMPTON, K. *Modern Architecture: A Critical History*. London: Thames & Hudson, 1997. p. 32

⁸ KUBO, M. & SALAZAR, J. Una breve historia de la era de la información. *Verb: Matters*, 2004, p. 3

⁹ Ibídem, pp. 3, 7

¹⁰ LUX, J. A. Estética de la Ingeniería. En T. MALDONADO, *Técnica y Cultura:el debate alemán entre Bismarck y Weimar*. Buenos Aires: Infinito, 2002. p. 89

La afirmación de Lux –“las formas tradicionales y acostumbradas se repiten [...] hasta que las leyes estilísticas inmanentes a la nueva materia son comprendidas y reconocidas”– permite explicar la idea de “períodos de transición” en la arquitectura. Además, Lux reconoce que la innovación formal surge de “la conquista material y técnica sobre la materia” y plantea que la forma es resultado del control (conquista) sobre la naturaleza (la materia) a través de los modos de producción (la técnica). Al presentar las innovaciones materiales y técnicas como factores esenciales para el desarrollo de formas que responden a nuevas expresiones funcionales o artísticas, Lux da a entender que, más allá de las ideas, estas formas responden a los materiales, las herramientas y los procesos que se aplican en su producción. Así, la posición de Lux se opone al idealismo que explica las formas a partir de las ideas y sitúa el origen de la creación formal en el ámbito de la producción material.

Tomando como referencia las reflexiones de Lux respecto a la introducción de los materiales y las técnicas de producción industrial en la arquitectura, el período de transición hacia una arquitectura digital comporta tres fases. La primera fase consiste en el empleo de los nuevos materiales y herramientas. La segunda fase conlleva un cambio de naturaleza en los procesos productivos, como resultado de aplicar los nuevos materiales y herramientas de producción. En la tercera fase se generan las expresiones funcionales y artísticas adecuadas, relacionadas con una nueva cultura material. En resumen, transponiendo estas etapas a la actual transición en la sociedad digital, el actual período de transición abarcaría la introducción de nuevos medios productivos –materiales y herramientas digitales–, el desarrollo de nuevos modos de producción –procesos de diseño y fabricación digital–, y el surgimiento de nuevas formas, funciones, conceptos y principios arquitectónicos –lenguaje y cultura digital–.

2. Marco teórico: del materialismo histórico a la materialidad digital

De acuerdo con Tomás Maldonado, la arquitectura moderna no puede concebirse como un estilo caracterizado por un lenguaje plástico homogéneo y específico. Las características que distinguen los edificios modernos –techo plano, superficies enlucidas blancas, volúmenes simples, ausencia de ornamento– se encuentran también en edificios de la arquitectura griega y romana antigua, en la arquitectura vernácula mediterránea, en los edificios japoneses tradicionales y de civilizaciones precolombinas, y en la arquitectura de la Edad Media.¹¹ Así, según Maldonado, el término “movimiento moderno” se ha acuñado por comodidad crítica e histórica –para agrupar la praxis y la teoría que gira en torno a la arquitectura moderna– aunque el movimiento como tal nunca existió como una realidad homogénea y compacta.¹² Ante esta falta de concreción, el término “arquitectura moderna” puede entenderse como una generalización amplia de la arquitectura que emerge en las primeras décadas del siglo XX. Por otra parte, Alfred North Whitehead sostiene que una generalización demasiado

¹¹ MALDONADO, T. *¿Es la arquitectura un texto?* Buenos Aires: Infinito, 2004, p. 38

¹² Ibídem, p. 66

amplia conduce a la esterilidad, aunque “La generalización amplia, limitada por una particularización afortunada, es lo que aprovecha una concepción”¹³. Así, a partir de las reflexiones de Maldonado y Whitehead, podemos concluir que para llevar a cabo un análisis “afortunado” de la arquitectura moderna, que ayude a comprender la transición actual hacia una arquitectura digital, es necesario recurrir a categorías que vayan más allá de las características estilísticas.

La caracterización de la arquitectura moderna a partir de sus cualidades estilísticas responde a un análisis formal que no consigue captar sus cualidades características esenciales, es decir, aquellas que la distinguen de la arquitectura de otras épocas y culturas. Por ello, más allá de la forma, es preciso identificar los materiales, las herramientas, los procesos y los principios productivos que rigen la sociedad industrial y que determinan las formas arquitectónicas de los edificios del denominado movimiento moderno. Esta perspectiva responde a los planteamientos del materialismo histórico, que otorga mayor importancia a los modos y los medios de producción que a sus manifestaciones y productos: “Lo que nos permite distinguir las diferentes épocas [...] no son los artículos fabricados sino la manera en que se fabrican y los instrumentos que se utilizan para fabricarlos”¹⁴.

La caracterización de los períodos históricos a partir de los modos y los medios de producción, propuesta en el materialismo histórico, se aplica al análisis de la arquitectura moderna y de la arquitectura digital. Para ello, se contrapone la arquitectura de la era industrial y la era digital a la luz del concepto de “producción”, entendido como una actividad que conlleva un orden de operaciones encadenadas para las que se requieren materiales, instrumentos, y conocimientos.¹⁵ Por otra parte, la distinción entre la era industrial y la era informacional, propuesta por Castells¹⁶, permite delimitar los contextos sociales en los cuales se desenvuelven la arquitectura moderna y la arquitectura digital.

Para el materialismo histórico, los materiales aplicados en la producción son necesariamente sustancias tangibles¹⁷; en la sociedad digital, la información deviene un material de producción, según Castells¹⁸. En este sentido, la distinción entre la producción industrial y la producción informacional puede entenderse como una actualización de la tesis del materialismo histórico. Llevando este planteamiento al terreno de la arquitectura, el nuevo material –la información– daría lugar a una nueva “materialidad digital”, que se contrapone a la materialidad derivada de la producción industrializada y de su aplicación por parte del movimiento moderno.

¹³ NORTH WHITEHEAD, A. *Science and the Modern World*. En BELL, Op.cit., p. 29

¹⁴ MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. (BOTTOMORE, T. B. & MAXIMILIEN, R. Eds.) Barcelona: Península, 1968. p.111

¹⁵ LEFEBVRE, H. *La producción del espacio*. Madrid: Capitán Swing, 2013. p. 128

¹⁶ CASTELLS. Op.cit.

¹⁷ MARX, K. *El Capital: crítica de la economía política. Libro primero: el proceso de producción del capital* (Vol. 1). Buenos Aires; Mexico D.F: Siglo veintiuno editores, 2005. p. 44

¹⁸ CASTELLS. Op.cit., p. 103

2.1 Materialismo histórico

“[La] interpretación tecnológica de la historia ha encontrado su expresión clásica en la concepción materialista de la historia. Ésta, en la forma en que Marx la ha presentado, no es en realidad una concepción ‘económica’, sino, justamente, una concepción ‘tecnológica’ de la historia, resultante de un examen detenido de criterios que son provistos, como es notorio, en las pocas líneas del prefacio de la *Crítica de la economía política*.¹⁹”

Werner Sombart

“En la producción social de su vida, los hombres contraen determinadas relaciones necesarias e independientes de su voluntad, relaciones de producción que corresponden a una determinada fase de desarrollo de sus fuerzas productivas materiales. El conjunto de esas relaciones de producción forma la estructura económica de la sociedad, la base real sobre la cual se levanta la superestructura jurídica y política, y a la que corresponden determinadas formas de conciencia social. El modo de producción de la vida material condiciona el proceso de vida social, política y espiritual en general.”²⁰

Karl Marx

Según Werner Sombart, el materialismo histórico es una “interpretación tecnológica” de la historia que intenta explicar la relación entre las “fuerzas productivas”, la “estructura económica”, y la “superestructura” propuestas por Marx; esto es, una interpretación a partir de unas categorías de análisis centradas en los procesos de producción. Según Gerald Cohen, las fuerzas productivas disfrutan de una primacía explicativa en la interpretación tecnológica del materialismo histórico.²¹ Bajo este punto de vista, un análisis histórico materialista de la arquitectura, debe analizar, en primer lugar, las fuerzas productivas en la correspondiente época histórica.

Marx definió las fuerzas productivas como un proceso de trabajo que incluye tres componentes: el trabajo en sí mismo o actividad personal determinada por un *modus operandi*, los objetos de trabajo u medios extraídos de la naturaleza para emplearlos en la producción, y los instrumentos de trabajo.²² Para Cohen, por su parte, este proceso consiste de una fuerza de trabajo, que incluye facultades como la fortaleza, la habilidad, el conocimiento o la inventiva, y unos medios de producción que comprenden las

¹⁹ SOMBART, W. Técnica y Cultura. En MALDONADO, T. (Ed.). *Técnica y cultura: el debate alemán entre Bismarck y Weimar*. Buenos Aires: Infinito, 2002. p. 130

²⁰ MARX, K. Prologo de la Contribución a la crítica de la economía política. En CÉSAR, R. (Ed.). *Escritos sobre el materialismo histórico*. Madrid: Alianza, 2012, p. 176

²¹ COHEN, G. *La teoría de la Historia de Karl Marx. Una defensa*. Madrid: Siglo XXI, 1986. p. 31

²² MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. Op.cit., pp. 109-112

materias primas y los instrumentos de producción.²³ Tomando como referencia las formulaciones de las fuerzas productivas propuestas por Marx y Cohen, el análisis de la arquitectura a partir de las fuerzas productivas se centra en el estudio de sus modos y medios de producción. Los modos de producción hacen referencia al trabajo en sí, es decir, la organización y las técnicas empleadas en los procesos de diseño y construcción. En cuanto a los medios de producción, éstos abarcan los instrumentos de trabajo, que incluyen la tecnología y las materias primas. (Figura 3)

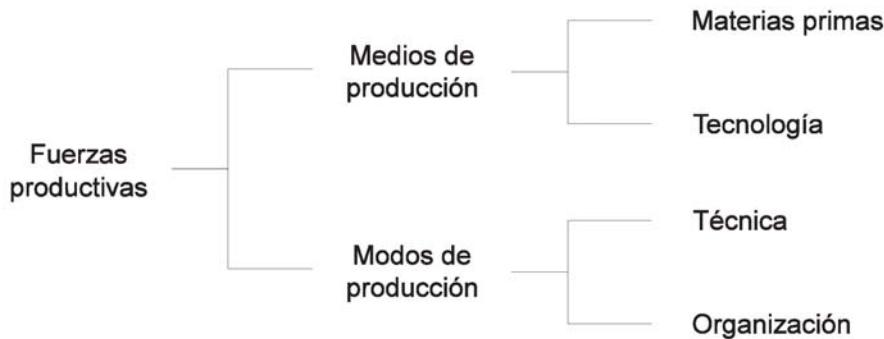


Figura 3 Componentes de las fuerzas productivas aplicados al análisis arquitectónico
(diagrama de elaboración propia)

Por consiguiente, un análisis de la arquitectura digital desde una perspectiva materialista conlleva examinar las nuevas técnicas de diseño y fabricación, y los modos de organización del trabajo que han surgido con el desarrollo de las tecnologías digitales. Por otra parte, asumiendo la premisa del materialismo histórico según la cual la producción material determina los procesos intelectuales y la conciencia social,²⁴ un análisis de la arquitectura digital de nuestra época implica examinar la influencia de las tecnologías digitales en el desarrollo de una nueva cultura arquitectónica, entendiendo el término “cultura” como “el conjunto de creencias, ideas, valores, reglas y pautas de comportamiento que caracterizan una sociedad”²⁵, y como “el reino del simbolismo expresivo y los significados”²⁶.

Las tecnologías digitales han dado lugar a una nueva “materialidad”, en el sentido de que nos hacen percibir la realidad física de otras maneras: “Materiality is about the way we perceive materials, but also objects as stable persistent realities. [...] There are multiple connections between these different approaches to materiality. Instruments and

²³ COHEN, G. Op.cit., p. 34

²⁴ En la interpretación de la historia en los términos del materialismo histórico intervienen otros dos términos: estructura y superestructura. La estructura hace referencia a la “estructura económica” que se compone de las “relaciones de producción” que generan la base de la formación social. La superestructura hace referencia a las instituciones de carácter no económico que determinan la conciencia social al influir sobre las ideas políticas, jurídicas, filosóficas, artísticas o académicas. COHEN, Op.cit., pp. 30-32, 49

²⁵ QUINTANILLA, M. Á. *Tecnología: un enfoque filosófico y otros ensayos de la filosofía de la tecnología*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2005. p. 27

²⁶ BELL, D. Op.cit., p. 28

machines embody some of the most important”²⁷. Bajo este punto de vista, “materialidad” y “materiales” pueden entenderse como una construcción sociocultural que resulta del empleo de la tecnología para operar sobre las materias primas en los procesos de trabajo. En este sentido, el objetivo del presente estudio es indagar acerca de la nueva materialidad de la arquitectura que surge de las tecnologías digitales.

2.2 Materialidad digital

“La primera característica del nuevo paradigma [de la tecnología de la información] es que la información es su materia prima: son tecnologías para actuar sobre la información, no sólo información para actuar sobre la tecnología, como era el caso de las revoluciones previas.”²⁸

Manuel Castells

Marx sostuvo que “Si se exceptúa la industria extractiva, que ya encuentra en la naturaleza su objeto de trabajo [...] todos los ramos de la industria operan con un *objeto* que es *materia prima*, esto es, con un objeto de trabajo ya filtrado por la actividad laboral, producto él mismo del trabajo”²⁹. Así, las materias que se extraen de la naturaleza, al ser procesadas por el trabajo se tornan en materias primas; por ejemplo, la madera extraída del bosque, transformada en planchas o listones, se convierte en materia prima para el carpintero. Estas materias primas pueden emplearse de diferentes maneras en el proceso de trabajo; por ejemplo, la madera puede utilizarse para construir una estructura o para producir el carbón vegetal que servirá de fuente de energía para otros procesos productivos. Por consiguiente, las materias primas tienen un “valor de uso” a partir del cual pueden funcionar como objeto de trabajo, medio de producción, o producto aplicado a un proceso de trabajo.³⁰

El valor de uso, o “utilidad”, según Marx “no flota por los aires. Está condicionada por las propiedades del cuerpo de la mercancía, y no existe al margen de ellas [...] El cuerpo mismo de la mercancía es pues un valor de uso o un bien”³¹. En este sentido, las materias primas son sustancias tangibles con propiedades mecánicas, físicas y químicas, y lo que determina su valor de uso es su materialidad. Por el contrario, cuando Castells considera que la información es la materia prima de las tecnologías digitales, sugiere que la corporeidad de los materiales ha dejado de ser una de sus características intrínsecas, contrariamente a Marx, quien la consideraba un elemento fundamental.

²⁷ PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Basilea: Birkhauser, 2010. pp. 145-146

²⁸ CASTELLS, Op.cit., p. 103

²⁹ MARX, K. *El Capital: crítica de la economía política. Libro primero: el proceso de producción del capital* (Vol. 1). Op.cit., p. 220

³⁰ Ibídem.

³¹ Ibídem, p. 44

Si la cualidad principal de las materias primas es su valor de uso, la información puede concebirse entonces como materia prima de los procesos de diseño y fabricación digital, al ser el objeto-material de trabajo de un ordenador durante un proceso computacional. Asimismo, el cómputo de información genera más información, que no es solo el producto del trabajo computacional sino que también es una materia prima para los procesos subsiguientes. Esta información, inexorablemente unida a las tecnologías digitales a través de las cuales se materializa (es decir, adquiere una existencia física), puede considerarse la “materia prima” en el proceso de producción de la arquitectura digital, desde su concepción hasta su construcción o fabricación.

La existencia de una “materialidad digital” ha sido explicada de diversas maneras por los autores que han teorizado acerca de la influencia de las tecnologías digitales en los procesos de diseño y construcción.

Stan Allen considera que “cuando nos referimos al ordenador normalmente no hablamos de un único aparato, sino de un ensamblaje de dispositivos”³² de entrada y de salida de datos que da la “capacidad de negociar entre el mundo abstracto de los instrumentos de diseño arquitectónicos y el propio carácter real de la arquitectura como parte del mundo físico”³³. Esta negociación entre el mundo abstracto y el físico es un proceso que, según Allen, extiende las capacidades instrumentales del ordenador al mundo de los objetos, dando lugar a una “materialidad digital”:

“Lo que intento sugerir al introducir un aparente oxímoron como ‘materialidad digital’ es que, en arquitectura, el ordenador se vuelve mucho más interesante cuando se conecta a algún dispositivo que permite producir algo distinto a una nueva imagen. Con ello me refiero a cosas tan obvias como los dispositivos de salida; el intercambio diario entre la pantalla y el plóter o la impresora [...] también se incluye la generación de prototipos rápidos (la producción de maquetas tridimensionales directamente desde archivos informáticos), así como el uso del troquelado y la fabricación en el propio proceso de construcción”³⁴.

Según Allen, por tanto, la “materialidad digital” es la manifestación de un continuo que incluye la realidad abstracta contenida en las tecnologías digitales y la realidad de los objetos del mundo físico que nos rodea. Branko Kolarevic emplea la expresión “continuum digital”³⁵ para referirse a esta continuidad entre la esfera abstracta y la esfera física de la arquitectura facilitada por las tecnologías de diseño y fabricación. Rivka y Robert Oxman, por su parte, emplean “digital materiality” para referirse a los

³² ALLEN, S. Velocidades terminales: el ordenador en el estudio de diseño. En ORTEGA, L. (Ed.) *La digitalización toma el mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009. p. 48

³³ Ibídem, p. 43

³⁴ Ibídem, p. 49

³⁵ KOLAREVIC, B. (Ed.). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York; London: Taylor & Francis, 2003. p.3

vínculos entre concepción y producción que se establecen a través de las tecnologías digitales:

“As part of this emerging of a digital materiality in design there have developed new linkages between conception and production through ‘file to file’ and CNC computer numerically controlled) fabrication. Digital design information can be used in fabrication driving rapid prototyping and CNC machinery.”³⁶

Como sostienen Fabio Gramazio, Matthias Kohler y Jan Willmann, esta materialidad digital permite replantear la separación entre el diseño y su materialización, unificando ambos en un único proceso bajo el control del arquitecto:

“Today, at the threshold between the mechanical and the digital age, it appears that a large part of contemporary architecture is determined by algorithmically established design procedures in which the constructive and building implementation is of insufficient significance and appears secondary; it is resolved only upon of the architectural design. With digital materiality something entirely different is introduced, instead of realizing a design, an image, or a drawing, a comprehensive design and building process is conceived. Here, the central issue is not the design of a form; rather, it is the design of a production process that is informed essentially by the constructive organization of the material. [...] It is a design and construction process controlled in all its details by the architect.”³⁷.

Además de superar la división entre diseño y fabricación, la materialidad digital permite asimismo superar el dilema persona-máquina, implicando a ambos en un proceso que integra las capacidades que son únicas a cada uno:

“Digital Materiality allows one to combine the abilities and deficiencies of human beings and machines to deliberate advantage. In the digital age this means while the machine with its numerical logic can rule over an infinitely large quantity of numbers, only human beings with their cognitive abilities and intuitive approaches can recognize meaning in them. The result is an added architectural value though the ‘interactive’ connection of the human and the machine, who are not equal but rather ‘equivalent’ partners.”³⁸

³⁶ OXMAN, R., & OXMAN, R.. *Theories of the Digital in Architecture*. Londres; New York: Routledge, 2014, p. 5

³⁷ GRAMAZIO, F., KOHLER, M., & WILLMANN, J. Towards an Extended Performative Materiality - Interactive Complexity and the Control of Space. En OXMAN, R., & OXMAN, R. (Eds.), *Theories of the Digital in Architecture*. London; New York: Routledge, 2014, p. 305

³⁸ Ibídem, p.307

A la luz de los planteamientos de estos autores, la información que se almacena y procesa en los ordenadores en un proceso de diseño y construcción puede entenderse como la materia prima esencial de una nueva *materialidad digital*. Esta materia prima no es únicamente un “objeto de trabajo”, en términos de Marx, sino que es parte de un “nuevo modo de desarrollo informacional”, en el que la productividad se mide en términos de procesamiento de la información y generación de conocimiento mediante las tecnologías digitales³⁹. Como sostiene Castells, “la acción del conocimiento sobre sí mismo [es la] principal fuente de productividad”⁴⁰.

Además de implicar una nueva concepción e instrumentalización de la información, la materialidad digital implica nuevas relaciones conceptuales y prácticas con la naturaleza. Estas relaciones surgen en la medida en que la producción es un proceso de trabajo que conlleva extraer materias de la naturaleza para que sean procesadas con medios tecnológicos. Según Marx:

“La tecnología revela las relaciones del hombre con la naturaleza, el proceso de producción de su vida y, con ello, el proceso de formación de sus relaciones sociales y de las concepciones mentales que resultan.”⁴¹

De este modo, Marx no solo establece una relación productiva entre los seres humanos y la naturaleza a través de la tecnología, sino que sostiene que esta relación es determinante en la formación de ideas. Asimismo, Castells sostiene que las relaciones productivas y conceptuales entre los seres humanos y la naturaleza están mediadas por la tecnología:

“La relación entre trabajo y materia en el proceso de trabajo supone el uso de los medios de producción para actuar sobre la materia mediante la energía, el conocimiento y la información. La tecnología es la forma específica de tal relación.”⁴²

En consecuencia, para Marx y Castells, los términos “materia” y “naturaleza” son equivalentes en un sentido productivo, ya que ambos reconocen la naturaleza como la fuente de la que se extrae la materia prima para producir, empleando la tecnología. Por consiguiente, si la noción de “materialidad” responde a la manera en que percibimos los materiales que provienen de la naturaleza, actualmente, esta percepción está condicionada por el modo en que se actúa sobre la materia-naturaleza mediante el uso de las tecnologías digitales; es decir que las tecnologías digitales han trasformado nuestra concepción de la naturaleza. En este contexto, aquí se analizará cómo la materialidad digital, para la arquitectura, es una nueva materialidad que conlleva una

³⁹ CASTELLS, M. Op.cit., p. 47

⁴⁰ Ibídem.

⁴¹ MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. Op.cit., p. 83

⁴² CASTELLS, M. Op.cit., p. 45

nueva relación con la naturaleza que surge de procesar la información, la materia y los fenómenos naturales mediante las tecnologías de diseño y fabricación digital.

2.3 Categorías de análisis

Asumiendo las premisas del materialismo histórico, se propone un esquema conceptual para estudiar la transición hacia una arquitectura digital basado en la tríada Materialidad-Producción-Cultura (Figura 4); un esquema que, como sostuvo Bell, “no es falso o verdadero, sino útil o no”⁴³. Esta estructura conceptual organiza las categorías de análisis que servirán para explicar la producción y la cultura arquitectónica de la era industrial y la era informacional desde una perspectiva materialista.

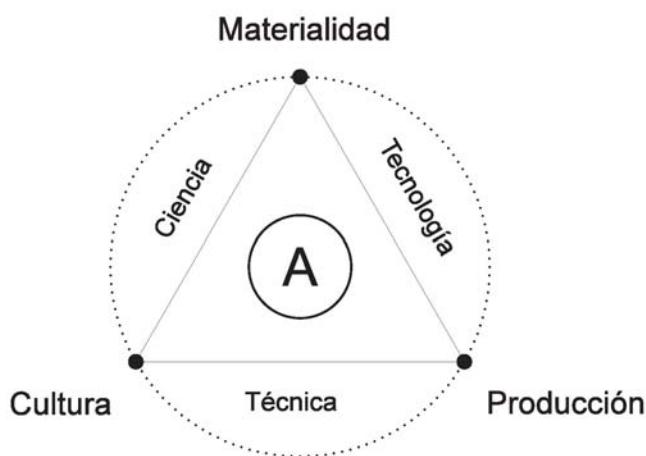


Figura 4 Esquema conceptual para un análisis de la arquitectura digital a partir del materialismo histórico (diagrama de elaboración propia)

Según el esquema propuesto, la materialidad (i.e. materias primas) y la producción (i.e. procesos de producción) constituyen dos categorías de análisis que se relacionan a través de la tecnología (i.e. CAD/CAM). Esta relación no solo implica entender la materia y la información como materias primas de los procesos de diseño y fabricación digital, sino que conlleva una noción de “materialidad” que surge de una nueva concepción e instrumentalización de la naturaleza.

La relación entre las categorías de producción (i.e. procesos de diseño y fabricación) y cultura (i.e. ideas, valores, principios) se establece a través de la técnica. De este modo se reconoce que la producción y la cultura arquitectónica tienen como objetivo satisfacer las necesidades materiales (i.e. conservación o bienestar) según los criterios económicos y racionales (i.e. eficiencia productiva y eficacia funcional) ya asumidos por las sociedades industriales.

Finalmente, las categorías de cultura (i.e. ideales, simbolismo, estética) y materialidad (i.e. materia y fenómenos naturales) se relacionan mediante la ciencia, no solo porque a

⁴³ BELL, D. Op.cit., p. 25

partir de la revolución científica se estableció una relación racional con la naturaleza que continúa vigente, sino por el hecho que las ciencias han penetrado en la sociedad a través de la industria.⁴⁴ Esto implica una nueva relación con la naturaleza que se manifiesta en las expresiones ornamentales de la arquitectura digital.

3. Metodología: la relación dialéctica entre la arquitectura moderna y la arquitectura digital

La metodología empleada para analizar la transición hacia una la arquitectura digital se basa en un análisis paralelo de los cambios materiales, productivos y culturales que han tenido lugar en la revolución industrial e informacional. La correspondiente relación entre la arquitectura digital y la arquitectura moderna puede explicarse, según la “dialéctica histórico-cultural” propuesta por Walter Benjamin.⁴⁵ La arquitectura digital representaría el “porvenir” de la arquitectura, o la “parte positiva”, mientras que los principios que forjaron la arquitectura moderna podrían considerarse como su “parte retrógrada” o “parte negativa”.

Esta relación dialéctica entre los dos períodos conlleva una contradicción interna que obedece al “principio dialéctico” de la unidad y la lucha entre los contrarios, entre un elemento “positivo” y uno “negativo” que rivalizan por prevalecer y que, al hacerlo, producen un conjunto de transformaciones que se resuelven en una síntesis superior.⁴⁶ En este sentido, la arquitectura digital representa el “elemento positivo” que apunta al futuro y se relaciona al “pensamiento progresista”, orientado hacia una nueva realidad que trasciende el orden existente mediante la implementación y desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías de diseño y fabricación digital; la arquitectura moderna, por el contrario, representa el “elemento negativo”, ya que los medios y modos de producción industrial que la fundamentaron subyacen tras una realidad que se pretende superar.⁴⁷

⁴⁴ MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. Op.cit., p. 94

⁴⁵ Walter Benjamin plantea la siguiente propuesta metódica para la dialéctica histórico-cultural: “emprender para cada época, en sus «diversos dominios», divisiones, de tal suerte que a un lado esté la parte ‘fructífera’, ‘pletórica del porvenir’, ‘positiva’ de esa época, y al otro la parte desechable, retrógrada, feneida. Incluso sólo se llegaría a evidenciar nítidamente los contornos de esa parte positiva cuando se profile contra la parte negativa. Pero la negación tiene valor únicamente como fondo para los contornos de lo viviente, lo positivo. Por eso es de importancia decisiva aplicar de nuevo a esta parte ya descartada, negativa, una división tal que con un desplazamiento del punto de mira (¡pero no de los criterios!) comparezca también en ella, de nuevo, algo distinto y positivo a lo anteriormente señalado.” BENJAMIN, W. *La dialéctica en suspeso. Fragmentos sobre la historia*. Santiago: ARCIS y LOM, 2002. pp. 115-116

⁴⁶ BORJA, R. *Dialéctica materialista*. Recuperado el 10 de 08 de 2017, de Enciclopedia de la política: <http://www.encyclopediapolitica.org/Default.aspx?i=&por=d&idind=465&termino=>

⁴⁷ La relación de la arquitectura digital con el pensamiento progresista se asienta en la interpretación del movimiento moderno propuesta por Manfredo Tafuri, para quien el “pensamiento progresista” estableció las bases teóricas del movimiento moderno y fomentó un pensamiento que apuntaba hacia el futuro, hacia una nueva realidad que trascendía el orden existente; un pensamiento que se oponía al “pensamiento conservador”, basado en reflexiones que dan significado al mundo sustentándose en el pasado y en lo existente. TAFURI, M. *Architecture and Utopia. Design and Capitalist Development*. Cambridge, Massachusetts, and London: MIT Press, 1976. pp. 50-54

La contraposición entre la arquitectura moderna y la digital se despliega en torno a las categorías de análisis establecidas a partir del materialismo histórico, según el esquema conceptual precedente: materialidad, producción y cultura arquitectónica (Figura 5). La materialidad industrial y la materialidad digital se contraponen en tanto que la primera se basa en materiales tangibles compuestos por átomos, mientras que la segunda también opera con bits, con materias primas intangibles. La producción industrial se fundamenta en el empleo de la máquina y la producción en serie, mientras que la producción digital se basa en el ordenador y se orienta a la producción personalizada (*mass customization*). Finalmente, la cultura moderna y la cultura digital se confrontan al responder a ideas y principios que buscan la simplicidad a partir de la mecanización, en el primer caso, y la complejidad a partir del procesamiento de la información, en el segundo.



Figura 5 Relación dialéctica entre la arquitectura moderna y la arquitectura digital, en torno a las categorías de análisis establecidas a partir del materialismo histórico (diagrama de elaboración propia)

Las categorías contienen y organizan la multiplicidad de cambios que la revolución industrial e informacional han acarreado en la arquitectura de la época moderna y la sociedad digital, mientras que la relación dialéctica entre la arquitectura moderna y la digital se desarrolla contraponiéndolos y relacionándolos (Figura 6). Esto permite una serie de emparejamientos que, por un lado, posibilitan una lectura diacrónica de la revolución científica, la revolución industrial y la revolución informacional y sus correspondientes influencias en la arquitectura y, por el otro, permiten operar en un plano sincrónico para relacionar los nuevos medios y modos de producción digital con los principios, las teorías, los ideales, y las expresiones formales y funcionales que están conformando una nueva cultura arquitectónica.

Industrial	REVOLUCIÓN	Informacional
Moderna	ARQUITECTURA	Digital
Átomos	MATERIALIDAD	Bits
Hierro Vidrio Hormigón	Materias primas	Información Fenómenos Materia
Máquina	PRODUCCIÓN	Ordenador
Mecanización Dibujo Composición Representación Estandarización Cadena de montaje	Tecnologías, técnicas, y organización del trabajo	CAD/CAM Modelo digital Computación Parametrización Personalización Plataforma on-line
Simple	CULTURA	Complejo
Lineal Reducciónista Mecanicista Figurativo Trascendente Geométrico Maquinista	Ideas, conceptos, teorías, ideales, principios, valores, estética	No-lineal Sistémico Cibernetico Operativo Inmanente Topológico Biológico

Figura 6 Multiplicidad de cambios acarreados por las revoluciones tecnológicas, organizados según las categorías de análisis establecidas a partir del materialismo histórico (tabla de elaboración propia)

4. Estructura de la investigación

El trabajo de investigación se estructura a partir de las categorías de análisis derivadas del materialismo histórico: materialidad, producción, y cultura arquitectónica (Figura 7).

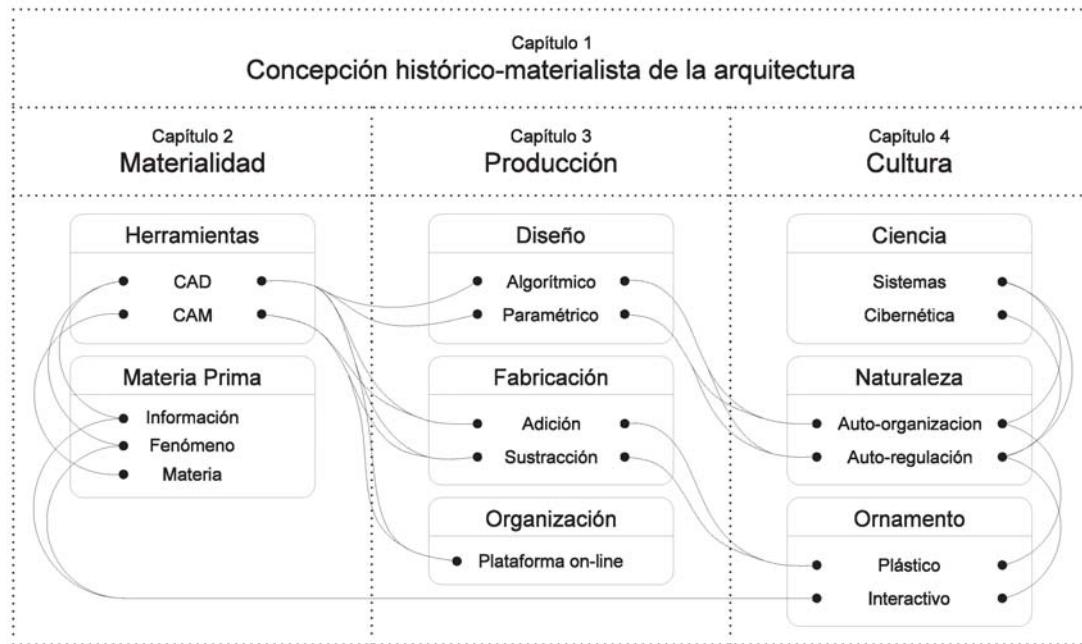


Figura 7 Estructura de la investigación organizada por capítulos (diagrama de elaboración propia)

En el Capítulo 1 “La concepción histórico-materialista de la arquitectura” se introducen los fundamentos teóricos necesarios para abordar el desarrollo histórico de la arquitectura a partir de la producción material, en contraposición a una historiografía centrada en las formas y los estilos. A continuación, se describen los cambios productivos, tecnológicos, materiales, técnicos, científicos y filosóficos que definen el contexto en el que se desarrollan tanto la arquitectura moderna como la arquitectura digital. De este modo se construye el contexto histórico que permite analizar conjuntamente la arquitectura moderna y la digital, según la concepción histórico-materialista de la historia. Al hilo de la discusión, surgen conceptos fundamentales – tecnología, técnica, materia prima, sistema, algoritmo, complejidad, máquina abstracta– surgidos en ámbitos ajenos a la cultura arquitectónica que fueron finalmente integrados en esta a través de su praxis y teoría.

Continuando con la construcción de la estructura argumental derivada del materialismo histórico, el Capítulo 2 “Materialidad: del hierro al bit” está dedicado a la *nueva materialidad*, producto de los materiales y las herramientas de trabajo que constituyen la base sobre la que se sustentan las producciones de la arquitectura moderna y de la arquitectura digital. Con este fin se analizan las condiciones técnicas, tecnológicas y materiales que dan lugar a la materialidad que subyace tras las cualidades funcionales, plásticas y espaciales de las obras de arquitectura.

En el Capítulo 3 “Procesos de producción: de lo mecánico a lo digital” se estudia la transformación del trabajo en sí, es decir, de los nuevos procesos de diseño y fabricación, así como de la organización del trabajo derivada de las tecnologías digitales. Se analizan los cambios relativos a los métodos de diseño y a los medios de representación, lo cual permite distinguir el diseño tradicional del diseño algorítmico-paramétrico. Posteriormente se estudia el modo en que se están aplicando las técnicas de fabricación digital en la arquitectura, y las posibilidades que ofrecen estas técnicas conjuntamente con los materiales de trabajo empleados. Finalmente se analizan la nueva organización productiva que está posibilitando Internet, y las nuevas relaciones de trabajo que están llevando a nuevos servicios y roles profesionales en la arquitectura.

Partiendo de la relación conceptual y productiva que establecemos con la naturaleza, determinada –de acuerdo con Marx y Castells– por el uso de la tecnología, el Capítulo 4 “Cultura arquitectónica: del rechazo al retorno de la naturaleza” se centra en la cultura arquitectónica que se está conformando a partir de la concepción e instrumentalización de la naturaleza facilitada por la aplicación de las tecnologías digitales en el diseño, la fabricación y la gestión del edificio. Para entender la relación entre la arquitectura y la naturaleza, se parte de su superación como modelo estético y su sustitución por la máquina por parte del movimiento moderno; posteriormente se constata un retorno de la naturaleza como modelo, bajo la influencia del pensamiento sistémico y la cibernetica; y, finalmente se reflexiona sobre las expresiones ornamentales que emergen a partir de la nueva instrumentalización de la naturaleza.

5. Consideraciones metodológicas: la construcción de un marco teórico para el análisis comparado de la arquitectura moderna y la arquitectura digital

Objetivos de la investigación

Esta tesis plantea que la arquitectura se encuentra en un período de transición como resultado de los cambios fomentados por las tecnologías digitales en los sistemas de producción de las sociedades industrializadas; cambios que están dando lugar a un nuevo contexto productivo, económico y sociocultural en el que emerge la arquitectura contemporánea. Para estudiar estos cambios se construye un marco teórico basado en el materialismo histórico, lo que supone examinar los modos y los medios de producción arquitectónicos, y la manera en que influyen sobre las ideas. Este marco se construye a partir de las interrelaciones entre tres categorías de análisis –Materialidad, Producción y Cultura arquitectónica– las cuales permiten explicar los efectos de las revoluciones tecnológicas –industrial e informacional– sobre la praxis y la teoría arquitectónica —moderna y digital—. El análisis se lleva a cabo sobre dos planos históricos en paralelo: el de la revolución industrial, con sus efectos en la arquitectura del movimiento moderno, y el de la revolución informacional, con sus consecuencias en la emergente arquitectura

digital. En su conjunto, el marco teórico propuesto y el análisis comparado de la arquitectura moderna y la arquitectura digital que se lleva a cabo a partir de él, constituyen la aportación metodológica de este trabajo. Con la aplicación de esta metodología, se persigue:

- Identificar los cambios derivados del desarrollo tecnológico y su influencia en las expresiones formales, funcionales y culturales que caracterizan la arquitectura digital.
- Diferenciar entre una aplicación tradicional y una innovadora de las tecnologías digitales en la arquitectura.
- Reconocer y valorar los hechos arquitectónicos que caracterizan la arquitectura digital.
- Examinar el impacto del CAD/CAM en la profesión de arquitecto, en las nuevas tareas y roles que debe asumir.
- Desarrollar un análisis histórico-crítico acerca de la influencia de la tecnología en la producción y la cultura arquitectónica.
- Identificar estrategias de diseño que faciliten el desarrollo y la socialización de la arquitectura digital.
- Cartografiar la evolución de la praxis y la teoría de la arquitectura digital, así como poner de manifiesto las relaciones entre ambas.

Pertinencia de la investigación

“[...] si las distintas etapas de la historia fueron realmente ocasionadas por transiciones críticas entonces no son propiamente etapas, es decir, pasos progresivos en un desarrollo donde cada paso dejaría atrás el anterior. [...] la historia humana no sigue una línea recta que apunta hacia las sociedades urbanas como meta última. Por el contrario, en cada transición crítica hay estados estables alternativos y se pueden dar coexistencias complejas de estados.”⁴⁸

Manuel De Landa

De acuerdo con Manuel De Landa, el desarrollo histórico es un proceso progresivo que, por un lado, continua con el pasado y la tradición para transmitir el conocimiento previamente adquirido, y, por el otro, aunque no avanza en línea recta ya que debe responder a las distintas fuerzas que coexisten e interactúan en una época determinada. Según esto, la transición hacia una arquitectura digital no supondría la desaparición del legado moderno, sino que avanzaría a partir de él para adentrarse en un estado complejo en el que la estructura teórica y el lenguaje formal y espacial heredado de la arquitectura moderna estarían sometidos a un proceso de redefinición y restructuración. Esta relación dialéctica entre los dos períodos, arquitectura moderna y arquitectura digital, permite explicar cada uno de ellos en función de las características del otro. De esta manera se pueden superar algunas de las limitaciones de las teorizaciones sobre la arquitectura digital, que se circunscriben a la época actual, a sus medios y fines, sin tener en cuenta las potenciales relaciones que la vinculan con los principios y objetivos planteados en su momento por una arquitectura moderna que, como la arquitectura digital de nuestra época, intentó congeniar la disciplina con los procesos y modos de producción vigentes.

En contraposición con el planteamiento adoptado en esta tesis, el debate actual sobre la arquitectura digital, se centra sobre todo en valorar el impacto de las tecnologías digitales en el diseño y la fabricación digital desde una perspectiva sincrónica, centrándose en cuestiones formales y productivas.

Estado del debate actual sobre la arquitectura digital

La adopción de las tecnologías digitales por parte de la arquitectura ha sido recibida con rechazo o fascinación. En la sociedad industrial, la máquina ya había suscitado reacciones similares: las críticas de John Ruskin y la celebración optimista de los futuristas.⁴⁹ Hoy, quienes se sitúan del lado de los críticos, como Kenneth Frampton o

⁴⁸ DE LANDA, M. *Mil años de historia no lineal*. Barcelona: Gedisa, 2011. pp. 13-14

⁴⁹ En el siglo XIX, John Ruskin defendió el trabajo artesanal, y por consiguiente, fue uno de los principales opositores a la aplicación de materiales y herramientas industriales en la producción arquitectónica, en tanto consideraba que: “la verdadera arquitectura no admite el hierro como material de construcción (38)”, pero, sobre todo, “no es, en efecto, la materia, sino la ausencia de trabajo humano lo

Juhani Pallasmaa, consideran que los proyectos en los cuales se aplican las tecnologías digitales ignoran la cualidad constructiva y háptica de la arquitectura y favorecen un formalismo descontextualizado. Una crítica que se dirige a arquitectos como Marcos Novak o Greg Lynn, que fueron pioneros en experimentar con las técnicas digitales en la generación de formas, fascinados por la posibilidad de crear nuevos lenguajes a partir de estas técnicas.

Según Picon, la fascinación que generaron las experimentaciones con el CAD durante los años 1990, respondía a la seducción de poder trabajar con formas curvilíneas que difícilmente podrían lograrse sin las herramientas de diseño digital⁵⁰, en tanto que el ordenador permite trabajar con flujos geométricos que generan “deformaciones volumétricas y superficiales [que] adquieren una especie de evidencia inasequible a los sistemas de representación gráficos tradicionales”⁵¹. Esta facilidad para trabajar con formas curvilíneas derivó en lo que Mario Carpo denominó “arquitectura de pliegues”, pliegues que constituyan la figura arquetípica y fundacional de la plástica arquitectónica de la era digital⁵². Inicialmente, sin embargo, esta plasticidad se inspiró en conceptos filosóficos y soslayó la fabricación digital⁵³. Estas primeras aplicaciones de las tecnologías digitales en el ámbito de la exploración formal quedaron limitadas a la pantalla del ordenador. Como sostuvo Stan Allen, las experimentaciones se redujeron a imágenes digitales que resultaron efectivas para ser difundidas por los *media* –

que quita a la obra todo su valor. Un trozo de tierra o de yeso cocido de París trabajado por la mano del hombre, vale todos los bloques de Carrara tallados a máquina. Es posible y hasta frecuente que los hombres degeneren en máquinas hasta el punto de que la labor humana presente todos los caracteres de un trabajo mecánico (52-53)”. RUSKIN, J. *Las siete lámparas de la arquitectura* (Cuarta ed.). Barcelona: Alta Fulla, 2000. Asimismo, los Futuristas se caracterizaron por su apología a la máquina, que se ve reflejada en el *Manifiesto de la arquitectura futurista*, donde Antonio Sant’Elia afirmó: “[...] nosotros – materialmente y espiritualmente artificiales– hemos de encontrar la [...] inspiración en los elementos del novísimo mundo mecánico que hemos creado.” Estos temas se profundizarán en el Capítulo 4.

⁵⁰ PICON, A. Op.cit., p. 70

⁵¹ PICON, A. La arquitectura y lo virtual. Hacia una nueva materialidad. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009. p. 72

⁵² CARPO, M. Ten Years of Folding. In OXMAN, R. & OXMAN, R. *Theories of the Digital in Architecture*. London: Routledge, 2014. p. 37

⁵³ Las experimentaciones plásticas de los años 1990 estuvieron influenciadas por el concepto de “pliegue” de Gilles Deleuze, recurrió a la metafísica de Leibniz para proponer una noción de la “complejidad” que se aleja de las ideas de *discontinuidad* y *colisión frontal*, y apela a otros conceptos como la no-linealidad, la interconectividad, la continuidad y el dinamismo. PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Op.cit. pp. 64-65, 78. Posteriormente, el concepto de “pliegue” fue introducido en la teoría arquitectónica por Greg Lynn en su ensayo “Folding in Architecture” (1993), que formó parte de una publicación con el mismo título que incluía ensayos y proyectos de arquitectos como Peter Eisenman, Jeffrey Kipnis o Stephen Perrella. De acuerdo con Lynn, la importancia de esta publicación radicaba en que los trabajos presentados abordaban temas compositivos, organizativos, visuales y materiales que fueron presentados antes que estas prácticas se vieran transformadas en teorías de diseño digital a partir del empleo de ordenadores y software de diseño. LYNN, G. *Folding in Architecture*. London: Wileey-Academy Press, 2004. p. 10. Así, a pesar de reconocer que en su momento los trabajos presentados requerían de herramientas digitales, Lynn consideró que los trabajos expuestos van más allá de la implementación de herramientas de diseño, visualización o fabricación digital, al enseñar una ambición por nuevos modelos formales y espaciales complejos. Consecuentemente, Mario Carpo consideró que en la arquitectura de pliegues las herramientas de diseño digital destacaron por su ausencia. CARPO. Op.cit., p. 41.

publicidad, audiencia, imagen y significado⁵⁴. Según Neil Leach, al priorizar la imagen como producto arquitectónico sobre la materialidad del edificio, “la cultura arquitectónica descontextualiza esa imagen y atrapa el discurso de la arquitectura en la lógica de la estetización, donde todo se ve despojado de su significado original”⁵⁵, de manera que “todo se traslada al terreno de lo estético y se valora por su apariencia”⁵⁶.

De acuerdo con Allen, la posibilidad de modelar fácilmente formas novedosas mediante el CAD daría lugar a una práctica profesional dudosa en la que el diseño sigue una trayectoria “que no va desde la imagen a la realidad, sino desde la imagen a la imagen”⁵⁷. Esta priorización de la imagen conlleva una noción del edificio entendido como forma-objeto que deniega el valor del espacio arquitectónico. De este modo la experimentación arquitectónica se torna en un ejercicio plástico que ignora las leyes físicas de la construcción y, más allá de proponer un proceso de transformación material, tiene como finalidad la creación de imágenes para sustentar un discurso teórico. Asimismo, la investigación arquitectónica queda determinada por el software de diseño empleado⁵⁸ y por la espectacularidad de las imágenes que genera.

Según Frampton, este tipo de resultados formales, creados con la ayuda de las tecnologías digitales, responden a las necesidades del mercado global, necesitado de imágenes espectaculares:

“[...] the sculptural character of this genre and the way in which this is closely connected to the spectacular, in as much as a great deal of its impact largely depends on its dissemination as an image through media. Here one can easily see how the cult of the free-standing aesthetic object is closely related to the populist franchising of culture, to the so-called Bilbao effect, wherein spectacular imagery serves to stimulate global market forces”⁵⁹.

Frampton no criticaba únicamente las formas escultóricas que resultaron de las primeras experimentaciones con el CAD, sino también la disociación que se daba entre el espacio interior y la plasticidad exterior del objeto⁶⁰. Posteriormente, Frampton reconoció el potencial de las herramientas digitales para trabajar con materiales tradicionales de maneras innovadoras, así como su capacidad para llevar a cabo procesos estocásticos e iterativos en el diseño de estructuras altamente funcionales. Sin embargo, mantuvo su oposición a la manera en que estas herramientas se estaban empleando para generar

⁵⁴ ALLEN, S. Velocidades terminales: el ordenador en el estudio de diseño. En ORTEGA, L. (Ed.) *La digitalización toma el mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009. pp. 42-43

⁵⁵ LEACH, N. *La an-estética de la arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001. p. 28

⁵⁶ Ibídem, p. 21

⁵⁷ ALLEN, S. Op.cit., p. 45

⁵⁸ BOUMAN, O. Building Terminal. In MIGAYROU, F. & BRAYER, M. A. *ArchiLab: Radical Experiments in Global Architecture*. London: Thames & Hudson, 2003. p. 15

⁵⁹ FRAMPTON, K. *Labour, work and architecture*. New York: Phaidon, 2002. p. 9

⁶⁰ Ibídem, p. 10

formas extravagantes que se convertían en un fin en sí mismas⁶¹, obviando así la dimensión humana y social de la arquitectura. Como sostiene Alberto Pérez-Gómez:

“The introduction of computers into architecture in the last two decades has helped reduce architectural discourse to issues of instrumentality. [...] Thus theoretical discourse tends to remain caught up in instrumental issues of form (innovation) and production (efficiency), while humanistic dimension of architecture is jeopardized”⁶².

Para poder valorar el impacto de las tecnologías digitales en la práctica profesional, más allá de las cuestiones específicamente técnicas relacionadas con la producción, es necesario situarlas en un contexto más amplio que permita relacionarlas con la cultura, la estética, los roles profesionales y los modos de organización social, así como con la permanente reestructuración del sector de la construcción. Con este objetivo, en esta investigación se adopta una perspectiva histórica que “evite el desenfoque que resulta de una visión demasiado próxima”⁶³ de un momento de transición en plena efervescencia, con el fin de aportar un conocimiento más profundo de la época presente –de sus tareas y de sus medios– que Mies consideró como un requisito imprescindible para la creación arquitectónica⁶⁴. Asimismo, a partir de este análisis histórico se busca evitar que el debate acerca de la arquitectura digital quede circunscrito a la innovación tecnológica, ya que, según Pablo Lorenzo-Eiroa:

“Architecture has regarded its cultural project to technology. There are several consequences and the main one relates to the role of the history of the discipline. Recent generations may consider architectural history irrelevant. This is quite verifiable in the current state of architecture discourse, where innovation is referenced by an advancement over previous digital form generation or digital representation techniques without addressing a cultural displacement that would activate content in the work. The implicit condition is that computation has induced an *ahistoric architecture*.”⁶⁵

La inexistencia de un discurso histórico centrado en la arquitectura digital se explica en parte por la necesidad de romper los vínculos con la arquitectura precedente. Este

⁶¹ Ibídem, pp.10-11

⁶² PÉREZ-GÓMEZ, A. *Built Upon Love: Architectural Longing after Ethics and Aesthetics*, MIT Press, (Cambridge, MA), 2008, p. 199. In SPILLER, N. Digital Solipsism and the Paradox of the Great Forgetting. In OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.) *Architectural Design*, 80 (4), 2010. p. 131

⁶³ Con estas palabras, Erich Mendelsohn se refería en 1919, a la postura que debía tomar la arquitectura ante las nuevas posibilidades derivadas, tanto de los cambios técnicos, económicos y culturales acarreados por la industrialización, como de “las catástrofes históricas mundiales” –en relación contexto europeo después de la Primera Guerra Mundial-. MENDELSON, E. *El problema de una nueva arquitectura*. En HEREU, P., MONTANER, J. M., & OLIVERAS, J. *Textos de arquitectura de la modernidad*. Hondarribia (Guipúzcoa): Nerea, 1999. p.172

⁶⁴ NEUMEYER, F. Op.cit., p. 459

⁶⁵ LORENZO-EIROA, P. Form:In:Form. On the Relationship Between Digital Signifiers and Formal Autonomy. In LORENZO-EIROA, P. & SPRECHER, A. *Architecture in Formation. On the Nature of Information in Digital Architecture*. New York: Routledge, 2013. p. 20

fenómeno se ha repetido a lo largo de la historia de la crítica arquitectónica⁶⁶. Así, la constitución del movimiento moderno se fundamentó en una negación del pasado y de la tradición que condujo al rechazo de la historia, a la sustitución de la naturaleza por la máquina como modelo arquitectónico o a la necesidad de hacer *tabula rasa* para establecer un nuevo origen para la arquitectura moderna, con el fin de reivindicar su originalidad y autonomía.

Como contrapunto a la posición dominante de los arquitectos de las vanguardias de principios del siglo veinte, que se desvincularon de la historia y de la tradición para reivindicar su originalidad, un análisis histórico de la arquitectura digital de nuestro tiempo permitirá contextualizar su producción y así identificar corrientes, tradiciones, posiciones y metodologías, reconstruyendo las condiciones en las que se crean las obras⁶⁷. Esta contextualización permitirá crear una visión pluralista de la arquitectura digital que se opone a la posición dominante, todavía centrada en el desarrollo de técnicas y herramientas, sin tener en cuenta su impacto estético y social. En definitiva, se trata de llevar a cabo una revisión crítica de la teoría y la praxis en la arquitectura digital, asumiendo que “parte de la duda y la indagación e, incluso, debe aceptar los errores y los cambios”⁶⁸.

Más que reconocer la génesis de la arquitectura digital, o describir los medios y modos de producción que la caracterizan, esta investigación propone una metodología para realizar un estudio histórico-crítico que parte de sus procesos productivos para contextualizar socioculturalmente su praxis y su teoría, en tanto se asume que “No puede explicarse la teoría [arquitectónica] sin relacionarla con una serie de proyectos y obras situados dentro de un sistema productivo, dentro de unas posibilidades tecnológicas, dentro de un contexto general del saber y formado por una situación de la práctica profesional”⁶⁹.

Para abordar el contexto dentro del cual se desarrollan la teoría y la práctica profesional de la arquitectura digital, es preciso reconocer el carácter de institución de la arquitectura, como propuso Manfredo Tafuri: “como institución [...] la arquitectura es un fenómeno fundamentalmente moderno, un fenómeno nacido con, y en apoyo de, todas las instituciones avanzadas de las sociedades capitalistas desarrolladas”⁷⁰. La arquitectura como institución puede formar parte de la *superestructura* planteada en el

⁶⁶ Wölfflin sostuvo que en el proceso de transición desde el Renacimiento al Barroco, “reside en el paso de un arte riguroso a un arte «libre y pintoresco», de una forma estricta a una ausencia de forma”. En WÖLFFLIN, H. *Renacimiento y Barroco*. Barcelona: Paidós, 1991. p. 13

⁶⁷ Según Montaner, esta contextualización es una tarea fundamental de la crítica. MONTANER, J. M. *Arquitectura y crítica* (Tercera ed.). Barcelona: Gustavo Gili, 2013, p. 19

⁶⁸ Ibídem, p. 12

⁶⁹ Ibídem, p. 22

⁷⁰ VIDLER, A. *Historias del presente inmediato. La invención del movimiento moderno arquitectónico*. Barcelona: Gustavo Gili, 2011. p. 180

materialismo histórico⁷¹, es decir, puede entenderse como una disciplina que determina la conciencia social al influir sobre las ideas. Por tanto, su actividad debe entenderse en relación con las fuerzas productivas y la economía de las sociedades industrializadas. Es en este contexto, según Anthony Vidler, en el que la institución de la arquitectura deriva en ideología: “la ‘arquitectura’ –totalidad de estructuras, sistemas, ideas y prácticas que tienen vinculación con los edificios proyectados y construidos por arquitectos– es una ideología”⁷².

En su obra *Architecture and Utopia. Design and Capitalist Development* (1973), Tafuri identificó las tareas que el desarrollo del capitalismo había sustraído de la arquitectura⁷³. Con ello, Tafuri puso en evidencia el debilitamiento de la arquitectura –entendida como ideología– que se desarrolló bajo las fuerzas productivas de la industria y la estructura económica capitalista. Entre las consecuencias de este debilitamiento de la arquitectura reconoció su comercialización, que condujo al “desencantamiento” y “pérdida del aura” como resultado de la racionalización y mecanización de sus procesos productivos, o al surgimiento de una vocación sociopolítica a partir de la cual se reconoció a sí misma como un instrumento de equilibrio político, para lo cual asumió la tarea de desarrollar soluciones universales y prácticas.⁷⁴

A la luz de Tafuri, el diseño y la fabricación digital se considerarán en esta tesis como procesos productivos vinculados a un “desencantamiento” de la arquitectura. Por otra parte, para reconocer la manera en que la arquitectura digital asume la vocación sociopolítica heredada del movimiento moderno, se adoptarán dos perspectivas: una primera, dentro del proyecto de la modernidad –del cual la arquitectura moderna formó parte– entendido como un proyecto democrático encaminado a mejorar la vida cotidiana en las sociedades industrializadas⁷⁵ a partir de la aplicación de la ciencia y la tecnología; y una segunda, en el marco de las dinámicas económicas en torno al cambio climático, que según Weinstock están favoreciendo un cambio sistémico en la arquitectura.⁷⁶

⁷¹ La “superestructura” hace referencia a las instituciones de carácter no económico que determinan la conciencia social al influir sobre las ideas políticas, jurídicas, filosóficas, artísticas o académicas. COHEN, G. Op.cit., p. 49,

⁷² VIDLER, A. Op.cit.. p. 180

⁷³ “What is of interest here is the precise identification of those tasks which capitalist development has taken away from architecture.” TAFURI, M. Op.cit., p. ix

⁷⁴ Ibídem, pp. 11-12

⁷⁵ MALDONADO, T. *¿Es la arquitectura un texto?* Op.cit., p. 62

⁷⁶ WEINSTOCK, M. Op.cit., p.26

Bibliografía

- ALLEN, S. Velocidades terminales: el ordenador en el estudio de diseño. En ORTEGA, L. (Ed.) *La digitalización toma el mando* (pp. 39-57). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- BELL, D. *El advenimiento de la sociedad post-industrial*. Madrid: Alianza, 2006.
- BENJAMIN, W. *La dialéctica en suspenso. Fragmentos sobre la historia*. Santiago: ARCIS y LOM, 2002.
- BORJA, R. *Dialéctica materialista*. Recuperado el 10 de 08 de 2017, de Enciclopedia de la política: <http://www.encyclopedia.politica.org/Default.aspx?i=&por=d&idind=465&termino=>
- BOUMAN, O. Building Terminal. In MIGAYROU, F., & BRAYER, M. A. *ArchiLab: Radical Experiments in Global Architecture* (pp. 15-16). London: Thames & Hudson, 2003.
- CARPO, M. Ten Years of Folding. In OXMAN, R. & OXMAN, R. *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 35-46). London: Routledge, 2014.
- CASTELLS, M. *La era de la información: economía, sociedad y cultura* (Segunda ed., Vol. I. La sociedad red). Madrid: Alianza, 2000.
- CÉSAR, R. (Ed.). *Escritos sobre el materialismo histórico*. Madrid: Alianza, 2012.
- COHEN, G. *La teoría de la Historia de Karl Marx. Una defensa*. Madrid: Siglo XXI, 1986.
- FRAMPTON, K. *Modern Architecture: A Critical History*. London: Thames & Hudson, 1997.
- FRAMPTON, K. *Labour, work and architecture*. New York: Phaidon, 2002.
- GRAMAZIO, F., KOHLER, M., & WILLMANN, J. Towards an Extended Performative Materiality - Interactive Complexity and the Control of Space. En OXMAN, R., & OXMAN, R. (Eds.), *Theories of the Digital in Architecture* (pp.307-317). London; New York: Routledge, 2014.
- HEREU, P., MONTANER, J. M., & OLIVERAS, J. *Textos de arquitectura de la modernidad*. Hondarribia (Guipúzcoa): Nerea, 1999.
- KOLAREVIC, B. (Ed.). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York; London: Taylor & Francis, 2003. p.3
- KUBO, M., y SALAZAR, J. Una breve historia de la era de la información. *VERB: Matters*, 2-19, 2004.
- LEACH, N. *La an-estética de la arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.
- LEFEBVRE, H. *La producción del espacio*. Madrid: Capitán Swing, 2013.
- LORENZO-EIROA, P. Form:In:Form. On the Relationship Between Digital Signifiers and Formal Autonomy. In LORENZO-EIROA, P. & SPRECHER, A. *Architecture in Formation. On the Nature of Information in Digital Architecture* (pp. 10-22). New York: Routledge, 2013.
- LUX, J. A. Estética de la Ingeniería. En T. MALDONADO (Ed.). *Técnica y Cultura:el debate alemán entre Bismarck y Weimar* (pp. 83-99). Buenos Aires: Infinito, 2002.
- LYNN, G. *Folding in Architecture*. London: Wileye-Academy Press, 2004.
- MALDONADO, T. *¿Es la arquitectura un texto?* Buenos Aires: Infinito, 2004.
- MARX, K. *El Capital: crítica de la economía política. Libro primero: el proceso de producción del capital* (Vol. 1). Buenos Aires; Mexico D.F: Siglo veintiuno editores, 2005.
- MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. En BOTTO MORE, T. B., & MAXIMILIEN, R. (Eds.) Barcelona: Península, 1968.
- MONTANER, J. M. *Arquitectura y crítica* (Tercera ed.). Barcelona: Gustavo Gili, 2013.
- NEUMEYER, F. *La palabra sin artificio: reflexiones sobre arquitectura 1922/1968*. Madrid: El Croquis, 2000.
- ORTEGA Y GASSET, J. *Ensimismamiento y alteración. Meditación de la técnica y otros ensayos*. Madrid: Alianza, 2014.

- OXMAN, R. Theory and Design in the First Digital Age. In: *The International Journal of Design Studies*, 27, pp. 229-265, 2006.
- OXMAN, R., & OXMAN, R.. *Theories of the Digital in Architecture*. London; New York: Routledge, 2014.
- PICON, A. La arquitectura y lo virtual. Hacia una nueva materialidad. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando* (pp. 67-83). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Basilea: Birkhauser, 2010.
- QUINTANILLA, M. Á. *Tecnología: un enfoque filosófico y otros ensayos de la filosofía de la tecnología*. Mexico, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2005.
- RUSKIN, J. *Las siete lámparas de la arquitectura* (Cuarta ed.). Barcelona: Alta Fulla, 2000.
- SOMBART, W. Técnica y Cultura. En MALDONADO, T. (Ed). *Técnica y cultura: el debate alemán entre Bismarck y Weimar* (pp. 121-152). Buenos Aires: Infinito, 2002.
- SPILLER, N. Digital Solipsism and the Paradox of the Great Forgetting. (R. OXMAN, & R. OXMAN, Edits.) *Architectural Design*, 80 (4), 130-134, 2010.
- TAFURI, M. *Architecture and Utopia. Design and Capitalist Development*. Cambridge, Massachusetts, and London: MIT Press, 1976.
- TOFFLER, A. *La Tercera Ola* (Decimosexta ed.). Barcelona: Plaza & Janés, 1999.
- VIDLER, A. *Historias del presente inmediato. La invención del movimiento moderno arquitectónico*. Barcelona: Gustavo Gili, 2011.
- WEINSTOCK, M. Metabolism and Morphology. *Architectural Design*, 78 (2), 26-36, 2008.
- WÖLFFLIN, H. *Renacimiento y Barroco*. Barcelona: Paidós, 1991.

Capítulo 1

La concepción histórico-materialista de la arquitectura

Introducción

En este capítulo se introducen las premisas para una interpretación histórico-materialista de la arquitectura. Primero, se aborda la diferencia entre la historiografía idealista y la materialista y se analizan ejemplos de estos tipos de análisis en la historiografía de la arquitectura moderna. A continuación, se contextualiza la arquitectura digital en relación con la Modernidad, atendiendo a los hechos históricos que la vinculan con la revolución científica, la revolución industrial y la revolución informacional. En este estudio se asume la diferenciación que propone Detlef Mertins entre los términos “Modernidad”, “modernización” y “modernismo”.¹ Así, la Modernidad sería un periodo histórico de duración incierta que rechaza modelos de otras épocas y crea sus propias normas –a partir del método y el pensamiento científico–. La modernización haría referencia a las transformaciones en el ámbito material de la civilización, así como a los avances en la estructura productiva, los materiales y las comunicaciones. Finalmente, el modernismo sería la respuesta cultural a la modernidad y la modernización.

Teniendo en consideración estos conceptos previos se describe el contexto histórico de la arquitectura moderna y la arquitectura digital, a partir de las categorías de análisis derivadas del materialismo histórico. Es decir, se analizarán las transformaciones generadas por la revolución industrial y la revolución informacional sobre las fuerzas de producción –procesos de trabajo, instrumentos, materias primas–, considerando su influencia sobre la cultura arquitectónica. Así, el análisis tiene en cuenta los cambios inducidos por las revoluciones tecnológicas sobre las técnicas, las tecnologías y los materiales de trabajo que se emplean en la arquitectura, con el fin comprender de qué manera estos cambios productivos se relacionan y retroalimentan con las ideas, conceptos, principios y valores que han determinado el desarrollo histórico de la arquitectura a partir de las respectivas revoluciones.

Este análisis de la arquitectura de las sociedades industrial e informacional a partir del materialismo histórico permite relacionar la arquitectura moderna y la arquitectura digital, para así identificar las continuidades y discontinuidades en su praxis y teoría y comprender lo que se ha obtenido y sotrayado en la arquitectura con la aplicación de las tecnologías digitales.

¹ MERTINS, D. *Modernity Unbound*. London: Architectural Association Publications, 2012. p. 5

1.1. La historiografía como estudio de los procesos de producción y su influencia en la cultura arquitectónica

1.1.1 Historiografía: del idealismo al materialismo

“Esta concepción de la historia se basa, pues, en la exposición del proceso real de la producción, partiendo de la simple producción material de la vida y de la comprensión de las formas conectadas con este modo de producción y engendradas por él [...] Al revés de la concepción idealista de la historia no debe buscar una categoría en cada periodo sino que permanece siempre en el suelo real de la historia; no explica la práctica por la idea sino que explica la formación de las ideas por la práctica material”.²

Karl Marx

La “Teoría de la historia” o el método de investigación científica de raíz materialista, en contraposición a su variante idealista, fue ideado por Marx para explicar el cambio social en la historia. El método de investigación histórico fue denominado “Materialismo Histórico” por Friedrich Engels, y se basa en dos principios fundamentales heredados de la concepción de la historia propuesta por Hegel. El primero es su oposición a la corriente de pensamiento originada en la Ilustración que consideraba a las personas seres semejantes a través del tiempo y del espacio; es decir, que la historia de los seres humanos es independiente de las épocas y lugares en los que transcurren sus vidas.³ El segundo, entender la historia como un proceso de “auto-creación” por el que la humanidad se crea a sí misma a lo largo del tiempo impulsada por su propia actividad en sociedad.⁴ Marx coincide con Hegel en cuanto a la noción del desarrollo histórico como un proceso que transcurre a través de diversas épocas. Sin embargo, Hegel entiende que el carácter de cada época se encuentra en las ideas, en un espíritu abstracto o “autoconciencia” que se desarrolla tanto al margen de la naturaleza y de la humanidad, como del tiempo y el espacio. Por el contrario, para Marx, más que las actitudes espirituales y las ideas, lo que impulsa el desarrollo histórico son las condiciones externas al hombre que residen en la naturaleza, así como en los medios y los fines desde los cuales actúa sobre ella. Por consiguiente, mientras la concepción de la historia de Hegel es de carácter idealista, la de Marx es materialista.

Hegel planteó que el proceso de auto-creación está separado de la vida cotidiana o en términos de Marx, de la “base real de la historia”. Bajo esta perspectiva, Hegel consideró que las acciones políticas, las luchas religiosas, y toda clase de luchas ideológicas representan la “ilusión de una época” que consigue activar las fuerzas humanas.⁵ Por el contrario, en el materialismo histórico se considera que el proceso de

² MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. En BOTTOMORE, T. B., & MAXIMILIEN, R. (Edits.) Barcelona: Península, 1968, p. 74

³ COHEN, G. *La teoría de la Historia de Karl, Marx. Una defensa*. Madrid: Siglo XXI, 1986, p. 3

⁴ MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. Op.cit., pp. 16-17

⁵ Ibídem, pp. 75-76

auto-creación se basa en la producción material de la existencia humana, entendida como un desarrollo social determinado por el dominio de los seres humanos sobre la naturaleza. En este sentido, “La historiografía debe partir de [las] bases naturales y de su modificación por la acción de los hombres en el curso de la historia”⁶. En otras palabras, Marx se opone a la idea hegeliana de entender lo “real” y el desarrollo histórico como una manifestación de los ideales, y considera que lo ideal no es más que lo material transpuesto a la mente humana.⁷ Así, en alusión a las concepciones idealistas de la historia, Marx expuso:

“¿Cree la ‘escuela crítica’ que llegara ni siquiera al principio del conocimiento de la realidad histórica mientras excluya del proceso histórico las relaciones teóricas y prácticas del hombre con la naturaleza, es decir, la ciencia natural y la industria? [...] Así como separa el pensamiento de la experiencia sensible, la mente del cuerpo y el cuerpo del mundo, separa también la historia de la ciencia natural y de la industria y busca el origen de la historia no en la vulgar producción material y terrestre, sino en las etéreas regiones celestiales.”⁸

A pesar de su oposición al idealismo, el materialismo histórico no refuta la influencia de las ideas sobre el desarrollo histórico; por el contrario, establece una relación dialéctica entre producción material y pensamiento, al plantear que el desarrollo histórico implica relaciones prácticas y teóricas de los seres humanos con la naturaleza: las prácticas por medio de la industria, las teóricas a través de la ciencia. De este modo, Marx no solo entiende la ciencia y la industria como elementos fundamentales del desarrollo histórico, sino que plantea un vínculo entre ellas, en la medida en que “las ciencias naturales han penetrado prácticamente en la vida humana con su transformación de la industria”⁹ (Figura 1.1).

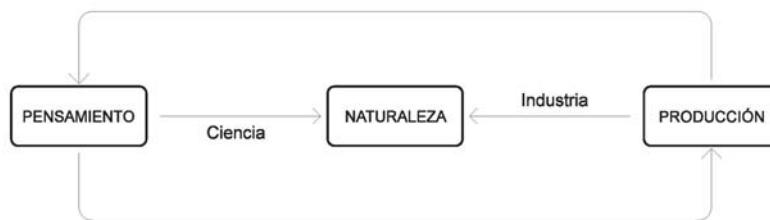


Figura 1.1 Relación dialéctica entre la producción y el pensamiento

En definitiva, el materialismo histórico sostiene que la producción material influye sobre las ideas y, luego, esas mismas ideas condicionan la producción. Esto implica una relación dialéctica entre la praxis y la teoría, una retroalimentación entre la producción y

⁶ Ibídem, p. 73

⁷ Ibídem, p. 22

⁸ Ibídem, p. 79

⁹ Ibídem, p. 94

sus fines o ideales, por la cual la ciencia abandona su condición abstracta, en tanto que es capaz de generar las leyes y/o principios que condicionan la producción material.

1.1.2 Hacia un análisis materialista de la arquitectura digital

La distinción entre una historiografía materialista y una idealista se da también en la historia de la arquitectura y el diseño. En el ámbito del diseño, la relación dialéctica entre el pensamiento y la producción fue expuesta en los años 1990 por Otl Aicher, a partir de la oposición entre “lo digital” y “lo analógico”. Para Aicher lo digital hace referencia a la conceptualización abstracta y la exactitud lógica, mientras lo analógico se vincula al pensamiento basado en lo intuitivo, a lo aprendido a través de la experiencia práctica y la percepción sensorial.¹⁰ Bajo esta relación dialéctica entre pensamiento y experiencia, Aicher planteaba,

“El hombre piensa con los medios de la percepción, y percibe con la ayuda del pensar. Su pensar es un pensar analógico, un pensar vidente. Percibir y pensar pueden ser separados conceptualmente, pero, en el fondo, se trata de dos aspectos del mismo proceso.”¹¹

La separación conceptual entre lo sensorial y lo intelectual, de acuerdo con Aicher, se fomentó a partir de la Ilustración, que condujo al dominio de una cultura basada en la razón.¹² Esta separación conceptual entre la producción y el pensamiento se mantuvo en el siglo XX. Así, Aicher afirmaba en 1959 que “El pensar se entendía entonces, todavía, como una actividad espiritual que participa de una dimensión trascendental de lo verdadero y de lo bueno, o como una operación lógico-matemática”¹³. Una separación entre la producción material e intelectual que, de acuerdo con Aicher, se reflejaba en el desarrollo de la computación de la segunda mitad del siglo XX: “El desarrollo de la cibernetica y de la tecnología de computadoras se ha limitado al pensar digitalizador y se ha encerrado en el terreno del pensar”¹⁴. Esta afirmación de Aicher, en los inicios de los años 1990, refleja cómo, en aquel momento, se consideraba que la función de los ordenadores estaba reducida al cómputo de datos y tenía poco o nada que ver con la producción material y la experiencia sensorial.

La opinión de Aicher acerca de los ordenadores, a los que consideraba el resultado de la escisión entre percibir y pensar, coincide con la de Frampton, quien a mediados de los años 1990 consideraba las herramientas digitales como una amenaza para las cualidades tectónicas y materiales de la arquitectura¹⁵ ya que obviaban cualidades constructivas

¹⁰ AICHER, O. *Analógico y digital*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001. pp. 25-36, 73-87

¹¹ Ibídem, p. 80

¹² Ibídem, p. 81

¹³ Ibídem, pp. 85-86

¹⁴ Ibídem, p. 86

¹⁵ FRAMPTON, K. *Estudios sobre la cultura tectónica*. Madrid: Akal, 1999.

como el peso y esfuerzos de los materiales o la resistencia física del edificio.¹⁶ Las formas curvilíneas y plegadas de los proyectos experimentales realizados con estas herramientas en aquella época respondían a las ideas de Gilles Deleuze acerca del pliegue; formas que, según Mario Carpo, dieron lugar a una “arquitectura de pliegues”¹⁷. Orientados por la filosofía de Deleuze, en ninguno de estos proyectos experimentales se recurrió a las técnicas digitales para explicar o validar su génesis.¹⁸ Así, en su mayoría no llegaron a materializarse y se redujeron a imágenes inscritas en la pantalla de ordenador. Según Alejandro Zaera-Polo, se creaba así una “arquitectura virtual” en “un mundo paralelo inmaterial”, sustentada por un discurso teórico. Para revertir esta situación, Zaera-Polo propuso aplicar las tecnologías digitales como medios de materialización o síntesis más que como soportes de un discurso teórico:

“No nos interesa la arquitectura virtual, sino lo virtual de la arquitectura. La materialidad es finalmente una condición necesaria de la arquitectura [...]. No trabajamos con discursos sino con materialidad, porque la arquitectura no se genera a través de un discurso teórico que después se materializa [...]. Lo que tratamos de explorar con estos medios [digitales] no es la posibilidad de generar un mundo paralelo inmaterial, sino la posibilidad de poner en un mismo plano materiales distintos de manera que puedan producir un ensamblaje híbrido entre ellos”¹⁹.

Tomando como referencia el planteamiento de Zaera-Polo, la concepción materialista de la historia de la arquitectura se desliga de la historiografía que toma las ideas y las formas como punto de partida explicativo, para basar su análisis en los medios y los modos de producción que subyacen tras los conceptos y las formas arquitectónicas. Así, la concepción histórico-materialista de la arquitectura difiere de los postulados que Peter Collins defendía en *Los ideales de la arquitectura moderna* (1965), según los cuales la creación arquitectónica sería el resultado de la dialéctica entre la forma y la teoría.²⁰

Según Collins, la historiografía clásica de la arquitectura moderna se ocupa ante todo de los orígenes de un estilo arquitectónico, de la forma aparente de los edificios, sin tener en cuenta los ideales que los sustentaban.²¹ Para Collins, la obra *Espacio, Tiempo y arquitectura* de Sigfried Giedion (1941) es un ejemplo de historiografía que se ocupa de los orígenes del estilo arquitectónico, mientras que *Architecture: Nineteenth and*

¹⁶ PICON, A. La arquitectura y lo virtual. Hacia una nueva materialidad. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando* (pp. 67-83). Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 67

¹⁷ CARPO, M. Ten Years of Folding. In OXMAN, R. & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture*. London: Routledge, 2014.

¹⁸ “At that time, none of these objects relied on digital process as a validation or explanation of their genesis.” LYNN, G. *Folding in Architecture*. London: Wileey-Academy Press, 2004, p. 10

¹⁹ ZAERA-POLO, A. De lo virtual. En ORTEGA, L (Ed.). *La digitalización toma el mando*. Barcelona Gustavo Gili: Gustavo Gili, 2009. pp. 121-122

²⁰ COLLINS, P. *Las ideas de la arquitectura moderna; su evolución (1750-1950)*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001. p. 10

²¹ Ibídem, pp. 9-10

Twentieth Centuries de Henry-Russell Hitchcock (1958) se centra en la forma-apariencia del edificio.²² Según esto, el libro de Collins complementaría el trabajo de Giedion y Hitchcock.

Giedion consideró que la producción masiva del hierro y la invención del entramado de acero estuvieron en el origen de la arquitectura moderna²³, pero, al igual de Hitchcock y Collins, no se ocupa del modo en que los procesos, los materiales y las herramientas de producción influyeron sobre las formas e ideas arquitectónicas. Asimismo, en su libro *Teoría y diseño en la primera era de la máquina*, Reyner Banham (1960) estudió las ideas e ideales que condicionaron el desarrollo de la arquitectura moderna, como es el caso de la admiración por la máquina de los Futuristas o la integración del diseño en la industria impulsado por la Werkbund. Sin embargo, Banham no abordó la relación entre las ideas que condicionaron la arquitectura moderna y los procesos de diseño o construcción modernos, basados en los medios y modos de producción industrial.

De acuerdo con Banham, los “sueños de las máquinas” se tradujeron en “la conciencia del carácter mítico de muchas de las características que el Movimiento Moderno se atribuía a sí mismo”²⁴. O, como argumentó Manfredo Tafuri en *Architecture and Utopia. Design and Capitalist Development* (1973), estos sueños configuraron la utopía bajo la cual actuaron los arquitectos modernos. A diferencia de Banham, que se centra en las ideas y discursos de la arquitectura moderna, Tafuri analiza la influencia que los intelectuales afines a la industria, la economía o la política administrativa y de planeación urbana ejercieron en los ideales arquitectónicos. De esta manera Tafuri ensanchó el marco interpretativo al relacionar los ideales de la arquitectura con otros ámbitos de la producción intelectual y material.²⁵

En su obra *Objects of Desire. Design and Society since 1750*, Adrian Forty (1986) encuentra un patrón inherente a la historiografía de la arquitectura moderna, basado en las ideas expuestas por sus arquitectos: sus biografías serían un medio de explicación satisfactorio.²⁶ Según Forty, el recurso a la biografía permite atribuir la responsabilidad exclusiva al arquitecto como diseñador, mientras que pasa por alto otros factores relevantes del diseño,²⁷ por ejemplo, la influencia que el sistema económico y el productivo ejercen en el diseño de un producto. Al no reconocer estos factores, el análisis historiográfico se reduce a una contraposición entre las ideas del arquitecto y la

²² Ibídem

²³ GIEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009, pp. 186-229

²⁴ BANHAM, R. *Teoría y diseño en la primera era de la máquina* (Cuarta ed.). Barcelona: Paidós, 1985. p. 18

²⁵ La falta de un análisis individualizado de la obra arquitectónica es intencionado por parte de Tafuri, quien lo hace patente al afirmar: “Rereading the history of modern architecture in the light of methods offered by an ideological criticism, understood in the strictest Marxist acceptance of the term, could [...] furnish only a frame of reference for further examination, and only a partial and circumstantial analysis of individual problems”. TAFURI, M. *Architecture and Utopia. Design and Capitalist Development*. Cambridge, Massachusetts, and London: MIT Press, 1976, p.vii

²⁶ FORTY, A. *Objects of Desire. Design and Society since 1750*. London: Thames & Hudson, 1986, p. 239

²⁷ Ibídem, pp. 239-241

forma del edificio y la obra se presenta como un objeto que formaliza-materializa su discurso teórico.

Por otra parte, Josep María Montaner sostiene que toda crítica arquitectónica tiene que entrar a fondo en el “análisis estrictamente formal”, siendo éste un análisis de “Las características espaciales, la relación entre lógica estructural y composición, las cuestiones funcionales, los itinerarios y las percepciones, los lenguajes y materiales utilizados deben ser los patrones esenciales del juicio”²⁸. El análisis histórico-materialista se centra también en la forma arquitectónica, pero considera además los modos, medios y principios de producción que la determinan. De este modo, el análisis no se centra en la obra arquitectónica en sí, sino en los procesos, técnicas, herramientas y objetivos que determinan la forma y su materialización.

El análisis histórico-materialista de la arquitectura digital que aquí se desarrolla, toma como referencia los trabajos de Forty y Tafuri, ya que sus estudios no se reducen a una relación de causalidad entre ideas y formas, sino que plantean un análisis más complejo de los diversos factores que las determinan. Según Forty, los historiadores tienden a presentar el diseño como una actividad artística y a eludir su relación con otros ámbitos como el comercio y la economía, de tal manera que

“It is commonly assumed that design would somehow be soiled if it were associated to closely with commerce, a misconceived attempt at intellectual hygiene that has done no good at all. It has obscured the fact that design came into being at a particular stage in the history of capitalism and played a vital part in the creation of industrial wealth”²⁹.

Para Tafuri, por otra parte, el capitalismo y la industria no solo condicionaron la producción material e intelectual de la arquitectura moderna, sino que transformaron el papel profesional del arquitecto y, por consiguiente, su función social. Más que representar la historia, Tafuri la utiliza como herramienta para interpretar el presente y proponer una visión de futuro.³⁰ Por consiguiente, el presente análisis histórico-materialista de la arquitectura digital asume los posicionamientos de Forty y Tafuri para explicar cómo los procesos y las herramientas de producción en la era digital influyen sobre la forma de los edificios y las ideas del arquitecto, atendiendo a la utilización de las herramientas de diseño y fabricación digital, a las relaciones de producción fomentadas por los modos de organización productiva a través Internet y a la nueva cultura arquitectónica que está emergiendo como resultado de los procesos de diseño, todo lo cual ha fomentado una nueva concepción e instrumentalización de la naturaleza.

²⁸ MONTANER, J. M. *Arquitectura y crítica* (Tercera ed.). Barcelona: Gustavo Gili, 2013, p. 19

²⁹ FORTY. Op.cit. p. 6

³⁰ JAMESON, F. *Architecture and the Critique of Ideology* (1985). In JAMESON, F. *The Ideologies of Theory. Essays 1971-1986* (Vol. 2. Syntax of Theory). Minneapolis: University of Minnesota Press, 1988. pp. 35-60

1.2 Contexto histórico de la arquitectura moderna y la digital

1.2.1 Producción: del diseño a la construcción

“Y es que toda técnica consiste en dos cosas: una, invención de un plan de actividad, de un método, procedimiento – *mechané*, decían los griegos– y otra, ejecución de ese plan. Aquella es en estricto sentido la técnica; ésta es sólo la operación y el obrar”³¹.

Ortega y Gasset

Según Ortega y Gasset, la “técnica”, entendida como el conjunto de procedimientos para transformar la naturaleza y obtener lo que en ella no hay pero necesitamos,³² ha tenido tres estadios a lo largo de su evolución histórica: la técnica del azar, la técnica del artesano y la técnica del técnico.³³ La transición desde la artesanía a la técnica actual, generó dos cambios fundamentales en el proceso productivo: la especialización y la aplicación de nuevos instrumentos de trabajo. Con la especialización la organización del trabajo se dividió entre las tareas gestión y las tareas de ejecución, entre el técnico que planifica y el obrero que ejecuta, entre los procesos de diseño y los de construcción. En cuanto a los nuevos instrumentos de trabajo, la evolución hacia el actual estadio técnico implicó la evolución de la herramienta a la máquina, es decir, a un instrumento capaz de producir un objeto por sí mismo. De este modo se invirtió la relación entre agente productor e instrumento: si anteriormente la herramienta era un suplemento del artesano, en tanto que éste era el principal agente productivo, en el caso de la máquina el instrumento pasa a un primer plano, ya que no es el obrero quien ayuda a la máquina sino al revés.³⁴

La especialización en la producción arquitectónica no solo llevó a la división entre los procesos de diseño y construcción. Además, las tareas relacionadas con el proyecto de arquitectura se repartieron entre arquitectos e ingenieros. Este cisma cristalizó en el siglo XIX³⁵ y subyace tras el significado de “diseño” que, según Forty, alude a una noción de “belleza” basada en la apariencia del objeto y a la preparación de las instrucciones necesarias para su producción.³⁶ Así, mientras que los arquitectos velan por la belleza y la composición formal-espacial de la obra, los ingenieros calculan, planifican y supervisan su construcción.

Aunque la industrialización contribuyó a la especialización entre arquitectos e ingenieros, la división entre la concepción y la materialización del edificio tiene sus orígenes en Leon Battista Alberti: “El arte de la construcción en su totalidad se

³¹ ORTEGA Y GASSET, J. *Ensimismamiento y alteración. Meditación de la técnica y otros ensayos*. Madrid: Alianza, 2014, p. 124

³² Ibídem, p. 65

³³ Ibídem, p. 116

³⁴ Ibídem, p. 123

³⁵ GIEDION. Op.cit., pp. 230-235

³⁶ FORTY. Op.cit., pp. 6-7

compone del trazado y su materialización”³⁷. Pero además de dividir la producción arquitectónica entre el diseño y la construcción del edificio, Alberti priorizó el trabajo teórico sobre el práctico al considerar que el “trazado” (*lineamenta*) consiste en la labor intelectual que le corresponde al arquitecto,³⁸ mientras que su “materialización” (*structura*) le corresponde al artesano, siendo ésta una acción puramente mecánica cuyo objetivo es la materialización de las ideas del arquitecto. Así, Alberti no solo anticipó la división técnica de la arquitectura entre aquellos que la conciben y la materializan, sino que sentó las bases para entender el diseño como una labor específicamente abstracta.³⁹

Al disociar la concepción y la materialización del edificio, Alberti redujo el diseño a operaciones intelectuales y al artesano a “la mano de un obrero que le sirve de herramienta al arquitecto”⁴⁰. Según Alberti, el arquitecto debía limitarse a transmitir sus ideas a través de dibujos y maquetas, y dejar de planificar, supervisar y coordinar la obra. De este modo la figura del arquitecto como “maestro constructor” se diluía y, con ello, se comenzaba a perder el conocimiento y el control sobre la construcción del edificio y la gestión de la obra. La figura del arquitecto adquiría entonces un carácter idealista, ya que su labor principal era determinar la esencia del edificio.⁴¹

Posteriormente, con el nacimiento de las primeras escuelas de arquitectura, el cisma entre proyecto y construcción, diseño y técnica, quedó reflejado en la separación entre la École des Beaux-Arts (1806) y la École Polytechnique (1794): la primera abarcaba todo el campo de las artes plásticas, incluida la arquitectura; la segunda ofrecía una preparación científica para las escuelas técnicas superiores, y tenía la función de integrar teoría y práctica.⁴²

Hasta mediados del siglo XIX la arquitectura mantuvo su prestigio profesional gracias a su afinidad con el arte, pero con la aceleración del desarrollo industrial su valor artístico fue puesto en duda. La valoración social de la arquitectura sobre sus cualidades artísticas comienza en el Renacimiento, cuando la burguesía hizo suyo el arte al considerarlo un factor de prestigio social y los mecenas reconocían a los artistas que destacasen por su genio y creatividad. Así, los arquitectos, en su afán por mantener el mismo prestigio social que los pintores y poetas y para diferenciarse de los artesanos, se vieron obligados a demostrar que la arquitectura era un arte.⁴³ La valoración de la arquitectura en términos artísticos persistió hasta el siglo XIX, cuando los métodos de

³⁷ ALBERTI, L. B. *De Re aedificatoria*. Madrid: Akal, 1991, p. 61

³⁸ “After Alberti, architecture is an intellectual work carried out by the architect that precedes the construction of the physical object.” MADRAZO, L. *The Concept of Type in Architecture. An Inquiry into the Nature of Architectural Form*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1995, p. 105

³⁹ Ibídem

⁴⁰ ALBERTI. Op.cit., p. 57

⁴¹ KOLAREVIC, B. (Ed.). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York; London: Taylor & Francis, 2003. p. 57

⁴² GIEDION. Op.cit., p. 230

⁴³ FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. New York: Thames & Hudson, 2000. p. 223

composición arquitectónica eran afines a los usados en la pintura.⁴⁴ Pero los adelantos técnicos introducidos por los ingenieros a mediados del siglo XIX, así como los métodos y elementos de construcción industrializados, contribuyeron a distinguir entre el arquitecto y el ingeniero,⁴⁵ profesionales que, según Pérez Gómez, se dedicaban respectivamente a la decoración y a los procesos técnicos.⁴⁶ De este modo, el siglo XIX fue el momento a partir del cual, según Bryan Lawson,

“The division of labour between those who design and those who make has now become a keystone of our technological society”⁴⁷.

En los inicios del siglo XX, los arquitectos modernos quisieron recobrar el prestigio perdido frente a los ingenieros. Con este fin, según Banham, decidieron “defender la nueva arquitectura o abogar por ella sobre bases lógicas y económicas, en lugar de hacerlo sobre bases estéticas o simbolistas”⁴⁸. Pero Banham consideró que esta era una idea errónea, ya que “En la creación del estilo, la emoción había desempeñado una parte mucho mayor que la lógica; los edificios de bajo costo habían estado revestidos de emoción, pero no era un estilo intrínsecamente más económico que cualquier otro”⁴⁹. Asimismo, Tafuri criticó la ineffectividad de la ideología de la arquitectura moderna la cual, en su intento de resolver los desequilibrios y las contradicciones inherentes al desarrollo de la industria y el capitalismo, puso en crisis al movimiento moderno y condujo al declive del estatus profesional del arquitecto.⁵⁰ Este declive, que llevó al arquitecto a ocuparse del simbolismo más que de la técnica, no solo se tradujo en la pérdida de conocimientos de construcción, sino que redujo sus competencias y responsabilidades profesionales.

Según Branko Kolarevic, la pérdida de competencias y responsabilidades profesionales también estuvo vinculada a que los planos de un proyecto se convirtieron en documentos contractuales a mediados del siglo XIX.⁵¹ La responsabilidad legal del arquitecto se limitó a verificar la ejecución de la obra según los planos que había redactado, más que a dirigir la construcción. Así, según Kolarevic,

“The design was split from the construction, conceptually and legally. Architects detached themselves fully from the act of building, unintentionally giving up power they once had,

⁴⁴ COLLINS. Op.cit., p. 231

⁴⁵ GIEDION. Op.cit., pp. 203, 231

⁴⁶ PÉREZ-GÓMEZ, A. *Architecture and the Crisis of Modern Science* (Seventh ed.). Cambridge, London: MIT Press, 1983. p. 11

⁴⁷ LAWSON, B. *How Designers Think. The Design Process Demystified* (Third ed.). Oxford: Architectural Press, 1980. p. 22

⁴⁸ BANHAM. Op.cit., p. 312

⁴⁹ Ibídem

⁵⁰ TAFURI. Op.cit., pp- 176-178

⁵¹ KOLAREVIC. Op.cit., p. 58

pushing the design to a sideline, and setting the profession on a path of increasing irrelevance in the twentieth century”⁵².

Según William Mitchell, la irrelevancia profesional del arquitecto como resultado de su exclusión del proceso constructivo hizo que éstos eludieran sus responsabilidades y evitaran riesgos, opuestamente a los ingenieros que asumieron nuevas competencias en situaciones de riesgo.⁵³ En este contexto, la aplicación de herramientas y procesos de diseño y fabricación digital se ha visto como una oportunidad para recobrar las responsabilidades y el prestigio profesional de los arquitectos. Primero, porque los procesos CAD/CAM facilitan que el arquitecto sea partícipe del proceso de fabricación. Segundo, porque el arquitecto asume nuevos riesgos al tener que replantearse los procesos de diseño, gestión, fabricación o construcción del edificio, a partir de las nuevas tecnologías digitales.

1.2.2 Tecnología: de las máquinas a los ordenadores

La separación entre trabajos físicos e intelectuales y entre tareas de ejecución y tareas de gestión, implica una división entre los procesos dirigidos a la transformación de los componentes materiales –en relación a su estado, estructura o comportamiento– y los procesos dirigidos a fijar los objetivos, a determinar las instrucciones para alcanzar los objetivos y a organizar y controlar el cumplimiento de estas instrucciones.⁵⁴ Desde el siglo XVII las máquinas se han aplicado a tareas de ejecución,⁵⁵ por ser artefactos que transforman la energía de un determinado tipo en movimientos-trabajos mecánicos, como es el caso de las operaciones de ensamblaje o la síntesis de nuevos objetos.⁵⁶ A partir de la segunda mitad del siglo XX los ordenadores se aplican a las tareas de gestión, puesto que son artefactos ideados para procesar y transmitir información. Igualmente, los ordenadores pueden programarse para realizar diversas tareas simultáneas –a diferencia de las máquinas que realizan acciones específicas y regulares– adaptándose a diversas funciones o circunstancias, además de comunicarse con otras máquinas para controlar sus operaciones.⁵⁷ Así, mientras las máquinas externalizan

⁵² Ibídem

⁵³ MITCHELL, W. En KOLAREVIC. Op.cit., p. 66

⁵⁴ QUINTANILLA. Op.cit., pp. 87-97

⁵⁵ El telar de Robert, creado en 1825, es considerado como la primera máquina de fabricación. ORTEGA Y GASSET. Op.cit. p. 123

⁵⁶ QUINTANILLA, M. Á. *Tecnología: un enfoque filosófico y otros ensayos de la filosofía de la tecnología*. Mexico, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2005, p. 03

⁵⁷ Una máquina es programable si puede introducir variaciones en su estructura que modifiquen su función. En el caso de los ordenadores, “la estructura” de funcionamiento está dada por el “programa” o “software”, que es la secuencia de instrucciones operacionales que ejecuta el ordenador. QUINTANILLA. Op.cit., p.105. Así, la capacidad para modificar la secuencia de instrucciones operacionales que ejecuta un ordenador, implica una adaptabilidad funcional que representa una de sus cualidades fundamentales; o en palabras de Pask y Curran: “The facility for the program instructions to be executed in different orders, depending upon the results produced by carrying out earlier instructions in the sequence, is one of the essential features of the modern computer. It is perhaps this, more than anything, which differentiates the computer from the calculator.” PASK, G., & CURRAN, S. *Micro Man: Living and growing with computers*. London: Century, 1982. p. 14

cualidades físicas como la fuerza y la destreza humana, los ordenadores externalizan cualidades intelectuales como la lógica y el cálculo.

Al trasponer la funcionalidad de las máquinas y los ordenadores a los procesos de producción arquitectónicos, se reconoce que la tecnología introducida por la revolución industrial se empleó en las tareas de ejecución, mientras que la tecnología introducida por la revolución informacional abarca la totalidad del ciclo productivo, en la medida en que puede emplearse para diseñar y construir el edificio. En otras palabras, las máquinas industriales sólo se aplicaron a tareas constructivas, por lo cual la arquitectura moderna se analizará en relación al modo en que los principios y los procesos inherentes a la industrialización constructiva derivaron en un nuevo estilo arquitectónico.

La capacidad del ordenador para controlar otras máquinas ha permitido automatizar ciertos procesos de fabricación, posibilitando así la realización de series de producción diferenciales donde la heterogeneidad no reduce la eficiencia productiva inherente a la homogeneidad de la estandarización. Si la idea de “menos es más” de Mies refleja el interés y la adaptación de los arquitectos modernos a la simplicidad inherente a la mecanización, con la introducción de las tecnologías CAD/CAM la arquitectura se caracteriza por su complejidad. En palabras de Mitchell:

“[The] emerging architecture of the digital era is characterized by high levels of complexity, and that this enables more sensitive and inflected response to the exigencies of site, program, and expressive intention than was generally possible within the framework of industrial modernism”⁵⁸.

Asimismo, Picon entiende “la complejidad” como factor diferencial entre la arquitectura moderna y la arquitectura digital, en tanto que

“Complexity, as opposed to the straightforwardness claimed by modernity, has become also a leitmotiv of contemporary architecture. It implies a multiplicity that is supposed to reflect on architecture”⁵⁹.

Las reflexiones de Mitchell y Picon acerca de la complejidad reflejan diversos modos de entender o aplicar herramientas digitales en la producción arquitectónica. Para Picon, la complejidad radica en las formas curvilíneas e irregulares –que se oponen a la plasticidad ortogonal de la arquitectura moderna–, que expresan una realidad

⁵⁸ MITCHELL, W. Constructing Complexity. In MARTENS, B., & BROWN, A. (Edits.), *Computer Aided Architectural Design Futures 2005. Proceedings of the 11th International CAAD Futures Conference held at the Vienna University of Technology, Vienna, Austria, on June 20-22, 2005*. Dordrecht: Springer, 2005. p. 41

⁵⁹ PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Basilea: Birkhauser, 2010, p. 80

multidimensional que se manifiesta en campos de fuerzas invisibles.⁶⁰ Picon considera que las técnicas digitales facilitan la elaboración de formas complejas,⁶¹ pero Mitchell entiende la complejidad desde una visión preminentemente productiva al vincularla al empleo de tecnologías digitales en el diseño, fabricación, construcción y gestión del edificio.⁶² Así, más allá de entender el diseño digital como el resultado de la aplicación de herramientas CAD para modelar y visualizar un proyecto, Mitchell lo concibe como un proceso de gestión e intercambio de información:

“A fully displayed design, then, is the joint product of the information already encoded in the system and the information added, in response to particular conditions and requirements of the context at hand, by the designer”⁶³.

Esta concepción del diseño se corresponde con una característica esencial de las TIC: son tecnologías para actuar sobre la información para producir más información que se traduce en bienes y servicios.⁶⁴ Pero, en relación a la complejidad, la capacidad de las TIC para actuar sobre la información permitió resolver lo que Bell consideró como uno los problemas intelectuales más importantes de la sociedad post-industrial: “la dirección de los sistemas de gran escala, con un amplio número de variables en interacción, que tienen que ser coordinadas para llegar a resultados específicos”⁶⁵. Según Bell, estos problemas corresponden a lo que Warren Weaver designó como “problemas de complejidad organizada”⁶⁶.

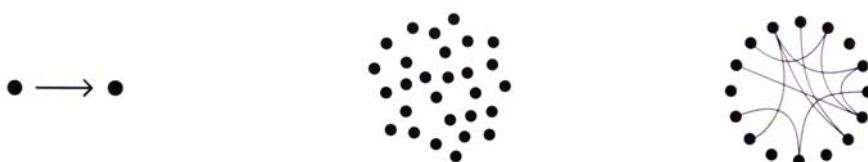


Figura 1.2 Problemas: simples, de complejidad desorganizada y de complejidad organizada

Para Weaver, del siglo XVII al XIX las ciencias experimentales se centraron en “problemas de simplicidad” que manejaban más frecuentemente dos variables y a lo máximo tres o cuatro. Posteriormente, durante la primera mitad del siglo XX, los físicos

⁶⁰ Ibídem, pp. 79-80

⁶¹ PICON, A. *La arquitectura y lo virtual. Hacia una nueva materialidad.* Op.cit., p. 72

⁶² En palabras de Mitchell: “Perhaps you have wondered why the shapes of buildings seem to be getting more complex. [...] The shift, I suggest, is a direct outcome of new conditions created by the digital revolution. Buildings [...] are materialized information –designed with the help of computer-aided design systems, fabricated by means of digitally controlled machinery, put together on site with the assistance of digital layout and positioning devices, and generally inseparable from flows of information through global computer networks.” MITCHELL. Op.cit., p. 41

⁶³ Ibídem, p. 43

⁶⁴ CASTELLS, M. *La era de la información: economía, sociedad y cultura* (Segunda ed., Vol. I. La sociedad red). Madrid: Alianza, 2000, pp. 62-63, 103

⁶⁵ BELL, D. *El advenimiento de la sociedad post-industrial.* Madrid: Alianza, 2006, p. 47

⁶⁶ Ibídem

y los matemáticos se unieron para desarrollar técnicas de estadística y probabilidad que condujeron al extremo opuesto, es decir, a métodos analíticos para operar con gran número de variables –dos billones– los cuales se emplearon para enfrentar los “problemas de complejidad desorganizada”⁶⁷. Finalmente, a partir de la segunda mitad del siglo XX se reconoce un nuevo tipo de problemas que fue denominado “problemas de complejidad organizada” que, opuestamente a la aleatoriedad de la “complejidad desorganizada”, presentan diferentes niveles de organización (Figura 1.2).⁶⁸ De acuerdo con Weaver, los “problemas de complejidad organizada” requerían de una visión sistemática para tratar simultáneamente con las múltiples variables interrelacionadas.⁶⁹

El poder de cálculo del ordenador, según Weaver, además de ser fundamental para tratar los problemas de complejidad organizada, daría lugar a nuevos métodos de análisis.⁷⁰ En este sentido, Bell consideró los problemas de complejidad organizada como parte de las técnicas y teorías que surgieron desde los años 1940 para resolver problemas que envuelven un gran número de variables e interacciones. Entre estas técnicas y teorías se encontraban la teoría de la probabilidad, la teoría de la información, la cibernetica, la teoría de decisión, la programación lineal, la teoría estadística de decisión y los cálculos de azar,⁷¹ que, en conjunto, conformaron lo que Bell denominó como “tecnología intelectual”:

“Una tecnología intelectual es la sustitución de juicios intuitivos por algoritmos (normas para la resolución de problemas). Esos algoritmos se pueden incorporar a una máquina automática, en un programa de computador o en una serie de instrucciones basadas en fórmulas estadísticas o matemáticas; las técnicas estadísticas y lógicas que se utilizan para tratar con la complejidad organizada se esfuerzan por formalizar una serie de reglas de decisión. [...] Lo característico de la nueva tecnología intelectual es el esfuerzo por definir una acción racional e identificar los medios para llevarla a cabo”⁷².

Según Bell, la tecnología intelectual habría conseguido sus mayores objetivos en el análisis de sistemas, los cuales describe de la siguiente manera: “Un sistema [...] es cualquier serie de relaciones recíprocas en la que una variación en el carácter (o valor

⁶⁷ WEAVER, W. Science and Complexity (1948). *E:CO*, 6 (3), 2004, p.68. Según Weaver, la aplicación de técnicas estadísticas a los problemas de complejidad desorganizada no permite predecir individualmente el comportamiento aleatorio de las variables, pero si el problema se aborda en su totalidad, como un sistema, es posible observar valores medios para su comportamiento que se hacen más precisos a medida que aumenta el número de variables.

⁶⁸ Ibídem, p. 69

⁶⁹ Ibídem

⁷⁰ Ibídem, p. 71

⁷¹ BELL. Op.cit., pp. 47-48

⁷² Ibídem. p.48. Daniel Bell describe los algoritmos como *normas para la resolución de problemas*. En relación a su procesamiento, aplicando tecnologías digitales, Pask y Curran exponen: “An algorithm is a set of procedural steps that outlines how a problem is to be solved. For the purposes of computing, an algorithm is a skeleton that used to construct a program that tells the computer what to do.” PASK, & CURRAN. Op.cit., p. 14

numérico) de uno de los elementos tendrá consecuencias determinadas –y posiblemente medibles– en todos los demás del sistema”⁷³. Un sistema complejo comprende la interacción de un número de variables que la inteligencia humana no puede apropiarse correcta y simultáneamente. La codificación de estas variables en algoritmos permite relacionarlas y tratarlas conjuntamente a través de ordenadores, para llegar a soluciones que no se reconocerían de forma inmediata. Consecuentemente, la naturaleza de los sistemas complejos es contra-intuitiva, en la medida que los juicios basados en la intuición responden a las relaciones inmediatas de causa y efecto que caracterizan los problemas simples.⁷⁴

Este cambio de perspectiva, desde la simplicidad a la complejidad, representa, según Castells, el nuevo paradigma de la tecnología de la información, en donde el “pensamiento de la complejidad” deviene un método para comprender la lógica de interconexión y las dinámicas no lineales de los sistemas vivos.⁷⁵ Este método, al igual que la tecnología intelectual, conlleva el procesamiento computacional de algoritmos para la resolución de problemas, lo que a su vez implica la sustitución de un juicio intuitivo por una decisión técnica. En otras palabras, el empleo de algoritmos para resolver problemas complejos, exige tomar decisiones de carácter instrumental guiadas por el cálculo, obviando las decisiones de carácter ideológico y emocional.⁷⁶

La sustitución del juicio intuitivo por algoritmos también se debatió en el marco de los métodos de diseño. En 1970 Christopher Jones defendía el diseño como una actividad contra-intuitiva y planteaba usar las matemáticas para solucionar los problemas de diseño, ya que, si estos pueden describirse en un lenguaje matemático también pueden resolverse automáticamente con la ayuda de un ordenador.⁷⁷ Esta *matematización* de los problemas de diseño conllevaba su codificación en algoritmos para poder procesarlos y resolverlos con ordenadores. En este sentido, la complejidad del diseño digital no residiría en la forma sino en la capacidad de resolver problemas de diseño a través del cálculo computacional.

La transición hacia una arquitectura digital implica la resolución de problemas complejos a través de ordenadores, entendiendo el diseño desde un punto de vista sistémico. Así, el análisis de la complejidad de la arquitectura digital se centrará en la capacidad de tratar múltiples variables e interacciones simultáneamente con la ayuda de ordenadores.

⁷³ BELL. Op.cit., p. 50

⁷⁴ Ibídem, p. 51

⁷⁵ CASTELLS. Op.cit., p. 108

⁷⁶ BELL. Op.cit., p. 53

⁷⁷ JONES, J. C. *Design Methods*. London: John Wiley & Sons, 1992. pp. 10-12

1.2.3 Materias primas: de la materia a la información

“[A] computer takes information as input, executes a process, and produces new information as output; its function is to transform information that we have into information that we want.”⁷⁸

William Mitchell y Malcolm McCullough

La descripción de Mitchell y McCullough acerca del funcionamiento y utilidad de un ordenador es coherente con la idea de información como materia prima de las tecnologías digitales formulada por Castells.⁷⁹ Asimismo, para Castells la utilidad de la información radica en su potencial para transformarse en conocimiento: “la acción del conocimiento sobre sí mismo como principal fuente de productividad”⁸⁰. Este aumento de productividad conseguido por la acción del conocimiento sobre sí mismo permite alcanzar “grados más elevados de conocimiento que suelen dar como resultado grados más elevados de producto por unidad de insumo”⁸¹.

En el diseño digital la acción del conocimiento sobre sí mismo se produce a través de los modelos digitales, en los que se introduce información para generar más información y conocimiento sobre el proyecto. Un modelo digital puede utilizarse para generar y evaluar la forma y comportamiento de un proyecto, para optimizar su construcción y para controlar el funcionamiento del edificio una vez construido.

El cálculo computacional no solo implica el uso de la información como materia prima de los procesos de diseño. Además, la materialidad de la arquitectura se expande más allá de su realidad objetiva si se considera que

“La realidad se compone de dos cosas: objetos y fenómenos. Los objetos ocupan el espacio, los fenómenos ocupan el tiempo. Los objetos son distribuciones espaciales de materia, energía e información. Los fenómenos son cambios temporales de los objetos”⁸².

Así, en la medida en que los fenómenos son cambios temporales de los objetos y que los ordenadores permiten simular e instrumentalizar estos cambios, el fenómeno entra a formar parte de los materiales de trabajo, o de las materias primas, que se emplean en el diseño digital. Si Marx sostuvo que la corporeidad era una condición necesaria de las materias primas, hoy puede afirmarse que la inmaterialidad es una cualidad inherente a la materialidad sobre la cual opera la arquitectura digital, en tanto que la información, el

⁷⁸ MITCHELL, W., & McCULLOUGH, M. *Digital Design Media* (Second ed.). New York: Van Nostrand Reinhold, 1995. p. 9

⁷⁹ Véase Capítulo 0.2

⁸⁰ CASTELLS. Op.cit., p. 47

⁸¹ Ibídem

⁸² WAGENSBERG, J. *La rebelion de las formas: o como perseverar cuando la incertidumbre aprieta*. Barcelona: Tusquets, 2004. p. 19

tiempo y los fenómenos forman parte de sus componentes esenciales. A pesar de ello, la instrumentalización de la información, el tiempo y los fenómenos conducen a resultados concretos, ya que su condición inmaterial se materializa mediante la forma o el comportamiento del edificio. Así, la transición hacia una arquitectura digital comporta una nueva noción de “materialidad” que debe ser analizada.

Los ordenadores han transformado la utilidad, o valor de uso, de la información. Para Marx, la información se materializaba en las máquinas que, en su conjunto, conforman el sistema técnico que denominaba “maquinaria” que reflejaba una continuidad entre tecnología y conocimiento y que “encierra el saber y la destreza de todos los trabajadores que la accionan, así como el de los científicos que la desarrollan bajo la forma de un saber y destreza objetivados”⁸³. Así, la información y el conocimiento actuaban sobre la tecnología, pero la tecnología no operaba sobre ellas. Por el contrario, Castells considera que la información generada por procesos computacionales se reinvierte para mejorar las mismas tecnologías que la generan.⁸⁴ En el ámbito de la arquitectura, este proceso de retroalimentación optimiza el diseño, la construcción y la gestión de edificios y da lugar, además, a nuevas técnicas de generación, representación, evaluación y fabricación de formas arquitectónicas.

1.2.4 Técnica: de la conservación al bienestar

El materialismo histórico plantea que para “hacer la historia” el individuo necesita satisfacer unas serie de necesidades primarias como comer, beber y tener de una vivienda que lo proteja del entorno natural.⁸⁵ Por consiguiente, el primer hecho histórico consiste en la satisfacción de estas necesidades materiales pero, una vez satisfechas, surgen nuevas necesidades.⁸⁶ Así, más allá de las ideas, el motor de la historia radica en la satisfacción de las necesidades humanas a través de un proceso productivo en el que el individuo inicia, regula, y controla sus relaciones materiales con la naturaleza.⁸⁷

La idea de un desarrollo histórico impulsado por las necesidades materiales es congruente con la noción de “técnica” expuesta por Ortega y Gasset. Para el filósofo, la técnica es un conjunto de actos técnicos que “presuponen y llevan en sí la invención de un procedimiento que nos permite [...] reformar la circunstancia de la naturaleza, logrando que en ella haya lo que no hay”⁸⁸. La técnica puede aplicarse para satisfacer dos tipos de necesidades: las vitales, que satisfacen condiciones objetivas que el ser

⁸³ RAUNIG, G. *Mil máquinas. Breve filosofía de las máquinas como movimiento social*. Madrid: Traficantes de Sueños, 2008. p. 26

⁸⁴ CASTELLS. Op.cit., p. 62

⁸⁵ MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. Op.cit., p. 80

⁸⁶ Ibídem

⁸⁷ Ibídem, p. 109

⁸⁸ ORTEGA Y GASSET. Op.cit., p. 65. Asimismo, la concepción materialista de Ortega y Gasset queda es más explícita al afirmar: “[...] la vida no es fundamentalmente como tantos siglos han creído: contemplación, pensamiento, teoría. No; es producción, fabricación, y solo porque estas lo exigen; por lo tanto, después y no antes, es pensamiento, teoría y ciencia.” ORTEGA Y GASSET. Op.cit., p. 90

humano necesita para vivir, y las superfluas, que son aquellas que se consideran necesarias para su bienestar.⁸⁹ Así, las necesidades vitales conllevan la adaptación del sujeto al medio natural para sobrevivir, mientras las necesidades superfluas conllevan la adaptación de medio al sujeto para vivir bien.⁹⁰

La distinción entre dos tipos de necesidades, vitales y superfluas, está también presente en el debate sobre la forma arquitectónica iniciado en la Ilustración.⁹¹ En su *Ensayo sobre arquitectura* (1753) Laugier sostuvo que la arquitectura era un medio de conservación de la especie humana, la respuesta a la necesidad que tenían los seres humanos de disponer de un lugar para reposar y protegerse de las desatenciones y negligencias de la naturaleza.⁹² Posteriormente, en su *Encyclopédie méthodique* (1778), Quatremère de Quincy amplió el ámbito de la arquitectura más allá de la satisfacción de las necesidades vitales hasta las superfluas, al considerar la arquitectura como un arte derivado de la necesidad y del placer, que ayuda la humanidad a soportar las penurias de la vida:

“Entre tous les arts, des enfants du plaisir & de la nécessité, que l’hommes s’est associés, pour l’aider à supporter les peines de la vie, & à transmettre sa mémoire aux générations futures, on ne saurait nier que l’architecture ne doive tenir rang des plus distingués. A ne l’envisager que sous le point de vue l’utilité, elle l’emporte sur tous le autres arts. Elle entretient la salubrité de les villes, elle veille à la santé des hommes, elle assûre leurs propriétés : elle ne travaille que pur la sûreté, le repos & le bon ordre de la vie civile”⁹³.

En los inicios del siglo XIX, en la introducción del *Compendio de lecciones de arquitectura* (1802) Jean-Nicolas-Louis Durand define los objetivos, los medios y los principios de la arquitectura. En ella sostuvo que la humanidad debe a la arquitectura su conservación como a la sociedad su existencia, ya que “sin ella la especie humana, enfrentada a todos los rigores de la naturaleza, ocupada únicamente en defenderse de la necesidad, los peligros y el dolor [...] posiblemente hubiera desaparecido casi por completo de la superficie del globo”⁹⁴. Al interpretar estas afirmaciones de Durand se puede concluir que el espíritu de conservación lleva la arquitectura a satisfacer las necesidades vitales de la humanidad, mientras que las necesidades superfluas “tienen por origen estos dos principios: el amor al bienestar y la aversión a cualquier tipo de penalidad”⁹⁵.

⁸⁹ Ibídем, p. 71

⁹⁰ Ibídém, pp. 72-73

⁹¹ HEREU, P., MONTANER, J. M., & OLIVERAS, J. *Textos de arquitectura de la modernidad*. Hondarribia (Guipúzcoa): Nerea, 1999, p.11

⁹² LAUGIER, M. A. *Ensayo sobre la arquitectura*. En HEREU, MONTANER, y OLIVERAS. Op.cit., p.22

⁹³ QUATREMÈRE DE QUINCY, A.C. *Encyclopédie Méthodique. Architecture (Tome Premier)*. Paris: C. J. Panckoucke, 1778. p. 109.

⁹⁴ DURAND, J. N. *Compendio de lecciones de arquitectura*. Madrid: Pronaos, 1981, p. 8

⁹⁵ Ibídém, p. 9

Según Durand, la labor del arquitecto se reduce a resolver dos problemas: “[primero], con una suma dada, hacer el edificio lo más conveniente posible, [segundo] dado el cometido de un edificio, hacer este edificio con el menor gasto posible”⁹⁶. De esta manera, los fines de la arquitectura se plantearon en términos primordialmente económicos y la tarea del arquitecto, según Durand, es realizar edificios convenientes – sólidos, salubres y confortables– utilizando una cantidad limitada de recursos. Así, Durand concluía: “conveniencia y economía son los medios que debe emplear naturalmente la arquitectura y las fuentes de las que debe extraer sus principios”⁹⁷. Por tanto, la arquitectura debía cumplir con su función –preservar la humanidad y la sociedad– empleando la mínima cantidad de recursos.

Pero esta noción de economía propuesta por Durand –hacer el edificio con “una suma dada”, y hacerlo con “el menor gasto posible”– iba más allá del coste pecuniario. Durand fundamentaba la arquitectura sobre unos principios técnicos: “el esfuerzo para ahorrar esfuerzo”⁹⁸, ya que “ese afán de ahorrar esfuerzo [es] lo que inspira la técnica”⁹⁹. Por tanto, las acciones del arquitecto debían regirse por la adecuación de los medios a los fines, es decir, por el principio de racionalidad práctica o instrumental.¹⁰⁰

Las teorías de Durand sentaron las bases para una concepción técnica de la arquitectura en las sociedades industrializadas, al ser “sociedades regidas por la economía, es decir, se organizan en torno a un principio de eficiencia funcional cuyo desiderátum es obtener más por menos y elegir la forma de acción más *racional*”¹⁰¹. Según esto, la ideología arquitectónica fue sustituida por criterios económicos¹⁰² y fundada en una racionalidad cuyo objetivo es la “utilización de los recursos con el mínimo coste y el mínimo esfuerzo”¹⁰³. Esta concepción meramente técnica, según Pérez Gómez, condujo a una “funcionalización” de la teoría de la arquitectura:

“This functionalization of architectural theory implies its transformation into a set of operational rules, into a tool of an exclusively technological character. Its main concern becomes how to build in an efficient and economical manner, while avoiding the questions related to why one builds and whether such an activity is justified in the existential context”
¹⁰⁴.

Al transformarse en un conjunto de reglas operativas para aumentar su eficiencia, la teoría arquitectónica adquirió un carácter técnico, convertida en una sucesión regulada

⁹⁶ Ibídem, p.15

⁹⁷ Ibídem, p. 9

⁹⁸ ORTEGA Y GASSET. Op.cit., p. 79

⁹⁹ Ibídem, p. 80

¹⁰⁰ QUINTANILLA. Op.cit., p. 51

¹⁰¹ BELL. Op.cit., p. 97

¹⁰² Ibídem, p. 97

¹⁰³ Ibídem, p. 222

¹⁰⁴ PÉREZ-GÓMEZ. Op.cit., p. 4

de instrucciones para resolver problemas de diseño. Así, Durand introdujo un conjunto de procedimientos a partir de los cuales equiparó la teoría con el método y, gracias a ello, -según Pérez Gómez- la teoría arquitectónica responde al siguiente contexto

“theory in any discipline is generally identified with methodology; it has become a specialized set of prescriptive rules concerned with technological values, that is, with the process rather than ultimate objectives, a process that seeks maximum efficiency with minimum effort”¹⁰⁵.

Bajo este punto de vista los problemas arquitectónicos adquieren un carácter eminentemente práctico y, con ello, el método constituirá una técnica en el sentido estricto.¹⁰⁶ Tras los escritos de Durand, los términos “teoría”, “método” y “técnica” se han entrelazado hasta convertirse en una sucesión de operaciones orientadas a resolver problemas de diseño del modo más eficiente.

Durand planteó un sistema de valores según el cual la eficiencia reemplazaba a la belleza.¹⁰⁷ Para Durand, más allá de la superficialidad de la decoración, la belleza era intrínseca al edificio y se manifestaba desde sus proporciones y formas geométricas y el placer que generaba residía en la satisfacción de las necesidades humanas de conveniencia y de economía.¹⁰⁸ Así, según Pérez Gómez, la arquitectura antepuso las necesidades materiales a las trascendentales:

“Durand stressed the irrelevance of any transcendental justification. Architecture should merely be assured of its usefulness in a material world ruled by pragmatic values. There was no need to look for explanation outside the field of a new theory, a theory architecture postulated for the first time as an autonomous, self-sufficient, and specialized, composed exclusively of truths evident to mathematical reason”¹⁰⁹.

Para Durand era más importante proyectar de un modo eficiente que hacerlo atendiendo a cuestiones trascendentales. Al hilo de sus teorías, la arquitectura se despreocupó por ser significativa y se concentró en ser eficaz, económica y confortable.

Bajo la perspectiva de Max Weber, las teorías de Durand responderían a principios fundamentales de las sociedades industriales, entre los cuales se encuentra “una actitud «economicista» (maximización, optimización, menor costo) no sólo hacia los recursos

¹⁰⁵ Ibídem, p. 5

¹⁰⁶ Ibídem

¹⁰⁷ Según Forty, el cambio de la belleza por la eficiencia en el sistema de valores arquitectónico se vio reflejado en el cambio del concepto de “hogar”: “Perhaps the most important change within the last century in the ideas constituting the home has been the shift from its role as a source of moral welfare to one of physical welfare, represented in visible terms by its turning from a place of beauty into one of efficiency”. FORTY, A. *Objects of Desire. Design and Society since 1750*. Op.cit., p. 108

¹⁰⁸ DURAND. Op.cit. pp. 14-15

¹⁰⁹ PÉREZ-GÓMEZ. Op.cit., p. 299

naturales, sino hacia todos los aspectos de la vida”¹¹⁰. Esta actitud obedece a una “racionalización intelectual por obra de la ciencia y de la técnica orientada científicamente”¹¹¹, que llevaría a un “desencantamiento del mundo” porque ya no se recurre a la magia “para dominar o para obtener la gracia de los espíritus [ya que] sucumben a la razón y los medios técnicos”¹¹². Este desencantamiento, sin embargo, no implicaba necesariamente la desaparición de la magia, la mitología o el simbolismo, sino que sus funciones recayeron en los bienes materiales de la sociedad de consumo, entre los cuales se encontraba la arquitectura.¹¹³ Así, la funcionalización y/o tecnificación de la teoría arquitectónica, llevó a la transferencia de las ideas místicas y románticas asociadas al pasado y la tradición, a la industria, la técnica y la ciencia. Esto no solo suponía asumir la racionalización, la economía y la eficiencia como principios fundamentales de la arquitectura, sino que suscitó el cambio del idealismo hacia el materialismo, de lo místico a lo terrenal. Este tránsito alinearía la teoría arquitectónica con lo que se ha considerado como el principal acontecimiento de la Modernidad: la sustitución de la trascendencia por la inmanencia, la transformación del conocimiento en un modo de hacer, en una práctica de transformar la naturaleza.¹¹⁴

Con el desencantamiento de la arquitectura sus cualidades simbólicas se emanciparían de la mística y la trascendencia, para quedar determinadas por la tecnología, la ciencia y la industria. Por consiguiente, para reconocer y comprender la dimensión simbólica de la arquitectura digital, esta deberá indagarse relacionándola con estos ámbitos.

1.2.5 Ciencia: del mecanicismo al pensamiento sistémico

“La época moderna comienza dando muerte al fenómeno [...] Comenzó la época de las ciencias naturales, la época de la investigación de las leyes naturales. Los fenómenos salieron del campo de la visión; desaparecieron”¹¹⁵.

Otl Aicher

La era mecanicista se inició con los avances de la técnica: las lentes de cristal hicieron posible el telescopio y el microscopio y, con ellos, las observaciones del universo y de la materia. De este modo, lo infinito y lo infinitesimal, el macrocosmos y el microcosmos, se concibieron a través de las técnicas de visualización y dejaron de ser

¹¹⁰ WEBER, M. *Gesammelte Politische Schriften*. En BELL, D. Op.cit., p. 87

¹¹¹ WEBER, M. La ciencia como profesión. En MALDONADO, T. (Ed.). *Técnica y cultura. El debate alemán entre Bismarck y Weimar*. Buenos Aires: Infinito, 2002. p. 204

¹¹² Ibídem

¹¹³ Según Mertins: “Max Weber’s analysis of how Enlightenment rationality had ‘disenchanted’ the world, he also recognized that the modern world was not yet free of myth, for things produced as commodities under the condition of alienated labour were enveloped in false mythologies, as evident in advertisements, fashion and architecture.” MERTINS. Op.cit.,p. 107

¹¹⁴ “Hardt and Negri conclude that the primary event of modernity was constituted by shifting knowledge from the transcendental plane to the immanent, thereby turning knowledge into a doing, a practice of transforming nature.” Ibídem, pp. 162-163

¹¹⁵ AICHER. Op.cit., pp. 113-114

conceptos especulativos relacionados con la eternidad y la inmortalidad. A partir de las observaciones astronómicas de Copérnico surgió un nuevo modo de conocimiento donde “todos los fenómenos complejos han de ser reducidos a lo mesurable, repetible, predecible y, en última instancia, controlable”¹¹⁶. Así, la astronomía permitió explicar el movimiento de los cuerpos celestes en el espacio a través de descripciones sistemáticas, la cuales conducirían a una visión mecanicista del mundo donde “la noción de universo orgánico, viviente y espiritual fue remplazada por el mundo como máquina”¹¹⁷.

Para las ciencias experimentales, la naturaleza y el universo se describían en un lenguaje matemático. Para Galileo, la “matemática” y la “geometría” eran los medios para estudiar el mundo natural, ya que “no podemos comprenderlo si primero no aprendemos el lenguaje y los caracteres con que está escrito. Este lenguaje es el de las matemáticas y los caracteres son los triángulos, círculos y otras figuras geométricas”¹¹⁸. Todo aquello que no pudiera expresarse en términos geométrico-matemáticos dejaba de tener interés para la ciencia, con lo que el estudio de la naturaleza se redujo a los fenómenos exclusivamente medibles y cuantificables.¹¹⁹ Esta distinción entre lo cuantitativo y lo cualitativo, entre lo objetivo y lo subjetivo, se hizo explícita en la distinción de Galileo entre las “cualidades primarias” y las “cualidades secundarias” de la naturaleza: las primarias, son las cualidades objetivas basadas en la forma, la cantidad, y el movimiento de las sustancias materiales-corpóreas; las secundarias, son las cualidades subjetivas perceptibles a través de los sentidos, como el color, el sabor, el olor o el sonido.¹²⁰

La división de la naturaleza entre propiedades objetivas y subjetivas, entre lo corpóreo y lo incorpóreo, anticipó la separación entre mente y cuerpo (*res cogitans*, *res extensa*) establecida posteriormente por Descartes, que relegó a un segundo plano la experiencia sensorial y emocional con el fin de fundamentar el conocimiento sobre el razonamiento puro. Para Descartes el cuerpo y la mente se presentan como realidades distintas regidas por principios dispares. El cuerpo es sustancia y extensión y pertenece a la dimensión sensible de la realidad; no puede por tanto formar parte de la esencia humana.¹²¹ La

¹¹⁶ MUMFORD, L. *El Pentágono del Poder. El Mito de la Máquina*, Volumen 2. Logroño: Pepitas de Calabaza, 2011, p. 52

¹¹⁷ CAPRA, F. *La trama de la vida: una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Barcelona: Anagrama, 1998, p. 39

¹¹⁸ En Ibídem, p.130

¹¹⁹ Ibídem, p.39

¹²⁰ La distinción entre la cualidades primerias y secundarias es resumida por Galileo de la siguiente manera: “En cuanto me formo una concepción de una sustancia material o corpórea, siento al mismo tiempo la necesidad de concebir lo límites de una forma u otra; que es grande o pequeña respecto a las demás; que está aquí o allá; en este o aquel momento; que está moviéndose o quieta; que toca o no otro cuerpo [...] Pero no me siento obligado a creer que deba ir acompañada de condiciones tales como ser blanca o roja, dulce o amarga, sonora o silenciosa, o que tenga un olor dulce o desagradable [...] Por consiguiente, creo que todos estos sentidos, olores, colores, etc., respecto al objeto en que parecen residir, no son otra cosa más que simples nombres [...] No creo que exista nada en los cuerpos externos que excite el sabor, olor o el sonido, etc., más allá del tamaño, la forma, la cantidad y el movimiento.” MUMFORD. Op.cit., p.102

¹²¹ TALAVÁN, R. Pensamiento. En ANDRÉS. R (Ed.), *Descartes. Vida, pensamiento y obra*. Madrid: Planteta DeAgostini, 2007. p. 99

mente, por el contrario, permite conocer la realidad entendida como una estructura inteligible de carácter matemático que sólo puede captarse a través de la razón.¹²² En este contexto, la razón se concibió como la única facultad que conduce al descubrimiento de la verdad o, como sostuvo Pérez-Gómez,

“Cartesian philosophy and the new science of Galileo postulated the initial split between the perceptual and the conceptual spheres of knowledge.”¹²³

Galileo y Descartes fragmentaron la naturaleza entre lo físico y lo fenomenológico, para entenderla desde muestras y abstracciones basadas en cantidades y magnitudes. Esta separación entre el conocimiento racional y el sensorial implicó la reducción de los sistemas vivos a sus cualidades físicas y, por consiguiente, a la simplificación de su complejidad orgánica. Así, el estudio científico de los organismos se centró en sus condiciones físico-corpóreas e ignoró sus cualidades fenomenológicas-incorpóreas como las relaciones y patrones organizativos.¹²⁴ Igualmente, se dio más importancia al conocimiento particular que la comprensión holística y los fenómenos complejos se fragmentaron para poder ser comprendidos. El método de Descartes se basaba en “dividir cada una de las dificultades, que examinara, en tantas parcelas como fuere posible y fuere requerido para resolverlas mejor”¹²⁵. Este reduccionismo facilitó el conocimiento de la naturaleza, pero supuso aceptar la disociación, la segmentación y el aislamiento del saber, soslayando las relaciones entre las partes y la organización que subyace detrás del todo.

La mecánica de Newton completaba esta concepción mecanicista del mundo. Newton deseaba demostrar que “toda la dificultad de la filosofía –o la ciencia, que en su momento se denominaba filosofía natural– consistía en pasar de los fenómenos de movimiento a la investigación de las fuerzas de la Naturaleza y, luego, demostrar los otros fenómenos a partir de esas fuerzas”¹²⁶. Así, para Newton, el principio de causalidad explicaba el movimiento de los cuerpos.¹²⁷ Pero al igual que Galileo y Descartes, Newton tuvo que simplificar la complejidad de los fenómenos para poder describirlos según sus postulados y lo hizo reduciendo las causas que influyen en el movimiento de los cuerpos. Por ejemplo, su “ley gravitacional” ignora la resistencia del aire y, con ella, se suprime otros factores como la temperatura, la presión y la

¹²² Descartes consideraba que: “entre todos lo que han buscado la verdad en las ciencias, sólo los matemáticos han podido encontrar algunas demostraciones, estos es, algunas razones ciertas y evidentes”. DESCARTES, R. *El discurso del método*. En ANDRÉS. R (Ed.). *Descartes, vida, pensamiento y obra*. Madrid: Planeta DeAgostini, 2007, p. 233

¹²³ PÉREZ-GÓMEZ. Op.cit., p. 22

¹²⁴ Para profundizar sobre la influencia de los pensamientos de Galileo y Descartes en la arquitectura, véase Capítulo 3.

¹²⁵ DESCARTES, R. En ANDRÉS. R (Ed.). Op.cit., p. 233

¹²⁶ NEWTON, I. *Philosophiae naturalis principia mathematica*. En HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. *Los Principia de Newton*.

¹²⁷ TOFFLER, A. *La Tercera Ola* (Decimosexta ed.). Barcelona: Plaza & Janés, 1999, p. 148-149

convección que también afectan a la caída de los cuerpos.¹²⁸ En otras palabras, el movimiento de un objeto está relacionado con múltiples variables que fueron ignoradas por Newton para poder formular la física de acuerdo a sus leyes de movimiento.¹²⁹

Galileo, Descartes y Newton contribuyeron a forjar una visión mecanicista de la naturaleza que la despojó de su complejidad: Galileo la concibió en términos de objetos cuantificables y fenómenos inmensurables; Descartes se centró en el estudio de las partes e ignoró sus relaciones con el conjunto; Newton simplificó la complejidad de la naturaleza, desecharo factores que determinan su comportamiento. Esta visión reduccionista de la naturaleza se denominó “mecanicismo” y dominó el pensamiento occidental hasta finales el siglo XIX. En la arquitectura de esa época, la influencia del mecanicismo se vio reflejada en el método de composición elemental de Durand, que dividió el edificio en sus elementos más simples para ensamblarlos a modo de mecanismo y en la separación entre el diseño y la construcción como esferas independientes. Asimismo, las metáforas mecanicistas abarcaron diversos ámbitos, hasta asimilar al ser humano, la ciudad, el Estado y el mundo con la máquina.¹³⁰

Según Norbert Wiener, el reduccionismo de la física newtoniana, al igual que el reduccionismo mecanicista de Galileo y Descartes, podía superarse a través de los métodos de análisis estadístico propuestos por Boltzmann y Gibbs, que seguían las leyes de Newton en su estudio del movimiento de los objetos, pero tenían en cuenta la complejidad inherente a las múltiples posiciones y fuerzas que lo condicionan.¹³¹ Con la aplicación de la estadística en la física, la incertidumbre y la contingencia fueron consideradas por la ciencia,¹³² dando lugar a una visión probabilística que alejó la física de “la certitud de lo que sucederá”, para centrarse en “lo que sucederá con gran probabilidad”¹³³. De esta manera, la ciencia dejó de reducir la complejidad de los sistemas vivos a un orden basado en cantidades y leyes específicas y empezó a considerar y tratar con la complejidad de la naturaleza:

“Gibbs’ innovation was to consider not one world, but all the worlds which are possible answers to a limited set of questions concerning our environment”¹³⁴.

La teoría de la evolución, también surgida en el siglo XIX, introdujo las nociones de cambio, crecimiento y desarrollo.¹³⁵ Estos conceptos precedieron el nacimiento del “organicismo” de los inicios del siglo XX, según el cual “el todo es más que la suma de sus partes” y para comprenderlo, por lo tanto, es necesario entender sus relaciones

¹²⁸ CAPRA. Op.cit., p. 61

¹²⁹ CAPRA. Op.cit., pp. 137-139; WIENER, N. *The Human Use of Human Beings. Cybernetics and Society*. London: Free Association Books, 1989, p. 7

¹³⁰ RAUNIG. Op.cit., p. 25

¹³¹ WIENER. Op.cit., p. 8

¹³² Ibídem

¹³³ Ibídem, p.10

¹³⁴ Ibídem, p.12

¹³⁵ CAPRA. Op.cit., pp. 43, 66-67

organizativas.¹³⁶ Al centrarse en el concepto de organización, el organicismo fomentaría la sustitución del mecanicismo por el “pensamiento sistémico”, que se centra en la conectividad entre las partes y en las relaciones entre estas y su entorno.

En el pensamiento sistémico, el término “sistema” se utilizaba para denominar organismos vivos y sociales entendidos como una “totalidad integrada”, donde las propiedades características del sistema emergen a partir de las relaciones entre sus partes que se manifiestan en un entorno determinado.¹³⁷ En este sentido, comprender las “propiedades sistémicas” exige un pensamiento contextual y relacional que contrasta con el reduccionismo mecanicista, ya que las propiedades de las partes no se analizan aislando de otras, sino que emergen a partir de sus relaciones con otras en diferentes “niveles sistémicos”. A partir de ello los organismos fueron entendidos y/o equiparados a los sistemas.

En la arquitectura, esta visión sistémica orientada a la conectividad, las relaciones y el contexto, empezó a ser asumida a mediados del siglo XX. De este modo, el edificio empezó a entenderse en relación con su entorno más que como un objeto aislado. Este cambio de enfoque, que prioriza el comportamiento sobre la composición, conllevaba la sustitución del concepto de “componente” por el de “elemento de un sistema”: mientras que la visión mecanicista concibió el mundo como una conjunto de elementos segregados, el pensamiento sistémico entendía que un componente es parte de una red de relaciones.¹³⁸ A la luz del pensamiento sistémico un edificio se entiende como un sistema-organismo más que como un objeto. Es decir, se comprende como una red de relaciones constituida por patrones organizativos y comportamentales. Esta visión holística permite integrar múltiples fenómenos en el sistema-edificio.

El pensamiento sistémico está presente en la transición de un pensamiento lineal y simplificado a uno no-lineal y complejo que caracteriza la arquitectura digital. Bajo esta concepción sistémica se observará cómo el edificio se concibe como un sistema abierto constituido por múltiples flujos de información, materia y energía; un sistema en el que los fenómenos naturales se consideran dentro de la multiplicidad de factores que determinan su forma y/o comportamiento. Así, al analizar la transición hacia la arquitectura digital, se considerará el retorno del fenómeno después de su desaparición tras la revolución científica, así como la sustitución del reduccionismo mecanicista por la complejidad sistémica, tanto en la praxis como en la teoría arquitectónica.

¹³⁶ Ibídem, p. 45

¹³⁷ Ibídem, pp. 46-47

¹³⁸ Ibídem, p. 57

1.2.6 Filosofía: de la maquinaria a las máquinas abstractas

“El medio de trabajo, asimilado con el proceso de producción capitalista, sufre diversas metamorfosis, la última de las cuales es la máquina, o, mejor dicho, un sistema automático de maquinaria (el sistema de la maquinaria, pues la maquinaria automática no es más que la forma más acabada y más adecuada de la misma, con la que la maquinaria se convierte en sistema) puesto en movimiento por un mecanismo automático o fuerza motriz, que se mueve por sí mismo”¹³⁹.

Karl Marx

Como sostuvo Marx, las herramientas utilizadas en los procesos de producción están también sometidas a un proceso evolutivo, por el que se transforma de herramienta a máquina y de máquina a maquinaria. La máquina, a diferencia de la herramienta, no es un simple medio de trabajo empleado individualmente por el trabajador. Por el contrario, la máquina sintetiza una diversidad de conocimientos y habilidades, para constituirse en un sistema que “encierra el saber y la destreza de todos los trabajadores que la accionan, así como el de los científicos que la desarrollan [y] acaba por oponerse, en un plano de inmanencia y como poder central dominante, a los propios trabajadores y trabajadoras individuales”¹⁴⁰. De acuerdo con Gerald Raunig, esta concepción marxista de la máquina no es una simple derivación de la herramienta entendida como extensión del ser humano para mitigar su esfuerzo potenciando cualidades físicas y mentales.¹⁴¹ Por el contrario, la máquina representa un mecanismo de sujeción social para los trabajadores, que acaban convirtiéndose en componentes de una cadena de montaje que en última instancia constituye la “maquinaria” que Marx entiende como un organismo¹⁴² y, que, en el ámbito de la crítica arquitectónica realizada por Tafuri, cristaliza en la metrópoli como mecanismo de producción-distribución-consumo.¹⁴³

La interpretación que Marx hace de la máquina va más allá de su consideración como artilugio para aumentar la productividad y la sitúa en un contexto social al concebirla como parte de una “maquinaria”. Pero, como afirma Raunig, la metáfora entre la

¹³⁹ MARX, K. “Fragmento sobre las Máquinas” de los *Grundrisse. Lineamientos fundamentales para la crítica de la economía política* 1857-1858. En RAUNING. Op.cit., p. 23

¹⁴⁰ Ibídem, p. 26

¹⁴¹ Esta concepción de la máquina es expuesta por Lewis Mumford de la siguiente manera: “Las máquinas se han desarrollado partiendo de un complejo de agentes no orgánicos para convertir la energía, para realizar un trabajo, para incrementar las capacidades mecánicas o sensorias del cuerpo del hombre o para reducir a un orden y una regularidad mesurables los procesos de la vida. El autómata es el último escalón en un proceso que empezó con el uso de una u otra parte del cuerpo humano como instrumento. En el fondo del desarrollo de los instrumentos y las máquinas está el intento de modificar el medio ambiente de tal manera que refuerce y sostenga el organismo humano: el esfuerzo es o bien aumentar la potencia de un organismo por una parte desarmado o fabricar fuera del cuerpo un conjunto de condiciones más favorables destinadas a mantener su equilibrio y asegurar su supervivencia.” MUMFORD, L. *Técnica y Civilización*. Madrid: Alianza, 1997, p. 27

¹⁴² RAUNIG. Op.cit., p. 26

¹⁴³ TAFURI. Op.cit., p. 83

máquina y organismo que subyace en la interpretación de Marx conlleva un sentido figurativo. A este sentido se oponen Deleuze y Guattari¹⁴⁴ con su concepto de “máquinas abstractas”, esto es: “[Máquinas que] se componen de materias no formadas y de funciones no formales [que conforman] un conjunto consolidado de materias-funciones (*filum* y *diagrama*)”¹⁴⁵. Ante esta noción no figurativa de la máquina, entendida como el compuesto materias-funciones,¹⁴⁶ el ser humano y los artefactos dejan de entenderse según la oposición clásica entre organismo y mecanismo y pasan a constituir un “agenciamiento maquínico” a partir del cual

“Ya no se trata de enfrentar al hombre y a la máquina para evaluar sus correspondencias, sus prolongaciones, sus posibles o imposibles sustituciones, sino de hacerlos comunicar entre sí para mostrar cómo el hombre forma una pieza con la máquina o forma pieza con cualquier otra cosa para construir una máquina”¹⁴⁷.

En este sentido, el concepto de “máquina” implica formar parte de algo, a diferencia de la idea de prolongarse o remplazar.¹⁴⁸ Es decir, la maquina abstracta se opone a la concepción marxista de la evolución de la máquina, que sería el resultado de una “línea recta que lleva desde las herramientas del organismo humano hasta las herramientas del aparato técnico”¹⁴⁹, hasta reemplazar la fuerza y las habilidades humanas. Esta concepción de la máquina como sustituta, tanto de los humanos como de la naturaleza, no solo fue asumida por el movimiento moderno sino que fue uno de sus principios fundamentales, en tanto que la productividad de la máquina permitió la creación de un *corpus teórico* que implicaba el rechazo del trabajo artesanal frente a la mecanización y estandarización industrial en la producción arquitectónica y, en un plano más especulativo, el reemplazo de la naturaleza por la máquina como modelo arquitectónico. Por el contrario, la arquitectura digital se ha desvinculado de esta noción de la máquina como sustituto, para equiparar naturaleza y máquina y conformar así una máquina abstracta.

Las máquinas abstractas conllevan el agenciamiento de elementos o, en otras palabras, una relación dialéctica que da lugar a líneas de potencialidad que se desarrollan a partir de un proceso de intercambio que se opone a la idea de sustitución y se abre a nuevas concatenaciones, conexiones o emparejamientos. El proceso de intercambio requiere lo que Guattari denomina “desterritorialización del territorio”, en la cual “El territorio

¹⁴⁴ RAUNIG. Op.cit., p. 33

¹⁴⁵ DELEUZE, G., y GUATTARI, F. *Mil Mesetas: Capitalismo y esquizofrenia* (6^a:2004 ed.). Valencia: Pre-Textos, 1980, p. 519

¹⁴⁶ Para Deleuze y Guattari en el conjunto de materias-funciones que conforman una *maquina abstracta* “la materia no formada, el *filum*, no es una materia muerta, bruta, homogénea, sino una materia-movimiento [...] y la función no formal, el *diagrama*, no es un metalenguaje inexpresivo y sin sintaxis, sino una expresividad-movimiento.” DELEUZE, y GUATTARI. Op.cit. p. 521

¹⁴⁷ DELEUZE, G., y GUATTARI, F. *El anti-Edipo. Capitalismo y esquizofrenia*. Barcelona: Paidós, 1998. p. 396

¹⁴⁸ Ibídem, p. 397

¹⁴⁹ RAUNIG. Op.cit., 2008, p. 33

puede ser relativo a un espacio vivido, así como a un sistema percibido en cuyo seno un sujeto se siente en su casa. [...] El territorio puede desterritorializarse, esto es, abrirse y emprender líneas de fuga e incluso desmoronarse y destruirse. La desterritorialización consistirá en un intento de recomposición de un territorio empeñado en un proceso de reterritorialización”¹⁵⁰.

En los siguientes capítulos se estudiarán diversos agenciamientos que han surgido tras la introducción de las tecnologías digitales en la producción arquitectónica. El análisis de la materialidad digital pondrá en evidencia que tras esta noción de “materialidad” subyace un agenciamiento entre átomos y bits, entre materia e información, derivados de la aplicación de las tecnologías digitales. Esta noción de “materialidad” conlleva diversos agenciamientos. En primer lugar, en el ámbito del diseño computacional, se agencian el arquitecto y el ordenador, en la medida en que se apoyan mutuamente para conformar un conjunto de elementos, fuerzas, flujos y funciones que los articula como una sola pieza, impidiendo precisar el nivel de autoría que le corresponde a cada cual. En segundo lugar, con respecto a los nuevos modelos de negocio que está fomentando el diseño paramétrico, la fabricación digital y el *e-commerce*, tiene lugar un agenciamiento debido a la cooperación entre productor y consumidor, entre diseñador y usuario final, a través de redes de organización *on-line* en las que el consumidor tiene la capacidad de personalizar y fabricar de manera autónoma. Finalmente, hay un agenciamiento que se produce por la interacción entre el edificio y su entorno, por el que la arquitectura ya no se enfrenta a la naturaleza, sino que forma una máquina abstracta con ella. De este modo, al análisis de las máquinas abstractas, inherentes a la arquitectura digital, se realiza bajo una secuencia lógica que responde a la concepción histórico-materialista de la arquitectura: en primer lugar, los agenciamientos entre átomos/bits y tecnologías CAD-CAM, que responden a los nuevos medios de producción digital; en segundo lugar, los agenciamientos arquitecto-ordenador y diseñador-consumidor, que responden a los nuevos procesos de producción digital; en tercer lugar, el agenciamiento edificio-entorno, o artificio-naturaleza, correspondiente a la instrumentalización de la naturaleza a través de las tecnologías digitales.

¹⁵⁰ GUATTARI, F. *Plan sobre el planta. Capitalismo mundial integrado y revoluciones moleculares*. Madrid: Traficantes de Sueños, 2004, p. 139

Conclusiones

Al contraponer una historiografía idealista con una historiografía materialista, se puede concluir que su diferencia primordial radica en que la segunda no explica la praxis partiendo de las ideas sino que intenta explicar la actividad intelectual sobre la base de las prácticas materiales. En términos arquitectónicos, esto significa que las ideas, conceptos o teorías arquitectónicas se estudian dando primacía explicativa a las técnicas y a las tecnologías productivas. Además, las formas y las funciones de las obras de arquitectura también se pueden explicar a partir del proceso de producción en sí, es decir, estudiando los procesos de diseño, fabricación y construcción del edificio, según las materias primas, tecnologías, técnicas y principios de producción empleados. Así, la concepción histórico-materialista de la arquitectura se opone a la historiografía, que toma las ideas y las formas como punto de partida explicativo, y ensancha el marco interpretativo al situar las ideas y las formas arquitectónicas en un contexto productivo, económico y cultural. Esto supone un análisis más complejo, por cuanto atiende a múltiples factores y relaciones para explicar las formas y las ideas en la arquitectura.

Para reconocer las transformaciones que la revolución industrial e informacional han dado lugar en la arquitectura moderna y digital, en este capítulo se ha delimitado un contexto histórico, construido a partir de conceptos derivados de ámbitos ajenos a la arquitectura que nos permiten, sin embargo, comprender el sentido de estas transformaciones.

Con la revolución industrial no solo cristalizó la separación entre el diseño y la construcción –que tuvo sus inicios en el Renacimiento y luego continuó con la revolución científica– sino que cristalizó con la especialización en la profesión de arquitecto. Esto dio lugar a la división entre aquellos que se ocuparían primordialmente de la forma y belleza del edificio y aquellos que se ocuparían de su construcción. En este contexto, si se acepta que la “técnica” conlleva la división del proceso productivo entre los especialistas dedicados a la planificación y los que ejecutan el plan, puede considerarse que la producción arquitectónica se “tecnificó” con la industrialización.

Con la especialización la labor del arquitecto tendió a ser una actividad primordialmente intelectual, disociada de la producción material del edificio, lo que derivó en una pérdida de competencias y responsabilidades sobre el control de la construcción y la gestión de la obra. Actualmente, la arquitectura digital ha despertado un nuevo interés hacia los materiales, los procesos y las herramientas de producción digital por parte de los arquitectos que no ven su labor como una actividad puramente intelectual.

Los materiales, los procesos y las herramientas de producción digital son elementos esenciales de una nueva materialidad, en la que la información y el fenómeno se tornan en materiales de trabajo para el arquitecto. Así, los datos y los fenómenos pasan a ser materias primas para la producción arquitectónica. Además, la información es también un producto de los procesos de diseño computacionales. La información deviene un

material de trabajo en sub-procesos de diseño como el modelado o generación formal o un *output* para materializar el proyecto mediante tecnologías CAD/CAM.

El empleo del fenómeno como material de trabajo se basa en la capacidad de simularlo e instrumentalizarlo a través de las tecnologías digitales. Además de una transformación productiva, esto supone una nueva relación entre la arquitectura y la naturaleza. Con la revolución científica los fenómenos “desaparecieron” ya que, al no poder expresarse en términos geométrico-matemáticos, dejaron de interesar a la ciencia. De este modo la concepción de la naturaleza se dividió entre lo cuantitativo y lo cualitativo, entre lo físico y lo fenomenológico, para poderla entender a partir de abstracciones basadas en cantidades y fórmulas. Con el advenimiento de las tecnologías digitales los fenómenos han “reaparecido” al poderse percibir, cuantificar, codificar, procesar, modelar y simular digitalmente. En este contexto, el análisis histórico-materialista no solo atiende las nuevas expresiones plásticas y funcionales que surgen a partir de una nueva concepción e instrumentalización de la naturaleza, sino que estudia la emergencia de un *ornamento digital* en donde los fenómenos naturales pasan a un primer plano tras su desaparición en los inicios de la Modernidad.

La relación técnica que la arquitectura posterior a la Ilustración ha establecido con la naturaleza ha supuesto el rechazo de las ideas transcen-
dentes y las consideraciones estéticas asociadas a esta última. Con la revolución industrial la naturaleza fue considerada una reserva inagotable de recursos para satisfacer las necesidades de conservación y bienestar de las sociedades industrializadas. La sobreexplotación posterior ha demostrado que los recursos naturales son limitados y que es necesario preservarlos. En este contexto, la arquitectura digital restablece el vínculo con la naturaleza que deja de ser un modelo estético para tornarse en un modelo de eficiencia productiva y funcional.

La transición hacia una arquitectura digital refleja el devenir de la arquitectura contemporánea, bajo el impulso de la contradicción interna que sufre al encontrarse inmersa en un contexto técnico, económico y cultural, fundamentado en la mecanización, pero que evoluciona hacia la digitalización. En este sentido, en la arquitectura digital se pone de manifiesto el devenir de la arquitectura contemporánea bajo el influjo de las fuerzas de producción de la actual sociedad informacional, mientras que la arquitectura moderna se presenta como el resultado de los medios y modos de producción acarreados por la industrialización. Así, la contradicción interna de la arquitectura contemporánea se manifiesta en el conflicto inherente a la transición de un sistema de producción industrial hacia un sistema de producción digital, que no reemplaza el anterior, sino que se interrelaciona con él para alcanzar un estadio superior (síntesis). En este contexto, las múltiples oposiciones que se tratarán a en los siguientes capítulos, las cuales contraponen la arquitectura moderna y la digital, no deben entenderse como un proceso de reemplazo de lo que implica la primera por lo de la segunda, por ejemplo, de la materia por la información como materia prima, de la máquina por el ordenador como herramienta de trabajo, de la estandarización por la

personalización como modo de producción, del pensamiento humano por el cálculo computacional en el proceso de diseño o de la naturaleza como modelo estético por uno meramente funcional. Por el contrario, deben entenderse como una evolución que aporta nuevas habilidades y conocimientos al arquitecto y que sintetiza en expresiones formales y espaciales innovadoras.

La concepción histórico-materialista plantea unas conexiones entre arquitectura y tecnología basadas en la ciencia, la materia, la técnica, la naturaleza, la economía y la cultura, relaciones que contribuyen a transformar la praxis y la teoría arquitectónica y a entenderlas como parte de una misma complejidad. Esta complejidad, que, en última instancia sitúa la arquitectura en su contexto histórico, se aborda en los siguientes capítulos estudiando las relaciones entre una multiplicidad de cambios originados por las revoluciones científica, industrial e informacional. La estructura de estas relaciones se describe en un diagrama (Figura 1.3) que vincula las cualidades formales y espaciales de la arquitectura moderna y de la arquitectura digital, con los ámbitos tecnológicos, económicos y teóricos con los que interactúan y a partir de los cuales se definen las cualidades materiales, productivas y culturales que caracteriza a las obras de arquitectura de cada uno de los dos períodos.

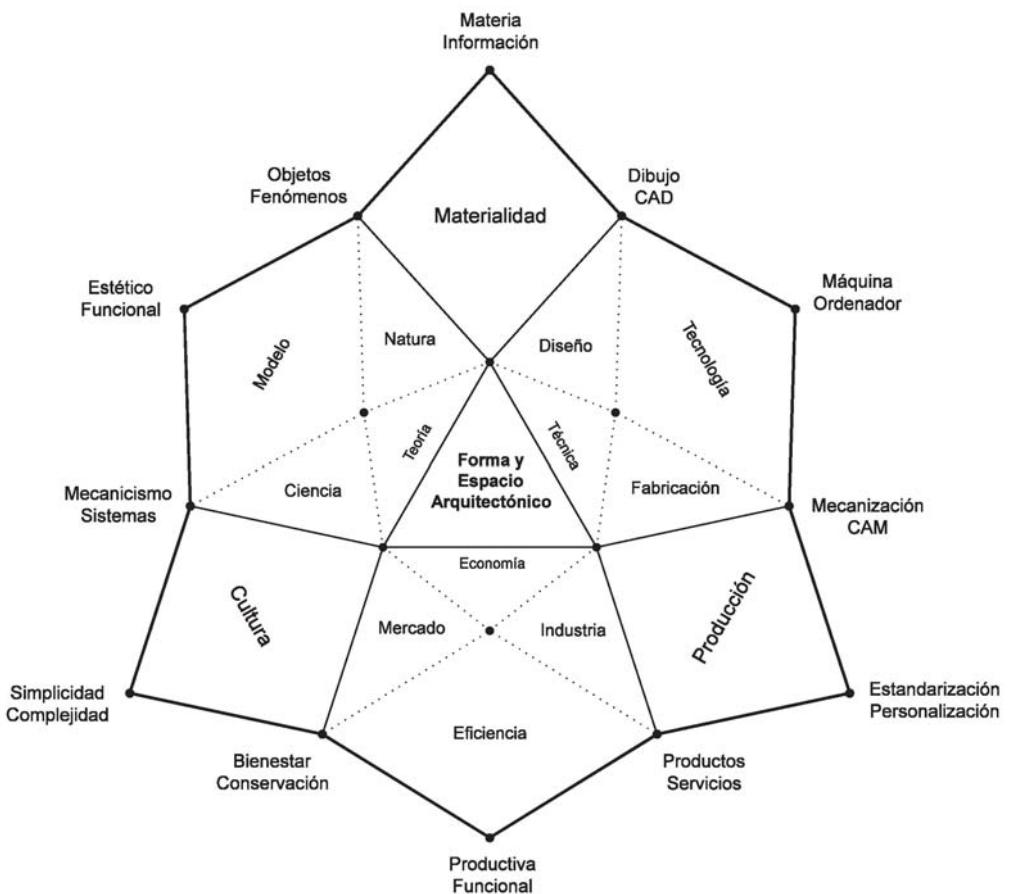


Figura 1.3 Contexto de análisis de la arquitectura moderna y de la digital, según la concepción histórico-materialista de la historia

Bibliografía

- AICHER, O. *Analógico y digital*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.
- ALBERTI, L. B. *De Re aedificatoria*. Madrid: Akal, 1991.
- BANHAM, R. *Teoría y diseño en la primera era de la máquina* (Cuarta ed.). Barcelona: Paidós, 1985.
- BELL, D. *El advenimiento de la sociedad post-industrial*. Madrid: Alianza, 2006.
- CAPRA, F. *La trama de la vida: una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Barcelona: Anagrama, 1998.
- CARPO, M. Ten Years of Folding. In OXMAN, R. & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 35-46). London: Routledge, 2014.
- CASTELLS, M. *La era de la información: economía, sociedad y cultura* (Segunda ed., Vol. I. La sociedad red). Madrid: Alianza, 2000.
- COHEN, G. *La teoría de la Historia de Karl Marx. Una defensa*. Madrid: Siglo XXI, 1986.
- COLLINS, P. *Las ideas de la arquitectura moderna; su evolución (1750-1950)*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.
- DELEUZE, G., y GUATTARI, F. *Mil Mesetas: Capitalismo y esquizofrenia* (6ª:2004 ed.). Valencia: Pre-Textos, 1980.
- DELEUZE, G., y GUATTARI, F. *El anti-Edipo. Capitalismo y esquizofrenia*. Barcelona: Paidós, 1998.
- DESCARTES, R. El discurso del método. En ANDRÉS. R (Ed.). *Descartes, vida, pensamiento y obra* (pp. 218-273). Madrid: Planeta DeAgostini, 2007.
- DURAND, J. N. *Compendio de lecciones de arquitectura*. Madrid: Pronaos, 1981.
- FORTY, A. *Objects of Desire. Design and Society since 1750*. London: Thames & Hudson, 1986.
- FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. New York: Thames & Hudson, 2000.
- FRAMPTON, K. *Estudios sobre la cultura tectónica*. Madrid: Akal, 1999.
- GIEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009.
- GUATTARI, F. *Plan sobre el planta. Capitalismo mundial integrado y revoluciones moleculares*. Madrid: Traficantes de Sueños, 2004.
- HEREU, P., MONTANER, J. M., & OLIVERAS, J. *Textos de arquitectura de la modernidad*. Hondarribia (Guipúzcoa): Nerea, 1999.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. Hernández - Los Principia de Newton. Recuperado el 02 de 05 de 2015, de SCRIBD: <https://es.scribd.com/document/157878354/Hernandez-Los-principia-de-Newton>
- JAMESON, F. Architecture and the Critique of Ideology (1985). In JAMESON, F. *The Ideologies of Theory. Essays 1971-1986* (Vol. 2. Syntax of Theory). Minneapolis: University of Minnesota Press, 1988.
- JONES, J. C. *Design Methods*. London: John Wiley & Sons, 1992.
- KOLAREVIC, B. (Ed.). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York; London: Taylor & Francis, 2003.
- LAWSON, B. *How Designers Think. The Design Process Demystified* (Third ed.). Oxford: Architectural Press, 1980.
- LYNN, G. *Folding in Architecture*. London: Wileye-Academy Press, 2004.
- MADRAZO, L. *The Concept of Type in Architecture. An Inquiry into the Nature of Architectural Form*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1995.
- MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. En BOTTOMORE, T. B., & MAXIMILIEN, R. (Edits.) Barcelona: Península, 1968.
- MERTINS, D. *Modernity Unbound*. London: Architectural Association Publications, 2012.

- MITCHELL, W. Constructing Complexity. In MARTENS, B., & BROWN, A. (Edits.), *Computer Aided Architectural Design Futures 2005. Proceedings of the 11th International CAAD Futures Conference held at the Vienna University of Technology, Vienna, Austria, on June 20-22, 2005*. Dordrecht: Springer, 2005.
- MITCHELL, W., & McCULLOUGH, M. *Digital Design Media* (Second ed.). New York: Van Nostrand Reinhold, 1995.
- MONTANER, J. M. *Arquitectura y crítica* (Tercera ed.). Barcelona: Gustavo Gili, 2013.
- MUMFORD, L. *Técnica y Civilización*. Madrid: Alianza, 1997.
- MUMFORD, L. *El Pentágono del Poder. El Mito de la Máquina, Volumen 2*. Logroño: Pepitas de Calabaza, 2011.
- ORTEGA Y GASSET, J. *Ensimismamiento y alteración. Meditación de la técnica y otros ensayos*. Madrid: Alianza, 2014.
- PASK, G., & CURRAN, S. *Micro Man: Living and growing with computers*. London: Century, 1982.
- PÉREZ-GÓMEZ, A. *Architecture and the Crisis of Modern Science* (Seventh ed.). Cambridge, London: MIT Press, 1983.
- PICON, A. La arquitectura y lo virtual. Hacia una nueva materialidad. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando* (pp. 67-83). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Basilea: Birkhauser, 2010.
- QUATREMÈRE DE QUINCY, A.C. *Encyclopedie Méthodique. Architecture (Tome Premier)*. Paris: C. J. Panckoucke, 1778.
- QUINTANILLA, M. Á. *Tecnología: un enfoque filosófico y otros ensayos de la filosofía de la tecnología*. Mexico, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2005.
- RAUNIG, G. *Mil máquinas. Breve filosofía de las máquinas como movimiento social*. Madrid: Traficantes de Sueños, 2008.
- TAFURI, M. *Architecture and Utopia. Design and Capitalist Development*. Cambridge, Massachusetts, and London: MIT Press, 1976.
- TALAVÁN, R. Pensamiento. En ANDRÉS, R. (Ed.), *Descartes. Vida, pensamiento y obra*. Madrid: Planteta DeAgostini, 2007.
- TOFFLER, A. *La Tercela Ola* (Decimosexta ed.). Barcelona: Plaza & Janés, 1999.
- WAGENSBERG, J. *La rebelion de las formas: o como perseverar cuando la incertidumbre aprieta*. Barcelona: Tusquets, 2004.
- WEAVER, W. Science and Complexity (1948). *E:CO*, 6 (3), 65-74, 2004.
- WEBER, M. La ciencia como profesión. En MALDONADO, T. (Ed.). *Técnica y cultura. El debate alemán entre Bismarck y Weimar* (pp. 203-212). Buenos Aires: Infinito, 2002.
- WIENER, N. *The Human Use of Human Beings. Cybernetics and Society*. London: Free Association Books, 1989.
- ZAERA-POLO, A. De lo virtual. En ORTEGA, L (Ed.). *La digitalización toma el mando* (pp. 121-122). Barcelona Gustavo Gili: Gustavo Gili, 2009.

Capítulo 2

Materialidad: del hierro al bit

Introducción

Un análisis histórico-materialista de la arquitectura parte de la producción material para luego comprender las formas resultantes, más que seguir el camino inverso. En este capítulo, por tanto, se analizan las expresiones formales y espaciales que caracterizaron la arquitectura moderna y las que hoy caracterizan la arquitectura digital, tomando como punto de partida los medios productivos –materias primas y herramientas de trabajo– específicos de los procesos de producción de la sociedad industrial y de la era digital.

La influencia de los nuevos materiales en el desarrollo de la arquitectura moderna fue reconocida por Mies, cuando afirmaba que “industrializar la construcción es una cuestión de materiales”¹. De acuerdo con esto, los inicios de la arquitectura moderna habría que situarlos en el uso del hierro, el vidrio y el hormigón. En la sociedad digital, la información es un nuevo material para el diseñador, según sostiene Rivka Oxman.² Conjuntamente, las afirmaciones de Mies y Oxman hacen referencia a una nueva materialidad en la arquitectura, derivada respectivamente de la revolución industrial (materialidad industrial) e informacional (materialidad digital).

El uso de la información como materia prima es el principio básico de la nueva materialidad digital. Su desarrollo e implementación en la arquitectura se estudiará en tres fases. La primera se refiere al procesamiento de información para controlar el comportamiento del edificio y su ambiente. La segunda trata sobre el uso de la información como materia prima en el proceso de diseño, a través de los modelos digitales que se utilizan para modelar, representar, racionalizar y evaluar un proyecto. En la tercera se aborda la materialización de la información mediante la fabricación digital.

A la fabricación digital corresponde la transformación de bits en átomos e implica la síntesis o modificación de materiales físicos. La transformación de bits en átomos, inherente a la fabricación digital, se analiza en tres etapas. Primera, el control sobre la forma que proporcionan las técnicas de fabricación digital las cuales permiten fabricar objetos con precisión y eficiencia. Segunda, la posibilidad de trabajar con materiales tradicionales de manera innovadora. Tercera, la síntesis de nuevos materiales mediante técnicas de diseño y fabricación digital que permiten configurar su composición interna.

Además de analizar cómo la nueva materialidad –en las eras industrial y digital– dio lugar a las expresiones formales y espaciales en la arquitectura moderna y en la digital, se reconocerán ideas, conceptos y filosofías del diseño relacionadas con el uso de los nuevos materiales y herramientas de trabajo. Tras exponer los materiales, herramientas, procesos e ideas que subyacen tras la noción de materialidad digital, se analiza un caso

¹ MIES VEN DER ROHE, L. La construcción industrial. En NEUMEYER, F. *Mies van der Rohe. La*

² OXMAN, R. Theory and Design in the First Digital Age. In: *The International Journal of Design Studies*. 2006. p. 242

de estudio representativo de la fase inicial de los periodos de transición hacia la era digital: el centro comercial Bory Mall, proyectado por Massimiliano Fuksas.

2.1 Materialidad industrial: hierro, hormigón y vidrio

Para reconocer el impacto de la nueva materialidad en la arquitectura contemporánea, en primera instancia se analiza la influencia de los materiales facilitados por la revolución industrial en la conformación de la arquitectura moderna. La producción en masa de hierro, hormigón y vidrio para su uso como material constructivo, junto con la invención del hormigón, serían los factores que conformaron la *materialidad industrial* que sentó las bases para el desarrollo de las cualidades formales y espaciales que caracterizaron la arquitectura moderna.

2.1.1 Los orígenes de la aplicación del hierro como material constructivo

Hasta el siglo XVIII la producción de bienes estaba ligada a los ciclos productivos de la naturaleza y, especialmente, a la producción de madera, base del carbón de leña que suministraba la energía para otras actividades productivas. En 1709 Abraham Darby logró sustituir el carbón de leña por el carbón mineral en la producción de hierro colado y medio siglo más tarde se perfeccionaba la fabricación de hierro con el invento de la bomba de vapor de Watt.³ Con ello, la producción se desligó de las condiciones climáticas de la naturaleza, al mismo tiempo que se inició una explotación intensiva de las cuencas de carbón, lo cual desencadenó el flujo de energía que impulsó la revolución industrial⁴ Este progreso de la industria conllevó un proceso de retroalimentación entre materia, energía y tecnología que James Gordon describió así:

“[...] cheap coal –which led to cheap iron– which led to iron steam engines fitted to turn that coal into cheap mechanical energy: and so on round and round in even more energy intensive cycles”⁵.

La energía del carbón permitió fundir grandes cantidades de hierro que fueron utilizadas para producir máquinas de vapor, con las cuales se generó aún más energía para fundir más hierro y fabricar más máquinas de producción. Pero, además del hierro, según Alfred Crosby, este ciclo de retroalimentación energía-hierro-máquina dio lugar a una producción sin precedentes:

“Una pequeña cantidad de carbón invertido en dicha máquina [de vapor] fue el catalizador para la producción de energía y de nuevos materiales a una escala nunca antes vista”⁶.

Antes de la industrialización, el hierro había funcionado primordialmente como medio auxiliar en la construcción, de manera que su uso estaba limitado a elementos

³ MUMFORD, L. *Técnica y Civilización*. Madrid: Alianza, 1997, p.176

⁴ DE LANDA, M. *Mil años de historia no lineal*. Barcelona: Gedisa, 2011. p. 86

⁵ GORDON, J. E. *Structures: Or Why Things Don't Fall Down*. London: Penguin, 1987. p.318

⁶ CROSBY, A. W. Ecological Imperialism. En DE LANDA. *Mil años de historia no lineal*. Op.cit. p.91

accesorios como tirantes, dinteles o cornisas.⁷ Hasta ese momento su papel más relevante se dio en el campo de las artes aplicadas, tal como sucedió durante los siglos XV y XVI con la elaboración de armas, rejas de hierro forjado o grabados de hierro.⁸ Pero su producción en masa hizo posible la producción de componentes en la cantidad y el tamaño necesarios para la construcción de fábricas, estaciones ferroviarias y puentes.⁹

Además de su producción en masa, otro factor fundamental para la generalización de hierro como material constructivo, fue su resistencia. Según Alfred Meyer, sus propiedades estructurales le convirtieron en el primer material estructural moderno:

“El hierro viene a ser cuarenta veces superior a la piedra en solidez, diez veces superior a la madera, teniendo frente a aquélla en todo caso un peso específico que es hasta cuatro veces superior, y ocho veces respecto de esa otra. De ello resulta que un bloque de hierro, en comparación a uno de piedra que posea idéntico volumen, soportará una carga potencial que se multiplica por cuarenta con solo cuatro veces más de peso”¹⁰.

La aplicación del hierro como material constructivo obedecía a cuestiones productivas y funcionales: a la capacidad de producirlo en masa gracias a nuevas fuentes de energía y a su resistencia estructural. La posibilidad de fundirlo y darle forma a través de moldes permitió que fuera utilizado con fines decorativos. Así, durante el siglo XIX se utilizó con criterios historicistas. En este sentido, el desarrollo de un nuevo lenguaje plástico a partir del hierro no fue inmediato, en la medida en que la arquitectura requería un periodo de tiempo para asimilar –técnica y culturalmente– las cualidades del nuevo material.

⁷ BENÉVOLO, L. *Historia de la arquitectura moderna* (Séptima ed.). Barcelona: Gustavo Gili, 1996, p. 31

⁸ LUX, J. A. Estética de la Ingeniería. En T. MALDONADO (Ed.). *Técnica y Cultura:el debate alemán entre Bismarck y Weimar*. Buenos Aires: Infinito, 2002, p. 89

⁹ Los puentes fueron las primeras construcciones de hierro que reemplazaron las de madera, tal como confirma Scheerbart: “La madera tampoco tiene ya aplicación en los puentes que se construyen por entero en hierro u hormigón armado” Scheerbart, 1998, p. 94. Una afirmación que responde a la evolución en la construcción de puentes que se dio entre el siglo XVIII y el siglo XIX. Entre 1775 y 1779 se erigió la primera edificación de hierro, el puente sobre el río Severn (Inglaterra) de John Wilkinson, constituido por un único arco de 30,6 metros y una flecha de 13,7 metros, compuesto por cinco nervios de fundición. Junto con el puente de Sunderland (Inglaterra), construido por Rowland Burdon en 1793, son los primeros ejemplos de construcciones metálicas cuya estructura portante estaba fabricada con arcos de hierro fundido. La construcción con arcos se mantuvo hasta 1824, fecha en que se construye el primer puente colgante de cables metálicos sobre el río Ródano (Francia), por Marc Séguin (inventor de la caldera tubular), lo que hizo posibles los trayectos largos en ferrocarril. GIEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009.

¹⁰ MEYER, A.G. *Construcciones en hierro*. En BENJAMIN, W. *Obra de los pasajes* (Vol. 1). Madrid: Abada, 2013, p. 275

2.1.2 La aplicación del hierro en el siglo XIX

La columna de fundición fue el primer elemento estructural cuya producción respondía a los métodos de fabricación industrial. Se introdujo en torno a 1780 para reemplazar las columnas de madera que soportaban las cubiertas de las primeras factorías de tejidos de algodón.¹¹ Inicialmente, en la construcción fabril se utilizaron pilares de hierro en combinación con otros materiales –piedra, ladrillo y madera–, a los que luego se añadieron jácenas de fundición y forjados de bovedillas cerámicas.¹² En 1818 se comenzaron a emplear elementos estructurales de hierro en un edificio civil; fue en la carpintería y la armadura metálica del techo del salón de recepción del Pabellón Real de Brighton, diseñado por John Nash.¹³ En la década de 1820 la columna de fundición se empleaba como soporte principal de edificios públicos como iglesias, teatros, fábricas y almacenes. Su uso generalizado respondía a cualidades como su resistencia estructural o su resistencia al fuego –en comparación con la madera–; a las facilidades que aporta su fabricación industrializada; y a su bajo precio, debido no solo al menor coste de la producción en masa, sino al abaratamiento de los materiales tras la crisis económica causada por la Revolución Francesa.¹⁴



Figura 2.1 Biblioteca Nacional; Palacio de Cristal; Mercado central de París

El uso de columna de fundición predominó hasta 1880, cuando se desarrolló el entramado de acero que tuvo un papel fundamental en el desarrollo de la Escuela de Chicago. Entre 1820 y 1880 la columna de fundición se empleó en edificios como la sala de lectura de la Biblioteca de Santa Genoveva y la Biblioteca Nacional de Francia - de Henri Labrouste-, el Palacio de Cristal -de Joseph Paxton-, el Mercado Central de París -de Baltard y Callet- y la fábrica de chocolate Menier -de Jules Saulnier- (Figura 2.1).

¹¹ GIEDION. Op.cit. p. 204

¹² Ibídem, p. 205

¹³ Ibídem, p. 206

¹⁴ BENÉVOLO, Op.cit., p. 42; GIEDION. Op.cit., p. 208

2.1.3 Desarrollo y aplicación del hormigón

De acuerdo con Giedion, el hormigón fue “redescubierto” por el ingeniero John Smeaton en 1774. Los faros construidos en Eddystone (Inglaterra) habían sido destruidos por tormentas y el azote del mar. Por este motivo, Smeaton construyó su mampostería usando “un sistema que la mantenía unida de un modo sumamente firme; encajó unas piezas en otras y para la cimentación y el conglomerante usó una mezcla de cal viva, arcilla, arena y escoria de hierro machacada; es decir, hormigón”¹⁵. A partir de este momento se llevaron a cabo nuevas experimentaciones que dieron lugar al primer cemento hidráulico cemento Portland, producido en 1824 por Joseph Aspdin. En 1829 se desarrolló un método para hacer forjados utilizando hormigón –con tirantes embebidos– como relleno entre vigas de hierro. Finalmente, en 1868 se inventó el hormigón armado cuando el jardinero Joseph Monier utilizó mallas de alambre para reforzar la resistencia de las macetas hechas de hormigón.¹⁶

A diferencia de Giedion, Adrian Forty sostiene que el hormigón armado no fue inventado sólo por Joseph Monier, sino que fue un descubrimiento paralelo llevado a cabo por Joseph Lambot en Francia y por Willliam Wilkinson en Inglaterra. Además, Forty argumenta que el desarrollo del hormigón se dio de un modo artesanal y, sobre todo, “[reinforced concrete] was marked by an almost total absence of theory, and was conducted by inserting pieces of iron and steel into concrete and hoping for the best. Architects and engineers showed no interest in these developments at all, remaining largely aloof and indifferent to them long after they had become accepted within the building world”¹⁷.

Pero más allá de la discrepancia sobre sus orígenes, Giedion y Forty reconocen que el interés y el uso generalizado del hormigón armado en Europa ocurrió en torno a 1890, gracias a François Hennebique, un constructor-promotor que en 1879 comenzó a experimentar con este material llegando a patentar en 1892 su propio sistema para reforzar el hormigón.¹⁸ Antes de Hennebique, el mayor problema para construir con hormigón era la dificultad en la obtención de juntas monolíticas: “Hennebique overcame this difficulty through the use of bars of cylindrical section which could be bent round and hooked together. Integral to his system alone was the cranking up of reinforcement bars and the binding of joints with stirrup hoops in order to resist local stress”¹⁹. En 1905 su empresa copaba la quinta parte del mercado de construcciones en hormigón armado; un éxito que estuvo ligado a la popularidad de la revista *Le Béton Armé* publicada por Hennebique, por medio de la cual defendía la superioridad del hormigón sobre las estructuras metálicas en la resistencia contra el fuego.²⁰

¹⁵ GIEDION. Op.cit., p. 332

¹⁶ Ibídем, p. 333

¹⁷ FORTY, A. *Concrete and Culture: a Material History*. Lóndres: Reaktion, 2013. p. 17

¹⁸ Ibídем, p. 18

¹⁹ FRAMPTON, K. *Modern Architecture: A Critical History*. London: Thames & Hudson, 1997, p. 37

²⁰ Ibídем, pp. 18, 23



Figura 2.2 Compañía Nacional de Radiadores; Goetheanum; Edificio Johnson Wax

En sus inicios el hormigón no era considerado un material “moderno” en la arquitectura, pero esta apreciación comenzó a cambiar en torno a 1920.²¹ Según Detlef Mertins, en el siglo XX el hormigón se valoró por su facilidad para realizar formas escultóricas,²² como fue el caso de la arquitectura expresionista que se dio durante los años 1920 en Holanda y Alemania.²³ Las cualidades plásticas del hormigón permitieron generar superficies curvilíneas y continuas que disuelven los elementos estructurales en un cuerpo monolítico sin fisuras ni anclajes. Por ejemplo, en obras como la Compañía Nacional de Radiadores de Eugène Freyssinet, el Goetheanum de Rudolf Steiner y los lucernarios del edificio Johnson Wax de Frank Lloyd Wright (Figura 2.2).

Por lo que respecta al uso del hormigón para racionalizar los procesos constructivos, tras el trabajo de Hennebique destacó Auguste Perret, quien creó un sistema de ensamblaje de elementos verticales y horizontales –columnas y vigas– que traducía las formas y los usos de la construcción en madera al hormigón armado.²⁴ Esta manera de emplear el hormigón fue la que predominó en el siglo XX y la construcción de formas plásticas se convirtió en la excepción, ya que requerían mucho más trabajo y mano de obra cualificada para fabricar los encofrados, lo que causaba un incremento sustancial de los costes.²⁵

²¹ FORTY. Op.cit., p. 21

²² MERTINS, D. *Modernity Unbound*. London: Architectural Association Publications, 2012, p. 180

²³ BANHAM, R. *Teoría y diseño en la primera era de la máquina* (Cuarta ed.). Barcelona: Paidós, 1985, pp. 176-186

²⁴ Ibídem, 1985, p. 55

²⁵ FORTY. Op.cit., p. 235

2.1.4 Aportaciones plásticas y espaciales de los nuevos materiales estructurales

“[...] en cincuenta años el hierro y el cemento han aportado conquistas que son el índice de una arquitectura con el código alterado”²⁶.

Le Corbusier

El hormigón y el hierro, como materiales estructurales, aportaron nuevas cualidades formales y espaciales a la arquitectura, lo que llevó a Le Corbusier a concluir que estos materiales facilitaron la creación de un *nuevo código arquitectónico*. Efectivamente, los nuevos materiales permitieron construcciones de grandes luces y, con ello, la posibilidad de realizar grandes espacios diáfanos, espacios sin compartimentaciones que daban mayor libertad de uso. Una calidad espacial y funcional de lo que Mies denominó “espacio universal”, un vacío en lo que todo puede llegar a ocurrir.²⁷

Las construcciones para las grandes exposiciones de la segunda mitad del siglo XIX fueron los primeros espacios amplios y diáfanos construidos gracias a las estructuras metálicas. Por ejemplo, la nave central del Palacio de la Industria en la Exposición Universal de 1855 en París, con una luz de 48 metros –sin ningún tirante– se convirtió en el espacio más amplio realizado hasta ese periodo, superando la del Palacio de Cristal que tenía una luz de 22 metros.²⁸ En la Exposición de París de 1889 se construyó la Galería de las Máquinas, con una bóveda que salvaba una luz de 115 metros y una altura de 45 metros. Al igual que el Palacio de Cristal y el Palacio de la Industria, la bóveda de la Galería de las Máquinas eran la manifestación de lo que Giedion denominó un nuevo “sentido del espacio”, donde “el énfasis se ponía en abrir el espacio más que en delimitar el volumen con un muro”²⁹.



Figura 2.3 Puente de Tavanasa; Hangares Aeronáuticos

El hormigón armado también permitió cubrir grandes luces, aunque inicialmente se empleó en construcciones civiles como el puente de Tavanasa sobre el río Rin de Maillart, con una luz de 51 metros,³⁰ o los hangares aeronáuticos en Orly de Freyssinet,

²⁶ LE CORBUSIER. *Hacia una arquitectura*. Barcelona: Apóstrofe, 1998. p. 227

²⁷ “the singularity of the large and largely unstructured room – an architecture that Mies described as almost nothing, a void [...] in which anything, everything and nothing can happen.” MERTINS. Op.cit., p. 143

²⁸ GIEDION. Op.cit., p. 273

²⁹ Ibídem, p. 273

³⁰ Ibídem, p. 450

con una luz de 300 metros y una altura de 62,5 metros;³¹ ambas construcciones monolíticas y auto-portantes (Figura 2.3). En el caso de Maillart, el monolitismo se alcanzó uniendo el arco y la calzada del puente en una única estructura.³² A diferencia de las construcciones metálicas basadas en el ensamblaje de elementos, las construcciones de hormigón son piezas monolíticas donde la forma se concibe, como describió Banham, “como si el edificio consistiera de un blando material plástico manipulado por una mano gigante”³³; o, en palabras de Forty,

“Compared to all previous methods of construction, where the procedure was the assembly of parts, reinforced concrete produced buildings in which there are no parts. Walls, floors, columns and beams formed one continuous structure, dissolving the traditional distinction between load and support”³⁴.

Además de permitir la construcción de edificios y puentes con estructuras monolíticas, el hormigón también facilitó el voladizo, que se convirtió en un nuevo elemento del vocabulario formal de la arquitectura. El voladizo oculta el modo en que se soporta el edificio, cuestionando así la relación tradicional entre carga y soporte.³⁵

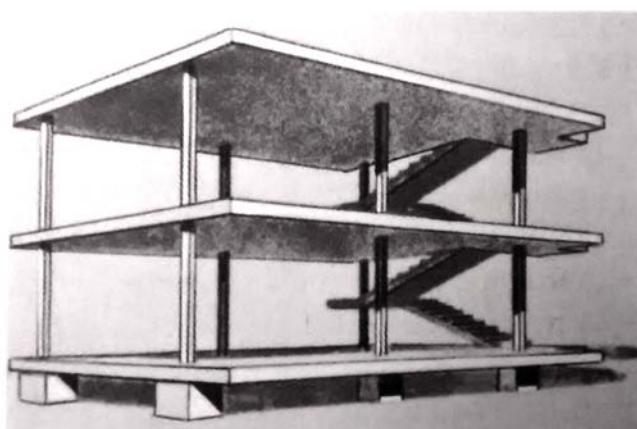


Figura 2.4 Sistema Dom-ino

Perret consideró que los arquitectos vanguardistas de inicios de siglo XX estaban más preocupados por los efectos plásticos del hormigón que por las propiedades estructurales del material.³⁶ Pero su crítica no se sostiene ante el sistema Dom-ino (1915) de Le Corbusier (Figura 2.4); un sistema formado por forjados apoyados en pilares y conectados por una escalera, considerado un elemento esencial de la arquitectura moderna por ser una “sencilla estructura, a fabricar en serie, [que]

³¹ FRAMPTON. Op.cit., p. 37

³² GIEDION. Op.cit., p. 450

³³ BANHAM. Op.cit., p. 180

³⁴ FORTY. Op.cit., p. 34

³⁵ “Desde el comienzo de la arquitectura, uno de sus hechos más destacados ha sido la relación visible entre la carga y el soporte.” GIEDION. Op.cit., p. 280

³⁶ Ibídem, p. 26

constituía el núcleo, en cuyo alrededor se podía desarrollar la nueva concepción del espacio con un vocabulario [plástico] nuevo”³⁷.

El sistema Dom-ino supuso la traducción del esqueleto metálico al hormigón, de manera que también se conoce como “esqueleto de hormigón”³⁸. De esta manera, el hierro y el hormigón sentaron las bases materiales para las nuevas configuraciones formales y espaciales que surgieron tras el reemplazo del muro portante por el esqueleto estructural que Christian Norberg-Schulz resume así:

“Un sistema esqueleto se define mediante la distinción entre elementos de soporte y de cerramiento. Consta, por tanto, de partes primarias y secundarias y tiene intrínsecamente una estructura de superficie mucho más rica que el sistema masivo. Las aberturas participan del sistema, en lugar de ser perforaciones relativamente accidentales. El tamaño y la forma de los espacios pueden tratarse con gran libertad, ya que las superficies límite son independientes de los miembros portantes. Esta libertad también se refiere a la altura y la cubrición del edificio. Las cerchas y entramados de acero y las láminas, las placas plegadas y las estructuras nervadas de hormigón armado permiten la cubrición de superficies de un tamaño previamente desconocido”³⁹.

La descripción que Norberg-Schulz hace del esqueleto estructural resume las cualidades formales y espaciales de lo que Le Corbusier definió como “una arquitectura con el código alterado”. Si el término “código” connota “conjunto de reglas o preceptos sobre cualquier materia”⁴⁰, puede afirmarse que el hierro y el hormigón alteraron las *reglas* de la arquitectura. Y si por “regla” se entiende un “modo establecido de ejecutar algo”⁴¹, estos materiales transformaron la manera de concebir y materializar el edificio. El nuevo código arquitectónico se utilizó tanto en la realización de grandes espacios diáfanos, voladizos y construcciones en altura, las cuales fueron posibles gracias a la resistencia de estos materiales como en las construcciones monolíticas y escultóricas que tuvieron su origen en la maleabilidad del hormigón. Gracias al esqueleto estructural –en hierro y en hormigón– surgieron nuevos lenguajes formales y nuevas manera de entender y utilizar el espacio a lo que también contribuyó el vidrio.⁴²

³⁷ NEUMEYER. Op.cit., p. 186

³⁸ GIEDION. Op.cit., p. 511

³⁹ NORBERG-SCHULZ, C. *Intenciones en la arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 1998. p. 106

⁴⁰ REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Consultado el 25/08/2016

⁴¹ Ibídem.

⁴² COLLINS, P. *Las ideas de la arquitectura moderna; su evolución (1750-1950)*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001, p. 140

2.1.5 La influencia del esqueleto estructural y de la transparencia del vidrio en la concepción del espacio moderno

Además del hierro y el hormigón, el vidrio fue un material que fomentó la aparición de un nuevo código en la arquitectura. Más allá de nuevas posibilidades formales, la aplicación de grandes paños de vidrio influyó en la nueva concepción del espacio arquitectónico que emergió en las primeras décadas del siglo XX. Su uso en la edificación se generalizó en los inicios del siglo XIX, cuando empezó a reemplazar el papel parafinado en el cerramiento de ventanas. Al igual que el hierro, su generalización como material constructivo se aceleró con la industrialización, es decir, cuando pudo producirse en cantidades suficientes para poder disminuir su coste.

En 1806 se producían paños de vidrio de 2,50 por 1,70 metros y entre 1816 y 1829 su consumo aumentó desde 10.000 a 60.000 quintales.⁴³ Según Benévolo, en ese tiempo “se universaliza el uso del vidrio para los cerramientos y se empieza a experimentar aplicaciones más ambiciosas, asociando el vidrio al hierro para obtener cerramientos translúcidos”⁴⁴. Entre los experimentos se encuentran la Galería Orléans del Palacio Real (Percier y Fontaine, 1829), invernaderos como el del Jardín de Plantas de París (Rouhault, 1833), el de Chatsworth (Paxton, 1837) y la Casa de la Palmera (Burton & Turner, 1848). En la segunda mitad de siglo el vidrio se empleó en obras como el Palacio de Cristal (Paxton, 1851) o el Palacio de las Máquinas (Dutert, 1889) (Figura 2.5).

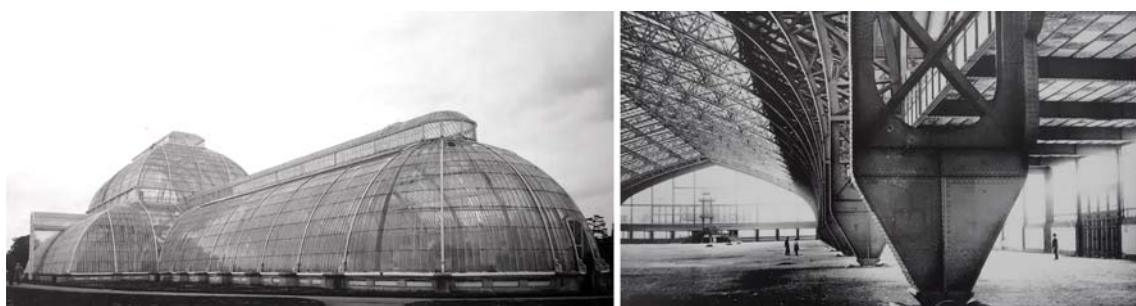


Figura 2.5 Casa de la Palmera; Palacio de las máquinas

Según Giedion, la combinación entre el esqueleto de hierro y el cerramiento de vidrio, “exige por su propia naturaleza una exhaustiva desmaterialización del edificio”⁴⁵, en tanto que se suprime el muro portante, como elemento delimitador del espacio. Esta idea del espacio como recinto delimitado por muros o superficies perimetrales, responde a la teoría del origen textil de la pared y al principio del revestimiento propuesto por Gottfried Semper: “Al mito de una estructura constructiva trilítica, ennoblecida en orden arquitectónico [por Vitruvio], se contrapone el mito de una envoltura

⁴³ BENÉVOLO. Op.cit., p. 39-40

⁴⁴ Ibídem, p. 39

⁴⁵ GIEDION. Op.cit., p. 280

delimitadora del espacio, cuya característica es la ligereza y respecto a la cual la estructura se encuentra subordinada y es tan sólo soporte”⁴⁶.

Las teorías de Semper, planteadas a mediados del siglo XIX, reflejan una conciencia del espacio como cualidad del edificio; idea que luego tendría su continuidad en la concepción del espacio de pioneros modernos como Peter Behrens y Adolf Loos. En su ensayo *El principio del revestimiento* (1898), Loos sostenía que el arquitecto tiene “la misión de hacer un espacio cálido y habitable [Y] concebir el armazón es la segunda misión del arquitecto”⁴⁷. Por su parte, Behrens afirmaba en *Arte y técnica* (1910) que la “naturaleza original [de la arquitectura] es la de incluir el espacio”⁴⁸.

En 1893 el escultor Adolf Hildebrand propuso una concepción cinética del espacio, al sugerir que el espacio se “produce” y “transforma” por el movimiento del individuo:⁴⁹ “By a spatial continuum we mean a space as three-dimensional extension and as a three-dimensional mobility or kinaesthetic activity of our imagination”⁵⁰. El *continuo espacial* propuesto por Hildebrand conlleva un movimiento físico y mental del individuo. En la década de 1920 se desarrollaría la idea del espacio como *continuum*, basada en la continuidad entre el espacio interior y exterior. Según Forty, este concepto de espacio se debe a Moholy-Nagy, quién afirmó: “space is achieved by detaching the structural members, so that in the voids between them is created a continuum of space that runs through the building and connects inside with outside”⁵¹. Así, la idea de continuidad espacial se materializó en la arquitectura moderna a partir de la sustitución del muro portante por el esqueleto estructural, lo que permitió conectar el espacio interior con el exterior.

El continuo espacial alude a la libertad de movimiento en el espacio que facilita el esqueleto estructural y a la conexión visual entre el interior y el exterior que permite la transparencia del vidrio. A partir del esqueleto estructural y el cerramiento de vidrio, Mies concibió el edificio como “una osamenta y una piel”⁵²:

“Sólo la piel de vidrio, sólo las paredes vidriadas permiten a las construcciones realizadas con un esqueleto alcanzar su forma estructural unívoca y les asegura sus posibilidades arquitectónicas. [Estos medios técnicos] permiten un grado de libertad en la configuración del espacio, del que ya no queremos prescindir. Solo así podemos estructurar los

⁴⁶ FANNELLI, G., y GARGIANI, R. *El principio del revestimiento*. Madrid: Akal, 1999. p. 7

⁴⁷ LOOS, A. *Dicho en el vacío 1897-1900*. Valencia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia, 2003, p. 149

⁴⁸ BEHRENS, P. Arte y técnica. En MALDONADO, T. (Ed.). *Técnica y cultura. El debate alemán entre Bismarck y Weimar*. Buenos Aires: Infinito, 2002. p. 110

⁴⁹ “[Moholy-Nagy] also has the idea that space is a product of motion, and that it changes as man moves in space”. FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. New York: Thames & Hudson, 2000, p. 267

⁵⁰ HILDEBRAND, A. *The Problem of Form in the Fine Arts*. Ibídem, p. 259

⁵¹ Ibídem, p. 267

⁵² MIES VAN DER ROHE, L. *Edificio de oficinas*. En NEUMEYER. Op.cit., p. 363

espacios con libertad, abrirllos al paisaje y ponerlos en relación con él”⁵³.

Las diversas concepciones del espacio que surgen entre mediados del siglo XIX e inicios del siglo XX, en el ámbito científico y artístico, convergieron en la noción de “espacio-tiempo” propuesta por Giedion. Desde el Renacimiento hasta la primera década del siglo XX la perspectiva condicionó la percepción del espacio en la pintura y la arquitectura, en función de las tres dimensiones del espacio cartesiano. Pero en la física moderna, según Giedion, la esencia del espacio radica en “su multiplicidad, la infinita potencialidad para las relaciones en su interior”⁵⁴. De este modo, Giedion equiparó los conceptos científicos y artísticos de espacio en el siglo XX: en el primer caso adoptó la idea de la física moderna, que concibe el espacio como algo relativo a un punto de vista móvil, en lugar de una entidad absoluta y abstracta; en el segundo, asume la noción cubista del espacio, que no busca reproducir la apariencia de los objetos, sino que los muestra desde varios puntos de vista entre los cuales ninguno tiene prioridad.⁵⁵ Según Giedion, el observador debe proyectarse a través del espacio para captar su esencia, añadiendo así la dimensión temporal a las tres dimensiones del espacio perspectivo-cartesiano.

2.1.6 El paradigma de la industrialización arquitectónica: el Palacio de Cristal

“El Palacio de Cristal [...] puede considerarse como el primer ejemplo coherente de la arquitectura en hierro y vidrio”⁵⁶.

Joseph August Lux

El Palacio de Cristal, al aplicar los materiales y técnicas de construcción industrializada, anticipó algunas las cualidades formales y espaciales que caracterizaron la arquitectura moderna.⁵⁷ Este edificio ejemplifica los efectos de la industrialización en la arquitectura, no solo por sus cualidades formales y espaciales logradas a través del hierro y el vidrio, sino también porque su construcción se fundamentó en los modos de producción industrial: producción en masa, mecanización y estandarización. Asimismo, tanto las bases del concurso del proyecto como los procesos productivos que facilitaron su realización, ponen de manifiesto la asimilación de la eficiencia productiva como principio fundamental de la producción arquitectónica.

⁵³ MIES VAN DER ROHE, L. *¿Qué sería del hormigón armado, sin el vidrio reflectante?* En NEUMEYER. Op.cit., p. 476

⁵⁴ GIEDION. Op.cit., p. 433

⁵⁵ Ibídem, pp. 433-434

⁵⁶ LUX. Op.cit. p. 92

⁵⁷ Ibídem

La Comisión Real convocó un concurso para el diseño y la construcción del edificio que acogería la Gran Exposición de Londres de 1851. Esta comisión estaba compuesta por 24 miembros de la Academia Real, fundada en 1754 bajo el nombre de Sociedad para el Estímulo de las Artes, la Producción y el Comercio (*Society for the Encouragement of Arts, Manufactures and Commerce*). En 1843 el Príncipe Alberto entró en la Academia Real y en 1847 asumió la presidencia para impulsar la aplicación de las ciencias y las artes en favor de los propósitos industriales.⁵⁸ Los requisitos del proyecto que estableció la Comisión Real fueron: un tamaño suficiente para albergar algunos de los edificios más grandes del mundo; el coste por metro cúbico más barato; poder erigirse en semanas en vez de años; y poder ser desmantelado dejando el lugar y su vegetación tal como se encontraba antes de su construcción.⁵⁹

La realización de un edificio de estas dimensiones, con los costes y tiempos establecidos,⁶⁰ no era posible con los procesos de construcción tradicionales. Por ello, las bases del concurso implícitamente sugerían utilizar medios de producción industrial. Tanto el coste por metro cúbico como la celeridad para edificar el edificio requerían la prefabricación de los componentes constructivos, la mecanización de los procesos de fabricación y montaje, y la separación de tareas propia de las cadenas de montaje. Asimismo, su tamaño requería la producción en masa de componentes constructivos en hierro y vidrio.

2.1.6.1 Bases materiales y productivas del diseño

La producción en masa de hierro y vidrio hicieron posible la realización del Palacio de Cristal. En 1800 la producción de arrabio para la fundición de hierro era aproximadamente de 258.000 toneladas y cuando se construyó el Palacio (1850) su producción había alcanzado 2.750.000 toneladas, de manera que las 5.000 toneladas que se requerían para construirlo no representaban un inconveniente para la industria siderúrgica. Por el contrario, los 900.000 pies cuadrados de vidrio para su acristalamiento suponían un problema, ya que a mediados del siglo XIX el vidrio fundido y laminado se producía en pequeñas cantidades y a costes muy elevados.⁶¹

⁵⁸ McKEAN, J. *Crystal Palace: Joseph Paxton and Charles Fox*. London: Phaidon Press, 1994.

⁵⁹ Ibídем, p. 5

⁶⁰ El tamaño y el presupuesto fueron fijados por la Comisión Real y por algunos de los comerciantes interesados en exponer sus productos. Henry Cole, miembro de la Real Academia desde 1846, fue uno de los principales promotores de la Gran Exposición. Al igual que el Príncipe Alberto, Cole entendía que *no había vuelta atrás después de la era de las máquinas*. BRIGGS, A. *Iron Bridge to Crystal Palace, Impact and Images of the Industrial Revolution*. Londón: Thames & Hudson, 1979. p. 166. Su idea sobre la unión entre el arte y la producción, a favor de la mejora del gusto popular, fue uno de los principales motivos para que se llevara a cabo la exposición. Cole fue quien se reunió con los comerciantes ingleses interesados en exponer sus productos y con ellos estableció que la superficie necesaria para que sus mercancías se expusieran adecuadamente era de 400.000 pies cuadrados. Así, teniendo en cuenta que los expositores extranjeros necesitarían un área similar, se decidió disponer de una superficie de 800.000 pies cuadrados, con un coste que no sobrepasara las 100.000£.

⁶¹ El vidrio fundido y laminado, que actualmente se utiliza en la producción de ventanas y espejos, se producía en pequeñas cantidades a costes muy altos alrededor de 1850, por lo cual las ventanas de la época se acristalaban con cristal corona –*crown-glass*–. De este modo, el cristal para ventanas se seguía

Junto a la cantidad de vidrio requerida, la dimensión de los paños también fue un condicionante, ya que Paxton demandaba láminas de 4 pies, pero en aquel momento éste tamaño no se producía industrialmente. Desde 1832 el fabricante Robert Lucas Chance producía paños hasta de 3 pies, pero Paxton consideraba que podían alcanzar hasta 4 pies con el mismo proceso productivo utilizado por Chance, el *cylinder process*, y le exigió alcanzar paños de 4 pies como condición para que su compañía formara parte del proyecto⁶² Además de la dimensión, el espesor de las láminas era determinante, no solo por su influencia en el peso y, con ello, en el grado de dificultad de su manejo, sino también por los posibles incrementos de coste motivados por fracturas durante su producción. Chance logró producir 300.000 paños (400 toneladas) a partir de láminas de cristal de 49 pulgadas de largo por 30 pulgadas de ancho. Los paños se dividieron en tres partes iguales de 49 pulgadas de largo por 10 pulgadas de ancho con peso de 16 onzas por pie cuadrado, es decir, paños de 4,08 por 0,83 pies con peso de 0,45 kg por pie cuadrado, con lo cual se facilitó su manipulación por parte de los operarios.⁶³

Los cristales de la cubierta se colocaron con una ligera pendiente para evacuar tanto las aguas lluvias como el agua condensada en el interior,⁶⁴ de manera que los cristales de 4,08 pies de longitud cubrían horizontalmente un espacio de 4 pies. Doblando esta distancia se alcanzaban los 8 pies. Con base en esta medida se configuró la estructura. En consecuencia, según Anthony Bird, “[...] the fundamental dimension of 8 ft., with the resultant 24 ft. spacing of columns and bays, and so on up to the 72 ft. span of the nave was determined by the size of the glass”⁶⁵. De acuerdo con Bird, el tamaño de los cristales fue determinante para el edificio en la medida que condicionó su retícula estructural: la producción de láminas de vidrio de 4 pies de longitud fue el factor que determinó la forma, la espacialidad, y el comportamiento estructural del edificio.

2.1.6.2 La optimización del proceso constructivo

El 30 de Julio de 1850 la Comisión Real aceptó el proyecto de Paxton y las condiciones de los contratistas Fox y Henderson. Una vez terminada la cimentación en hormigón se comenzó a levantar la estructura el 26 de septiembre de 1850. La celeridad en su montaje fue posible por el uso de elementos prefabricados, el empleo de maquinaria y la división del trabajo.

fabricado de forma artesanal, a través de un proceso donde el vidrio era soplado en una “corona” o globo hueco, para ser aplanado posteriormente; un proceso bajo el cual cada cristal resultaba con una protuberancia central, que correspondía al lugar de desprendimiento del punto de soplado.

⁶² McKEAN. Op.cit. 1994

⁶³ Ibídem, p. 15

⁶⁴ Ibídem.

⁶⁵ BIRD, A. *Paxton's Palace*. London: Cassell, 1975. p. 57

Las vigas metálicas debían soportar cargas de 9, 15 o 22 toneladas, por lo que se construyó una máquina para comprobar su resistencia. El montaje de las vigas metálicas suponía traer cada viga desde el vagón del tren, pesarla, probarla en la máquina, transportarla hasta su ubicación y, finalmente, colocarla en la obra. Este proceso se realizó en menos de cuatro minutos (Figura 2.6). A finales de octubre se estaban levantando aproximadamente 200 columnas por semana, de manera que la estructura pudo completarse en pocas semanas para dar paso al acristalamiento, puesta en obra que, nuevamente, se llevó a cabo con ayuda de máquinas.

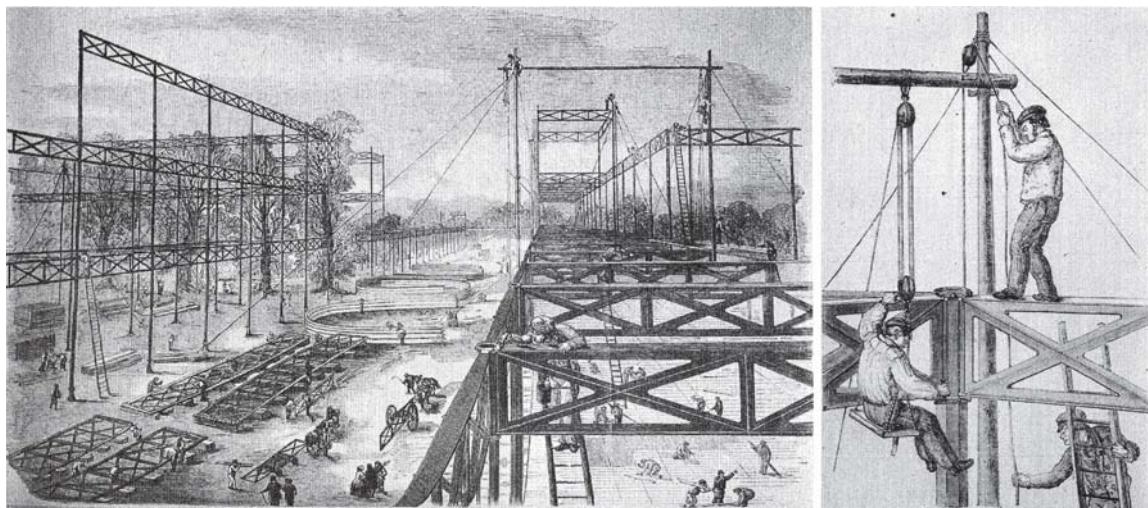


Figura 2.6 Montaje de estructura metálica

El montaje de los cristales en cubierta exigió diversas innovaciones constructivas. En 1850 Paxton tenía experiencia en construcciones de vidrio y madera, gracias a los invernaderos que había realizado a lo largo de veinte años utilizando estos materiales. Como resultado de esos trabajos previos, Paxton concibió una carpintería estructural auto-portante que, no solo soportaba los cristales de la cubierta, sino que permitía evacuar las aguas lluvias y el agua condensada en el interior de los invernaderos (Figura 2.7). Esta carpintería, conocida como “Paxton Gutter”, estaba pensada para ser producida en serie con una máquina de vapor que Paxton había adquirido en 1838 y con la que llegó a producir 40 millas para el invernadero conocido como Great Stove en Chatsworth. Este proceso de mecanización y estandarización supuso un ahorro en costes de 1.200 libras en trabajos manuales durante la construcción del invernadero. Por esta razón se aplicó para realizar la carpintería del Palacio de Cristal. Igualmente, la carpintería se pintó utilizando máquinas.

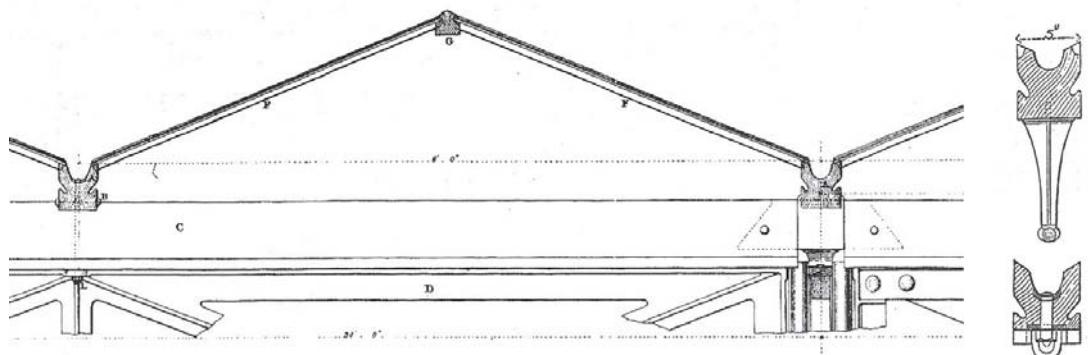


Figura 2.7 Paxton Gutter

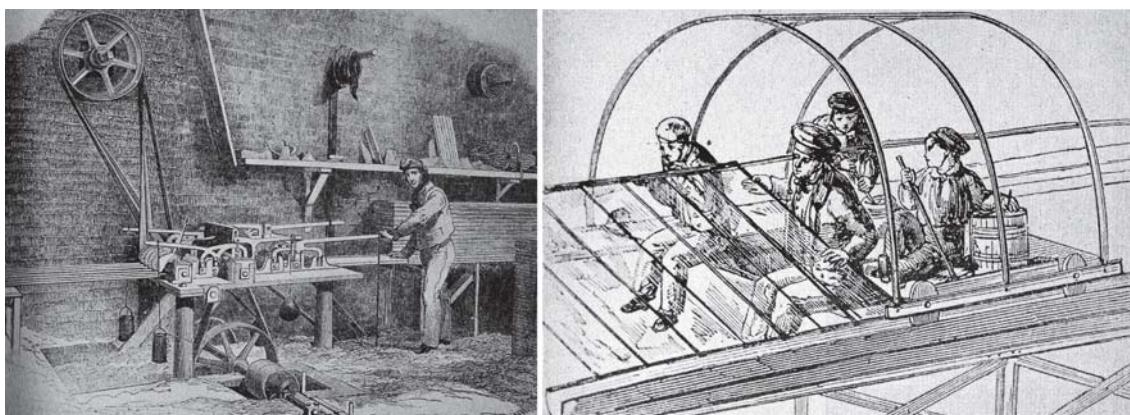


Figura 2.8 Máquina para producir carpinterías y máquina para instalar cristales

En la instalación de la carpintería y los cristales de cubierta se utilizó una carretilla diseñada por Charles Fox, que se desplazaba utilizando como rieles la carpintería diseñada por Paxton. En cada carretilla trabajaban cuatro operarios (dos hombres y dos niños) a los cuales se les suministraba el material desde abajo a través de un orificio central. De esta manera se facilitaba el montaje y se evitaban los andamios (Figura 2.8). Igualmente, el montaje de la cubierta se realizó con una bóveda que cubría cada carretilla y permitía trabajar bajo la lluvia. Según el *Official Popular Guide*, utilizando estas carretillas 80 operarios lograron instalar 18.000 paños de cristal para cubrir una superficie de 62.000 pies cuadrados por semana.⁶⁶

La eficacia conseguida a partir de la división del trabajo, la mecanización del montaje y la producción de componentes, quedó patente en la cantidad de obra ejecutada por semana: número de columnas erigidas, 310; vigas producidas, 316; *canalones paxton* instalados, 442; número máximo de cristales instalados en un día por un solo operario, 108.⁶⁷ Transcurridas veintidós semanas, contadas desde el inicio de obra el edificio se encontraba casi terminado: la estructura había sido levantada y acristalada y las galerías, escaleras y suelos estaban terminados. El trabajo para las siguientes 16 semanas se centró en el acondicionamiento del interior: instalaciones de agua, de gas, de aseo y de

⁶⁶ BIRD. Op.cit., p. 87

⁶⁷ McKEAN. Op.cit., pp. 23-25

seguridad contra incendios, hall de entrada, una habitación privada para la Reina, tres restaurantes, una sala de lectura, oficinas administrativas y una pequeña sala de máquinas para el suministro de vapor y agua caliente. Las mercancías que se iban a exponer se ubicaron mientras se realizaban los trabajos de pintura y decoración. El 1 de mayo de 1851, en su discurso inaugural, el príncipe Alberto declaró: “El gran principio de la división del trabajo, que se puede entender como el poder de movimiento de la civilización, se está extendiendo a las diferentes ramas de la industria y el arte”⁶⁸. En este sentido, el Palacio de Cristal pondría de manifiesto la estrecha relación que, a partir del siglo XIX, se establecía entre el desarrollo industrial y la innovación arquitectónica.

2.1.7 Materialidad y pensamiento arquitectónico

Las propiedades físicas y funcionales de los nuevos materiales industriales no solo dieron lugar a nuevos procesos y sistemas constructivos, sino que introdujeron nuevas cualidades formales y espaciales en la arquitectura. Las consecuencias derivadas de la aplicación de procesos industrializados de fabricación y construcción en la arquitectura cristalizaron en planteamientos teóricos de la arquitectura moderna.

La traducción de las nuevas condiciones materiales en nuevos principios arquitectónicos se aprecia en los “cinco puntos de una nueva arquitectura”, propuestos por Le Corbusier y Pierre Jeanneret en 1926: los “pilotis” (pilares), las terrazas-jardín, la planta libre, la “fenêtre en longueur” (ventana longitudinal) y la fachada libre.⁶⁹ El pilar, como elemento del esqueleto estructural en hierro u hormigón, libera la fachada de su función estructural. Al suprimir los muros portantes se consigue una planta libre que aporta flexibilidad espacial pues independiza la distribución y la forma de los muros entre las diferentes plantas. La fachada libre es el resultado del esqueleto estructural y del cerramiento de vidrio y posibilita la continuidad visual entre el espacio interior y el exterior. Estos principios expuestos por Le Corbusier y Jeanneret, ejemplifican la relación dialéctica entre la producción material y la teoría arquitectónica.

Le Corbusier encontró en los materiales industriales un argumento para romper con la concepción tradicional de arquitectura. Entre ellas, la que defendió Leon Battista Alberti, cuando propuso el uso de “materiales puros, sólidos no mezclados, naturales, apropiados, [y] en buen estado”⁷⁰. Alberti recomendaba materiales en su estado natural que estuviesen listos para ser usados y rechazaba los fabricados por el hombre.⁷¹ Por el contrario, la arquitectura moderna adoptó los materiales artificiales por considerarlos como un nexo entre la arquitectura y el conocimiento científico y técnico de su época. En este sentido, Le Corbusier afirmaba:

⁶⁸ Ibídem, p. 21

⁶⁹ BENÉVOLO. Op.cit., pp. 461-462

⁷⁰ ALBERTI. Op.cit., p. 400

⁷¹ GIEDION. Op.cit., p. 189

“Los primeros efectos de la revolución industrial en la ‘construcción’ se manifiestan por esta etapa primordial: el remplazo de los materiales naturales por los materiales artificiales, de los materiales heterogéneos y dudosos por los materiales homogéneos y probados por ensayos de laboratorio y producidos con elementos fijos”⁷².

Al considerar que los efectos de la revolución industrial sobre la construcción tienen una “etapa primordial”, consistente en el reemplazo de los materiales naturales por artificiales, Le Corbusier situaba los orígenes de la arquitectura moderna en el hierro, el vidrio y el hormigón. En este sentido reproducía el mismo argumento de Mies, quien afirmaba que la industrialización de la construcción era una cuestión de materiales.⁷³ En esta “etapa primordial”, fase inicial de la transición hacia la arquitectura moderna, las cualidades materiales del hierro, el vidrio y el hormigón se tradujeron en nuevos hechos arquitectónicos: la resistencia del hierro y el hormigón dio lugar al esqueleto estructural con el cual se lograron espacios amplios y diáfanos; la transparencia del vidrio conectaría visualmente el espacio interior y el exterior y la maleabilidad del hormigón permitiría superficies curvilíneas y continuas. Asimismo, estos hechos arquitectónicos dieron lugar a conceptos de espacio expresados en términos como “espacio universal”, “planta libre” y “continuum espacial”.

Las aplicaciones que los arquitectos e ingenieros hicieron del hierro, el vidrio y el hormigón, entre la segunda mitad del siglo XIX y los inicios del siglo XX, fueron determinantes para el desarrollo de la arquitectura moderna. Esta materialidad industrial era el resultado de los nuevos materiales y sistemas constructivos facilitados por la revolución industrial e implicaba, además, una nueva manera de trabajar con los materiales existentes. En la arquitectura moderna que surgió de la sociedad industrial se daba, por tanto, una relación recíproca entre los materiales disponibles y el espíritu de la época:

“Cada época se sirve del material que responde a ella en mayor profundidad. Pero también la manera específica de emplear un *material arquitectónico* es sintomático del espíritu de la época”⁷⁴.

De la misma manera que existió una *materialidad industrial* estrechamente vinculada a la arquitectura moderna, emerge en la actualidad una *materialidad digital*, entendida como el conjunto de materiales, herramientas y procesos que se derivan de la aplicación de las tecnologías digitales en la arquitectura actual.

⁷² LE CORBUSIER. Op.cit., p. 192

⁷³ Véase la Introducción del Capítulo 2.

⁷⁴ GRAVENKAMP, C. *Mies van der Rohe. Glashaus in Berlin*. En NEUMEYER. Op.cit., p. 237

2.2 Materialidad digital: información, fenómenos, y materia

En arquitectura el término “materialidad digital” ha sido empleado por diversos autores⁷⁵ y en todos los casos remite a un proceso fundamental: la digitalización. Inicialmente la digitalización se asoció con la transferencia de entidades –objetos, fenómenos, signos– desde un entorno físico a uno digital; un proceso que, según Nicholas Negroponte, implica la transformación de átomos a bits, reduciendo el mundo físico a un código binario.⁷⁶

En el proceso de digitalización “lo digital” tiende a confundirse con “lo virtual”, confusión que Pierre Lévy describe como “la oposición fácil y equívoca entre lo real y lo virtual [donde] el término virtual suele emplearse [...] para expresar la ausencia pura y simple de la existencia, presuponiendo la ‘realidad’ como una realización material, como una presencia tangible”⁷⁷. En la medida en que “lo digital” se asocia a “lo virtual”, su significado tiende a relacionarse con “lo inmaterial” y oponerse a “lo real”. Por tanto, para comprender el concepto de “materialidad digital” es necesario diferenciar “lo digital” y “lo virtual”. Para ello se recurre a los emparejamientos que Deleuze propone entre “lo real” y “lo posible” y entre “lo virtual” y “lo actual”.

De acuerdo con la lectura que Lévy hace de los emparejamientos propuestos por Deleuze, lo real sería una realización material, una presencia tangible que se concretiza de un modo efectivo o formal, mientras que lo posible es una realidad latente, es decir, algo idéntico a lo real, pero sin existencia –la idea–. En este sentido, lo posible ya está conformado, de manera que su realización no implica un cambio en su naturaleza constitutiva. Al no haber un cambio de naturaleza, la realización de lo posible es un proceso que se considera estático, mientras lo virtual es un acontecimiento dinámico, en tanto implica actualizar las potencialidades que acompañan una entidad que reclama un proceso de resolución o de actualización. En este sentido, lo virtual (del latín *virtus*) es lo que existe en potencia, pero no en acto; por ello, lo virtual no se opone a lo real sino a lo actual, mientras que lo posible se opone a lo real. Consecuentemente, lo posible y lo virtual implican un estado inmaterial que potencialmente puede realizarse. Pero la realización de lo posible no es una creación, ya que la “creación” conlleva la producción innovadora de una idea o de una forma. Por el contrario, la realización de lo virtual es un proceso de actualización que comporta un cambio de naturaleza, gracias a la creación o invención de una forma generada por una configuración dinámica de fuerzas y finalidades.⁷⁸

⁷⁵ ALLEN, S. Velocidades terminales: el ordenador en el estudio de diseño. En ORTEGA, L. (Ed.) *La digitalización toma el mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009; GRAMAZIO, F., KOHLER, M., & WILLMANN, J. Towards an Extended Performative Materiality - Interactive Complexity and the Control of Space. En OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.), *Theories of the Digital in Architecture*. London; New York: Routledge, 2014; OXMAN, R., & OXMAN, R.. *Theories of the Digital in Architecture*. Londres; Nueva York: Routledge, 2014.

⁷⁶ NEGROPONTE, N. *Mundo Digital*. Barcelona: Ediciones B, 1995. p. 4

⁷⁷ LÉVY, P. *¿Que es lo virtual?* Barcelona, Buenos Aires, Ciudad de México: Paidós, 1999. p. 10

⁷⁸ Ibídem, pp. 10-11

Para comprender cómo las oposiciones de Deleuze nos permiten explicar el concepto de “materialidad digital”, ésta debe contraponerse a la idea de la digitalización entendida como un proceso de transformación de átomos a bits. Igualmente, se toma como referencia la materialidad industrial, en tanto que la noción de “materialidad” se encuentra asociada a los procesos de producción industrializada, como fue el caso del hierro y el vidrio.

Al ser inmateriales, los bits son entidades que forman parte del ámbito de lo posible y lo virtual y, potencialmente, pueden realizarse o actualizarse en el entorno físico. En este sentido, la digitalización es el tránsito de entidades físicas en un espacio actual a entidades inmateriales en un entorno digital. Un tránsito que es fundamental para el arquitecto, al facilitar que los objetos y fenómenos puedan representarse, reconfigurarse, analizarse o simularse, mediante el uso de ordenadores, para producir información útil en el diseño del edificio. Esta capacidad de utilizar la información digital como material de trabajo, puede considerarse la operación primaria de la materialidad digital. Pero la materialidad digital no se reduce al procesamiento de información en un entorno digital, ya que la arquitectura requiere la realización o actualización de los bits en el entorno físico. Desde esta perspectiva, la materialidad digital es un proceso inverso a la digitalización, en tanto conlleva la transformación de bits en átomos y procesos en el espacio actual (Figura 2.9). Por consiguiente, el proceso que caracteriza la materialidad digital en la arquitectura, consiste en el procesamiento y la producción de información digital, para producir objetos arquitectónicos y, a partir de ellos, generar fenómenos en el espacio físico.

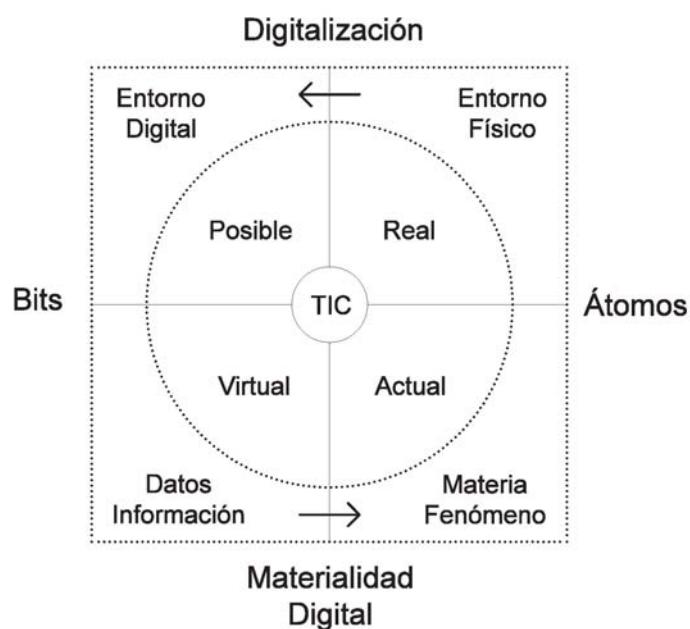


Figura 2.9 Noción de “materialidad digital” de acuerdo con los emparejamientos de Deleuze

Antes de que Gehry emplease herramientas CAD/CAM en la producción arquitectónica, en los años 1980 Toyo Ito y Jean Nouvel utilizaron las tecnologías digitales –edificios de la Torre de los Vientos e Instituto Árabe de París– para capturar información del entorno por medio de sensores y actuadores, controlados por ordenador, y convertirla en fenómeno arquitectónico. En estos proyectos el fenómeno, previamente digitalizado, se convierte en un input que transforma la apariencia formal y espacial de los edificios.

En los años 1990 se empezó a extender el uso del CAD en la arquitectura para representar y modelar geometrías complejas utilizando modelos digitales. Pero estas exploraciones plásticas, aplicando los términos de Deleuze, se redujeron al ámbito de “lo posible”, ya que ignoraron las condiciones físico-materiales de la arquitectura por no tener en cuenta los procesos de fabricación.⁷⁹ Pocos de los proyectos experimentales realizados en esa época llegaron a realizarse y permanecieron en el entorno digital. A finales de esta década, sin embargo, los modelos digitales se transpusieron a la realidad física mediante las herramientas de fabricación digital.

El proceso de diseño y construcción del Guggenheim de Bilbao ejemplifica el reverso del proceso de la digitalización en el ámbito de la arquitectura, es decir, la transformación de bits en átomos. Lo que antes había sido una realidad latente –un modelo virtual– se convirtió en arquitectura realizada.

Desde la realización del Guggenheim la noción de “materialidad digital” sirve para referirse a la continuidad de los procesos de diseño y fabricación digital. Esta continuidad se planteó como un factor esencial de la nueva materialidad arquitectónica, en la medida en que la información producida desde un modelo digital se utiliza para controlar las máquinas de fabricación automatizada.⁸⁰

Otro aspecto característico de la materialidad digital es el empleo de las propiedades de los materiales constructivos como parámetros o inputs de diseño, puesto que pueden ser codificadas y trabajadas empleando modelos digitales. Esto ha dado lugar a nuevas maneras de trabajar los materiales existentes y a nuevas maneras de concebir materiales empleando técnicas de CAD/CAM para articular, distribuir y ordenar diferentes materiales en una escala milimétrica.

La materialidad digital se abordará desde tres ámbitos: empleo del fenómeno como material arquitectónico; cómputo y producción de información para optimizar el diseño y construcción; re-conceptualización de los materiales tradicionales y síntesis de nuevos materiales. Además de reconocer los diferentes procesos, herramientas, materiales y conceptos que conforman la noción de “materialidad digital”, en este análisis se

⁷⁹ CACHE, B. *Projecticles*. London: Architectural Association, 2011. p. 8; PICON, A. La arquitectura y lo virtual. Hacia una nueva materialidad. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 67

⁸⁰ KOLAREVIC, B. (Ed.). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York; London: Taylor & Francis, 2003, p. 3

identifican sus consecuencias formales y espaciales. Del mismo modo en que la materialidad industrial dio lugar a una nueva plasticidad y espacialidad que caracterizó la arquitectura moderna, tras la materialidad digital subyacen nuevas concepciones de la forma y el espacio que caracterizan la arquitectura digital.

2.2.1 De la transparencia física a la mediática

En su ensayo “Transparencia: literal y fenomenal”⁸¹, Colin Rowe y Robert Slutzky distinguen entre la transparencia literal que deriva de materiales como el vidrio y la transparencia fenomenológica que hace referencia a la continuidad visual entre el espacio interior y el exterior. En la era digital ha surgido una nueva continuidad visual que Paul Virilio define como la “óptica transhorizonte que permite ver lo que hasta hace poco estaba fuera de la vista”⁸². Esta continuidad, que ahora es audio-visual, se basa en lo que Virilio describe como el horizonte artificial de la pantalla. Un horizonte que forma parte de la “perspectiva mediática” que se sobrepone a la perspectiva inmediata del espacio físico,⁸³ y genera un desdoblamiento que descompone la realidad entre “la *realidad actual* de las apariencias inmediatas [y] la *realidad virtual* de las transparencias mediáticas”⁸⁴. En otras palabras, la “transparencia mediática” introducida por la pantalla-ordenador ha permitido ver más allá de las limitaciones espaciales y físicas de la realidad material, al conectar lugares geográficamente remotos y permitirnos ver más allá de lo aparente y lo corpóreo. Consecuentemente, Virilio concluye

“La famosa ‘realidad virtual’, pues, no es tanto la navegación en el ciberespacio de las redes, como la amplificación del espesor óptico de las apariencias del mundo real”⁸⁵.

Del mismo modo en que la transparencia del vidrio facilitó la continuidad visual entre el espacio interior y el exterior, dando lugar a una nueva continuidad en la que el espacio deja de concebirse como un recinto cerrado, con la transparencia mediática se consigue observar más allá de lo aparente y lo corpóreo, vinculando así la realidad física con la inmaterial. Por un lado, la continuidad audiovisual de Internet ha permitido la conexión instantánea con lugares, entidades y personas geográficamente inconexas, hecho que acarrea un nuevo tipo de espacio o espacialidad. Por otro lado, la transparencia mediática ha permitido “ver” fenómenos hasta ahora invisibles. Igualmente, los fenómenos naturales pueden aprehenderse, reproducirse y manipularse con el soporte de medios digitales, para convertirlos en “materiales arquitectónicos”.

⁸¹ ROWE, C., & SLUTZKY, R. Transparencia: literal y fenomenal. En C. Rowe, *Manierismo y arquitectura y otros ensayos* (Tercera ed.). Gustavo Gili, 1999.

⁸² VIRILIO, P. *La bomba informática*. Madrid: Cátedra, 1999. p. 23

⁸³ Ibídem, p. 24

⁸⁴ Ibídem, p. 25

⁸⁵ Ibídem, p. 24

2.2.1.1 Del entorno físico a los entornos digitales

“Existen actualmente dos universos paralelos: un universo analógico cotidiano, en el que vivimos, y un nuevo universo digital creado por los humanos, pero habitado por máquinas digitales”⁸⁶.

Paul Saffo

“The rise of digital culture is inseparable from the spectacular progress of the interface between man and machine, and generally between the physical and the electronic worlds. Mostly visual at first, these interfaces more and more often involve speech, touch and movement”⁸⁷.

Antoine Picon

El advenimiento de las tecnologías digitales ha venido acompañado del desarrollo de un entorno digital, al cual Saffo y Picon se refieren como un “universo digital” o “mundo electrónico” que se sobrepone e interactúa con el entorno físico. Los diferentes términos utilizados por estos autores, junto con otras expresiones como “mundo digital” de Negroponte, o “realidad virtual” de Virilio, aluden a las diversas interpretaciones que se han generado en torno a la interacción entre los humanos y los ordenadores o entre el universo digital y el analógico. Según éstas expresiones, el entorno digital se compone de diferentes capas o espacios correspondientes a los diversos tipos de interacciones que pueden generarse a través del ordenador. En este sentido, Yehuda Kalay sugiere que la interacción con el ordenador ha dado lugar a tres tipos de entornos digitales: el “entorno de diseño”, el “entorno virtual” y el “entorno físico-habitable”⁸⁸.

El entorno de diseño se refiere a la necesidad de diseñar “dentro” del ordenador, un hecho que, según Kalay, transforma el ordenador en el “lugar” donde ocurre el diseño.⁸⁹ Asimismo, al convertirse en el lugar donde acontece el diseño, el ordenador ha transformado los procesos de producción y colaboración profesional, al propiciar un espacio de trabajo que supera los límites espacio-temporales existentes. En términos de Virilio, el diseñador opera en un espacio que reemplaza el fundamento geográfico de los continentes, en beneficio de los “telecontinentes” de la comunicación mundial casi instantánea,⁹⁰ desde la cual se opera en un “tiempo mundial” donde la simultaneidad de las acciones prima sobre su carácter sucesivo.⁹¹ Esto quiere decir que el entorno de diseño es un espacio de trabajo en donde se han reconfigurado las relaciones de producción, no solo entre el arquitecto y su herramienta de diseño (el ordenador), sino entre los diferentes agentes que intervienen en el proyecto. Si anteriormente los agentes

⁸⁶ SAFFO, P. Sensors: The Next Wave of Information. En MITCHELL, W. *E-topía: vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001. p.39

⁸⁷ PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Op.cit., p. 49

⁸⁸ KALAY, Y. *Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design*. Cambridge (Massachusetts); London: MIT Press, 2004. pp. 78-81

⁸⁹ Ibídem, p. 78

⁹⁰ VIRILIO. Op.cit., p. 18

⁹¹ Ibídem, pp. 22-23

estaban dispersos en el espacio y actuaban secuencialmente en el tiempo, en el entorno de diseño se ubican y actúan en un mismo plano espacio-temporal.

La simultaneidad espacio-temporal del entorno de diseño caracteriza el entorno virtual, o ciberespacio, que hace referencia al espacio de la información creado por Internet. Kalay considera que este espacio es una extensión de nuestra experiencia física y temporal, el escenario común donde confluyen la economía, la cultura, la educación, el ocio y otras actividades cotidianas.⁹² Al conectar con las estructuras y actividades de nuestra cotidianidad, el entorno virtual condiciona nuestra cultura pues influye sobre hábitos y rituales y, por consiguiente, afecta nuestra conducta y manera de percibir la realidad.⁹³ Esta conexión entre el espacio físico y el ciberespacio, según Mitchell, ha creado un nuevo contexto para nuestras actividades cotidianas donde un lugar con una configuración espacial y material específica, habitada por grupos de gente con sus costumbres locales y su cultura, puede relacionarse visual y acústicamente con otros ambientes y personas que se encuentran en lugares distintos.⁹⁴ Mitchell considera que:

“[...] nuestras acciones en el espacio físico están estrecha y directamente emparejadas con nuestras acciones en el ciberespacio. Llegamos a ser verdaderos habitantes de entornos electrónicos, en lugar de meros usuarios de artefactos informáticos”⁹⁵.

En este sentido, Mitchell se alinea con Picon y Saffo respecto a la concatenación entre el ciberespacio y el espacio físico, entre el universo analógico y el digital, a través de redes telemáticas que facilitan flujos de información entre humanos y máquinas o entre humanos a través de máquinas. Los puntos de acceso al ciberespacio son los elementos que actúan como interfaz entre el mundo físico y el digital, siendo las pantallas los principales dispositivos que permiten esta interacción. En una sociedad sometida a la proliferación de pantallas,⁹⁶ la ubiquidad de estos puntos de conexión entre el espacio físico y el ciberespacio ha generado “lugares inteligentes donde fluyen con abundancia los bits y donde el mundo físico y el digital se superponen”⁹⁷. Por ello, Mitchell sugiere que somos “habitantes de entornos electrónicos” y considera los edificios “robots donde habitar”, dotados de sistemas nerviosos artificiales, sensores, pantallas y equipos controlados por ordenador para responder activamente a las necesidades de sus habitantes.⁹⁸

La concepción del edificio como “robot donde habitar” puede entenderse como la actualización del concepto de “máquina de habitar” de Le Corbusier, que respondió al

⁹² Kalay. Op.cit., pp. 79-80

⁹³ PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Design Professions*. Op.cit., p. 50

⁹⁴ MITCHELL, W. *E-topía: vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos*. Op.cit., pp. 37-38

⁹⁵ Ibídem, p. 50

⁹⁶ LIPOVETSKY, G., y SERROY, J. *La pantalla global: Cultura mediática y cine en la era hipermoderna*. Barcelona: Anagrama, 2009. p. 268

⁹⁷ MITCHELL, W. *E-topía: vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos*. Op.cit., p. 37

⁹⁸ Ibídem, p. 65

diseño de la vivienda como una máquina que hace el trabajo diario lo más rápido y simple posible, sin olvidar el confort.⁹⁹ Mientras que Le Corbusier entendió la vivienda como una “máquina de habitar” compuesta de un sistema de instalaciones mecánicas que garantizaban el bienestar del individuo,¹⁰⁰ Mitchell la consideró un “robot de habitar” dotado de un sistema de instalaciones mecánico-electrónico, que automatiza su funcionamiento y la torna en un “lugar inteligente”.

Bajo la noción de “lugar inteligente” o de “lugar electrónico”, Mitchell hace referencia al concepto de “computación ubicua” acuñado por Mark Weisser en los años 1990, quién propuso que más allá de simular el mundo real, la realidad virtual podía mejorar la realidad existente extrayendo de los medios tecnológicos la virtualidad de los datos informáticos para transponerlos al mundo físico¹⁰¹. En otras palabras, que la información generada por el ordenador se utilice para cambiar el entorno físico. Con este objetivo propuso la miniaturización e integración de ordenadores en los objetos reales para hacerlos imperceptibles a la percepción humana¹⁰² y, sobre todo, para animar objetos hasta ahora inertes.¹⁰³ En este contexto, la proliferación de pantallas junto a la integración de sensores y actuadores electrónicos en objetos, ha permitido tornar los edificios en objetos interactivos capaces de reaccionar a los estímulos del medio en que se encuentran, actuando como interfaz entre el entorno físico y el ciberespacio. Gracias a ello, el espacio arquitectónico adquiere las cualidades de los “lugares electrónicos” descritos por Mitchell, donde “el espacio carnal y el ciberespacio [o] la biomasa y la infomasa, se cruzan y combinan de alguna forma eficaz para sostener una actividad humana particular”, de manera que acaban siendo “lugares [donde] una acción física invoca un proceso informático; y donde los procesos informáticos se manifiestan físicamente”¹⁰⁴.

La interacción entre el espacio físico y el ciberespacio, mediante edificios inteligentes e interactivos, caracteriza el tercer entorno digital propuesto por Kalay: el entorno físico-habitable. En este entorno la interacción entre el mundo físico y el ciberespacio crea un “paisaje electrónico” donde los fenómenos naturales como la temperatura, la humedad y la iluminación, pueden manipularse según los deseos y necesidades del habitante.¹⁰⁵

⁹⁹ “A house has two functions. First *a machine for living*, which means a machine designed to make our daily work as rapid and as simple as possible, and to look for our bodily needs attentively, providing comfort.” LE CORBUSIER. En JENGER, J (Ed.). *Le Corbusier. Architect, Painter, Poet*. New York: Abrams, 1993, p. 129.

¹⁰⁰ Le Corbusier declaró: “Una casa es una máquina de habitar. Baños, sol, agua caliente, agua fría, temperatura a voluntad, conservación de los alimentos, higiene, belleza mediante la proporción.” LE CORBUSIER. *Hacia una arquitectura*. Op.cit., p. 73

¹⁰¹ WEISER, M. *The Computer of the 21st Century*. *Scientific American*, 265 (3), 1991. p. 79

¹⁰² Según Weiser, las tecnologías más profundas son aquellas que se disuelven en nuestra cotidianidad hasta el punto de que se hacen irreconocibles dentro de ella. Por ejemplo, la escritura, considerada como la primera tecnología de la información, permitiría capturar el lenguaje hablado en una representación simbólica, permitiendo almacenar y liberar la información de la memoria individual. Actualmente la escritura es ubicua, lo que ha permitido ir más allá de la técnica de la escritura en sí, para centrarse en el contenido, es decir, en las posibilidades operativas de la información. Ibidem, p. 78

¹⁰³ Ibídем, p. 86

¹⁰⁴ MITCHELL, W. *E-topía: vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos*. Op.cit., p. 38

¹⁰⁵ KALAY. Op.cit., p. 79

Precisamente, la percepción, digitalización y manipulación de fenómenos naturales que ocurre en el entorno físico-habitable son acciones inherentes a la materialidad digital, entendida como un proceso que considera los fenómenos como material de trabajo, esto es, un proceso de desterritorialización de los fenómenos a partir de su transformación en bits que, al actualizarse, cambian de naturaleza manifestándose como efectos o sensaciones atmosféricas.

2.2.1.2 El fenómeno como material arquitectónico

“The next step is to oppose the ideology of Information with a philosophy of Incarnation”¹⁰⁶.

Bernard Cache

En su ensayo *Objecticle: The Pursuit of Philosophy by Other Means?*, Bernard Cache plantea la “búsqueda” o “persecución” de una filosofía (*pursuit of philosophy*) que se ocupa y compromete con los modos de producción.¹⁰⁷ El modo de producción del cual se ocupa Cache es la “producción no-estándar”, que se ha convertido en un pilar de la fabricación y la materialidad digital¹⁰⁸ y que requiere el empleo de medios sistemáticos y materiales.¹⁰⁹ Cache propone utilizar las matemáticas como medio de producción sistemático y considera al algoritmo un objeto manufacturado.¹¹⁰ En cuanto al medio de producción material, Cache lo explica a partir del concepto de “inmaterialismo” de Bergson, quien consideró que “matter has no inside, no underside ... hides nothing, holds nothing ... possesses neither power, nor virtuality of any kind ... extends as a surface and coheres at every moment in everything it gives”¹¹¹. Bajo este punto de vista, la “materia” se presenta como el elemento mínimo a partir del cual se conforma nuestro entorno. En palabras de Cache:

“Matter is thus simultaneously that by which everything is given, reducible to pure quantity [...] as well as which constitutes the most relaxed membrane, the qualitative residue without which quantity does not exist. It is the minimal colour without which there is no black or white, the fundamental noise without which there is no signal”¹¹².

Desde esta perspectiva, la materia es reducible a pura cantidad, al mismo tiempo que es el mínimo elemento con cualidades propias. Esta idea de la materia como elemento mínimo y fundamental, es análoga a la definición de bit propuesta por Negroponte: “Un bit no tiene color, tamaño ni peso y viaja a la velocidad de la luz. Es el elemento más

¹⁰⁶ CACHE. Op.cit., p. 25

¹⁰⁷ Ibídem, p. 20

¹⁰⁸ El modo de “producción no-estándar” se analizará en el Capítulo 3.

¹⁰⁹ CACHE. Op.cit., p. 21

¹¹⁰ “mathematics has effectively become a manufactured object”. Ibídem, p. 22

¹¹¹ DELEUZE, G. *Bergsonism*. En Ibidem pp. 25-26

¹¹² Ibídem, p.26

pequeño en el ADN de la información”¹¹³. Se puede deducir de ello que ambos autores equiparan el átomo y el bit como elementos mínimos del entorno físico y digital, además de reconocer las posibilidades inherentes a su interacción.

De acuerdo con Negroponte y Cache, la interacción entre el entorno físico y el digital implica la digitalización, en tanto que las señales auditivas y visuales se convierten en “cadenas de bits” o “series digitales” inscritas en el entorno virtual. En consecuencia, la señal que se transforma en información requiere actualizarse en el entorno físico-habitable, a través de un soporte físico que la reconvierte en una señal auditiva o visual:

“The source coding has to be backed up by channel coding. In fact, any text, any sound, any image may in future be reduced to a digital series, but a bit stream –a series of ones and zeros– is nothing until it is recomposed in a given platform, at a predetermined clock time. This is how a digital series can effectively become a sound on a stereophonic membrane or an image in a video screen. This is how digital series become analogue flesh [...] It is the act whereby a bit of information is incarnated through a perceptual support [...] and numbers become sounds or images”¹¹⁴.

Al igual que ocurre con las pantallas o los equipos de audio, los edificios son un soporte a través de los cuales los bits se encarnan en imágenes y sonidos. Según esto, la arquitectura puede actuar como interfaz entre el entorno virtual y el físico-habitable, en tanto la miniaturización e integración de ordenadores ha permitido que los edificios puedan percibir, manipular y representar información. En términos de Negroponte, esta experiencia arquitectónica cumple las tres propiedades necesarias para tornar el edificio en interfaz: es un evento, que permite percibir fenómenos visuales, auditivos, olfativos, táctiles o extrasensoriales; es una manifestación, que consiste en medir y manipular el evento de acuerdo con unos parámetros; es una representación, que requiere mapear la información del evento en un receptor como puede ser la fachada del edificio.¹¹⁵ Para Cache, sin embargo, la representación del evento no se reduce a la reproducción exacta de la señal, sino que propone realizar un “montaje digital” en el que las señales cambian de naturaleza, en el que sea posible “visualizar sonidos” o “escuchar imágenes”.¹¹⁶

¹¹³ NEGROPONTE. Op.cit., p. 12

¹¹⁴ CACHE. Op.cit., p. 25

¹¹⁵ NEGROPONTE. Op.cit., p. 12

¹¹⁶ CACHE. Op.cit., p. 21

2.2.1.3 La arquitectura como interfaz

Toyo Ito y Jean Nouvel fueron pioneros en explorar las posibilidades de concebir el edificio como una interfaz, integrando sensores para aprehender fenómenos naturales y transfiérmalos en expresiones-efectos arquitectónicos.

Según Ito, el entorno urbano está compuesto por dos tipos de ciudad: una ciudad como objeto material, constituida por objetos físicos; y una ciudad como fenómeno, la ciudad como información, la ciudad virtual como acontecimiento.¹¹⁷ La Torre de los Vientos de Yokohama (1986) es el primero de una serie de proyectos que plantean la posibilidad de crear fenómenos arquitectónicos que responden a la ciudad como fenómeno (Figura 2.10).



Figura 2.10 Torre de los Vientos de Yokohama

El proyecto consistió en remodelar una torre de 20 metros de altura de hormigón armado, que albergaba un depósito de agua y las instalaciones de ventilación de un centro comercial subterráneo. Se revistió la torre con tres capas: una interior de espejos que recubren la superficie de hormigón; una exterior de paneles de aluminio perforado; y una intermedia, compuesta de 1280 mini-lámparas que responden en tiempo real a la intensidad del viento y a los sonidos del entorno, captado todo a través de sensores.¹¹⁸ Esto permitió generar una iluminación intermitente basada en la interacción entre la torre y su entorno, de modo que la torre se convierte en “un dispositivo que hace visible el ruido existente en el aire de la ciudad”¹¹⁹, y genera un espacio en donde las condiciones atmosféricas se re-construyen y re-presentan de manera dinámica y cambiante.

Mientras Ito trabajaba con fenómenos como el sonido y el viento, Jean Nouvel lo hacía con la luz. En el edificio para el Instituto Árabe de París (1987) tomó como referencia la

¹¹⁷ ITO, T. *Escritos*. Murcia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia, 2007. pp. 115-116

¹¹⁸ MOUSSAVI, F., y KUBO, M. *La función del ornamento*. Barcelona: Actar & Harvard Graduate School of Design, 2008. p.5

¹¹⁹ ITO. Op.cit., p. 124

celosía árabe (*moucharabieh*) para diseñar la fachada sur, con el fin de permitir el paso de la luz manteniendo la intimidad del interior respecto al exterior. Nouvel se refiere a esta fachada como una pared revestida de diafragmas que dan lugar a una geometría variable de círculos y polígonos y dejan pasar la cantidad óptima de luz tanto en el verano como en el invierno.¹²⁰ El control de la luz se realiza por medio de 25.000 diafragmas que componen la fachada, agrupados en 240 paneles cuadrados y conectados a sensores fotosensibles, los que, a su vez, envían la información a un ordenador central que regula su apertura, por medio de 250 motores, de acuerdo con la intensidad lumínica.

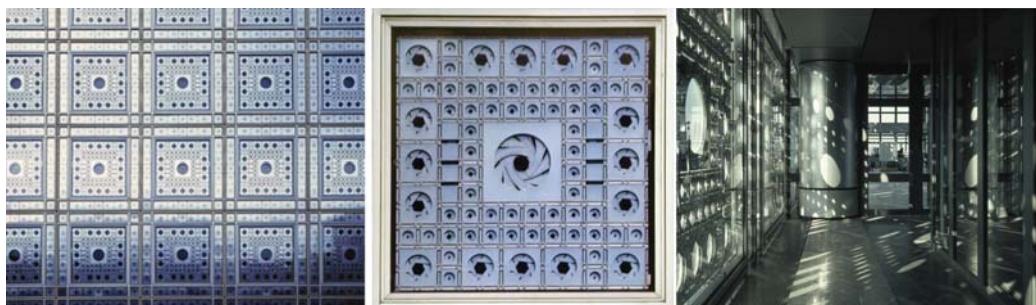


Figura 2.11 Instituto Árabe de París

Contrariamente a la torre de Ito, que genera una respuesta fenomenológica a través de frecuencias-intensidades lumínicas que transforman el espacio contiguo, en el caso de Nouvel la respuesta del edificio es de carácter físico-estructural, ya que a pesar de crear diversas sensaciones atmosféricas –lumínicas– en el espacio interior, estas responden a un efecto cinético de la fachada que se produce mecánicamente (Figura 2.11).

2.2.1.4 El espacio como “campo”

“La arquitectura ya no es simplemente un juego de volúmenes bajo la luz; ahora incluye el juego de la información digital bajo el espacio”¹²¹.

William Mitchell

El “juego de información digital bajo el espacio”, al cual se refiere Mitchell, se hace eco de la noción de “campo” expuesta por Stanford Kwinter y Stan Allen, la cual, a su vez, se remonta a la teoría del espacio como un campo de fuerzas propuesta por Nietzsche. Según el filósofo, el “espacio” es un campo de fuerzas generado por el movimiento corporal, es decir, no es tanto un vacío que alberga actividades, sino un campo animado por los acontecimientos que ocurren dentro de él. En este sentido, Nietzsche manifestaba: “I believe in absolute space as a substratum of force”¹²²; una idea que recuerda la noción de espacio que Moholy-Nagy propuso en los años 1920, según la

¹²⁰ BACHMAN, L. *Jean Nouvel. Una lezione in Italia*. Milán: Skira, 1996, p. 82

¹²¹ MITCHELL, W. *E-topía: vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos*. Op.cit., p. 48

¹²² NIETZSCHE, F. *The Will to Power*. En FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. Op.cit., p. 259

cual el espacio sería un “campo continuo de fuerzas” activado por el movimiento de las personas.¹²³ En la década de 1980, Stanford Kwinter reformuló esta idea del espacio de la siguiente manera:

“El campo describe un espacio de propagación, de efectos. No incluye materia o puntos materiales, sino funciones, vectores y velocidades. Describe relaciones internas de diferencia dentro de campos de celeridad, de transmisión o de puntos de aceleración”¹²⁴.

Asimismo, Stan Allen consideró que el “campo” es un sistema de fuerzas complejo y dinámico:

“Las configuraciones de campo son conjuntos unidos de forma flexible que se caracterizan por su porosidad y conectividad interna. La forma y extensión global son altamente fluidas y tienen menos importancia que la relación interna de las partes, que es lo que determina el comportamiento del campo. Los campos no funcionan ni mediante mallas reguladoras ni mediante relaciones convencionales de axialidad, simetría y jerarquía”¹²⁵.

Al desligar el “campo” de las mallas reguladoras y de las relaciones convencionales, la noción contemporánea de “espacio” se opone a la noción de “espacio cartesiano” que fue asumida por la arquitectura moderna. Una oposición que, implícitamente, rechaza la concepción del espacio como algo homogéneo para entenderlo como un conjunto de multiplicidades. Por consiguiente, a diferencia del “campo continuo de fuerzas” planteado por Moholy-Nagy en donde el “campo” es generado por el individuo, hoy se plantea que el “campo” se produce a partir de múltiples funciones, vectores, velocidades y flujos que, más allá de delimitar su extensión o forma, determinan su comportamiento. Bajo esta perspectiva, lo que caracteriza el espacio es su comportamiento más que su forma o sus límites.

El interés por el comportamiento del espacio se traslada a los edificios que se conciben en términos de interacción entre el entorno físico y el ciberespacio. Según esto, el edificio es una interfaz que permite visualizar fenómenos invisibles que se han digitalizado y *reterritorializado*. En este sentido, las variaciones lumínicas generadas por la Torre de los Vientos son el registro visual de las fuerzas invisibles del entorno, como son las ondas sonoras o los flujos de viento. Asimismo, el movimiento de la fachada del Instituto Árabe es una función-acción que regula la iluminación de su espacio interior. Las propuestas de Ito y Nouvel fueron los primeros ejemplos de una nueva concepción del espacio que, de acuerdo con Philippe Rahm,

¹²³ LÁSZLÓ MOHOLY-NAGY. *The New Vision*. En Ibídem

¹²⁴ KWINTER, S. En ALLEN, S. Del objeto al campo: condiciones de campo en la arquitectura y el urbanismo. En ÁBALOS, I. (Ed.). *Naturaleza y artificio: el ideal pintoresco en la arquitectura y el paisajismo contemporáneos*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 149

¹²⁵ Ibídем, p. 150

“[...] suggests that the traditional way of tracing the contours of space with walls and floors to clearly separate two spaces, one inside and one outside, can be displaced in favour of a mode of composition in which spaces are created by [...] gradations of heat, vapour, noise, or air pollution”¹²⁶.

Al sugerir que el espacio se crea a partir de las gradaciones de calor, vapor, ruido y polución, Rahm no solo sugiere un nuevo paradigma espacial, sino también una nueva materialidad arquitectónica que comprende los fenómenos y su interacción con la materia. Se puede deducir de ello que las tecnologías digitales permiten superar la dualidad que contrapone las ideas a la sustancia, para dar cabida a una nueva noción de la materia que comprende tanto la sustancia como el fenómeno o, en términos de Picon,

“With the computer, besides flows and deformation, other phenomena become so easy to manipulate that they assume the status of quasi-objects for the architect”¹²⁷.

El estatus de “cuasi-objeto”, que Picon atribuye al fenómeno, así como su empleo en la configuración del espacio que sugiere Rahm, son cualidades fundamentales de una nueva materialidad que Farshid Moussavi ha denominado “supramaterialidad” y que consiste en

“[An] approach toward materiality, away from understanding of material as exclusively physical and tangible, to include physical and non-physical –climate, sound or economics as well as wood, steel or glass. [...] Today, abstract and dynamic materials can be precisely measured and visualized with the aid of digital software, and merged with concrete materials used to produce design built forms”¹²⁸.

En resumen, las tecnologías digitales han dado lugar a una transparencia mediática que nos permite percibir fenómenos que hasta ahora eran invisibles y, sobre todo, digitalizarlos, codificarlos, procesarlos y recomponerlos durante el proceso de diseño para generar nuevas expresiones arquitectónicas. La transparencia mediática no solo ha dado lugar a una nueva espacialidad basada en la interacción entre el entorno físico y los entornos digitales, sino que se encuentra ligada a la nueva materialidad digital donde los flujos de información convierten el fenómeno en objeto de diseño, al igual que se abren las puertas a una “arquitectura inteligente” que reacciona y se adapta a los estímulos del entorno. En este sentido, la transparencia mediática es un aspecto de la

¹²⁶ RAHM, P. *Gradating Spaces: Plot, Contour vs. Sfumato, Dimming in Architecture*. In LORENZO-EIROA, & SPRECHER (Edits.). *Architecture In Formation: On the Nature of Information in Digital Architecture*. New York: Routledge, 2013. p. 157

¹²⁷ PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Op.cit., p. 150

¹²⁸ MOUSSAVI, F. *The Function of Form*. Barcelona: Actar & Harvard University School of Design, 2009, p. 8

materialidad digital a partir del cual la información actúa sobre las cualidades espaciales o atmosféricas del edificio, más allá de su configuración formal-material.

2.2.2 Del dibujo en papel al modelo digital

“Buildings were once materialized drawing, but now, increasingly, they are materialized digital information – designed with help of computer-aided design systems, fabricated by means of digitally controlled machinery, put together on site with assistance with digital layout and positioning devices, and generally inseparable from flows of information through global computer networks”¹²⁹.

William Mitchell

Según Mitchell, los “dibujos materializados” pasaron a convertirse, tras el advenimiento del ordenador, en “información digital materializada”. Tanto el dibujo en papel como el modelo digital son herramientas de diseño que se utilizan para concebir y comunicar un proyecto. Para analizar y reflexionar sobre una idea de diseño, ésta debe comunicarse, es decir, externalizarse por un medio de la expresión verbal o de la representación gráfica y simbólica. Por tanto, la función de las herramientas de diseño consiste en hacer inteligibles y comunicables las ideas que subyacen en el proyecto, tanto al diseñador como a los diferentes actores que intervienen en el mismo,¹³⁰ a lo largo de las diferentes fases del proceso de diseño.

Según Kalay,¹³¹ el proceso de diseño comienza con la formulación de un problema y sus posibles soluciones, teniendo en cuenta las restricciones existentes y las variables posibles. A partir de esta información se pasa a la fase de “generación” o “síntesis de soluciones”. De este modo se determinan las formas, los materiales, las condiciones ambientales y los efectos espaciales que guiarán la exploración y generación de soluciones de diseño. Posteriormente, se evalúan las soluciones para verificar si responden a las restricciones, las variables y los objetivos de diseño preestablecidos, es decir, se verifican las concordancias y discordancias entre las soluciones y los objetivos de diseño. La fase de evaluación permite reconocer si una solución es satisfactoria o si es necesario reconsiderar los objetivos del proyecto. Por consiguiente, la evaluación implica un proceso de retroalimentación que permite replantear los problemas, los objetivos o las soluciones de diseño.

¹²⁹ MITCHELL, W. Constructing Complexity. In MARTENS, B., & BROWN, A. (Eds.), *Computer Aided Architectural Design Futures 2005. Proceedings of the 11th International CAAD Futures Conference held at the Vienna University of Technology, Vienna, Austria, on June 20-22, 2005*. Dordrecht: Springer, 2005, p. 41

¹³⁰ GÄNSHIRT, C. *Tools for Ideas. An Introduction to Architectural Design*. Basilea, Boston, Berlín: Birkhäuser, 2007, pp. 60, 65

¹³¹ KALAY. Op.cit., pp. 9-13

A lo largo de estas fases del proceso de diseño existe una comunicación entre los diversos actores del proyecto –arquitectos, ingenieros, proveedores, constructores y clientes– quienes pueden intervenir para evaluar, mejorar o proponer nuevas soluciones. La diversidad de la información generada por los diferentes integrantes hace necesario emplear diferentes medios de representación –dibujos, vistas, modelos y textos–. Como sostiene Kalay,

“Communication is much more complex than is evident in any one means chosen for its representation: it is a process of encoding and decoding information, using the medium that can afford the transfer of ideas, the design process, and across the different phases of the process itself”¹³².

Es decir, la comunicación en el contexto del desarrollo de un proyecto arquitectónico implica la codificación y decodificación de información a través de diferentes medios, para que ésta pueda ser comprendida por los diversos actores que intervienen a lo largo del mismo.

2.2.2.1 Comunicación de la información sobre el proyecto

El dibujo y los modelos digitales son herramientas para representar y comunicar ideas durante el proceso de diseño, en dos ámbitos diferenciados, uno interno y otro externo. En los procesos internos, también conocidos como “ideación”, el diseñador se comunica consigo mismo durante la síntesis, la evaluación y la transformación de las ideas o soluciones de diseño; en los procesos externos, el diseñador comunica a otros actores la evolución de las ideas o soluciones para evaluar el proyecto y construir el edificio.¹³³

La ideación conlleva la existencia de un conocimiento implícito al diseñador, conocimiento que se hace explícito a partir de su interacción con los medios de representación.¹³⁴ La interacción que se produce entre el diseñador y el modelo digital es un factor que permite diferenciarlo del dibujo en papel. De acuerdo con Oxman, existen dos tipos de interacción entre el diseñador y su medio de representación, la interna y la externa.¹³⁵ La interacción externa conlleva una relación directa con la forma, en tanto que el diseñador la representa y manipula directamente; por ejemplo, en el dibujo en papel el diseñador interactúa directamente con las formas que dibuja, o en el caso de un modelo físico, con los materiales a partir de los que se genera la forma. Por el contrario, en la interacción interna se genera una relación indirecta con la forma, en la medida que se genera y representa a través de un medio, como los modelos digitales, donde la interacción se produce a través de un ordenador.

¹³² Ibídem, p. 1

¹³³ Ibídem, pp. 99, 189-190

¹³⁴ JONES, J. C. *Design Methods*. London: John Wiley & Sons, 1992, p. 45; OXMAN, R. Theory and Design in the Digital Age. In *The International Journal of Design Studies*. Op.cit., p. 243

¹³⁵ OXMAN, R. Theory and Design in the Digital Age. In *The International Journal of Design Studies*. Op.cit., pp. 242-244

En la interacción externa, la representación del conocimiento generado durante la ideación no se formaliza o recopila en un medio lingüístico, numérico, simbólico o geométrico. Esto dificulta la percepción, reproducción, transformación o evaluación de la información y el conocimiento implícito en las formas. Por el contrario, un modelo digital puede contener la información y el conocimiento producidos en la ideación, es decir, permite externalizar la información y el conocimiento –desde la interacción entre el diseñador y el modelo–, facilitando con ello su evaluación y manipulación por parte de otros actores del proyecto. La capacidad de externalizar las ideas a través de la construcción de un modelo digital, ha ayudado a que el diseño deje de ser un acto creativo misterioso, para ser un proceso que puede comprenderse racionalmente dentro de ciertos límites¹³⁶ o, como sostuvo Christopher Jones, para que lo que ocurre en la mente del diseñador, de manera parcialmente inconsciente e inexplicable, deje de ser un misterio creativo.¹³⁷ En este sentido, Kalay considera que

“Computing technology allows the ‘externalization’ of internal representations. A model of the problem context and the design solution can be created in a digital form that serves to support the designer’s ‘internal’ ideation process in a manner similar to –but more powerful than– hand-draw sketches, drawings and models. The computer can help the designer to analyze the problem and manage the connections between the results of the analysis and the emerging design solution”¹³⁸.

Durante las fases del proceso de diseño se producen diferentes tipos de información y de conocimiento, las cuales, a su vez, requieren diferentes formas de representación. En el caso del dibujo en papel, la información generada por el diseñador o proyectista se expresa mediante dibujos de diseño, de presentación y de producción.¹³⁹

2.2.2.2 Dibujos de diseño, presentación, y producción

El “dibujo de diseño” (*design drawing*) tiene una función generativa, por ser el medio de representación gráfica que permite al diseñador expresar sus ideas y reflexionar sobre ellas durante el proceso de ideación. En la fase inicial de un proyecto, los problemas y objetivos no se encuentran totalmente especificados y la multiplicidad de posibles soluciones impide que alguna de ellas pueda desarrollarse sistemáticamente. Los problemas y las soluciones de diseño inicialmente se encuentran en un estado abstracto que se va concretando a partir de un proceso cognitivo, basado en la interacción entre el diseñador y el objeto de diseño, proceso que fue definido por

¹³⁶ GÄNSHIRT, Op.cit., p. 65

¹³⁷ JONES, Op.cit., p. 46

¹³⁸ KALAY, Op.cit., p. 190

¹³⁹ LAWSON, B. *How Designers Think. The Design Process Demystified* (Third ed.). Oxford: Architectural Press, 1980, p. 24

Donald Schön como “reflexión-en-acción”.¹⁴⁰ Este tipo de interacción implica un diálogo interior del diseñador consigo mismo, que al ser registrado a través de dibujos esquemáticos –croquis, esbozos– ilustra tanto la definición del problema como sus posibles soluciones, tal como sostiene Kalay:

“The sketch, therefore, becomes the external means of communication that supports the designer’s own ideation process: it may mean little to outside observers, who would be hard pressed to make sense of such sketches [...] Yet, to the designer, it is highly abstracted but fully interpretable record of the thinking process”¹⁴¹.

Los croquis son dibujos abstractos que visualizan el objeto de diseño y registran su proceso creativo. Por tanto, estos dibujos no aportan la información esperada por el cliente. Los dibujos para comunicarse con el cliente serían los “dibujos de presentación”, en tanto que facilitan la comunicación a través de imágenes que no se interpretan, como los croquis, sino que visualizan de manera inequívoca un diseño a través de ilustraciones o perspectivas.

El “dibujo de producción” sería el medio para comunicar la información al constructor, para especificar las características de los elementos constructivos que faciliten su puesta en obra: el “dibujo de producción” implica una descripción precisa de los componentes constructivos que permite estimar los costes y establecer los procedimientos constructivos.

2.2.2.3 El modelo digital

Los dibujos de diseño, presentación y producción de un proyecto arquitectónico se producen separadamente y, por eso, la información que contienen queda fragmentada en diferentes documentos. Por el contrario, cuando esta información se genera con modelos digitales, puede almacenarse en una estructura de información única. Mientras un dibujo suele responder una función específica –por ejemplo, un plano de estructuras o de instalaciones a una escala determinada–, un modelo digital permite extraer múltiples representaciones a partir de un único modelo que las contiene a todas.

2.2.2.3.1 La información como materia prima

Los modelos digitales son estructuras de información que permiten generar, evaluar y representar un diseño, además de fabricarlo. La información que contienen se procesa con diversas herramientas según los objetivos y las acciones en cada fase del diseño. Por ejemplo, el proceso para generar una imagen de un proyecto es distinto al proceso

¹⁴⁰ SCHÖN, D. *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*. In KALAY. Op.cit., p.

100

¹⁴¹ Ibídem, p. 102

para evaluar su comportamiento estructural, aunque el modelo digital sea el mismo. Es decir, que el modelo digital puede utilizarse de varias maneras con diferentes objetivos, como representar un edificio a través de plantas, secciones y axonometrías, o representarlo con un *render* para visualizar los materiales o la iluminación de los espacios. Asimismo, el modelo digital puede usarse para generar el proyecto de un modo manual-intuitivo, basándose en la experiencia e imaginación del arquitecto o aplicando el cálculo computacional para generar formas y evaluar sus prestaciones.

Un modelo digital permite calcular el área de las superficies para estimar costes y el rendimiento energético, para realizar un cálculo volumétrico que permita analizar estructuralmente sus componentes o hacer mediciones de materiales. Esta evaluación del proyecto a través del modelo digital requiere otra información más allá de sus atributos geométricos, como puede ser el tipo y las propiedades de los materiales, los costes o el comportamiento del edificio bajo ciertas condiciones. De este modo, con un modelo digital se puede reproducir la complejidad de la realidad pues permite trabajar con una multiplicidad de variables, contrariamente al dibujo en papel, que es una representación simplificada que aporta información únicamente sobre una o algunas pocas variables. Por consiguiente, el modelo digital es un objeto único con diversas capas de información que pueden emplearse de varias maneras durante el proceso de diseño. En palabras de Christian Gänshirt,

“Scarcely any other design tool has changed so much as a result of digitalization as drawing. The traditional two-dimensional drawing has literally acquired any number of extra dimensions. [...] The simple drawing becomes a complex, poly-dimensional data structure that can be linked with other data at will and presented in a whole variety of ways [...] Something that was one project in the mind of the person who created the design, presented in different ways with the aid of various design tools, now comes together again as one digital data structure”¹⁴².

Si el modelo digital se utiliza únicamente como herramienta de representación, al igual que el dibujo en papel, no ofrece ninguna explicación causal del diseño, ni aporta información sobre sus intenciones o funcionamiento.¹⁴³ En este sentido, un modelo digital es meramente una herramienta de representación que permite automatizar los dibujos de producción y los dibujos de presentación.

2.2.2.3.2 De la descripción a la predicción

De acuerdo con Peter Szalapaj, la utilidad de los modelos digitales no está en su capacidad de representación sino en su capacidad para realizar evaluaciones precisas del

¹⁴² GÄNSHIRT, Op.cit., pp. 145-146

¹⁴³ JONES, Op.cit., p. 23; LAWSON, Op.cit., pp. 24-25

proyecto,¹⁴⁴ por lo cual plantea que sean utilizados para predecir más que para describir el proyecto. Más allá de representar la forma, el modelo digital se utiliza para analizar soluciones de diseño. Esto es, para predecir y evaluar tanto el modo en que se consiguen los objetivos que ha de cumplir, como los posibles efectos de las decisiones que tome el diseñador. Las dos acciones pueden realizarse con o sin ayuda del ordenador.

Si un modelo digital se utiliza para predecir y evaluar los efectos de una forma predefinida por el arquitecto, el cálculo computacional no influye sobre el diseño en sí, aunque permite verificar a posteriori si la forma planteada se ajusta a los objetivos, o si produce efectos insatisfactorios que requieran redefinir la propuesta o los objetivos de diseño. Cuando el modelo digital se utiliza como medio de predicción y evaluación durante el desarrollo de un proyecto –en el proceso de ideación–, ayuda a clarificar y valorar los objetivos que se persiguen. Por consiguiente, si la evaluación digital se aplica desde las fases iniciales del diseño, se puede comprender mejor el problema así como proponer soluciones más eficaces, tomando decisiones relativas al funcionamiento del edificio durante las fases iniciales del proyecto.¹⁴⁵

La evaluación comprende dos tipos de criterios que Szalapaj define como “intangibles” y “tangibles”.¹⁴⁶ Los criterios intangibles son de carácter estético o compositivo y tienen que ver con aspectos plásticos, conceptuales y culturales; esto es, aspectos que difícilmente pueden evaluarse-computarse con ordenadores, ya que su cuantificación matemática es muy compleja. Por el contrario, los criterios tangibles son cuantificables. Por un lado, se relacionan con la habitabilidad, de manera que evalúan parámetros estructurales, medioambientales, de distribución, de circulación o de funcionamiento del edificio; por el otro, se relacionan con parámetros económicos ligados a los costes y a los modos de producción. Consecuentemente, un modelo digital permite predecir y evaluar el comportamiento y las condiciones del edificio que puedan medirse o cuantificarse, por ejemplo, la estructura, la acústica, la iluminación, la ventilación, la organización, el funcionamiento, el confort térmico, los costes de producción o el consumo de recursos materiales y energéticos en las fases de producción y uso del edificio. En este sentido, la evaluación digital del proyecto mejora las prestaciones de los dibujos de diseño.

La eficacia de un diseño es proporcional al número de parámetros e interacciones que puedan evaluarse conjuntamente. En este contexto, la capacidad de los ordenadores para procesar grandes cantidades de datos de manera simultánea, permite evaluar constantemente el proyecto para optimizarlo o ajustarlo a los objetivos de diseño. A partir de estas evaluaciones se determina si es necesario modificar el proyecto, de modo que se genera un proceso iterativo donde las propuestas y objetivos de diseño se modifican de acuerdo con la concordancia entre los resultados de la evaluación y los

¹⁴⁴ SZALAPAJ, P. *CAD Principles for Architectural Design*. Oxford: Architectural Press, 2001. p. 7

¹⁴⁵ Ibídem, pp. 4, 13

¹⁴⁶ Ibídem, p. 15

objetivos preestablecidos. La evaluación orienta el proceso de diseño como lo explica Kalay:

“The evaluation guides generative process towards achieving the stated objectives, uncovers opportunities to be explored, and indicates tradeoffs that must be made in order to improve the overall quality of the solution”¹⁴⁷.

Además de guiar el proceso generativo, la evaluación digital facilita la externalización del conocimiento que se genera a lo largo del proceso de diseño. Con el dibujo en papel la evaluación la lleva a cabo el diseñador, pero al realizarse con un modelo digital, la información generada se almacena en su estructura y su base de datos.¹⁴⁸ Esta externalización no solo facilita la colaboración con los otros agentes que participan en el proyecto, que pueden compartir la información, sino que vincula los diferentes procesos de modelado y evaluación. Si no hay problemas de compatibilidad entre el modelo y los programas de evaluación, el proyecto puede evaluarse automáticamente.¹⁴⁹ Además de servir para evaluar un proyecto, el modelo digital es la fuente de información para fabricarlo.

En cuanto al proceso de generación formal, la externalización de conocimiento se lleva a cabo mediante *scripts*, es decir, de secuencias de operaciones algebraicas y geométricas –algoritmos– que al ser procesadas generan la forma. Según Mark Burry, el scripting obliga al arquitecto a construir lógicamente el proceso de generación formal, a codificarlo para que pueda ser computado con un ordenador.¹⁵⁰ Así, el script hace el papel de interfaz entre el conocimiento del arquitecto y la estructura de datos que soporta la geometría del proyecto. De esta manera, el objetivo del diseño no es definir la forma sino los procesos que la generan.¹⁵¹

En definitiva, los modelos digitales permiten recopilar, estructurar, producir, procesar e intercambiar información a lo largo de las fases de un proyecto. Esta información se torna en la materia prima de los procesos de representación, evaluación, generación y fabricación digital, a través de su cómputo informático. Y, en la medida que los procesos evaluativos y generativos producen información, ésta no solo actúa como materia prima, sino que se convierte en producto mismo del proceso de diseño digital. Un producto que incrementa el conocimiento y el control sobre el objeto de diseño y, con ello –teóricamente–, la eficacia de las soluciones, el rendimiento del edificio o la eficiencia productiva.

¹⁴⁷ KALAY. Op.cit., p. 302

¹⁴⁸ OXMAN, R. Theory and Design in the Digital Age. In *The International Journal of Design Studies*. Op.cit., p. 248

¹⁴⁹ Ibídem.

¹⁵⁰ BURRY, M. Dimensions. In R. OXMAN, & R. OXMAN (Edits.), *Theories of the Digital in Architecture*. New York: Routledge, 2014 p. 174

¹⁵¹ El empleo del ordenador como herramienta generativa se profundizará en el Capítulo 3.

2.2.2.3.3 La eficiencia del modelo digital

Un dibujo esquemático en papel no puede tornarse en un dibujo de presentación o en un dibujo de producción. Es igualmente estático, ya que cada dibujo debe realizarse desde el inicio e implica posibles errores durante la traducción de un tipo de dibujo a otro. Por el contrario, la función del modelo digital puede cambiar fácilmente a lo largo de las diversas fases de diseño: puede utilizarse en el proceso de ideación para modelar la forma, ya sea de modo intuitivo o aplicando técnicas de generación o análisis; o permite automatizar la generación de plantas, secciones, alzados y perspectivas, así como crear animaciones para recorrer virtualmente el proyecto. Por consiguiente, el modelo digital concentra las funciones de los dibujos de diseño, los dibujos de presentación y los dibujos de producción.

En teoría, un modelo digital puede actualizarse automáticamente frente a los cambios que se producen a lo largo del proyecto. Por ejemplo, si se cambia la forma o la posición de algún elemento, la actualización de este cambio en el dibujo en papel requiere modificar manualmente una gran cantidad de documentos gráficos. En un modelo digital, en cambio, las transformaciones quedan automáticamente reflejadas en las plantas, secciones, alzados y perspectivas que puedan generarse a partir del mismo.

Como pueden ser transmitidos a través de medios telemáticos, los modelos digitales no solo optimizan la comunicación y la toma de decisiones entre los agentes del proyecto – arquitecto, ingeniero, constructor, cliente–, sino que, si se superan los problemas de interoperabilidad, facilitan la continuidad, simultaneidad y sincronización del trabajo. Además, los modelos digitales no solo se emplean en el proceso de diseño, sino también en la construcción llevada a cabo con técnicas de fabricación digital, de modo que permiten la automatización de tareas del proceso constructivo y, por consiguiente, lo optimizan.

2.2.2.4 El paradigma de la digitalización arquitectónica: el Guggenheim de Bilbao

En el proyecto para el Museo Guggenheim de Bilbao finalizado en 1997, Gehry exploró el potencial de las tecnologías digitales disponibles entonces para llevar a cabo el proyecto y para construirlo. Las decisiones durante el proyecto se tomaron a partir de maquetas físicas y esbozos, mientras que el modelo digital permitió analizar y sistematizar las formas generadas con las técnicas tradicionales con el fin de facilitar su construcción. Así, el Guggenheim de Bilbao supuso una experiencia pionera en la utilización de un modelo digital para proyectar y construir edificios de formas complejas y gran tamaño.

2.2.2.4.1 Representación y modelado

Gehry decidió emplear modelos digitales en el proceso de diseño del Guggenheim bajo dos premisas: que el modelo digital mantuviera la expresividad de sus bocetos y maquetas escultóricas y que le permitiera escalar las maquetas de diseño al tamaño de un edificio.¹⁵² En el diseño del Guggenheim de Bilbao la aplicación de tecnologías digitales partió de la digitalización de maquetas de cartón y madera, para convertirlas en un conjunto de puntos, líneas y curvas de un modelo digital construido con CATIA.¹⁵³ En algunos casos no coincidían las aristas generadas a partir de los datos escaneados y se creaban huecos entre ellas. Por ello fue necesario redefinir ciertas superficies para “cerrar” los volúmenes (Figura 2.12).

La información del modelo digital se utilizó para realizar maquetas de espuma empleando una fresadora automatizada (CNC). Esto permitió verificar si la traducción de las maquetas físicas a los modelos digitales era correcta; es decir, si los puntos en el espacio físico se corresponden con los puntos reproducidos en el entorno digital. Cuando la correspondencia entre las maquetas de espuma y el modelo CATIA se solucionó, éste se utilizó como modelo de referencia para el desarrollo de planos y para la coordinación del proceso constructivo.¹⁵⁴ La coordinación se logró conjuntando la información generada por los arquitectos e ingenieros en modelos digitales que compartían la misma ubicación en un sistema de coordenadas.¹⁵⁵ El modelo facilitó la coordinación entre los distintos profesionales y permitió automatizar parte de la producción de casi 200 planos de conjunto y de detalle.

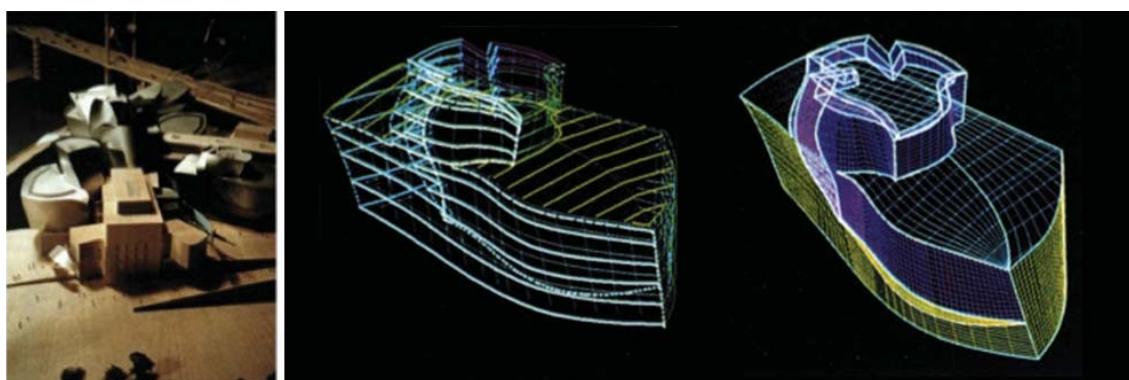


Figura 2.12 Maquetas físicas; modelos digitales realizados con CATIA

¹⁵² SZALAPAJ. Op.cit., p. 191

¹⁵³ De acuerdo con Lindsey, la correspondencia de los puntos en el espacio físico con los puntos reproducidos en el entorno digital es el factor fundamental del proceso de digitalización. Entre las diferentes técnicas de digitalización, las mayormente utilizadas por Gehry son: trazar una serie de líneas sobre el modelo analógico, como si fueran líneas topográficas, para que sean trazadas-delineadas con el digitalizador; trazar una malla sobreponerla al modelo analógico y digitalizar sus puntos de intersección; localizar los puntos límitrofes del modelo analógico para delinejar las aristas que los conectan y definir la forma. LINDSEY, B. *Digital Gehry: Material Resistance Digital Construction*. Basilea: Birkhäuser, 2001, pp. 65-68

¹⁵⁴ Ibídem, p. 44

¹⁵⁵ SZALAPAJ. Op.cit., p. 200

Los archivos CATIA se enviaron en casetes DAT¹⁵⁶ a IDOM –empresa encargada del proyecto de ejecución y de la dirección de obra–, para producir los planos del proyecto.. El ingeniero José Emilio Galíndez Maurenya describió así el proceso de trabajo llevado a cabo por IDOM para completar la información facilitada por CATIA:

“Los ficheros CATIA constituyeron los verdaderos soportes para el desarrollo del proyecto y podían no coincidir con la información de AutoCad. Así, AutoCad proporciona la geometría aproximada de cada módulo y la forma más exacta en todos sus contornos: recortes, aristas, entrantes, etc., que no figuran en los ficheros CATIA. Sin embargo, los ficheros CATIA aportaban las geometrías que se debían respetar, depurándolas”¹⁵⁷.

El modelo del edificio se descompuso en diferentes volúmenes que fueron denominados River, Neo, T1000, Potemkin, Cobra, Fox, Flower, Tower S17, Fish, Boot y Canopy. Después de dividir cada volumen en un número de superficies, delimitadas por una línea de contorno, se definieron los ejes estructurales (Figura 2.13).

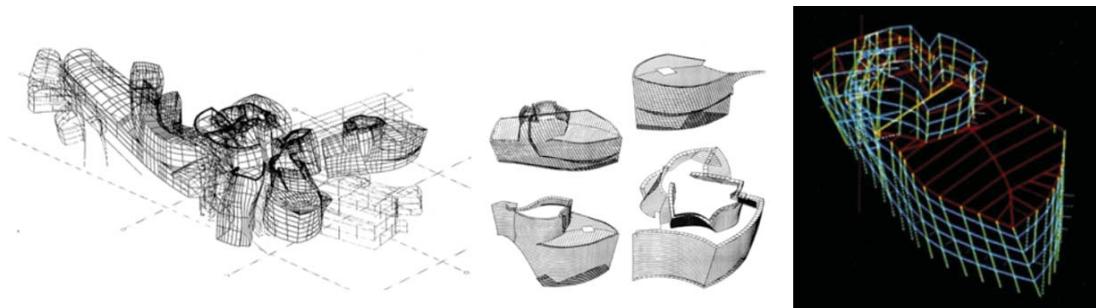


Figura 2.13 Modelo general; descomposición por volúmenes; contorno con ejes estructurales

2.2.2.4.2 Racionalización y evaluación

Las superficies del modelo digital permitieron sistematizar la envolvente y facilitaron la colocación de sus componentes en relación con los elementos estructurales durante la puesta en obra. Según Jim Glymph,¹⁵⁸ la transformación de las maquetas físicas de formas complejas y poco determinadas en un modelo digital permitió “racionalizarlas”¹⁵⁹. En el equipo de proyecto el término “racionalización” se refería a la descripción matemática de una forma compleja, para poderla evaluar y construir. El modelo digital permitió tanto evaluar el proyecto a nivel de costes y comportamiento estructural como controlar el ensamblaje de elementos constructivos.

¹⁵⁶ Cinta de Audio Digital, (Digital Audio Tape, abreviado DAT) es una señal de grabación y medio de reproducción desarrollado a mediados de 1980.

¹⁵⁷ GALINDEZ, J. E. Desarrollo del Proyecto y Ejecución de las Fachadas del Museo Guggenheim Bilbao. En *Informes de la Construcción*, 49 (451), 1997. p.22

¹⁵⁸ Jim Glymph fue arquitecto que estuvo a cargo de la investigación y la introducción del CAD/CAM en el estudio de Gehry desde el diseño para el Pez de Barcelona.

¹⁵⁹ LINDSEY. Op.cit., pp. 69-70

El diseño y construcción de la fachada conllevaron diversos procesos de racionalización –sistematización– y evaluación. La fachada se compone de cuatro elementos: 1) la “estructura primaria”; 2) el “ladder”, estructura secundaria de travesaños horizontales; 3) el “exterior geometric”, montantes verticales ubicados sobre el “ladder”; 4) la “envolvente exterior”, compuesta de paneles de chapa de titanio de 0,4 mm de espesor (Figura 2.14).¹⁶⁰ Una vez definida la forma de cada volumen, se proyectó la estructura primaria sobre una retícula con intervalos de 3 metros. Al verificar que la estructura primaria no interfiriera con el “exterior geometric”,¹⁶¹ se evaluó la estructura utilizando herramientas de análisis FEM y FEA.¹⁶² De esta manera fue posible dimensionar los elementos de fachada con geometrías complejas.¹⁶³



Figura 2.14 Estructura primaria, “ladder”, “exterior geometric” y chapa de titanio

Dado que la estructura primaria se componía de elementos rectilíneos, las formas curvilíneas del cerramiento se consiguieron por medio de los “ladders” –estructura secundaria– y el “exterior geometric” –montantes–. Las curvas que definían la geometría de los “ladders” se modelaron en CATIA para generar curvas compuestas de un número definido de arcos de circunferencia. Esto permitió imponer condiciones de tangencia para conectar los “ladders” de manera continua y simplificar su geometría mediante curvas con 2 o 3 radios distintos. La forma y la dimensión de cada “ladder” se definió con un modelo digital que, a su vez, se utilizó para la puesta en obra, en tanto

¹⁶⁰ GALÍNDEZ. Op.cit., pp. 23-26

¹⁶¹ La complejidad del proyecto requirió la continua comprobación entre los archivos CAD y el fichero CATIA. Por ejemplo, en el caso de las fachadas ciegas, “era obligación de la empresa [contratista] detectar las deficiencias y diferencias existentes entre los ficheros CATIA y los planos de AutoCad. Por ejemplo, en el M2 en CATIA no se correspondía el perfil perimétrico en los dos ficheros. En ese caso, prevalecía el AutoCad. Existía, pues, una reforma en la estructura primaria que había que notificar a FOG/A [Architect, Frank O. Gehry and Associates] y ellos indicarían si se aceptaba o no y quien la realizaría. Con la solución definitiva se creaba un nuevo fichero, tanto de la estructura primaria, como del ‘exterior geometric’ y de ‘cladding pattern.’” GALÍNDEZ. Op.cit., p. 23

¹⁶² FEM: Analytical computational techniques based on finite element method (FEM), in which geometric model is divided into small, interconnected mesh elements, are used to actually perform structural, energy and fluid dynamics analyses for building of any formal complexity.” KOLAREVIC, B. Computing the Performative. In R. OXMAN, & R. OXMAN (Edits.), *Theories of the Digital in Architecture*. London: Routledge, 2014, p. 107. FEA: “Finite Element Analysis is a method that breaks down a continuous structure into many simple, linked elements. This allows formerly unthinkable forms to be assessed for mechanical, material, and energy requirements and to be realized as a built structure.” BEESLEY, P., HIROSUE, S., & RUXTON, J. Towards a Responsive Architecture. In R. OXMAN, & R. OXMAN (Edits.), *Theories of the Digital in Architecture*. London; New York: Routledge, 2014. p. 338

¹⁶³ LINDSEY. Op.cit., p. 76

que los elementos estructurales estaban definidos por coordenadas UTM que facilitaron su posicionamiento.¹⁶⁴

Antes de fabricar los “ladders” se fijó la posición de los montantes que conforman el “exterior geometric”. Para ello, las curvas de los “ladders” se dividieron en distancias regulares con una herramienta de CATIA que genera secuencias de planos espaciados a la distancia deseada y perpendiculares a la curva. La distancia aproximada entre cada “ladder” es de seis metros, y la misma longitud se asignó a los montantes. Cuando la longitud del montante sobrepasaba los seis metros, éste se analizaba con la herramienta FEM para obtener las deformaciones y las tensiones máximas para evaluar si era necesario su refuerzo estructural.¹⁶⁵

En la cara exterior de los montantes se ubicaron los paneles de chapa de titanio que conformaban la superficie de la envolvente. La curvatura de la envolvente obligó a realizar modelos a escala 1:1 para medir la capacidad de los paneles para curvarse sin llegar a deformarse. Esta información se introdujo en una base de datos asociada al modelo digital, para evaluar con un análisis de Gauss¹⁶⁶ la capacidad de curvatura de los paneles de acuerdo con la geometría y el comportamiento del material. Esta evaluación permitió identificar las zonas de fachada que podían generar problemas en el anclaje de los paneles de titanio y, sobre todo, optimizar el uso de las piezas de la envolvente para llegar a cubrir el 80% de su superficie con paneles de cuatro tamaños diferentes.¹⁶⁷

Los elementos arquitectónicos –constructivos, estructurales, ornamentales– se clasificaron según criterios geométricos –rectos, planos, curvos, de doble curvatura y enrollados– y se catalogaron de acuerdo con la cantidad de veces que se repetían, por su similitud con otros elementos o por su singularidad. Los elementos rectos que se repetían se consideraron más simples que los enrollados que no se repetían. Un mayor nivel de complejidad implicaba un incremento de los costes.¹⁶⁸ Como argumentó Gehry, “Flat pieces cost one dollar, single curvature pieces cost ten dollars; double curvature pieces cost ten dollars”¹⁶⁹.

2.2.2.4.3 Fabricación remota y comunicación a distancia

Los modelos digitales permitieron automatizar la fabricación de algunos componentes de la estructura, como la subestructura que soporta la fachada ciega de titanio, los

¹⁶⁴ GALÍNDEZ. Op.cit., p. 24

¹⁶⁵ Ibídem.

¹⁶⁶ “The Gaussian analysis evaluates the degree of curvature in complexly-shaped elements and produces a colored image that indicates, through various colours, the extent of surface curvature –a blue color indicates areas of no or minimum curvature, red is applied to maximum values, and green is used in areas with a median curve.” KOLAREVIC, B. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Op.cit., p. 47

¹⁶⁷ SZALAPAJ. Op.cit., p. 196

¹⁶⁸ LINDSEY. Op.cit., pp. 70-71

¹⁶⁹ ZAERA-POLO, A. Frank Gehry 1991-1995, Conversation with Frank O. Gehry. *El Croquis*, no. 74-75. In LINDSEY. Op.cit., p. 71

paneles de vidrio del muro cortina y los elementos de la fachada de piedra.¹⁷⁰ En el caso de la estructura principal, la empresa contratista URSSA utilizó el BOCAD, un software CAD/CAM, para importar los modelos digitales creados por la oficina de Gehry y generar un modelo estructural del cual se extrajeron los datos con los cuales se podían controlar las maquinas CNC que fresaron y plegaron los elementos estructurales. El entramado estructural se pre-ensambló en fábrica, en piezas que fueron transportadas a la obra por medios terrestres o marítimos. Todos los elementos de la estructura se identificaron con un código de barras y, en los puntos de intersección, con referencia a elementos de otras capas estructurales. De este modo, el modelo digital se tomó como referente para posicionar la estructura. El escaneo del código de barras revelaba su posición dentro del modelo digital y, utilizando en obra herramientas de posicionamiento asociadas al sistema coordenadas UTM, los elementos estructurales se montaban en obra según su ubicación en el modelo digital.¹⁷¹ Esto redujo la acumulación de tolerancias, así como la necesidad de medir o cortar elementos en obra.¹⁷²

Las superficies curvilíneas de las fachadas de cristal se resolvieron triangulando los paneles de vidrio que la componen. De los 2.200 paneles de vidrio que conforman el muro cortina, 2.000 eran piezas únicas. Por ello, se desarrolló un software paramétrico para definir cada unidad por sus diferentes aristas. Estos archivos se tradujeron a un formato .dxf con las líneas de corte para las láminas de cristal.¹⁷³ Igualmente, este tipo de archivos se usó para controlar las fresadoras CNC que fueron transportadas a la obra con el fin de fabricar el revestimiento de la fachada de piedra,¹⁷⁴ compuesta por superficies sinuosas (Figura 2.15). De este modo, “The modelled curvilinear forms were transformed directly into the data needed for construction, transforming fluid forms into economically viable technical specifications”¹⁷⁵.



Figura 2.15 Triangulación de fachada de cristal y muros curvos de piedra

La realización del Guggenheim ejemplifica lo que Castells describe como la “nueva lógica industrial”, que “se caracteriza por la capacidad tecnológica y organizativa de

¹⁷⁰ CAICOYA, C. Algunos aspectos del proceso de construcción del Museo Guggenheim de Bilbao. *Informes de la Construcción*, 49 (451), 1997, p. 7

¹⁷¹ KOLAREVIC, B. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Op.cit., p. 38

¹⁷² SZALAPAJ. Op.cit., p. 195

¹⁷³ GALINDEZ. Op.cit., p. 27

¹⁷⁴ LINDSEY. Op.cit., p. 45

¹⁷⁵ SZALAPAJ. Op.cit., p. 200

separar los procesos de producción en diferentes emplazamientos mientras integra su unidad mediante conexiones de telecomunicaciones, y por la precisión basada en la microelectrónica y la flexibilidad de fabricación de sus componentes”¹⁷⁶. En el caso del Guggenheim, esta lógica industrial fue posible por la precisión y flexibilidad que aportó el CAD/CAM para diseñar y fabricar el edificio y la posibilidad de conectar telemáticamente sub-procesos de diseño en diferentes emplazamientos.

Randy Jefferson, director de proyecto en el estudio de Gehry en California, fue el interlocutor con IDOM del País Vasco. Para intercambiar la información se utilizaron diferentes redes de comunicación como faxes, correos y correos electrónicos, llamadas telefónicas y videoconferencias diarias programadas de las 9 a las 11, hora de Los Ángeles (de las 18 a las 20 hora de Bilbao). El grado de información que se llegó a transferir es incalculable, pero junto a las horas diarias de comunicación telefónica que se requirieron para mantener a todo el equipo informado, se estima que durante todo el proceso se enviaron aproximadamente 16.000 faxes.

Pero la herramienta fundamental para el intercambio de información fue el modelo CATIA, una fuente única de información, base de datos tridimensional, que permitió la representación, evaluación y fabricación del proyecto.¹⁷⁷ Gracias a este modelo se optimizó el diseño y construcción del edificio, no solo porque se automatizó la representación y actualización del proyecto, sino porque facilitó la comunicación entre los integrantes del equipo de proyecto –arquitectos, ingenieros y fabricantes– que trabajaron en diversos lugares y zonas horarias. Compartir la información de este modo requería compatibilizar los diferentes archivos-formatos digitales para lograr la interoperabilidad necesaria. Si esto se logra, el modelo digital permite que la información del diseño se traduzca en información constructiva.¹⁷⁸ Asimismo, al tornarse en la única fuente de información para los diferentes agentes del proyecto, el modelo digital establece nuevas bases legales al adquirir connotaciones contractuales.¹⁷⁹

2.2.2.4.4 Productividad y libertad plástica

Gehry utilizó el modelo digital para representar y modelar formas complejas que antes simplificaba para poder representarlas con los medios convencionales.¹⁸⁰ Según Glymph, el proyecto del Guggenheim pudo haberse representado a través del dibujo en papel, pero hubiera tardado décadas.¹⁸¹ En la medida en que Gehry no se vio obligado a simplificar la forma del edificio y que su representación y construcción pudieron realizarse en un tiempo razonable, puede considerarse que uno de los mayores

¹⁷⁶ CASTELLS, M. *La era de la información: economía, sociedad y cultura* (Segunda ed., Vol. I. La sociedad red). Madrid: Alianza, 2000, p. 464

¹⁷⁷ LINDSEY. Op.cit., p. 87

¹⁷⁸ Ibídem, p. 90

¹⁷⁹ Para Gehry y su equipo, el modelo digital ha tomado precedencia legal, y práctica, respecto a los documentos constructivos. En Ibidem, pp. 87-89

¹⁸⁰ Véase Capítulo 2.2.3.1

¹⁸¹ GLYMPH, J. En SZALAPAJ. Op.cit., 2001, p. 196

beneficios que aportó el modelo digital fue la libertad para concebir la forma del edificio, sin verse condicionado por las dificultades inherentes a su representación y construcción en caso de ceñirse a los medios y esquemas convencionales. Esto se traduce en mayor libertad plástica, derivada de los procesos de cálculo computacional aplicados en la evaluación, la racionalización y la fabricación digital, todo lo cual, en última instancia, garantizó la construcción del edificio.

A pesar de que las tecnologías digitales facilitaron el diseño y la construcción del Guggenheim, la idea del edificio surgió de un modo intuitivo y empleando métodos de representación convencionales, como maquetas físicas y dibujos en papel. En palabras de Jefferson y Glymph, el empleo del modelo digital

“[...] had nothing to do with presenting it to the client. It has nothing to do either with the design process, because the design was already finished. Unlike many other architects who use the computer rendering and animation programs to convey ideas to the client, we began past that stage, so the only application that we were interested in were those that would assist manufacturers and contractors in producing the job cheaper and more efficiently”¹⁸².

A diferencia de los proyectos experimentales de los inicios de 1990, Jefferson y Glymph justifican el uso del modelo digital en términos de productividad, es decir, para optimizar los procesos constructivos y reducir costes. A partir de ello puede concluirse que el uso del CAD/CAM en este proyecto estuvo motivado por consideraciones económicas y constructivas más que por criterios estéticos o plásticos. Después del Guggenheim, el concepto de “digitalización” se empezó a relacionar con los nuevos modos de producción, y a desligarlo de las exploraciones plásticas que ignoran las condiciones materiales y productivas del edificio. El museo de Bilbao fue el primer edificio a gran escala en extender el uso del ordenador más allá del proceso de diseño para abarcar los procesos de fabricación arquitectónicos.¹⁸³ Del mismo modo que el Palacio de Cristal fue considerado como el paradigma de la arquitectura construida con hierro y vidrio producidos industrialmente, el Guggenheim de Bilbao puede considerarse como el primer ejemplo de un edificio construido a partir de un modelo digital.

En ambos edificios la forma estuvo determinada por la nueva materialidad facilitada por la revolución tecnológica de cada época. Mientras las cualidades estructurales del hierro dieron lugar a los grandes volúmenes y a los espacios diáfanos del Palacio de Cristal, la evaluación computacional del proyecto a través de modelos digitales y la continuidad entre los procesos de diseño y fabricación a través del CAD/CAM evitó que la forma irregular y curvilínea del Guggenheim entrara en conflicto con los sistemas de fabricación y construcción de la industria tradicional. Gracias a ello, Gehry logró

¹⁸² ZAERA POLO, A. En Ibídem, p. 197

¹⁸³ ALLEN, S. *Velocidades terminales: el ordenador en el estudio de diseño*. Op.cit., p. 49

construir la forma escultórica que pretendía dentro del tiempo y el presupuesto asignado, del mismo modo en que la estandarización y la mecanización permitieron construir el Palacio de Cristal con el dinero y dentro del plazo establecidos por la Comisión Real. En este contexto, la libertad plástica es uno de los primeros efectos de la nueva materialidad, pero más allá de valorarse desde las cualidades formales del edificio, se justifica por la optimización de sus procesos productivos.

2.2.3 Del bit al átomo

En los años 1990, Gehry fue pionero en explorar la integración de los procesos de diseño y fabricación digital. Durante esta década, los modelos digitales 3D se utilizaron prioritariamente en proyectos de formas complejas, pero que desconsideraban las cualidades materiales y las leyes físicas que condicionan el edificio.¹⁸⁴ Según Allen, estos proyectos ilustraban “una fuerte tendencia, tanto en la arquitectura como en otras disciplinas, a ver el ordenador como parte de un movimiento general desde lo físico a lo virtual”.¹⁸⁵

A principios de 1990, Marcos Novak investigó las consecuencias del tránsito de la arquitectura desde la experiencia del mundo físico al virtual. Novak introdujo el término “transarquitectura” para referirse a una arquitectura que es el resultado de un nuevo concepto de “espacio” que comprende el espacio local y remoto, la presencia física y la virtual:

“Space is no longer innocent. Under the impact of science and technology, ordinary space has become just a subset of a composite ‘new space’ that interweaves local, remote, telepresent, interactivated and virtual spacetime into the new spatial continuum that is the focus of emerging transarchitectures”¹⁸⁶.

Esta transarquitectura nace, según Novak, en el ciberespacio:

“Cyberspace alters the way in which architecture is conceived and perceived [...] This, of course, means that any information, any data, can become architectonic and habitable, and that cyberspace and cyberspace architecture are one and the same.”¹⁸⁷

En el ciberespacio también surgen “arquitecturas líquidas” que, según Novak, se producen por la transformación de datos en formas que cambian continuamente como

¹⁸⁴ PICON, A. *La arquitectura y lo virtual. Hacia una nueva materialidad*. Op.cit, p. 67

¹⁸⁵ ALLEN, S. *Velocidades terminales: el ordenador en el estudio de diseño*. Op.cit., p. 48

¹⁸⁶ NOVAK, M. En MIGAYROU, F., & BRAYER, M.A. (2003). *ArchiLab: Radical Experiments in Global Architecture*. London: Thames & Hudson, 2003. p. 314

¹⁸⁷ NOVAK, M. Liquid Architectures in Cyberspace. In M. BENEDIKT (Ed.), *Cyberspace: First Steps*. Cambridge, MA.: MIT Press, 1991. p. 282

resultado del flujo de información que llega del espacio físico y digital, se trata de una arquitectura desmaterializada: “A liquid architecture in cyberspace is clearly a dematerialized architecture”¹⁸⁸. Además de su inmaterialidad, esta arquitectura se caracterizaría por ser “animada” al quedar libre de las restricciones físicas propias de los objetos materiales y al espacio físico. La arquitectura que surge del ciberespacio es “líquida”, es decir, no tiene una forma estable sino que está sujeta a una mutación continua: “the architect is called upon to design not the object but the principles by which the object is generated and varied in time”¹⁸⁹.

Un ejemplo de “arquitectura líquida” es el proyecto Paracube (1997-98), que consiste de un cubo definido por seis superficies generadas y relacionadas algorítmicamente. Dos cubos se generan e interrelacionan a través de un algoritmo: uno “rígido”, que conforma una retícula, y otro “suave”, generado por superficies fluidas (Figura 2.16). El cubo rígido responde a la función paramétrica de “baja suavidad” (*low smoothness*) y el cubo fluido a la de “alta suavidad” (*high smoothness*). De acuerdo con esta conformación algorítmica y paramétrica, cualquier cambio de la retícula o de alguna superficie transformaba los elementos adyacentes.¹⁹⁰



Figura 2.16 Paracube

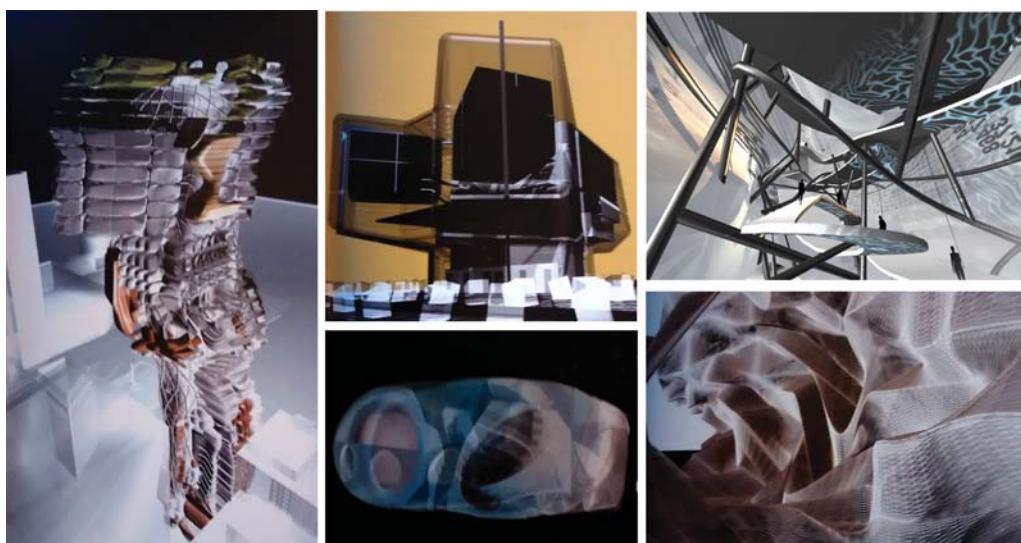


Figura 2.17 Rise-Rise Skyscraper, Embajada Portuguesa de Berlin, Virtual Guggenheim, Beachness, X Phylum

¹⁸⁸ Ibídem, p. 284

¹⁸⁹ Ibídem.

¹⁹⁰ MIGAYROU & BRAYER. Op.cit., p. 316

Tras los trabajos de Novak, otros autores continuaron explorando esta línea de investigación: The Virtual Guggenheim Museum de Lise-Anne Couture y Hani Rashid (Asymptote); la Embajada Portuguesa en Berlín de Didier Fiúza Faustino; el proyecto Rise-Rise Skyscraper de Sulan Kolatan y William J. Mac Donald; el Embryologic Space de Greg Lynn; la ESK House de Tarek Naga; el proyecto Beachness de Lars Spuybroek; o el proyecto X PHYLUM de Karl Chu (Figura 2.17).

Estos proyectos sugieren la posibilidad de una arquitectura localizada en un mundo virtual para clientes o en lugares imaginarios,¹⁹¹ una arquitectura virtual que contradice la condición material de la arquitectura, al centrarse en la metafísica del ciberespacio en vez de explorar las posibilidades tectónicas del diseño y la fabricación digital.¹⁹² Según Cache, era necesario superar su confinamiento a la imagen y la pantalla para llevar esta arquitectura a la realidad física:

“[...] in order to move from this virtual possibilities to actual realities, we have to switch scanning techniques and replace the electronic remote control that activates pixels in our video screen with a digital command router that manufactures any material”¹⁹³.

La reflexión de Cache sobre la necesidad de traducir las imágenes-píxeles digitales en objetos manufacturados es congruente con el término “materialidad digital” acuñado por Allen, al asumir que las posibilidades de lo virtual no se encuentran en el ciberespacio sino en el espacio real.¹⁹⁴ Es decir, la materialidad digital conlleva la traducción de bits a átomos por medio de procesos de diseño y fabricación digital.

Posteriormente, y en un ámbito más especulativo, los arquitectos Fabio Gramazio y Matthias Kohler han reformulado la noción de “materialidad digital” como una lógica productiva y computacional controlada por la robótica:

“[A] proposed connection –enabled by robots– between computational logic and material realization as a new basis for the discipline’s practices”¹⁹⁵.

La conexión entre la lógica computacional y la realización material que defienden Gramazio y Kohler, se correspondería con lo que Lipson y Kurman definen como la

¹⁹¹ MITCHELL, W., & McCULLOUGH, M. *Digital Design Media* (Second ed.). New York: Van Nostrand Reinhold, 1995, p. 463; PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Op.cit., pp. 52-53

¹⁹² MIGAYROU, F. The Orders of the Non-Standard. En OXMAN, R. & OXAMN, R (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture*. Londres: Routledge, 2014. p. 21

¹⁹³ CACHE. Op.cit., p. 28

¹⁹⁴ ALLEN, S. *Velocidades terminales: el ordenador en el estudio de diseño*. Op.cit., p. 49

¹⁹⁵ GRAMAZIO, F., & KOHLER, M. In Authoring Robotic Processes. (GRAMAZIO, F., & KOHLER, M. Edits.) *Architectural Design: Made by Robots: Challenging Architecture at a Large Scale*, 2014, p. 15

convergencia entre el mundo virtual y el físico,¹⁹⁶ una convergencia entre lo computacional y los material, entre los bits y los átomos, que se genera a través de herramientas CAD/CAM. En el ámbito del diseño, esta convergencia tendrá lugar en tres fases,

“Primero conseguiremos el control de la forma de las cosas físicas. Después aumentaremos el control sobre su composición, los materiales que las forman. Por último, obtendremos el control del comportamiento de las cosas”¹⁹⁷.

Esta integración ha fomentado una nueva manera de comprender la “digitalización de la arquitectura”, que se aleja de la desmaterialización inherente a la transformación de átomos en bits, y propone un cambio paradigmático al centrarse en las herramientas y protocolos de producción digital.¹⁹⁸

2.2.3.1 Continuum Digital

“Digital age has radically reconfigured the relationship between conception and production, creating a direct link between what can be conceived and what can be constructed”¹⁹⁹.

Branko Kolarevic

En los procesos de diseño tradicional, el proyectista prepara los planos que se envían a los fabricantes, contratistas y constructores para que planifiquen y ejecuten la construcción del edificio. En este sentido, el diseño es una actividad conceptual desligada de la gestión y ejecución del proceso productivo e implica una duplicación de esfuerzos.²⁰⁰ Los planos son dibujados por los proyectistas y los agentes implicados en la construcción deben tener la capacidad de interpretarlos y transformarlos en un objeto físico.²⁰¹ A diferencia de esta segregación entre diseño y fabricación, en los procesos CAD/CAM no hay discontinuidad entre ambas fases, ya que estas herramientas facilitan la continuidad del diseño a la manufactura del producto. Así, un diseño creado con herramientas CAD, se convierte en una fuente de información para las herramientas CAM. Esta continuidad no solo optimiza los tiempos de producción, sino que reduce el riesgo de errores debidos a la interpretación humana.²⁰²

¹⁹⁶ LIPSON, H., y KURMAN, M. *La revolución de la impresión 3D*. Madrid: Anaya; Wiley, 2015. p. 31
¹⁹⁷ Ibídem.

¹⁹⁸ GRAMAZIO, & KOHLER. Op.cit., p. 14

¹⁹⁹ KOLAREVIC, B. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Op.cit., p. 31

²⁰⁰ NASR, E. A., & KAMRANI, A. *Computer-Based Design and Manufacturing: An Information-Based Approach*. New York: Springer, 2007. p. 65

²⁰¹ SHEIL, B. (2005). Design Through Making: An Introduction. (SHEIL, B. Ed.) *Architectural Design: Design Through Making*, 75 (4), 2005, p. 11

²⁰² KOLAREVIC, B. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Op.cit., p. 59

De acuerdo con Nars y Kamrani, un sistema CAD/CAM ideal es aquel que permite tomar información del modelo digital para convertirla automáticamente en un plan de fabricación del producto.²⁰³ Según Kolarevic, esta capacidad de extraer e intercambiar información de un diseño con el objeto de transformarla en instrucciones para los procesos fabricación, está redefiniendo la relación entre los procesos de diseño y construcción:

“The ability to digitally generate and analyze design information, and then use it directly to manufacture and construct buildings, fundamentally redefines the relationship between conception and production — provides for an informational continuum from design to construction.”²⁰⁴

El vínculo automático entre el diseño y la fabricación digital fue denominado por Kolarevic “continuum digital”.²⁰⁵ Rivka y Robert Oxman se refieren al mismo en estos términos:

“[It is] a digital continuum from design to production, from form generation to fabrication design. This new continuity transcends the merely instrumental contribution of man-machine relationship to praxis and has begun to evolve as a medium that supports a continuous logic of design thinking and making”²⁰⁶.

Esta “lógica de continuidad” responde a la integración de los procesos de generación, análisis, representación, fabricación y ensamblaje del proyecto arquitectónico;²⁰⁷ es decir, la continuidad abarca el proceso que se inicia en el modelo digital hasta su materialización con procedimientos automáticos (*file-to-factory*),²⁰⁸ de modo que “la construcción se convierte en una función directa de la computación”²⁰⁹.

Antes del Guggenheim, Gehry recurrió a la tecnología digital para realizar una escultura: el Pez para la Villa Olímpica de Barcelona (1992), de 54 metros de longitud y 35 metros de altura, con una forma curvada generada por una superficie de láminas metálicas entrelazadas. La forma se creó mediante bocetos y maquetas de madera y metal. Se empleó el CAD, por razones productivas y económicas, para cumplir con los plazos de entrega y para ajustarse al presupuesto disponible.²¹⁰

²⁰³ NASR, & KAMRANI. Op.cit., pp. 63-65

²⁰⁴ KOLAREVIC, B. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Op.cit., p. 59

²⁰⁵ Ibídem, p. 3

²⁰⁶ OXMAN, & OXAMN. *Theories of the Digital in Architecture*. Op.cit., p. 1

²⁰⁷ KOLAREVIC, B. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Op.cit., p. 7; OXMAN, & OXAMN. *Theories of the Digital in Architecture*. Op.cit., pp. xxii-xxiii

²⁰⁸ KOLAREVIC, B. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Op.cit., p. 31

²⁰⁹ “Constructability becomes a direct function of computability”. Ibídem, p. 31

²¹⁰ LINDSEY. Op.cit., 2001, p. 34

Tras definir la forma de la escultura se realizó un modelo digital, que consistió en reconstruir las maquetas físicas mediante una malla poligonal desarrollada con el software Alias. A pesar de que el modelo digital reproducía fielmente la geometría de las maquetas, no contenía la información requerida por las herramientas de CNC. Por este motivo se buscaron otros programas de modelado capaces de vincular el modelo digital con las máquinas de fabricación. La investigación condujo al CATIA, que aportaba la información numérica para fabricar automáticamente la superficie plegada de la escultura, así como ubicar los elementos que la componen en la obra.

A partir del modelo digital se creó una maqueta compuesta de cintas de papel fabricadas por una cortadora láser CNC, lo que permitió verificar la correspondencia entre el modelo digital y los modelos analógicos.²¹¹ El sistema de control numérico del modelo CATIA permitió ubicar los puntos de conexión entre la superficie y la estructura (Figura 2.18). Estos puntos se convirtieron al formato AES (Architectural and Engineering System) para que los ingenieros de Skidmore, Owings & Merrill (SOM) resolvieran los aspectos estructurales y constructivos. La superficie de láminas entrelazadas se desplazó 10 pulgadas de la estructura, con lo que se logró crear el espacio necesario para ubicar los travesaños de acero que conectan la superficie y la estructura de soporte. De esta manera se generó un sistema compuesto de piel, espacio de conexión y estructura portante, que anticipó el sistema constructivo utilizado para el Guggenheim.²¹² El proceso de fabricación lo desarrolló la empresa italiana Permasteelisa, que adquirió el software CATIA para generar e intercambiar archivos a distancia, lograr una construcción rápida y precisa que tardó seis meses y que solo tuvo dos errores de tres milímetros entre los miles de puntos de conexión existentes.²¹³

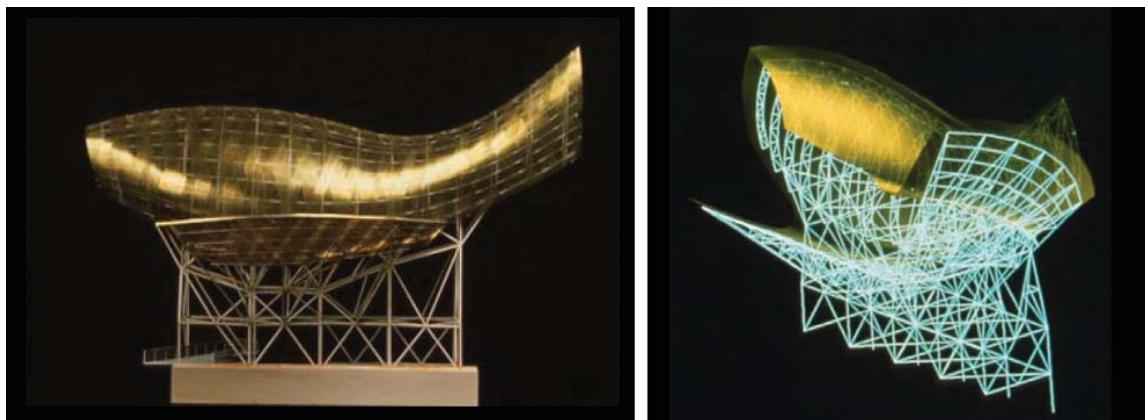


Figura 2.18 Maqueta y modelo CATIA de Pez para Villa Olímpica

Rem Koolhaas también fue pionero en experimentar con las herramientas CAD/CAM pero, a diferencia de Gehry, lo hizo para generar elementos arquitectónicos de menor escala. Para el diseño interior de las tiendas Prada en Nueva York (2001) y Los Ángeles (2004), OMA indagó la manera de colgar y exponer prendas de ropa en cualquier parte

²¹¹ Ibídem, p. 35

²¹² Ibídem.

²¹³ Ibídem, p. 38

de un muro, sin la necesidad de colgadores o elementos sobrepuestos. Con el fin de crear superficies que cumpliesen esta función, el equipo de investigación de materiales estudió la estructura de la espuma. Al reproducir esta estructura a mayor escala, se consiguió una superficie que permitiría colgar en ella las prendas.

Inicialmente se estudió la geometría, la posición y el tamaño de las perforaciones de la espuma, a través de maquetas realizadas con globos inflados con agua, colocados en una caja rellenada de yeso u hormigón (Figura 2.19). Simultáneamente al desarrollo de las maquetas físicas, se investigó la posibilidad de reproducir la estructura física de la esponja a un tamaño cien veces mayor, se concluyó que no era posible por dos razones: resultaba químicamente imposible y, a medida que el material se expandía, perdía densidad y consistencia, por lo cual se fracturaba. De este modo se hizo evidente que la escala sería un factor determinante en la relación entre el material y su forma y, sobre todo, para su fabricación. A partir de ello, los investigadores concluyeron que debían adoptar un proceso mecánico, no químico, para su manufactura.

Se hicieron maquetas con distintos tipos de poliuretano, caucho y silicona (Figura 2.20) y se observó que los materiales blandos se deterioraban rápidamente. Además, la superficie deseada debía ser translúcida y resistente al fuego, pero los únicos plásticos resistentes eran opacos. Por este motivo se acudió a un fabricante de plásticos, con quien se desarrolló un poliéster translúcido con la resistencia adecuada al fuego. Pero surgió un nuevo problema: encontrar un sistema para producir paneles de poliéster en grandes cantidades.



Figura 2.19 Estudio geométrico



Figura 2.20 Maquetas en diversos materiales

El primer prototipo de la esponja, con la geometría y la escala adecuadas, se realizó por medios manuales –definición de perforaciones mediante globos–. Este proceso dificultó su producción a gran escala, pero más allá de ello, no funcionó porque había una discontinuidad evidente entre los dos paneles que conformaban el muro –cara y dorso–, al mismo tiempo que no cumplía con las expectativas de forma y acabado. Estos problemas se resolvieron a través de un modelo digital que, como afirma el investigador Chris van Duijn, permitió “crear la esponja exactamente con la geometría que queríamos, con una textura perfecta, perforaciones perfectas, etc. y que, a la vez,

permitía un moldeado fácil”²¹⁴. A partir del modelo digital se realizó una maqueta física, desde la cual se observó que utilizando paneles de cara y dorso con geometrías idénticas, no se conseguía la apariencia irregular que se había establecido como objetivo de diseño. Por este motivo se modificó la geometría del primer modelo digital para crear dos paneles diferentes que, al ser acoplados, generasen una geometría irregular (Figura 2.21). Una vez se consiguió la geometría deseada, desde el modelo digital se extrajo la información para controlar la fresadora CNC con la cual se crearon los dos moldes de aluminio en que se vertió la resina para crear los muros, moldes de 3 metros de alto por 1,5 metros de ancho y que tardaron 6 semanas para ser fabricados con la fresadora funcionando 24 horas al día.²¹⁵



Figura 2.21 Paneles cara-dorso; acabado final

La escultura de Gehry y el muro de Koolhaas demuestran que las tecnologías digitales permiten un mayor control sobre la materia, durante el diseño y la ejecución. La tecnología CAD/CAM permite así unificar ambas fases en un continuum digital, lo que reduce los errores de ejecución, gracias a la precisión tanto del modelo digital como de las máquinas de control numérico. Además, la modelización de la materia mediante las tecnologías digitales la convierte en inputs o parámetros de diseño. Esta nueva manera de entender y trabajar la materia subyace tras la *re-conceptualización* de los materiales constructivos que actualmente se está produciendo en la arquitectura.

2.2.3.2 Re-conceptualización de los materiales constructivos

“With Digital Materiality [...] instead of realizing a design, an image, or a drawing, a comprehensive design and building process is conceived. Here, the central issue is not the design of a form; rather it is the design of a production process that is informed essentially by the constructive organization of the material”²¹⁶.

Gramazio, Kohler & Willmann

²¹⁴ VAN DUIJN, C. Investigación sobre materiales en OMA. En *VERB: Matters*. Barcelona: Actar, 2004. p. 84

²¹⁵ Ibídem, p. 86

²¹⁶ GRAMAZIO, KOHLER, & WILLMANN. Op.cit., p. 305

Fabio Gramazio y Matthias Kohler emplean el término “materialidad digital” para referirse a una nueva relación con la materia en la que las propiedades del material pasan a formar parte del proceso de diseño y, por la que las herramientas y técnicas de fabricación digital, aportan un nuevo potencial creativo y generativo.²¹⁷ Con ello los materiales, las herramientas y los protocolos de producción constituyen parámetros esenciales del diseño, en la medida en que el diseño es influenciado o deriva directamente de ellos. En este sentido, la materialidad digital conlleva un agenciamiento entre los medios y los modos de producción con las ideas que guían el diseño, agenciamiento a partir del cual se descubren los principios formativos y las cualidades de un proyecto arquitectónico.

Considerar que las propiedades materiales pasan a formar parte del diseño implica que los materiales constructivos dejan de entenderse como materia inerte y sometida a la forma. Más bien, las propiedades de los materiales constructivos se convierten en parámetros generativos de la forma.

Yves Weinand y Markus Hudert (2008) han explorado esta relación entre materia y proceso de generación formal en su sistema Timberfabric (tejido de madera). En este sistema, la madera trabaja de forma “cooperativa”, como lo hacen los tejidos, para generar estructuras entrelazadas que pueden utilizarse en cubiertas, fachadas o puentes.²¹⁸ Weinand y Hudert observaron que la madera se compone de fibras de celulosa longitudinales, cuya flexibilidad les permite deformarse elásticamente y retener una forma dada.²¹⁹ Igualmente, por ser un material anisótropo, su organización interna es heterogénea aunque la mayoría de las fibras longitudinales se encuentran alineadas con el eje del tronco.²²⁰ Estas cualidades permiten que la madera se comporte de diversas maneras dependiendo del sentido en que se disponen las fibras. Por ello, el sistema hace coincidir la rigidez y la fuerza del material –basada en la disposición de las fibras– con la dirección y distribución de las cargas aplicadas.

Las propiedades de la madera son un parámetro de diseño del Timberfabric, pero éstas se combinan con principios comportamentales y organizativos de los textiles: elasticidad y flexibilidad.²²¹ Al igual que la madera, un tejido está compuesto de fibras interconectadas que actúan solidariamente de modo que, en términos de Weinand y Hudert, presentan un “comportamiento social” donde el fallo de un elemento no lleva al colapso de la estructura porque es asumido por los elementos adyacentes.²²² Un tipo de

²¹⁷ GRAMAZIO, & KOHLER. Op.cit., pp. 17-18

²¹⁸ SISTANINIA, M., HUDERT, M., HUMBERT, L., & WEINAND, Y. Experimental and numerical study on structural behavior of a single timber textile module. *Engineering Structures*, 46, 2013, p. 557

²¹⁹ WEINAND, Y., & HUDERT, M. Timberfacric: Applying Textile Principles on a Building Scale. (OXMAN, R. & OXMAN, R. Edits.) *Architectural Design*, 80 (4), 2010, p. 104

²²⁰ MENGES, A. Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design. (MENGES, A. Ed.) *Architectural Design: Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, 82 (2), 2012. pp. 37, 40

²²¹ WEINAND, & HUDERT. Op.cit., p. 104

²²² Ibídem.

comportamiento que se mantiene independientemente de la escala y, por ello, puede funcionar tanto en un tejido como en un sistema estructural.

El Timberfabric parte del diseño de un módulo (Textile Module) que, al repetirse y ensamblarse, genera un sistema. Su forma resulta de trenzar y entrecruzar dos paneles de madera laminar. Curvando los paneles durante el proceso de ensamblaje, el módulo adquiere doble curvatura, lo que contribuye a aumentar su resistencia por la flexión y torsión de las láminas.²²³ Así, en el proceso de fabricación se genera una tensión que aumenta la resistencia estructural del módulo²²⁴ y que, al ser ensamblado con otros módulos, genera un “tejido estructural” cuya elasticidad y flexibilidad permite su adaptación a diferentes cargas. El sistema tiene la capacidad de deformarse para evitar su ruptura pero que, al eliminar la carga, su forma retorna al estado inicial (Figura 2.22).



Figura 2.22 Módulo y tejido estructural Timberfabric

Las deformaciones de los módulos sometidos a una carga se midieron para evaluar y resolver cuestiones como la proporción entre la longitud y el ancho de las láminas o la curvatura que puede asumir el módulo. Estos parámetros se determinaron a partir de las mediciones obtenidas de los sensores instalados en los prototipos físicos. A partir de estos datos, se construyó un modelo digital para simular las deformaciones producidas. Al analizar el comportamiento de un módulo sometido a diferentes cargas se observó que, en algunos casos, la estructura se hacía más estable a medida que aumentaban las cargas, gracias a su capacidad para deformarse.²²⁵ Comparando la simulación digital con el comportamiento del modelo físico, se observó que el modelo digital tendía a infravalorar la rigidez de la estructura real. Esta discrepancia entre los dos modelos se atribuyó a los parámetros utilizados para construir el modelo digital.²²⁶ A pesar de estas diferencias, se concluyó que la correspondencia entre el modelo físico y el digital era satisfactoria, ya que la mayor discrepancia observada fue del 14% y sólo se dio en un solo punto de medición.²²⁷

En el diseño del Timberfabric las herramientas digitales fueron fundamentales para analizar su comportamiento, pero el diseño fue el resultado de una investigación

²²³ Ibídem, p. 104, 107

²²⁴ SISTANINIA, HUDERT, HUMBERT, & WEINAND Op.cit., p. 558

²²⁵ WEINAND & HUDERT. Op.cit., p. 107

²²⁶ SISTANINIA, HUDERT, HUMBERT, & WEINAND Op.cit., p. 567

²²⁷ Ibídem, p. 566, 568

empírica del material. El trabajo de Weinand y Hudert demuestra que la interacción entre modelos digitales y analógicos es fundamental en la actual fase de desarrollo de la arquitectura digital. Esta relación entre la innovación tecnológica y los materiales existentes exige entender el diseño como un proceso de retroalimentación entre lo material y lo intelectual o, como sostienen Weinand y Hudert,

“There appear to be something remarkable in the interaction of the material and the formal qualities that produces a distinguish quality of design. [...] It is perhaps the elevation of the material to a level of prominence in design and design research that can explain this intellectual resonance and its implications for architecture as a material practice”²²⁸.

Al integrar la materia en el proceso de diseño, deja de ser un receptáculo obediente y se convierte en un parámetro que aumenta el potencial creativo del diseñador. Gramazio y Kohler sostienen que este potencial creativo aumenta con la capacidad de los diseñadores para programar las herramientas digitales y adaptarlas a las necesidades constructivas de cada proyecto.²²⁹ Así, la materialidad digital conlleva el diseño y programación de las máquinas capaces de materializar una forma:

“With robots, it is now possible to radically enrich the physical nature of architecture, to ‘inform’ material processes and to amalgamate computational design and constructive realisation as a hallmark feature of architecture in the digital age, leading to the emergence of a phenomenon we described a few years ago as ‘digital materiality’.”²³⁰

Gramazio y Kohler consideran que, más que servir para ejecutar automáticamente las instrucciones para construir un objeto a partir de un modelo digital, el robot se convierte en el vínculo entre la esfera digital y la analógica:

“[...] the robot allows one to execute diverse applications in a rapid and precise way, but above all, to work directly at the immediate interface between digital and material spheres and thus to exert decisive influence on the physical world through programming”²³¹.

Gramazio y Kohler emplearon la robótica para construir elementos constructivos de la fachada de la bodega Gantenbein (Fläsch, 2006). El diseño de la fachada se basa en el proyecto de investigación Programmed Wall (ETH, Zúrich, 2006), en donde se empleó un robot industrial de 6 ejes para fabricar un muro de ladrillo, ubicando cada ladrillo

²²⁸ WEINAND & HUDERT. Op.cit., p. 107

²²⁹ GRAMAZIO, & KOHLER. Op.cit., p. 16

²³⁰ Ibídem, p. 14

²³¹ GRAMAZIO, KOHLER, & WILLMANN. Op.cit., p. 313

con un ángulo y una posición diferente con el fin de generar una geometría irregular (Figura 2.23).²³²

El proyecto en Gantenbein, diseñado por Bearth & Deplazes Architects, consiste en una sala de fermentación, una bodega subterránea y una terraza para recepciones y catas de vino. Gramazio y Kohler fueron invitados a participar en el proyecto cuando ya se encontraba en construcción.²³³ Gramazio y Kohler propusieron crear una fachada cuya apariencia hiciera alusión al vino, de modo que interpretaron el esqueleto estructural como una cesta que contenía uvas. La forma de las fachadas se generó con un software que simuló la caída de las uvas en la canasta-estructura (Figura 2.24). Estas imágenes se tradujeron en muros de obra de fábrica. La traducción de lo virtual a lo analógico consistió en asimilar los ladrillos a píxeles; es decir, los ladrillos que compondrían la fachada eran equivalentes a los píxeles que componían la imagen. Pero, mientras que una imagen digital es bidimensional y se compone de píxeles que varían de color, en el caso de estas fachadas los elementos que la componen son tridimensionales y tienen un único color. Para resolver la situación, las fachadas se construyeron colocando cada ladrillo en una posición determinada y, con ello, conseguir contrastes de luz y sombra que crearan una imagen que recordara la original (Figura 2.25).



Figura 2.23 Programmed Wall

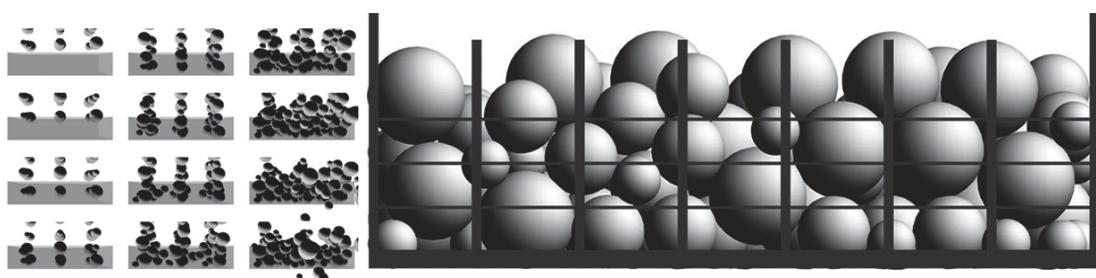


Figura 2.24 Simulación digital de caída de uvas

²³² GRAMAZIO, F. & KOHLER, M. *The Programmed Wall*, ETH Zurich, 2006. Recuperado el 08 de 04 de 2016, de Gramazio & Kohler Research: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/81.html>

²³³ GRAMAZIO, F. & KOHLER, M. *Gantenbein Vineyard Facade*, Fläsch, Switzerland, 2006. Recuperado el 08 de 04 de 2016, de Gramazio & Kohler Research: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/52.html>



Figura 2.25 Fachada lagar Gantenbein

La construcción de la fachada se realizó de manera automática y manual. Los 400 metros cuadrados de superficie se dividieron en 72 elementos –correspondientes a los vanos del esqueleto de estructural–, los cuales fueron prefabricados en las instalaciones del ETH de Zúrich con herramientas de fabricación digital. Cada elemento se fabricó tomando como base las jácenas de hormigón del esqueleto y los ladrillos se situaron sobre ellas con la ayuda del brazo robótico, a partir de los datos facilitados por el modelo digital. Pero, además de posicionar los ladrillos, el brazo robótico también se utilizó, junto a un extrusor automatizado, para aplicar el material de unión. Una vez fabricados los módulos del muro, se transportaron en camión a la obra y se montaron con grúas y operarios. La fachada fue diseñada y construida en tres meses (Figura 2.26).

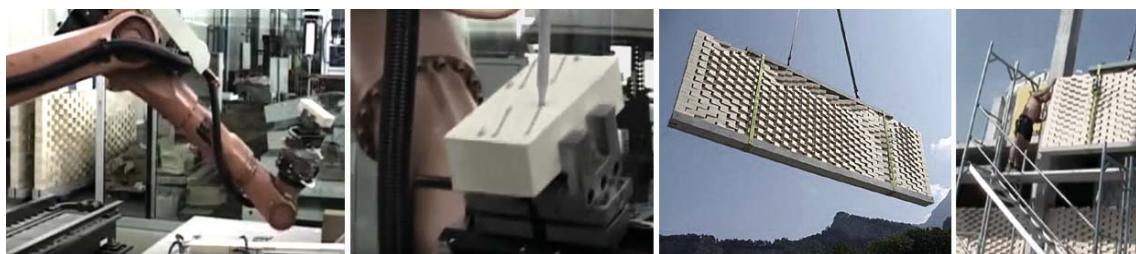


Figura 2.26 Prefabricación digital y montaje “manual” de la fachada

Gramazio y Kohler destacan el efecto pictórico de la fachada exterior y la calidez del espacio interior, efecto de la luz que penetra por los ladrillos.²³⁴ Para ellos, el uso del robot está justificado cuando existe un número elevado de relaciones y requerimientos –formales, espaciales, funcionales, productivos– que no pueden ser resueltos manualmente de manera precisa y eficiente.²³⁵ En este sentido, la automatización no implica el reemplazo del trabajo humano, sino un complemento que permite alcanzar nuevas soluciones de diseño desde la precisión y la eficiencia tecnológica. De esta manera se entiende la tecnología como una ayuda a la creatividad más que una restricción:

“the ‘operationality’ of the robot is no longer related exclusively to the material act of producing, of material operations, and of pure implementation, but rather equally to

²³⁴ Ibídem.

²³⁵ GRAMAZIO, KOHLER, & WILLMANN. Op.cit., p. 311

the way architecture is intellectually conceived, programmed, and designed”²³⁶.

Gramazio y Kohler consideran el robot como una herramienta que aumenta la creatividad del arquitecto al facilitar una nueva forma de relación entre la concepción y la materialización del proyecto. Este aumento de creatividad se fundamenta en la operatividad del robot para ejecutar operaciones de fabricación complejas de un modo rápido y preciso. En este sentido, Gramazio y Kohler hacen alusión a un continuum digital inherente al uso de información como materia prima, lo que permite un aumento de la eficiencia constructiva y un mayor control sobre la forma y da lugar a nuevas expresiones plásticas. En el caso de la bodega, la capacidad de situar cada ladrillo en el muro con un ángulo y una posición variable mediante un brazo robótico fue fundamental para alcanzar la expresividad plástica de la fachada. Además de la operatividad del robot en el proceso de construcción, fue igualmente importante el montaje con medios mecánicos y manuales, es decir, la hibridación entre la producción digital y la producción tradicional.

La hibridación de la producción tradicional y la digital implica una relación dialéctica entre lo material y lo digital, relación que también está presente en la equivalencia entre píxeles y ladrillos: los ladrillos fueron los elementos utilizados para componer el muro, de la misma manera que los píxeles componen una imagen. En el sistema Timberfabric esta hibridación también fue parte del diseño, solo que en este caso no se consiguió a partir del formato del material –ladrillo– sino a partir de las propiedades intrínsecas del material, la madera.

Las expresiones plásticas y funcionales de los casos estudiados, conllevan una relación dialéctica entre la tradición y la innovación: construcción manual y fabricación digital; materiales estandarizados y montaje robótico; empleo de materiales tradicionales y de información como materia prima; investigación formal empírica y evaluación digital. En este sentido, estos proyectos no solo implican una re-conceptualización de los materiales constructivos; sobre todo, ejemplifican la contradicción interna que obedece al principio dialéctico de la unidad y la lucha entre lo “positivo” y lo “negativo” que se resuelve en una síntesis superior.²³⁷

Si la re-conceptualización de los materiales de construcción se refiere a un aspecto de la materialidad digital que implica la hibridación de procesos de producción digitales y pre-digitales, la estructuración digital de la materia es un aspecto de la materialidad digital que no radica en la hibridación de procesos productivos, sino en la combinación de materiales mediante herramientas de diseño y fabricación digital, para sintetizar materiales multifuncionales y comportamiento programado.

²³⁶ Ibídem, p. 15

²³⁷ Véase Capítulo 0.3

2.2.3.3 Estructuración digital de materiales

“En relación a la cuestión de la materialidad, el paisaje digital proporciona numerosas oportunidades inéditas, como la posibilidad de diseñar materiales y dar forma a sus propiedades y aspecto, en lugar de utilizarlos de una forma pasiva. [La] revolución digital es contemporánea a una revolución de los materiales que utilizamos y producimos”²³⁸.

Antoine Picon

Según Picon, las tecnologías digitales –al permitir visualizar los fenómenos materiales que se producen a escala molecular, junto a la posibilidad de abstraer, codificar y reproducir las propiedades y fenómenos materiales mediante algoritmos–²³⁹ posibilitan el diseño de nuevos materiales. Pero esta revolución material, que Picon asocia a los procesos de modelado y simulación, también depende de las herramientas de fabricación digital. El modelado digital de un material permite controlar la distribución y la relación interna entre sus componentes, la simulación digital permite analizar su comportamiento y la fabricación digital posibilita la combinación de materiales y la modificación de su geometría a una escala micro. En otras palabras, la fabricación digital permite combinar materiales de un modo que hasta ahora no era posible.²⁴⁰

El diseño de nuevos materiales con tecnologías digitales es posible con las técnicas de *impresión 3D*. Este tipo de impresión se realiza por acumulación, o fabricación aditiva, y funciona de la siguiente manera: “La impresora, guiada por las instrucciones del archivo de diseño, rocía o solidifica el material en polvo, líquido o fundido conforme a un patrón específico. Una vez se solidifica la primera capa, el cabezal de impresión en 3D vuelve y da forma a otra capa fina sobre la anterior. Cuando la segunda capa se solidifica, el cabezal de impresión regresa de nuevo y deposita una tercera capa sobre la anterior. Al final, esas capas finas dan forma a objetos tridimensionales”²⁴¹. Este proceso de materialización por capas permite generar formas difíciles de conseguir con procesos de producción tradicional, por ejemplo, objetos irregulares con cámaras interiores.

A diferencia de las técnicas de fabricación sustractiva, donde se talla, corta o moldea un material para darle forma, con las técnicas de impresión multi-material es posible fusionar diferentes compuestos para crear materiales con nuevos comportamientos y propiedades.²⁴² Así, más allá de moldear el material, con la impresión multi-material es posible “embeber y entrelazar varios materiales en complejas microestructuras especificadas con una precisión de micrómetros”²⁴³. Con esta capacidad para estructurar

²³⁸ PICON, A. La arquitectura y lo virtual. Hacia una nueva materialidad. Op.cit., pp. 79-80

²³⁹ Ibídem, p. 78

²⁴⁰ LIPSON, & KURMAN. Op.cit., p. 30

²⁴¹ Ibídem, pp. 28-29

²⁴² Las diferencias entre la fabricación digital aditiva y sustractiva se analizan en el Capítulo 3.2

²⁴³ LIPSON, & KURMAN. Op.cit., p. 338

y fusionar materiales no solo se superan las limitaciones de la fabricación tradicional – donde cada elemento está hecho de un único material que se ensambla con otro–, sino que es posible “programar materiales” para que se comporten de un modo concreto.²⁴⁴

Una de las técnicas empleadas para diseñar digitalmente la composición y el comportamiento de un material se basa en el uso de *vóxeles* y *máxeles*. Un voxel es un píxel volumétrico, de manera que si un píxel es el mínimo elemento que compone una imagen digital 2D, el voxel es la mínima unidad cúbica de un objeto o modelo 3D digital.²⁴⁵ Un volumen puede representarse en un ordenador utilizando un bit de información por un voxel. Los voxels situados fuera del sólido tienen valor cero y los que están dentro valor uno. De esta manera se distingue la parte sólida de la vacía en un volumen. Con dos bits por voxel se pueden introducir otras condiciones como el tipo de material y sus diferentes densidades.²⁴⁶ Un máxel es equivalente a un voxel físico,²⁴⁷ de manera que si un átomo es la unidad elemental de la materia física, el máxel es la unidad elemental de la materia impresa. En este sentido, máxeles y voxels representan las unidades materiales de la materia física y la materia digital –en el ámbito de la fabricación digital–; en términos de Cache, el máxel sería el soporte físico a través del cual se actualiza el voxel, la encarnación de lo digital en la materia.²⁴⁸

La combinación de máxeles con propiedades físicas diferentes permite que un mismo material pueda tener cualidades diversas (peso, fuerza, flexibilidad, conductibilidad). Pero el material resultante no solo depende de las propiedades físicas de los máxeles, sino también del modo en que se estructuran a una microescala desde la distribución de los voxels en el modelo digital–. Así, al mezclar máxeles blandos y duros con un cierto patrón organizativo, es posible conseguir un material compuesto que sea aún más resistente que los originales o hacer que un material sea flexible en una dirección y rígido en otra. En un segundo caso se le considera como un material dinámico, ya que cambia su comportamiento de acuerdo con las condiciones a las que sea sometido. Esta cualidad ha sido definida por Neri Oxman como “anisotropía sintética”²⁴⁹.

La anisotropía sintética resulta de controlar la densidad y la direccionalidad de la materia, con procesos de diseño y fabricación digitales a los que Oxman se refiere como “diseño de propiedades variables” y “prototipado rápido de propiedades variables” (Variable Property Design / Variable Property Rapid Prototyping). El objetivo del diseño de propiedades variables es diseñar ensamblajes materiales que varíen gradualmente su composición, para optimizar sus propiedades y su rendimiento en

²⁴⁴ Ibídem, p. 338; MITCHELL, & McCULLOUGH. Op.cit., p. 236

²⁴⁵ OXMAN, N. Variable Property Rapid Prototyping. In *Virtual and Physical Prototyping*. Taylor & Francis, 2011, p. 11; OXMAN, N. Material Ecology. In OXMAN, R. & OXMAN, R. (Edits.), *Theories of the Digital in Architecture*. London; New York: Routledge, 2014, p. 322

²⁴⁶ MITCHELL, & McCULLOUGH. Op.cit., pp. 236-237

²⁴⁷ OXMAN, N. *Variable Property Rapid Prototyping*. Op.cit., p. 14; OXMAN, N. *Material Ecology*. Op.cit., p. 322

²⁴⁸ Véase Capítulo 2.1.2.1.2

²⁴⁹ OXMAN, N. *Variable Property Rapid Prototyping*. Op.cit., p. 8

relación con necesidades funcionales específicas. El prototipado rápido de propiedades variables permite mezclar y variar dinámicamente las ratios de diferentes materiales durante el proceso de impresión 3D, para crear materiales compuestos con microestructuras y componentes variables, con gradientes físicas y funcionales continuas.²⁵⁰ En consecuencia, estos “materiales funcionalmente graduados” tienen una composición y estructura variable, como resultado de una configuración anisótropa basada en la heterogeneidad de tamaño, propiedades y distribución de los elementos que los componen.

De acuerdo con Oxman, estos procesos de diseño y fabricación permiten superar la división predominante en la práctica profesional, en la que el arquitecto da forma al edificio y el ingeniero propone una solución estructural que determina la selección de materiales constructivos.²⁵¹ Contrariamente a este tipo de diseño, que prioriza la forma sobre la estructura y el material, Oxman invierte la relación para que la materia informe la solución estructural, la cual, a su vez, determina la configuración formal; en sus propias palabras:

“In this approach, material precedes shape, and it is the structuring of material properties as a function of performance that anticipates their form”²⁵².

En el diseño y la fabricación del prototipo “Beast” para una *chaise longue* (2009), Oxman aplica esta técnica de diseño para crear una silla que responde a necesidades estructurales y funcionales, por medio de una superficie única compuesta por un material funcionalmente graduado; es decir, una superficie con un patrón estructural intrínseco, determinado por la distribución controlada de diversos materiales durante los procesos de impresión 3D. Las necesidades estructurales y funcionales de la silla, que se traducen en su resistencia y confort, se satisfacen adaptando el grosor de la superficie, y la resistencia y flexibilidad de los materiales a la curvatura de su geometría y a la presión que ejerce el usuario.²⁵³ Así, la forma es el resultado de procesar mediante algoritmos los requerimientos mecánicos, materiales y funcionales. La gradación funcional-material se realizó a partir de una superficie teselada, compuesta de “células” con las que se conformó el patrón estructural y la distribución material de la superficie (Figura 2.27).

La distribución heterogénea de la composición del material permitió que la superficie de la silla tuviese diferentes comportamientos. En las superficies más horizontales y con curvatura más suave, donde se apoya el cuerpo, las células son gruesas, se distribuyen con menor densidad y se componen de materiales blandos y flexibles que permiten aumentar el confort. Por el contrario, en las zonas verticales y curvadas, las “células” se

²⁵⁰ Ibídem, pp. 8-10

²⁵¹ OXMAN, N. Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials. In OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Architectural Design: The New Structuralism*, 80 (4), 2010. p. 80

²⁵² Ibídem, p. 81

²⁵³ OXMAN, N. *Variable Property Rapid Prototyping*. Op.cit., p. 16

distribuyen con mayor densidad y se componen de materiales duros, ya que sufren mayor compresión y requieren mayor resistencia estructural (Figura 2.28).²⁵⁴ La transición desde materiales duros hacia materiales blandos y flexibles es gradual, de modo que la geometría y el patrón estructural son continuos y fluidos.

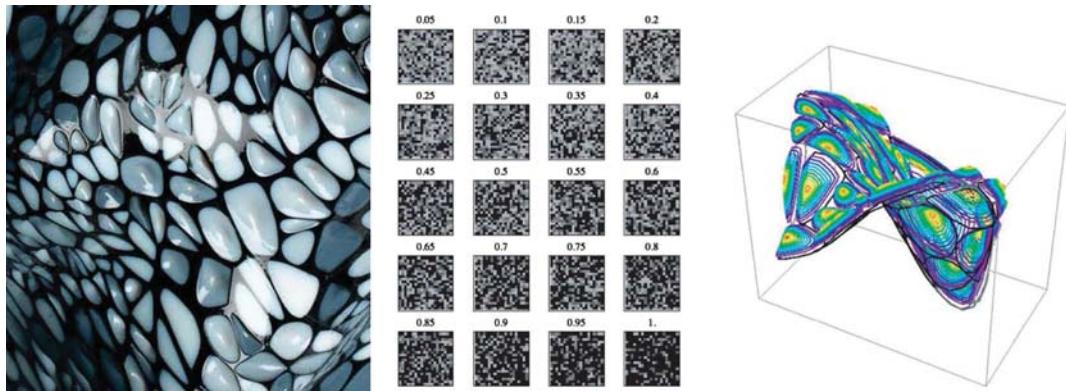


Figura 2.27 Organización material aplicando algoritmos y tesela de superficie

El prototipo de la silla se realizó a partir de 32 piezas ensambladas que fueron impresas con una impresora multi-material.²⁵⁵ Pero no se llegaron a utilizar diferentes materiales en la impresión, sino que se utilizaron resinas de diferentes colores para exemplificar y hacer visibles las diversas cualidades del material.²⁵⁶ El número de piezas indica que la impresora 3D utilizada tiene una capacidad limitada en cuanto al tamaño de impresión. Además, el tiempo de fabricación fue elevado.²⁵⁷



Figura 2.28 Distribución gradual de materiales según necesidades estructurales y de confort

El prototipo Beast puede considerarse como el predecesor de la silla Gemini (2014), para la cual se aplicó la anisotropía sintética combinando 44 materiales, a fin de crear un material funcionalmente graduado que varía su opacidad, rigidez y color en función

²⁵⁴ Ibídem, p. 19-20

²⁵⁵ Ibídem, p. 20

²⁵⁶ Ibídem, pp. 29-30

²⁵⁷ LIPSON & KURMAN. Op.cit., pp. 352-353

de condicionantes geométricos, estructurales y acústicos.²⁵⁸ Pero, a diferencia del proyecto para la silla Beast, con base en una superficie compuesta por un solo material funcionalmente graduado, en la silla Gemini los requerimientos estructurales se solventan combinando el material funcionalmente graduado con una superficie de madera (Figura 2.29).



Figura 2.29 Silla Gemini

El diseño de materiales compuestos se basa en el control y la combinación de propiedades diversas, como la resistencia, el peso y la flexibilidad. También se está investigando la inclusión a estos materiales de propiedades eléctricas, térmicas, magnéticas, ópticas, acústicas o sensitivas.²⁵⁹ Los materiales así conformados se denominan “inteligentes” porque son capaces de responder al ambiente.²⁶⁰ Posiblemente, los materiales inteligentes fabricados con técnicas de impresión multi-material requieren aún de cierto desarrollo antes de poder ser aplicados en sistemas estructurales o constructivos, pero los resultados logrados hasta ahora sugieren nuevas maneras de entender la relación entre forma, materia y función en la arquitectura.

2.2.3.4 Del creacionismo al materialismo digital

“En Deleuze hay una distinción entre dos maneras de producir formas en la naturaleza o en la sociedad: una que impone una forma previa a un material considerado inerte [...] y otra en que uno le saca la forma, sin imponerla, a un material activo”²⁶¹.

Manuel De Landa

Partiendo de la filosofía de Deleuze, De Landa propone dos teorías de “la génesis de la forma” cuya diferencia radica en la influencia de la materia en el diseño. La primera se asocia con el al “creacionismo”, según el cual primero se crea la forma y luego se le

²⁵⁸ OXMAN, N. *Projects: Gemini*. Recuperado el 22 de 08 de 2017, de Neri Oxman: <http://www.materialecology.com/projects/details/gemini>

²⁵⁹ OXMAN, N. *Variable Property Rapid Prototyping*. Op.cit., p. 29

²⁶⁰ ADDINGTON, M., & SCHODEK, D. *Smart Materials and New Technologies. For Architecture and design professions*. Oxford: Elsevier & Arhitectural Press, 2005. p.1

²⁶¹ DE LANDA, M. Filosofías del Diseño. El caso de los programas de modelado. *VERB, Processing*, 2001. p.130

impone a la materia como orden; es decir, el origen de la forma es trascendental.²⁶² En la segunda, se entiende que la forma es inmanente a la propia materia, es decir, que “Los materiales tienen una capacidad inherente para la generación de la forma, una capacidad inherente para auto-organizarse en ciertas condiciones”²⁶³. De acuerdo con esta segunda interpretación, De Landa propone una filosofía de diseño que disocia la génesis formal de cualquier fuente trascendental, basándose en el concepto “*filum maquinista*” de Deleuze, donde *filum* significa “una arquitectura abstracta de la cual podemos obtener [...] una amplia variedad de arquitecturas concretas”²⁶⁴, y “maquinista” se refiere a “la creación de la forma con materiales que no han sido reducidos a la obediencia por la homogeneización”²⁶⁵.

Estas filosofías del diseño –una de carácter “trascendente”, que se basa en la idea de que la forma proviene del exterior para moldear un material inerte, y otra de carácter “inmanente”, según la cual la materia tiene la capacidad de generar la forma– permiten a De Landa diferenciar los “materiales virtuales” del software de diseño digital. Por materiales virtuales se refiere a operaciones o funciones del software que clasifica entre las “simples” y las “complejas”.²⁶⁶ Las primeras se asocian a softwares de modelado sólido e implican la simulación del estado más simple de la materia; por ejemplo, la extrusión o rotación de una curva para crear formas tridimensionales. El uso de materiales virtuales que responden a estas funciones simples suele responder a la filosofía de diseño trascendental-creacionista. Asocia el segundo tipo de operaciones-funciones a simulaciones de un estado más complejo de la materia, como el líquido, y comprenden elementos geométricos como *splines*, la simulación dinámica de partículas o los algoritmos genéticos. En este caso, el diseñador no impone una forma predefinida, sino que utiliza estos materiales virtuales en el proceso de generación formal.

La idea de “material virtual” alude al uso de la información como materia prima en subprocesos computacionales de diseño con modelos digitales. Sin embargo, no contempla la materialización de la información por medios de fabricación digital, esto es, la transformación de bits en átomos. Pero las filosofías de diseño –trascendental e inmanente– propuestas por De Landa pueden extenderse al análisis de la convergencia entre lo computacional y lo material, cuyo desarrollo histórico se divide en las fases expuestas anteriormente: control de la forma, de la composición y del comportamiento.

El control de la forma, logrado a través del continuum digital inherente al CAD/CAM, se asocia a la filosofía del diseño de carácter trascendental-creacionista. Esta filosofía del diseño tendría su origen en el Renacimiento, en la teoría de Alberti, quien planteó el diseño como un ejercicio abstracto ya que era “ posible proyectar en la mente y espíritu

²⁶² Ibídem, pp.132, 134

²⁶³ Ibídem, p.134

²⁶⁴ Ibídem.

²⁶⁵ Ibídem.

²⁶⁶ Ibídem, pp. 138-139

las formas en su totalidad, dejando a un lado todo el material”²⁶⁷. Antes de la revolución industrial, la labor de los artesanos requería el conocimiento de las cualidades y el comportamiento de los materiales.²⁶⁸ Con la revolución industrial, la mecanización y la división del trabajo simplificaron el trabajo humano para convertirlo en acciones rutinarias y homogéneas que pudiesen ser ejecutadas ininterrumpidamente por máquinas.²⁶⁹ Este proceso se desarrolló paralelamente a la homogeneización de los materiales²⁷⁰ ya que la producción industrializada requería materiales homogéneos y no heterogéneos, isótropos y no anisótropos.

El uso de materiales isótropos en lugar de materiales anisótropos fomentó los procesos de diseño en los que la materia sería secundaria respecto a la forma.²⁷¹ Esto condujo a una “crisis de la forma” según Neri Oxman, por la que está quedó reducida a la geometría.²⁷² Así, se pasó por alto que las cualidades estructurales y geométricas de la forma están vinculadas al material y al proceso productivo.²⁷³ En este contexto, el uso que Gehry hace del CAD/CAM en el diseño de su escultura en Barcelona o el Guggenheim de Bilbao, ilustra el empleo de modelos digitales siguiendo la filosofía del diseño creacionista, en tanto la forma se crea sin considerar las propiedades de la materia y el uso de las herramientas digitales se reduce a la realización –eficiente– de una forma creada con independencia de dichas propiedades.

El muro diseñado por OMA para las tiendas Prada en Nueva York y Los Ángeles se basó en una investigación empírica de los materiales a ser empleados. En la medida que la forma respondía a una relación dialéctica entre las propiedades materiales y la geometría del muro, su diseño se aleja del creacionismo. A pesar de ello, las herramientas CAD/CAM no se emplearon en la generación de la forma, sino que se emplearon para modelar y fabricar los moldes; es decir, para aumentar el control sobre la forma.

²⁶⁷ ALBERTI, L. B. *De Re aedificatoria*. Madrid: Akal, 1991, p. 61

²⁶⁸ Por ejemplo, los herreros de la era preindustrial obtenían el hierro de diferentes minas, por lo cual estaban obligados a afrontar distintas mezclas e impurezas que impulsaban su creatividad y evitaban el trabajo rutinario; además, la heterogeneidad de los materiales con que trabajan no solo se respetaba sino que se integraba al proceso productivo-creativo. Esta integración se producía en la medida en que se trabajaba teniendo en cuenta las capacidades inherentes a la materia para auto-organizarse. Así, los metalúrgicos preindustriales sabían que las transiciones de fase de un metal –de su estado líquido al sólido– eran fundamentales, ya que la manera en que se cruza ese punto crítico, determinaba tanto el acabado como las propiedades del objeto; por ejemplo, si un metal fundido se solidifica lentamente al contacto con el aire, se obtiene un material más cristalino en tanto las moléculas tienen el tiempo necesario para encontrar su lugar en la red cristalina; por el contrario, si el metal se enfriá rápidamente sumergiéndolo en agua fría, se obtiene un metal más amorfo en la medida en que el enfriamiento rápido imposibilita que se organicen en series regulares. DE LANDA, M. *Filosofías del Diseño. El caso de los programas de modelado*. Op.cit., pp. 132-135

²⁶⁹ RATHENAU, W. La Mecanización del Mundo. En MALDONADO, T. *Tecnica y Cultura: El debate alemán entre Bismarck y Weimar*. Buenos Aires: Infinito, 2002. p. 155

²⁷⁰ DE LANDA, M. Filosofías del Diseño. El caso de los programas de modelado. *VERB, Processing*, 2001, p. 136

²⁷¹ OXMAN, N. *PhD Thesis: Material-based Design Computation*. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2010. p. 27

²⁷² Ibídem, p. 72

²⁷³ Ibídem, pp. 31, 73

El sistema Timberfabric de Weinand y Hudert también se basó en investigaciones empíricas sobre la materia. Su generación formal estuvo determinada por las cualidades de la madera: el aumento de resistencia al curvarse y su flexibilidad. Estas cualidades intrínsecas de la madera fueron codificadas e introducidas en un modelo digital, para simular y evaluar el comportamiento estructural del sistema. Por esto, Weinand y Hudert fueron pioneros en el desarrollo de procesos de generación formal en los que el CAD se emplea para evaluar una forma que emerge del control de la composición interna del material.

Gramazio y Kohler instrumentalizaron la forma del elemento constructivo –el ladrillo–, más que sus cualidades materiales. Por otro lado, la imagen de la fachada se generó con una simulación digital, para luego hacer corresponder la imagen con un muro, y los píxeles con ladrillos. Una equiparación alcanzada a través de procesos de fabricación digital que permitieron rotar y situar los ladrillos de forma precisa para generar los contrastes de luz que crean la imagen. Este control de la composición de la fachada requirió producir información a través del modelo de diseño, para utilizarla como materia prima de los procesos computacionales que controlan los robots de fabricación.

Si Weinand y Hudert explotaron las cualidades anisótropas de la materia en la generación formal y Gramazio y Kohler aplicaron materiales estandarizados de una manera no-estándar, el trabajo de Oxman se caracteriza por utilizar el CAD/CAM para programar y sintetizar materiales inteligentes que se adaptan a los estímulos del entorno. Es decir, crea materiales con un comportamiento controlado, estructurando su composición interna mediante modelos digitales e impresoras 3D que imprimen simultáneamente diversos materiales a gran resolución. De esta manera se invierte la lógica de la estandarización industrial en la que la homogeneización de los materiales dio lugar a sistemas constructivos donde a cada requisito le corresponde un material o sistema; por ejemplo, los cerramientos multicapa, generados por capas superpuestas de diversos materiales entre el interior y el exterior.²⁷⁴ Por el contrario, en el trabajo de Oxman el diseño de un material funcionalmente graduado permite responder a múltiples requerimientos, lo que sugiere la transición desde el uso de materiales homogenizados hacia los *materiales no-estándar*.

A los materiales virtuales propuestos por De Landa, basados en el cómputo de información en sub-procesos de diseño mediante modelos digitales, deben sumarse los *materiales digitales* cuya forma, composición o comportamiento son determinados por el diseñador. La evolución de estos materiales digitales facilitaría la transición de una filosofía de diseño trascendental hacia una de diseño inmanente, es decir, permitiría superar el creacionismo para alcanzar lo que podría denominarse el *materialismo digital*.

²⁷⁴ MOUSSAVI, y KUBO. Op.cit.

2.3 Procesos de diseño y fabricación digital del Tornado

La multiplicidad de factores que conforman la materialidad digital sugiere que ésta no surge de forma inmediata y directa como resultado del descubrimiento de un material o técnica, sino que emerge paulatinamente como resultado de la combinación de materiales y técnicas asociadas a las tecnologías de diseño y fabricación digital. Este desarrollo no-lineal tiene lugar durante un periodo de hibridación en el que conviven la innovación tecnológica y la tradición arquitectónica. Es decir, de una nueva materialidad no implica el reemplazo inmediato de los materiales, los procesos o las ideas tradicionales. En este sentido el Guggenheim de Bilbao fue paradigmático, ya que su generación formal fue el resultado de un proceso tradicional de diseño con herramientas tradicionales pero su construcción se confió a las herramientas digitales.

Tras la construcción del Guggenheim se han desarrollado nuevas técnicas de diseño digital, aunque el CAD/CAM en la actualidad sigue empleándose en la arquitectura de una manera similar a como lo utilizó Gehry. En proyectos posteriores, como el diseño del centro comercial Bory Mall de Massimiliano Fuksas, el CAD sigue utilizándose combinándolo con técnicas de diseño tradicionales, pero su combinación con el CAM ha permitido conjugar las cualidades del acero, el vidrio y el hormigón y conseguir así nuevas expresiones arquitectónicas.

2.3.1 El Bory Mall y la fachada estructural del Tornado

El centro comercial Bory Mall en Bratislava es la primera fase del plan de desarrollo urbano Bory, que cuenta con zonas comerciales y residenciales, oficinas y servicios públicos. Tras los recortes presupuestarios que obligaron a reducir el tamaño y replantear el programa del proyecto, se construyó un edificio de tres plantas con 150 locales comerciales y 12 salas de cine, que suman un total 55.000 metros cuadrados de espacio alquilable, de los 115.000 metros cuadrados que tiene todo el edificio. El espacio central del complejo tiene un área de 2.200 metros cuadrados, en la que se ubica una zona de restaurantes alrededor de un patio abierto y ajardinado. La zona de restaurantes y el patio se encuentran separados por el elemento principal del centro comercial, el Tornado, una fachada acristalada y auto-portante que se pliega desde la cubierta hacia la planta baja, cubre la zona de comidas y envuelve el patio central (Figura 2.30).

En términos plásticos, la transición hacia una arquitectura digital se caracteriza por el paso de los volúmenes simples, regulares y ortogonales que resultaron de mecanizar la producción arquitectónica, hacia las superficies curvilíneas, irregulares y fluidas que caracterizan la estética digital. Estas cualidades plásticas, que se ven reflejadas en el Tornado, son el resultado de los procesos de fabricación basados en la personalización en masa de los componentes de la malla estructural. Anteriormente, las superficies curvilíneas diseñadas por Fuksas se articulaban a través de nudos que se diferencian de

los montantes (Figura 2.31). Pero en el Tornado cada nudo tiene una geometría que se adapta a los montantes de manera que se une solidariamente a ellos para conseguir una malla fluida. En este sentido, la malla estructural del Tornado ilustra la transición desde el lenguaje moderno que enfatiza el ensamblaje de elementos, hacia un lenguaje digital que busca la continuidad.



Figura 2.30 Bory Mall; exterior del Tornado; espacio interior del Tornado



Figura 2.31 Feria de Milán; Oficina Central De Cecco; edificio en Plaza 18 de Septiembre

2.3.2 Modelado, racionalización y evaluación de la malla estructural

En el proyecto del Tornado el arquitecto realizó dibujos en papel, a partir de los cuales se creó un modelo digital.²⁷⁵ La digitalización fue la transposición de una forma previamente definida y conceptualizada en la mente del arquitecto a un modelo digital. El poder computacional del ordenador no se explotó para generar la forma, pero se utilizó para representar, modelar, evaluar, optimizar y fabricar los componentes del edificio.

La propuesta inicial del Tornado tuvo que ser redimensionada después de un recorte presupuestario que paralizó el proyecto. Cuando el proyecto se reactivó, el arquitecto Riccardo Ferrari entró a formar parte del mismo para actualizar el modelo digital de acuerdo con las nuevas necesidades. Ferrari no realizó el mismo proceso de transposición inicial, sino que modificó el modelo existente tomando como referencia 6

²⁷⁵ SCOTTI, E. (27 de 11 de 2014). *Entrevista al arquitecto director de proyecto del Tornado.* (Abondano, D. Entrevistador) Roma.

curvas-críticas que se establecieron desde la geometría previa: 4 secciones verticales y 2 curvas en planta, la superior (cubierta) y la inferior (suelo-planta baja) (Figura 2.32).²⁷⁶ En este sentido no hubo procesamiento de datos que repercutieran sobre en la forma del edificio, en tanto que el modelo digital fue manipulado “manualmente” a través del ratón, no por la programación de instrucciones –scripting–.

Una vez definido el modelo de la superficie se prosiguió con su racionalización para generar una forma geométrica que permitiese controlar las dimensiones y la volumetría.²⁷⁷ Con esta racionalización la superficie se hizo computable y, gracias a ello, fue posible aplicar técnicas de análisis –estructurales y constructivas– que aportaron la información necesaria para determinar si el proyecto podría construirse con el presupuesto asignado. La racionalización se basó en el teselado triangular de la superficie, o modelo *wireframe* (Figura 2.33). Con esta triangulación, la superficie quedó conformada por elementos planos que se tradujeron en las superficies de cristal o metal en el edificio construido. Estas superficies estaban condicionadas por las dimensiones de las láminas de vidrio que, juntamente con los requisitos estructurales, determinaron el tamaño y la densidad de la malla.²⁷⁸

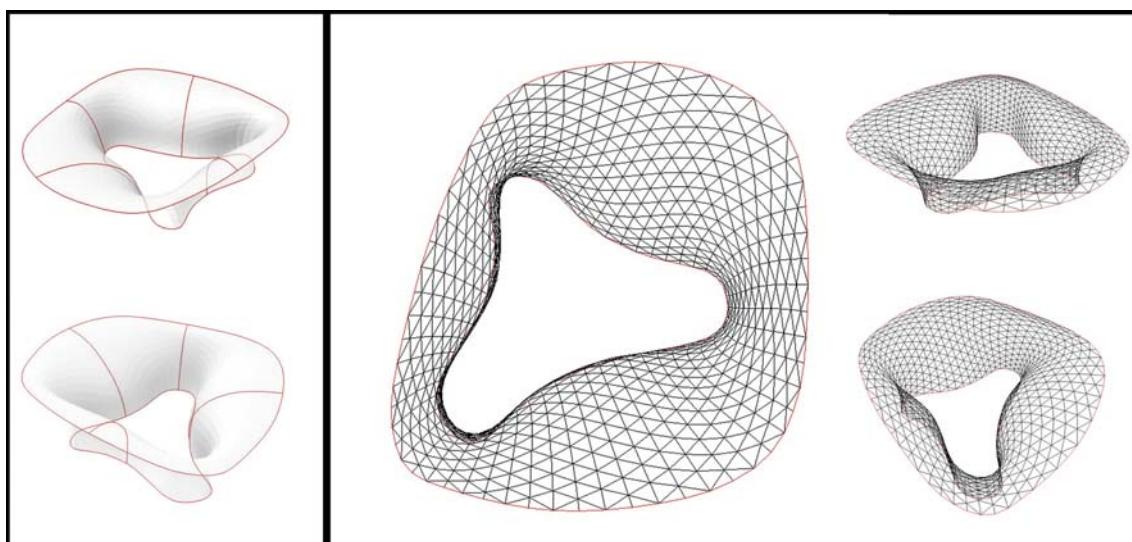


Figura 2.32 Curvas para generar la geometría de la superficie. **Figura 2.33** Malla estructural derivada de la racionalización de la superficie.

Las restricciones estructurales y económicas determinaron que las aristas de los vidrios triangulares debían medir entre 1,5 y 2,0 metros. Teniendo en cuenta estas premisas, Ferrari modeló la malla de la siguiente manera: 1) dividió en 35 partes iguales las dos curvas que definen la superficie en planta –la de cubierta y la de planta baja–; 2) unió los puntos en la curva superior con los de la curva inferior trazando una sección por la

²⁷⁶ FERRARI, R. (07 de 12 de 2014). *Entrevista al modelador del Tornado*. (Abondano, D. Entrevistador) Skype.

²⁷⁷ Véase capítulo: 2.2.3.1.2

²⁷⁸ Un aumento en el tamaño de los paños de vidrio implicaba mayores esfuerzos estructurales. Igualmente, el tamaño de los paños tuvo que mantenerse en las dimensiones estándar del mercado para evitar incremento de costes.

superficie de manera que se generaron 35 secciones, o *b-splines*: 3) copió y rotó “manualmente” los ejes para darles inclinación; 4) hizo otra copia de los ejes y los rotó en el sentido contrario para generar el entramado; 5) situó ejes secundarios entre las secciones iniciales para generar las triangulaciones de la malla (Figura 2.34).

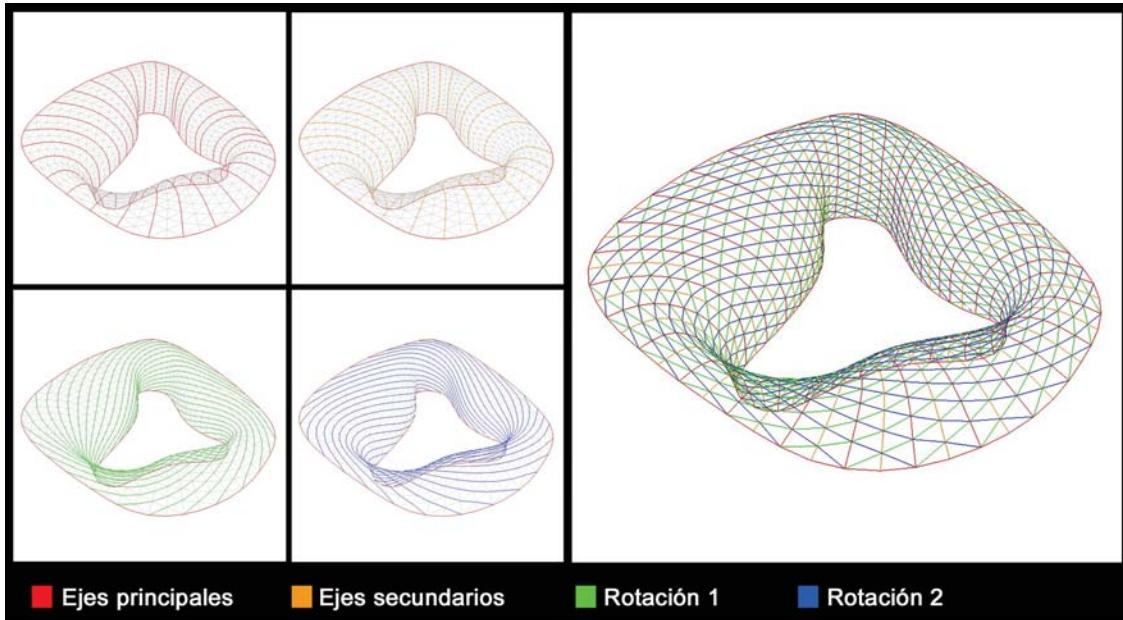


Figura 2.34 Modelado de malla estructural

El modelo de la malla se envió a la ingeniería Knippers Helbig para que analizara la geometría y calculara la dimensión de los elementos estructurales. Con el análisis inicial se detectaron problemas de tensión –estática– que se solucionaron modificando ligeramente la rotación de la malla, sin que esto representara un cambio significativo de su geometría.²⁷⁹ Esta fue la única modificación de la geometría de la malla estructural. Inicialmente, el proyecto planteaba perfiles de 12 centímetros de canto, pero la propuesta inicial de los ingenieros incluía perfiles de 17 centímetros en los casos más desfavorables. Esto condujo a hacer perfiles con secciones variables que oscilaban entre 12 y 17 centímetros de canto y con un grosor interno que variara según las necesidades estructurales, por cuanto el objetivo de diseño era evitar que los cambios dimensionales se apreciaran visualmente.²⁸⁰ Para cumplir con estos requisitos fue necesario recurrir a la fabricación digital de los perfiles estructurales que, a su vez, funcionaban como montantes para los paneles de la fachada, los cuales también fueron fabricados a partir del modelo digital. Una vez definidas las dimensiones de los perfiles, se dio paso al modelado y a la fabricación de los nudos.

La reconfiguración del proyecto, a causa de los recortes presupuestarios, se aprovechó para aumentar la iluminación del espacio alrededor del Tornado, pero minimizando la incidencia de luz directa sobre la zona de restaurantes.²⁸¹ Para ello se realizó un estudio

²⁷⁹ FERRARI. Op.cit.

²⁸⁰ SCOTTI. Op.cit.

²⁸¹ Ibídem

de iluminación en el cual Ferrari insertó el modelo original en Rhino –en el programa Sketch-up– y realizó una simulación de la radiación solar que permitió visualizar las zonas de luz y sombra a lo largo del día y del año (Figura 2.35).²⁸² En este sentido, el cálculo computacional permitió explorar diferentes alternativas de iluminación, que ayudaron a tomar decisiones respecto a las zonas transparentes y opacas de la fachada.

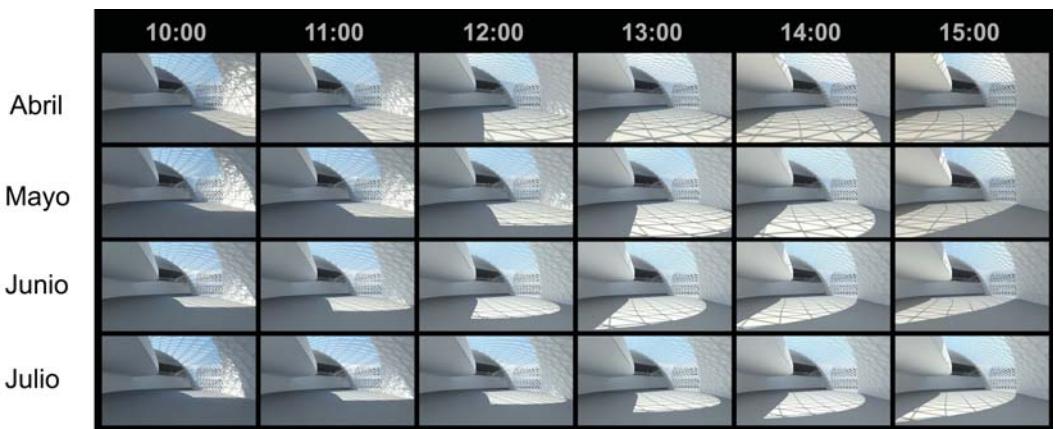


Figura 2.35 Estudio de iluminación de la zona de comidas

2.3.3 Diseño y fabricación digital de los nudos

El diseño de la superficie tenía como premisa conseguir una malla estructural con apariencia continua y fluida. Estas cualidades plásticas podían conseguirse curvando los montantes de la malla, pero esto hubiera incrementado sustancialmente los costes. Por este motivo, la sinuosidad de la superficie fue asumida por los nudos. En cada nudo convergen seis montantes rectos, cuyos ángulos de incidencia están determinados por la forma curvilínea e irregular de la superficie, de manera que cada montante se conecta al nudo con un ángulo diferente. Los ingenieros de Knippers Helbig consiguieron nudos cuya geometría era el resultado de la confluencia de los perfiles, pero esta solución acentuaba una dirección específica y rompía la continuidad y fluidez pretendida por el equipo de diseño.²⁸³ Asimismo, al resultar directamente de la confluencia de los perfiles, la propuesta de los ingenieros presentaba una angulosidad que requería alisar los nudos para conseguir la continuidad plástica en la malla. Sin embargo, el alisado no garantizaba un acabado óptimo y, además, implicaba incrementar trabajo y costes.

El equipo de diseño propuso entonces un nudo cuya superficie frontal tenía una forma que, contrariamente a los nudos con aristas sobresalientes propuestos por los ingenieros, se “disolvía” entre los perfiles generando una malla continua. Para ello, cada nudo se modeló individualmente con el software Rhino, siguiendo este proceso (Figura 2.36): 1) se toman como referencia las aristas-curvas de la cara superior de dos perfiles adyacentes y, con la herramienta se unen tangencialmente [comando: BlendCrv »

²⁸² FERRARI. Op.cit.

²⁸³ Ibídem

Continuity_1=G1 Continuity_2 =G1]; 2) la unión tangencial de las aristas de todos los perfiles que se conectan al nudo genera las curvas que componen el contorno-perfil del nudo, desde el cual se genera la superficie [comando: patch]; 3) el mismo proceso se repite con la cara inferior del nudo; 4) las superficies laterales del nudo se generan desde las líneas de contorno-perfil de las superficies inferiores o superiores del nudo [comando: Sweep_2]; 5) una vez definida la geometría del nudo, el archivo se enviaba a la empresa contratista Metal Yapi, para su mecanización y fabricación.

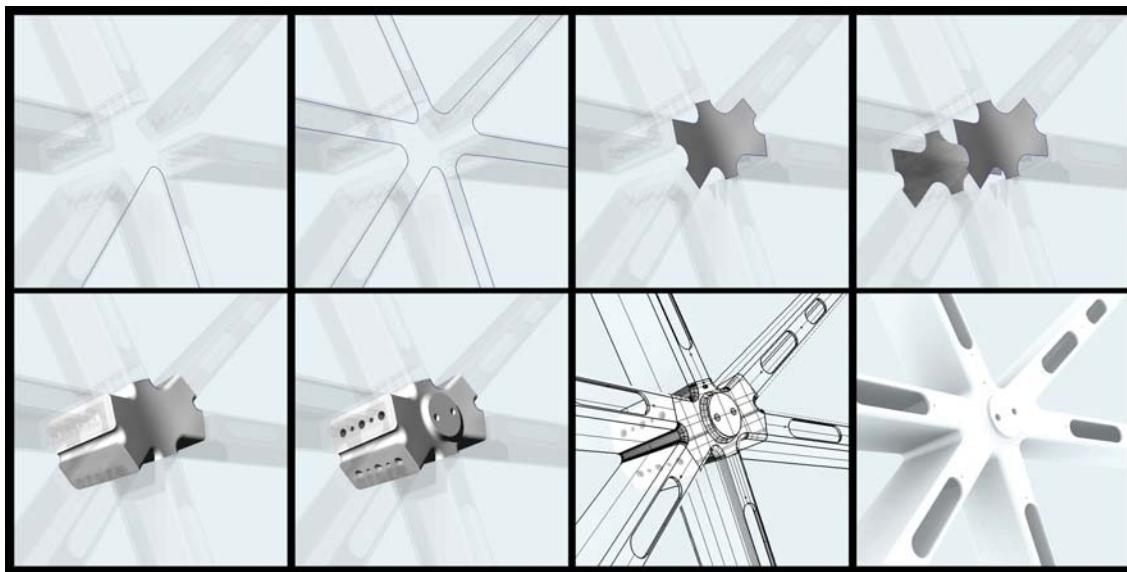


Figura 2.36 Proceso de modelación de nudo

Metal Yapi remodeló cada nudo en el software Solid Works para generar archivos en formato “.step”, compatible con los softwares SolidCAM y Cimatron. Este trabajo requirió cinco modeladores trabajando simultáneamente para producir uno o dos nudos al día.²⁸⁴ Previamente a la mecanización de la fabricación del nudo, en algunos casos, fue necesario modificar la geometría pues tenía radios muy pequeños que no podían ser ejecutados con las máquinas CNC. Antes de ser enviados a producción, los archivos eran remitidos desde Metal Yapi al equipo de diseño, para la revisión y aprobación de la geometría definitiva. Una vez se tenía la aprobación del equipo de diseño se inició la fabricación del nudo mediante dos fases, la generación de su contorno, cortando una plancha de acero, y el fresado de cada pieza con máquinas CNC para darle la forma y el acabado definitivo.

De acuerdo con la arquitecta Esra Enke de Metal Yapi,²⁸⁵ el primer paso fue generar el contorno del nudo en un archivo CAD 2D y emplear un *nesting software* para optimizar la ubicación del contorno de varios nudos en las planchas de acero. El archivo con la ubicación de los contornos se empleó para controlar la máquina de corte de oxígeno que fresa el perfil del nudo desde la plancha (Figura 2.37). Las piezas generadas desde las

²⁸⁴ ENKE, E. (15 de 01 de 2015). *Entrevista a arquitecta de Metal Yapi*. (Abondano, D. Entrevistador) Skype.

²⁸⁵ Ibídem

planchas se mecanizaron con una máquina CNC de tres ejes lo que permitió reproducir la forma aproximada del nudo. Las aristas fueron redondeadas para conectarlas con las aristas también redondeadas de los perfiles (Figura 2.38). Finalmente, los nudos se remecanizaron con máquinas CNC de cinco ejes para redondear y alisar las superficies y alcanzar la continuidad pretendida por el equipo de diseño (Figura 2.39).



Figura 2.37 Corte de oxígeno de planchas de acero y perfil de nudos. **Figura 2.38** Nudos fresados con máquina CNC de 3 ejes



Figura 2.39 Fresadora CNC de 5 ejes y nudos acabados

Los cristales y los perfiles tubulares también fueron producidos con máquinas CNC (Figura 2.40). La dimensión y el acabado del corte requerían mucha precisión, puesto que las tolerancias que se estaban manejando estaban entre 1mm y 2mm. Enke considera que el empleo de tecnologías CAD/CAM fue fundamental por ser el único método adecuado para producir los 800 nudos que componen la estructura en los tiempos especificados y, sobre todo, con una precisión que se mantuviera en las tolerancias de 1mm y 2mm.²⁸⁶

La fabricación de los nudos requirió operarios para importar los archivos “.step” al software CAM (Figura 2.41) y definir los protocolos de fabricación: el tipo de máquina CNC y el tipo de herramienta de corte-fresado, la compensación –si la trayectoria de corte se realiza alineada con el eje, por su interior o su exterior–, la dimensión y el tipo de material de la superficie a mecanizar, el punto de referencia inicial de la trayectoria y

²⁸⁶ Ibídem

la simulación del mecanizado.²⁸⁷ En el caso de los nudos los puntos de referencia eran dos agujeros alineados sobre su eje central (Figura 2.42) que, a su vez, fueron aprovechados para ubicar las piezas de anclaje del vidrio.²⁸⁸ Igualmente, la cara superior e inferior del nudo requirieron un fresado muy preciso que, de acuerdo con Enke, necesitó entre 6 y 24 horas por nudo, un tiempo muy superior a otros proyectos de geometrías complejas.²⁸⁹ Finalmente, en las instalaciones de Metal Yapi se preensamblaron fragmentos del Tornado ya que era más fácil soldar la piezas en taller. El tamaño de estos fragmentos estuvo determinado por el tamaño de los contenedores utilizados para su transporte desde Turquía a Eslovaquia.



Figura 2.40 Fabricación de perfil con máquina CNC. **Figura 2.41** Ajuste de parámetros de fabricación en software CAM

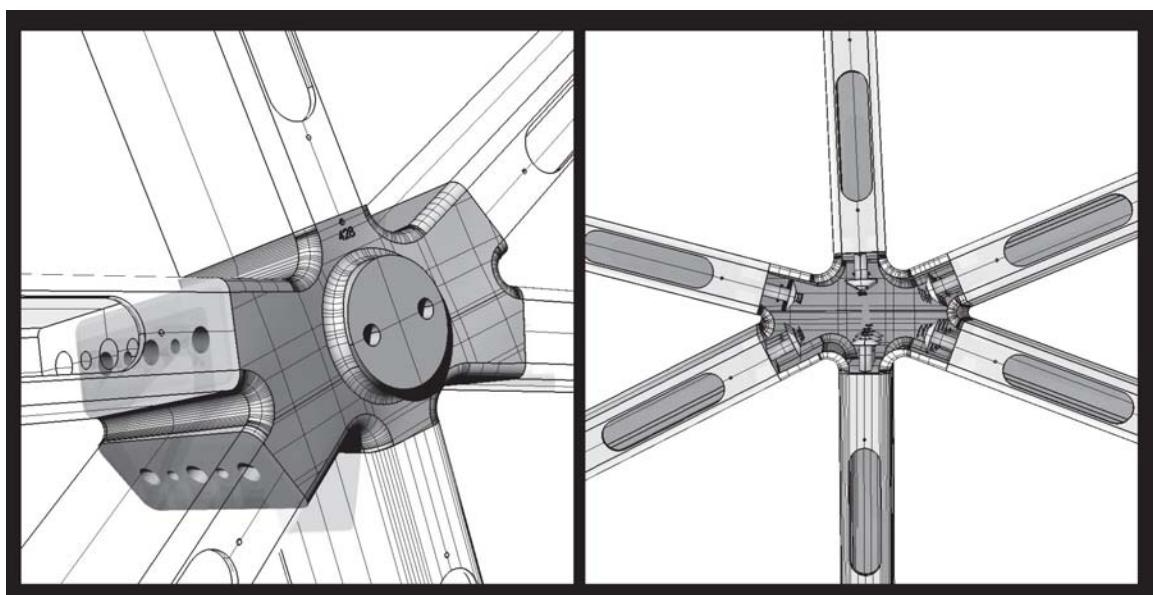


Figura 2.42 Modelo del nudo mecanizado

²⁸⁷ Ibídem

²⁸⁸ SCOTTI. Op.cit.

²⁸⁹ ENKE. Op.cit.

Tanto Emiliano Scotti como Esra Enke consideran que la realización del Tornado no hubiera sido posible sin las herramientas de diseño y fabricación digital. Para Scotti, el CAD/CAM permitió representar, modelar, evaluar y fabricar el proyecto en el tiempo y con el presupuesto estimado. Para Enke, la precisión de las herramientas de fabricación digital para ejecutar elementos estructurales, con tolerancias entre 1 y 2 milímetros, era imposible de alcanzar con procesos de mecanización tradicionales.

Por otra parte, la realización del Tornado también refleja el cambio en las relaciones de producción que están emergiendo con las tecnologías digitales. En el proceso de diseño, los diversos actores participantes en el proyecto interactuaron e intercambiaron información en tiempo real, utilizando modelos digitales que ayudaron a tomar decisiones consensuadas muy rápidamente, a pesar de estar trabajando en diversos países. Asimismo, la fabricación de los nudos no se hizo con base en planos que debieran ser interpretados por el fabricante, sino a partir de archivos digitales que igualmente implicaron una nueva relación contractual, pues adquirieron valor legal: el contrato entre Metal Yapi y Fuksas se hizo en función del modelo digital, mientras que el visto bueno del equipo de diseño para la puesta en obra se dio sobre los modelos digitales enviados por Metal Yapi.²⁹⁰

2.3.4 Hibridación de las cualidades del hierro, el vidrio y el hormigón

El Tornado forma parte de una serie de proyectos en los que Fuksas ha empleado superficies curvilíneas y fluidas para generar la forma y delimitar el espacio, pero manteniendo la relación visual entre el espacio interior y el exterior. Entre estos proyectos se encuentran la Feria de Milán (2005), el centro comercial MyZeil en Frankfurt (2009), el edificio en la Plaza 18 de Septiembre en Eindhoven (2010) y la restauración del edificio de la Unión Militar en Roma (2013). A excepción de la Feria de Milán, en la que se utilizan pilares, estas superficies son auto-portantes debido a la malla estructural que las conforman y en todos los casos se pliegan con libertad en diversas direcciones para generar formas con gran expresividad plástica.

La expresividad plástica de las superficies de Fuksas evocan el uso del hormigón en los inicios del siglo XX, por la libertad que este material aportó para realizar formas escultóricas. Pero, mientras con hormigón se construyen superficies monolíticas sin fisuras ni anclajes, en el caso de las estructuras de Fuksas se consiguen superficies igualmente continuas con elementos discretos. Además, la opacidad del hormigón crea superficies que separan radicalmente el espacio interior del exterior. En la malla estructural de los proyectos de Fuksas, por el contrario, se crea un *continuum espacial* entre interior y exterior por la combinación de la malla con la transparencia del cerramiento de vidrio. De este modo, la superficie del Tornado combina las cualidades plásticas del hormigón con las cualidades espaciales del hierro y el vidrio y diluye la separación entre soporte y cerramiento.

²⁹⁰ SCOTTI. Op.cit.

El Tornado se diferencia de las mallas estructurales precedentes. Las mallas de la Feria de Milán y del edificio de la Unión Militar, tienen nudos con una forma estándar, circular, mientras que en el comercial MyZeil y en el edificio en la Plaza 18 de Septiembre, tienen forma de estrella (Figura 2.43). En el Tornado la geometría del nudo se fusiona con los montantes, de modo que se crea una malla continua sin empalmes ni anclajes visibles (Figura 2.44).



Figura 2.43 Detalle de nudos estructurales: Feria de Milán; Edificio Unión Militar; Centro comercial MyZeil; Edificio en Plaza 18 de Septiembre



Figura 2.44 Continuidad entre nudos y montantes del Tornado

El proyecto del Tornado representa la hibridación entre la generación formal tradicional y el diseño digital. Es decir, es el resultado de la combinación de un proceso de ideación en el que se llega a la forma con ayuda de bocetos o modelos, conjuntamente con el empleo de herramientas digitales para evaluar su comportamiento y fabricar eficientemente los elementos que la componen. Su forma curvilínea y fluida se consigue mediante la fabricación de elementos constructivos con diferentes formas y dimensiones. La malla estructural del Tornado tiene una forma irregular y variable, pero es fluida y mantiene la continuidad entre el espacio interior y el exterior conseguida por la transparencia del vidrio. En el Tornado, las superficies curvilíneas y fluidas que se asocian a la arquitectura digital expresan cualidades formales y espaciales que se identifican con la arquitectura moderna.

Conclusiones

La materialidad digital amplia la noción de “materialidad” vigente desde la sociedad industrial. La materialidad industrial se basó en el hierro, el vidrio y el hormigón. El uso de estos materiales dio lugar a nuevas cualidades formales y espaciales al fomentar la sustitución del muro de piedra por el esqueleto estructural y el cerramiento transparente: las estructuras de hierro y hormigón permitieron la construcción de espacios amplios y diáfanos, al mismo tiempo que el cerramiento de vidrio facilitó la continuidad visual entre los espacios interior y exterior; la maleabilidad del hormigón hizo posible nuevas expresiones plásticas.

La materialidad digital se extiende más allá de la materia, para incluir la información y el fenómeno. El fenómeno deviene un material de trabajo pues se puede percibir, codificar y manipular con herramientas digitales. La información deviene material de trabajo a través de procesos computacionales ejecutados mediante modelos digitales. Gracias a ello se consigue una libertad plástica sin precedentes; se re-conceptualizan materiales naturales y artificiales; se crean nuevos materiales que resultan de la combinación de las propiedades de los materiales existentes para mejorar o crear nuevas prestaciones; y se instrumentalizan los fenómenos (Figura 2.45) . La materialidad digital expande la noción de “materialidad” más allá de los materiales constructivos compuestos por sustancias corpóreas.

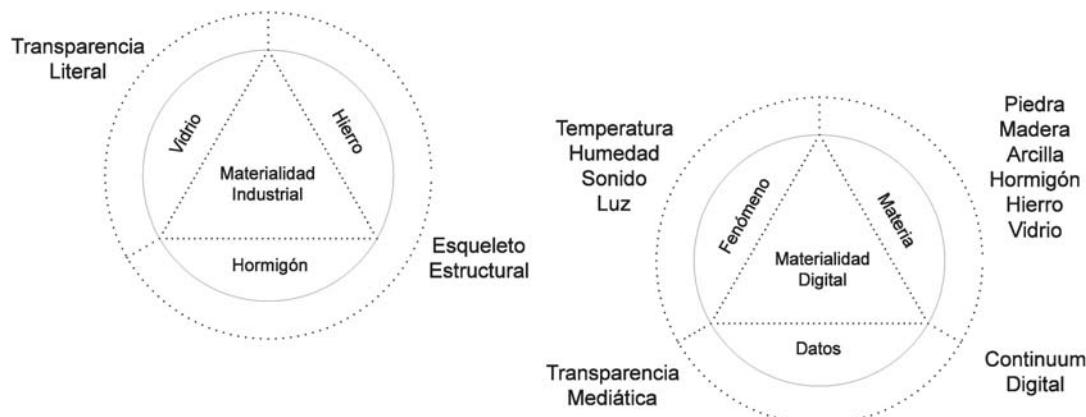


Figura 2.45 Expansión de la noción de “materialidad”

La materialidad digital también implica la expansión de las cualidades formales y espaciales introducidas por la materialidad industrial. Si la transparencia del vidrio facilitó la continuidad visual entre el espacio interior y el exterior del edificio, con la transparencia mediática no solo se genera una continuidad audio-visual entre el espacio actual y el ciberespacio, sino que convierte al edificio en interfaz que permite “ver” fenómenos “invisibles” a través de efectos creados por el edificio. Al concebir el edificio como una interfaz, el arquitecto trabaja con los fenómenos más que con geometrías y el diseño se orienta al comportamiento más que a la forma del edificio.

La maleabilidad del hormigón hizo posible una nueva expresividad plástica en la arquitectura moderna, expresividad que pasó a un segundo plano frente a la eficiencia que aportaron los sistemas estructurales y constructivos basados en elementos prefabricados y estandarizados construidos con ese material. Con la materialidad digital, no es necesario renunciar a las formas libres y complejas para conseguir procesos de producción eficientes. El *continuum digital* permite explorar formas complejas y materializarlas de forma automática con las tecnologías de fabricación digital. Esta nueva expresividad plástica viene asociada a la facilidad y precisión que aporta el modelo digital para modelar y visualizar formas complejas y para controlar la forma. Pero lo que garantiza la realización de estas formas es la información que se extrae del modelo digital para evaluar aspectos estructurales y constructivos y la información que genera para producir componentes con herramientas de fabricación digital. Por consiguiente, el modelo digital garantiza la constructibilidad y la materialización del proyecto con formas complejas, puesto que puede convertir la información de diseño en información constructiva a través del CAD/CAM.

La materialidad digital ha extendido las cualidades de los materiales naturales. De la madera se han explotado sus cualidades intrínsecas como la flexibilidad –facilitada por la disposición anisótropa de sus fibras– para entrelazar elementos laminares y crear mallas estructurales que permiten nuevas expresiones plásticas y funcionales. Del ladrillo se ha explotado su geometría para crear con ellos muros, a semejanza de los píxeles de las imágenes digitales. Con las estructuras metálicas se han alcanzado formas que solo se conseguían mediante la maleabilidad del hormigón, pero manteniendo la conexión visual entre el espacio interior y el exterior.

Además de entender las expresiones formales y espaciales, asociándolas a los materiales y técnicas de producción derivados de las revoluciones industrial e informacional, el estudio conjunto de la materialidad industrial y la materialidad digital ha permitido identificar algunos de los fundamentos materiales y productivos que subyacen en la arquitectura moderna y en la arquitectura digital. El *continuum espacial* –la supresión de límites entre exterior e interior y la ausencia de demarcaciones en el interior– fue posible gracias al esqueleto estructural y al vidrio. A partir de esta libertad de movimiento, el espacio se concibió como un “campo animado” por el movimiento de las personas más que como un vacío que alberga actividades. Con la instrumentalización del fenómeno como material arquitectónico, el espacio comprende no solo el movimiento, sino también cualidades lumínicas, acústicas, olfativas o táctiles.

La animación subyace bajo el concepto de “arquitectura líquida”, una arquitectura que puede mutar al emplazarse en el ciberespacio, al no estar sujeta a las restricciones físicas. El ciberespacio que sugiere Novak se correspondería con el entorno de diseño propuesto por Kalay, en el sentido de que ambos aluden a un entorno digital de donde el diseño emerge; un entorno considerado como un campo de fuerzas que influyen y determinan el desarrollo del diseño. En este entorno, la “arquitectura líquida” no se crea

a partir de una forma dada, sino a partir de unos procedimientos que la generan a lo largo del tiempo. Así, la arquitectura líquida se manifiesta, no solo en el espacio sino también a través del tiempo, de una manera similar a como el espacio convertido en fenómeno cambia durante la vida del edificio. El espacio como fenómeno implica que se transforma y reconfigura a lo largo del tiempo, como resultado de la interacción del objeto arquitectónico con el entorno. Esto supone una nueva condición espacial, o espacialidad, que resulta de la hibridación del espacio “real” con el ciberespacio y produce efectos ambientales y atmosféricos que otorgan carácter y sentido al espacio arquitectónico.

La noción de “materialidad digital” abarca la animación, la interacción, la adaptación, el campo, la fluidez, la continuidad, la complejidad y la anisotropía que se reflejan en las cualidades formales, espaciales y funcionales del edificio. La materialidad digital se encuentra relacionada tanto con las ideas como con las cualidades del edificio que responden a la integración de los materiales, herramientas y protocolos de producción digital, todos factores que influyen en el diseño arquitectónico. En este contexto, la noción de “materialidad digital” está ayudando a recobrar la esencia de la arquitectura como práctica material.

El conjunto de ideas, materiales, herramientas y procesos de producción que conforman la materialidad digital, constituyen la base práctica y teórica del desarrollo de la arquitectura digital, del mismo modo en que la materialidad industrial sentó las bases para el desarrollo de la arquitectura moderna. La producción en masa de hierro fue el factor determinante para el desarrollo de la materialidad industrial, al igual que el cómputo de información lo ha sido para la materialidad digital.

Inicialmente, la producción en masa de hierro se aplicó para realizar edificios cuyas formas presentaban estilos historicistas, es decir, para repetir formas tradicionales y acostumbradas. En el caso de la materialidad digital, la repetición de las formas tradicionales no se relaciona con los estilos sino con los procesos productivos. Se emplean modelos digitales para construir formas que han sido concebidas sin la ayuda de herramientas digitales y en procesos de diseño en los que el uso del ordenador se reduce a la representación del proyecto mediante plantas, secciones, alzados, axonometrías y perspectivas. La materialidad digital se aplica de un modo innovador cuando el cálculo computacional cambia la naturaleza del diseño. Esto representa un cambio paradigmático que se analizará con mayor profundidad en el siguiente capítulo.

Bibliografía

- ADDINGTON, M., & SCHODEK, D. *Smart Materials and New Technologies. For Architecture and design professions*. Oxford: Elsevier & Arhitectural Press, 2005.
- ALBERTI, L. B. *De Re aedificatoria*. Madrid: Akal, 1991.
- ALLEN, S. Del objeto al campo: condiciones de campo en la arquitectura y el urbanismo. En ÁBALOS, I. (Ed.). *Naturaleza y artificio: el ideal pionero en la arquitectura y el paisajismo contemporáneos* (pp. 149-170). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- ALLEN, S. Velocidades terminales: el ordenador en el estudio de diseño. En ORTEGA, L. (Ed.) *La digitalización toma el mando* (pp. 39-57). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- BANHAM, R. *Teoría y diseño en la primera era de la máquina* (Cuarta ed.). Barcelona: Paidós, 1985.
- BACHMAN, L. *Jean Nouvel. Una lezione in Italia*. Milán: Skira, 1996.
- BEESLEY, P., HIROSUE, S., & RUXTON, J. Towards a Responsive Architecture. In R. OXMAN, & R. OXMAN (Edits.), *Theories of the Digital in Architecture* (pp.333-343). London; New York: Routledge, 2014.
- BEHRENS, P. Arte y técnica. En MALDONADO, T. (Ed.). *Técnica y cultura. El debate alemán entre Bismarck y Weimar* (pp. 100-114). Buenos Aires: Infinito, 2002
- BENÉVOLO, L. *Historia de la arquitectura moderna* (Séptima ed.). Barcelona: Gustavo Gili, 1996.
- BENJAMIN, W. *Obra de los pasajes* (Vol. 1). Madrid: Abada, 2013,
- BIRD, A. *Paxton's Palace*. London: Cassell, 1975.
- BRIGGS, A. *Iron Bridge to Crystal Palace, Impact and Images of the Industrial Revolution*. Lódon: Thames & Hudson, 1979.
- BURRY, M. Dimensions. In R. OXMAN, & R. OXMAN (Edits.), *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 171-189). New York: Routledge, 2014.
- CACHE, B. *Projecticles*. London: Architectural Association, 2011.
- CAICOYA, C. Algunos aspectos del proceso de construcción del Museo Guggenheim de Bilbao. *Informes de la Construcción*, 49 (451), 5-11, 1997.
- CASTELLS, M. *La era de la información: economía, sociedad y cultura* (Segunda ed., Vol. I. La sociedad red). Madrid: Alianza, 2000.
- COLLINS, P. *Las ideas de la arquitectura moderna; su evolución (1750-1950)*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.
- DE LANDA, M. Filosofías del Diseño. El caso de los programas de modelado. *VERB, Processing*, 130-143, 2001.
- DE LANDA, M. *Mil años de historia no lineal*. Barcelona: Gedisa, 2011.
- ENKE, E. (15 de 01 de 2015). *Entrevista a arquitecta de Metal Yapi*. (Abondano, D. Entrevistador) Skype.
- FANNELLI, G., y GARGIANI, R. *El principio del revestimiento*. Madrid: Akal, 1999.
- FERRARI, R. (07 de 12 de 2014). *Entrevista al modelador del Tornado*. (Abondano, D. Entrevistador) Skype.
- FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. New York: Thames & Hudson, 2000.
- FORTY, A. *Concrete and Culture: a Material History*. Lóndres: Reaktion, 2013.
- FRAMPTON, K. *Modern Architecture: A Critical History*. London: Thames & Hudson, 1997.
- GALINDEZ, J. E. Desarrollo del Proyecto y Ejecución de las Fachadas del Museo Guggenheim Bilbao. En *Informes de la Construcción*, 49 (451), 19-31, 1997.

- GÄNSHIRT, C. *Tools for Ideas. An Introduction to Architectural Design*. Basilea, Boston, Berlín: Birkhäuser, 2007.
- GIEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009.
- GORDON, J. E. *Structures: Or Why Things Don't Fall Down*. London: Penguin, 1987.
- GRAMAZIO, F. & KOHLER, M. *The Programmed Wall, ETH Zurich, 2006*. Recuperado el 08 de 04 de 2016, de Gramazio & Kohler Research: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/81.html>
- GRAMAZIO, F. & KOHLER, M. *Gantenbein Vineyard Facade, Fläsch, Switzerland, 2006*. Recuperado el 08 de 04 de 2016, de Gramazio & Kohler Research: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/52.html>
- GRAMAZIO, F., & KOHLER, M. In Authoring Robotic Processes. (GRAMAZIO, F., & KOHLER, M. Edits.) *Architectural Design: Made by Robots: Challenging Architecture at a Large Scale*, 14-21, 2014.
- GRAMAZIO, F., KOHLER, M., & WILLMANN, J. Towards an Extended Performative Materiality - Interactive Complexity and the Control of Space. En OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.), *Theories of the Digital in Architecture*. London; New York: Routledge, 2014.
- ITO, T. *Escritos*. Murcia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia, 2007.
- JENGER, J. (Ed.). *Le Corbusier. Architect, Painter, Poet*. New York: Abrams, 1993.
- JONES, J. C. *Design Methods*. London: John Wiley & Sons, 1992.
- KALAY, Y. *Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design*. Cambridge (Massachusetts); London: MIT Press, 2004.
- KOLAREVIC, B. (Ed.). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York; London: Taylor & Francis, 2003.
- KOLAREVIC, B. Computing the Performative. In R. OXMAN, & R. OXMAN (Edits.), *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 103-111). London: Routledge, 2014.
- LAWSON, B. *How Designers Think. The Design Process Demystified* (Third ed.). Oxford: Architectural Press, 1980
- LE CORBUSIER. *Hacia una arquitectura*. Barcelona: Apóstrofe, 1998.
- LÉVY, P. *¿Que es lo virtual?* Barcelona, Buenos Aires, Ciudad de México: Paidós, 1999.
- LINDSEY, B. *Digital Gehry: Material Resistance Digital Construction*. Basilea: Birkhäuser, 2001.
- LIPOVETSKY, G., y SERROY, J. *La pantalla global: Cultura mediática y cine en la era hipermoderna*. Barcelona: Anagrama, 2009.
- LIPSON, H., y KURMAN, M. *La revolución de la impresión 3D*. Madrid: Anaya; Wiley, 2015.
- LOOS, A. *Dicho en el vacío 1897-1900*. Valencia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia, 2003.
- LUX, J. A. Estética de la Ingeniería. En T. MALDONADO (Ed.). *Técnica y Cultura:el debate alemán entre Bismarck y Weimar* (pp. 83-99). Buenos Aires: Infinito, 2002.
- McKEAN, J. *Crystal Palace: Joseph Paxton and Charles Fox*. London: Phaidon Press, 1994.
- MENGES, A. Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design. (MENGES, A. Ed.) *Architectural Design: Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design* , 82 (2), 34-51, 2012.
- MERTINS, D. *Modernity Unbound*. London: Architectural Association Publications, 2012.
- MIGAYROU, F. The Orders of the Non-Standard. En OXMAN, R. & OXAMN, R (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture* (pp.17-34). Londres: Routledge, 2014.
- MIGAYROU, F., & BRAYER, M.A. (2003). *ArchiLab: Radical Experiments in Global Architecture*. London: Thames & Hudson, 2003.

- MITCHELL, W. Constructing Complexity. In MARTENS, B., & BROWN, A. (Edits.), *Computer Aided Architectural Design Futures 2005. Proceedings of the 11th International CAAD Futures Conference held at the Vienna University of Technology, Vienna, Austria, on June 20-22, 2005*. Dordrecht: Springer, 2005.
- MITCHELL, W. *E-topía: vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.
- MITCHELL, W., & McCULLOUGH, M. *Digital Design Media* (Second ed.). New York: Van Nostrand Reinhold, 1995.
- MOUSSAVI, F. *The Function of Form*. Barcelona: Actar & Harvard University School of Design, 2009.
- MOUSSAVI, F., y KUBO, M. *La función del ornamento*. Barcelona: Actar & Harvard Graduate School of Design, 2008.
- MUMFORD, L. *Técnica y Civilización*. Madrid: Alianza, 1997.
- NASR, E. A., & KAMRANI, A. *Computer-Based Design and Manufacturing: An Information-Based Approach*. New York: Springer, 2007.
- NEUMEYER, F. *Mies van der Rohe. La palabra sin artificio, reflexiones sobre arquitectura*. Madrid: El Croquis, 2000.
- NEGROPONTE, N. *Mundo Digital*. Barcelona: Ediciones B, 1995.
- NORBERG-SCHULZ, C. *Intenciones en la arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.
- NOVAK, M. Liquid Architectures in Cyberspace. In M. BENEDIKT (Ed.), *Cyberspace: First Steps* (pp. 272-285). Cambridge, MA.: MIT Press, 1991.
- OXMAN, N. *PhD Thesis: Material-based Design Computation*. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- OXMAN, N. Variable Property Rapid Prototyping. In *Virtual and Physical Prototyping* (pp. 3-31) Taylor & Francis, 2011.
- OXMAN, N. Material Ecology. In OXMAN, R. & OXMAN, R. (Edits.), *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 319-326). London; New York: Routledge, 2014.
- OXMAN, N. Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials. (OXMAN, R., & OXMAN, R. Edits.). *Architectural Design: The New Structuralism*, 80 (4), 78-85, 2010.
- OXMAN, N. *Projects: Gemini*. Recuperado el 22 de 08 de 2017, de Neri Oxman: <http://www.materialecology.com/projects/details/gemini>
- OXMAN, R. Theory and Design in the First Digital Age. In: *The International Journal of Design Studies*. 2006.
- OXMAN, R., & OXMAN, R.. *Theories of the Digital in Architecture*. Londres; Nueva York: Routledge, 2014.
- PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Basilea: Birkhauser, 2010.
- PICON, A. La arquitectura y lo virtual. Hacia una nueva materialidad. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando* (pp. 67-83). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- RAHM, P. Gradating Spaces: Plot, Contour vs. Sfumato, Dimming in Architecture. In LORENZO-EIROA, & SPRECHER (Edits.). *Architecture In Formation: On the Nature of Information in Digital Architecture* (pp. 156-163). New York: Routledge, 2013.
- RATHENAU, W. La Mecanización del Mundo. En MALDONADO, T. *Tecnica y Cultura: El debate alemán entre Bismarck y Weimar* (pp. 153-181). Buenos Aires: Infinito, 2002.
- Real Academia Española. *Real Academia Española*. Obtenido de Diccionario de la lengua española: <http://www.rae.es>
- ROWE, C., & SLUTZKY, R. Transparencia: literal y fenomenal. En C. Rowe, *Manierismo y arquitectura y otros ensayos* (Tercera ed.). Gustavo Gili, 1999.

- SCOTTI, E. (27 de 11 de 2014). *Entrevista al arquitecto director de proyecto del Tornado*. (Abondano, D. Entrevistador) Roma.
- SHEIL, B. (2005). Design Through Making: An Introduction. (SHEIL, B. Ed.) *Architectural Design: Design Through Making*, 75 (4), 5-12, 2005.
- SISTANINIA, M., HUDERT, M., HUMBERT, L., & WEINAND, Y. Experimental and numerical study on structural behavior of a single timber textile module. *Engineering Structures*, 46, 557-568, 2013.
- SZALAPAJ, P. *CAD Principles for Architectural Design*. Oxford: Architectural Press, 2001.
- VAN DUIJN, C. Investigacion sobre materiale en OMA. En *VERB: Matters*. Barcelona: Actar, 2004.
- VIRILIO, P. *La bomba informática*. Madrid: Cátedra, 1999.
- WEINAND, Y., & HUDERT, M. Timberfacric: Applying Textile Principles on a Building Scale. (OXMAN, R. & OXMAN, R. Edits.) *Architectural Design*, 80 (4), 102-107, 2010.
- WEISER, M. The Computer of the 21st Century. *Scientific American*, 265 (3), 94-104, 1991.

Capítulo 3

Procesos de producción: de lo mecánico a lo digital

Introducción

En este capítulo se estudia la segunda fase de la transición hacia una arquitectura digital, en la cual las herramientas de diseño y fabricación digital dejan de utilizarse para repetir procesos de diseño y construcción tradicionales, para dar lugar a unos nuevos. Se trata de examinar la transformación del trabajo en sí como resultado de la utilización de medios de producción basados en las tecnologías digitales, es decir, del cambio profundo experimentado en los procesos de diseño y de construcción, así como en la organización del trabajo. Estos cambios se abordarán a partir del concepto de “lo virtual” propuesto por Deleuze, que hace referencia a un proceso de actualización que conlleva un cambio de naturaleza.

En la primera parte del capítulo se analiza el cambio en los procesos de diseño, a raíz de la aplicación de procedimientos algorítmicos. Este análisis parte de la racionalización del proyecto a partir del método de composición de Durand, con el que intentó equiparar la arquitectura con la ciencia, aplicando el mecanicismo cartesiano para descomponer un proyecto arquitectónico en sus elementos más simples, para luego recomponerlos. El método propuesto por Durand en el siglo diecinueve puede considerarse un precedente del posterior desarrollo del diseño asistido por ordenador en la arquitectura. Posteriormente se aborda el diseño paramétrico como nuevo sistema de representación, complementario a la geometría descriptiva y al espacio cartesiano en los que se ha basado el diseño en la era pre-digital. La innovación que aporta la tecnología digital aplicada al diseño se fundamenta en el agenciamiento entre el diseñador y el ordenador, de manera que la actividad intelectual del primero se complementa con el poder computacional del segundo. Este agenciamiento se analiza en relación al diseño paramétrico.

En la segunda parte del capítulo se examina la transformación del diseño arquitectónico por la fabricación digital, que facilita una construcción con elementos diferenciados en lugar de componentes estandarizados. Inicialmente, la tecnología digital se empleó en el diseño de formas complejas, aunque posteriormente esta noción de “complejidad” ha dejado de asociarse exclusivamente a las cualidades formales para extenderse a los aspectos constructivos y materiales.

En la tercera parte del capítulo se estudian los nuevos modos de organización de los procesos constructivos facilitados por las tecnologías digitales. Los modelos de negocio *on-line* fomentan nuevos servicios y roles profesionales y facilitan los procesos de construcción descentralizados, como el de las viviendas WikiHouse.

3.1 Del diseño compositivo al diseño paramétrico

3.1.1 Racionalización y sistematización del diseño

“Componer, la lógica de disponer juntos unos elementos en virtud de una serie de reglas y significados, se extiende, no sin problemas, hasta el proyectar, hasta la determinación de lo futuro y, con ello, de lo posible. Será la unidad entre ciencia y técnica quien gobierne tal posibilidad, la cual permitirá el nacimiento de la cultura politécnica, una cultura esencialista, abstracta, del cálculo, para la que la esencia de las cosas está separada de su apariencia”¹.

Roberto Masiero

Si “componer” conlleva disponer un conjunto de elementos en virtud una serie de reglas, la composición es un proceso que podría equiparse a la organización de un sistema, entendiendo por “sistema” un “conjunto de reglas o principios sobre una materia racionalmente enlazados entre sí” o un “conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto”². Según esto, la “composición” sería una forma de conjugar unos elementos según unas reglas o principios. Estos procedimientos basados en reglas comportan un proceso de racionalización, si se entiende que “racionalizar” implica “reducir a normas o conceptos racionales”³.

La arquitectura intentó alcanzar, a través del racionalismo, un estatus de disciplina científica. Tal como sostuvo César Daly: “Los racionalistas querían conciliar la arquitectura moderna con la ciencia y la industria moderna”⁴. Desde la óptica del racionalismo, el diseño y la construcción de una obra de arquitectura serían procesos susceptibles de ser reducidos a operaciones basadas en principios técnicos y científicos, con el fin de aumentar las prestaciones y reducir los costes.

En el *Compendio de lecciones de arquitectura*, publicado en 1802, Durand propone un método de composición que fue un precedente del racionalismo arquitectónico posterior. Antes de Durand, en el siglo XVII, el debate racionalista en arquitectura giró en torno a la separación entre ciencia y arte. Cada una de ellas planteaba el estudio de la naturaleza de una manera distinta. Por un lado, el estudio científico, es decir, racional, cuyo objetivo era encontrar las leyes que gobernaban la naturaleza para luego aplicarlas a la creación arquitectónica. Por el otro, el estudio artístico, es decir, estético, que atendía a las apariencias de las creaciones naturales para extraer de ellas modelos a imitar por las formas arquitectónicas.

¹ MASIERO, R. *Estética de la arquitectura*. Madrid: A. Machado Libros, 2003. p. 161

² Real Academia Española. Recuperado el 27 de Mayo de 2016 de Diccionario de la lengua española: <http://www.rae.es>

³ Ibídem

⁴ COLLINS, P. *Las ideas de la arquitectura moderna; su evolución (1750-1950)*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001, p. 203

Esta separación entre razón y sentimiento caracterizó el debate racionalista de los siglos XVII y XVIII, que acabó planteándose en términos de contraposición entre la reproducción de naturaleza con fines decorativos o su imitación con fines constructivos. En 1753 Marc-Antoine Laugier publicó el *Ensayo sobre la arquitectura*, en el que sostenía que el arte nace desde la imitación de los procedimientos de la naturaleza.⁵ Laugier intentaba salvar la brecha entre arte y ciencia, al considerar que la esencia de la arquitectura se encontraba en las leyes inherentes a los procesos constructivos, más allá de las formas aparentes:

“[...] la esencia de la arquitectura radica en su lógica constructiva, verdaderamente racional. Su verdad no se encuentra en la proporción, sino en la lógica de la construcción. Establecida esta verdad, el problema de la arquitectura, antes estético, se hace ético”⁶.

En los inicios del siglo XIX, el debate racionalista se centró en la eficiencia más que en las cuestiones metafísicas. El método compositivo de Durand, basado en un conjunto de operaciones para componer un edificio, es reflejo de ello. La labor del arquitecto, según Durand, consistía en crear edificios sólidos, saludables y confortables con una cantidad determinada de recursos. La economía y la eficiencia eran los únicos valores aceptables para la arquitectura,⁷ y las figuras geométricamente simples el medio para alcanzarlos.⁸

Su método partía de las “partes constitutivas” del edificio, las cuales dividió entre los “elementos del edificio” que incluyen soportes aislados y entregados, muros, diferentes tipos de aberturas, cimientos, bóvedas, techumbres y terrazas⁹ y sus “partes principales” que incluyen los porches, vestíbulos, escaleras, patios y salas de cualquier clase.¹⁰ Si las partes principales se componen combinando los elementos, el edificio en su conjunto se compone combinando sus partes principales.

Según explicó Durand, los elementos del edificio son para la arquitectura lo que las palabras son para el lenguaje,¹¹ sugiriendo así que en la arquitectura hay que distinguir entre elementos y el modo correcto de combinarlos.¹² En su método, las partes principales del edificio se disponían en una retícula ortogonal, o sistema de coordenadas cartesiano (Figura 3.1). El método consistía en una sucesión de operaciones elementales:¹³ disposición de los ejes principales de composición; superposición de una retícula de ejes secundarios que complementa los primarios; trazado de los muros sobre

⁵ LAUGIER, M. A. *Ensayo sobre la arquitectura*. En HEREU, P., MONTANER, J. M., & OLIVERAS, J. *Textos de arquitectura de la modernidad*. Hondarribia (Guipúzcoa): Nerea, 1999, p. 22

⁶ MASIERO. Op.cit., p. 148

⁷ Véase Capítulo 1.2.4

⁸ PÉREZ-GÓMEZ, A. *Architecture and the Crisis of Modern Science* (Seventh ed.). Cambridge, London: MIT Press, 1983, p. 303

⁹ DURAND, J. N. *Compendio de lecciones de arquitectura*. Madrid: Pronaos, 1981, pp. 53-57

¹⁰ Ibídем, pp. 57-61

¹¹ COLLINS. Op.cit., p. 183

¹² Ibídем, p. 184

¹³ MADRAZO, L. *The Concept of Type in Architecture. An Inquiry into the Nature of Architectural Form*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1995, pp. 213-214

los ejes; ubicación de los pilares en las intersecciones; distribución de elementos arquitectónicos en planta, y generación de secciones y alzados a partir de las plantas. De esta forma se simplificaba el proceso de diseño, para hacerlo económico y eficiente.¹⁴

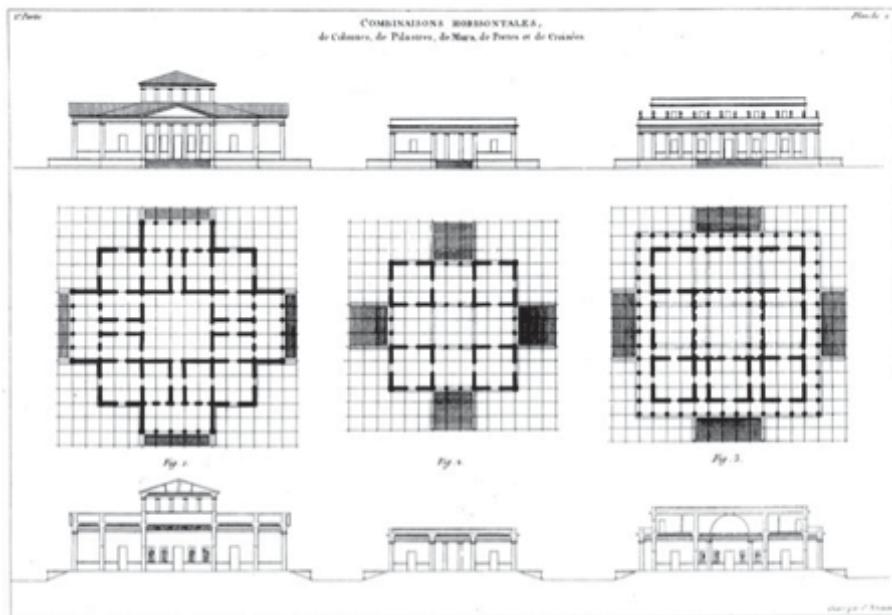


Figura 3.1 Método de composición elemental sobre retícula ortogonal

De acuerdo con Banham, el compendio de Durand contenía una filosofía del diseño que fue luego asumida por la teoría y la praxis de la arquitectura moderna.¹⁵ Así, a pesar de no haber tenido una aplicación sistemática y generalizada durante el siglo XIX, el método y los principios compositivos de Durand seguían vigentes en los albores de la arquitectura moderna. En sus conferencias “Elementos y teorías de la Arquitectura” (1902) en la École des Beaux-Arts de París, Julien Gaudet seguía refiriéndose al método de composición tal como lo había planteado Durand:

“Este curso tiene como finalidad el estudio de la composición de edificios en sus elementos y en su totalidad, desde un doble punto de vista: adaptarlos a programas definidos y a necesidades materiales”,¹⁶.

Al igual que para Durand, para Gaudet un edificio era el resultado de combinar las partes en un todo:

“La composición trabaja con materiales, tal como lo hace la construcción, y esos materiales son precisamente, los Elementos de la Arquitectura [...] Reunir, ensamblar, unir las partes de un todo. Estas partes a su vez, son Elementos de la Composición, y así como realizareis vuestros edificios con

¹⁴ PÉREZ-GÓMEZ. Op.cit., p. 304

¹⁵ BANHAM, R. *Teoría y diseño en la primera era de la máquina* (Cuarta ed.). Barcelona: Paidós, 1985, pp. 33-34

¹⁶ GAUDET, J. *Elementos y teorías de la arquitectura*. En Banham Op.cit., p. 33

muros, aberturas, bóvedas, techos –elementos todos de la arquitectura–, así también integrareis vuestra composición con habitaciones, vestíbulos, salidas y escaleras. Tales son los elementos de la composición”¹⁷.

Esta idea de “composición elemental”, que comparten Laugier, Durand y Gaudet, siguió presente en la arquitectura moderna. Por ejemplo, los “trazados reguladores” de Le Corbusier rememoran el *parti* del método de composición Durand, al emplear una retícula abstracta para disponer figuras geométricas simples sobre ella. Le Corbusier lo explicaba en sus propios términos:

“Para construir bien, para repartir bien los esfuerzos, para lograr la solidez y la utilidad de la obra, las medidas condicionan todo. [...] Pero, al decidir la forma del recinto, la forma de la choza, la situación del altar y de sus accesorios, ha seguido intuitivamente los ángulos rectos, los ejes, el cuadrado, el círculo. [...] Porque los ejes, los círculos, los ángulos rectos, son las verdades de la geometría, son los efectos que nuestros ojos miden y reconocen, de modo que otra cosa sería el azar, anomalía, arbitrariedad. La geometría es el lenguaje del hombre”¹⁸.

La intención de basar el diseño de un edificio en una serie de leyes y operaciones combinatorias y genéricas, respondía a la necesidad de dotar la arquitectura de una base científica.¹⁹ Durand –siguiendo el legado de Perrault– aspiró a “modernizar” la arquitectura situándola en el ámbito de la ciencia moderna.²⁰ Para ello, era necesario liberar la teoría arquitectónica de cuestiones trascendentales y, sobre todo, transformar la naturaleza del diseño, ya que la capacidad creativa dejaba de ser exclusiva del artista para externalizarse en forma de operaciones que podían reproducirse de manera anónima.²¹

La transformación del diseño en una secuencia de operaciones permitía externalizar y generalizar el conocimiento necesario para diseñar un edificio; operaciones que pueden transmitirse, evaluarse y reproducirse. Esta codificación del diseño en una secuencia de operaciones, por las que un número determinado de elementos se combinan para dar lugar a múltiples variantes, es un proceso que puede ejecutarse mediante el ordenador.²² Según Mitchell, las estructuras de datos en las que se fundamenta el diseño asistido por ordenador,²³ remplazan las figuras y transformaciones geométricas dibujadas sobre

¹⁷ Ibídем, p. 34

¹⁸ LE CORBUSIER. *Hacia una arquitectura*. Barcelona: Apóstrofe, 1998, pp. 53-54

¹⁹ MADRAZO. Op.cit., pp. 222-223

²⁰ PERRAULT, C. *Ordonnance for the Five Kinds of Columns After the Method of The Ancients*. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and Humanities, 1993. pp. 1-3

²¹ PÉREZ-GÓMEZ. Op.cit., p. 304; MADRAZO. Op.cit., pp. 222-223

²² MITCHELL, W. Vitruvius Computatos. En MITCHELL, W. (Ed.). *Environmental Design: Research and Practice; Proceedings of the EDRA 3/AR 8 Conference, University of California at Los Angeles, January 1972, Volumen 2* (Vol. 2). Los Angeles: Verlag University, 1972. pp. 384-385

²³ Véase Capítulo 2.2.2.3

papel por descripciones simbólicas –numéricas y textuales– de las figuras y las operaciones –lógicas y aritméticas– para transformarlas y combinarlas:

“To develop a useful data structure for computer-aided architectural design it seems necessary to conceive of architectural forms as divisible into sets of discrete and uniquely identifiable elements and to develop some consistent systematic notation for identifying and describing those elements and the important relations between them”²⁴.

En la medida en que el diseño asistido por ordenador se basa en elementos discretos y en reglas combinatorias, se asemeja considerablemente al método de composición elemental propuesto por Durand. Por ello, el CAD se ha considerado como una continuación de la tradición académica de Durand,²⁵ y puede entenderse como un intento más para dotar al diseño en arquitectura de un método científico.

El método compositivo de Durand transformó la naturaleza del diseño al externalizar sus operaciones para reproducirlas y aplicarlas sistemáticamente en la composición formal del edificio. En este proceso de composición, como sostuvo Gaudet, los elementos del edificio son los “materiales de trabajo”. Posteriormente, Le Corbusier plantearía estos materiales de trabajo de un modo más abstracto, al emplear la geometría –ejes, ángulo recto, cuadrado, círculo– como lenguaje compositivo. Con el desarrollo del CAD, las secuencias de operaciones compositivas se codifican en algoritmos para procesarlas en un ordenador. Esto implica una transformación de la naturaleza del diseño: al externalizar las operaciones del diseño en algoritmos, el diseñador no ejecuta las operaciones de diseño, sino que las programa; el material de trabajo no se basa en elementos geométricos que se disponen en una retícula, sino en la información y las operaciones que se codifican; la forma no se genera utilizando un lenguaje geométrico sino estructurando el flujo de datos. En este sentido, el algoritmo contiene la estructura, las operaciones y el material de trabajo que generan la forma de un objeto.

²⁴ MITCHELL, W. *Vitruvius Computatos*. Op.cit., p. 385

²⁵ Ibídem, p. 386

3.1.2 De la composición elemental al algoritmo

“An algorithm is a process of addressing a problem in a finite number of steps. It is an articulation of either a strategic plan for solving a known problem or a stochastic search towards possible solutions to a partially known problem. In doing so, it serves as a codification of the problem through a series of finite, consistent, and rational steps”²⁶.

Kostas Terzidis

El algoritmo es la síntesis de un proceso. En el proceso de diseño, el algoritmo deviene en un “plan estratégico” para explorar y generar posibles soluciones, mediante operaciones finitas, consistentes, y racionales (Figura 3.2). La interpretación del algoritmo como plan estratégico evoca el concepto de “*filum* maquinista” de Deleuze, donde el término “*filum*” hace referencia a una “arquitectura abstracta” que permite obtener una amplia variedad de arquitecturas concretas.²⁷ Según esto, el algoritmo es una estructura abstracta que permite generar múltiples soluciones a un problema de diseño. Gordon Pask describe el algoritmo como el “esqueleto” sobre el cual se construye la secuencia de instrucciones desde las cuales el ordenador genera la forma del edificio.²⁸

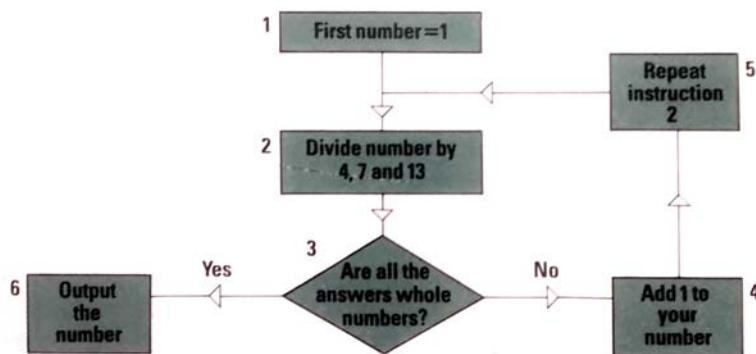


Figura 3.2 Algoritmo definido por una serie de operaciones finitas, consistentes y racionales
(para encontrar números enteros divisibles por 4, 7 y 13)

Deleuze toma el término “*filum*” de la biología y, según De Landa, es una manifestación del “pensamiento topológico”. En la biología el término “*filum*” se refiere a la “categoría taxonómica fundamental de la clasificación biológica, que agrupa a los organismos de ascendencia común y que responden a un mismo modelo de organización”²⁹. Al tratar sobre un mismo modelo de organización, De Landa considera

²⁶ TERZIDIS, K. *Algorithmic Architecture*. Oxford MA: Architectural Press; Elsevier, 2006. p. 15

²⁷ Véase Capítulo 2.2.3.4

²⁸ “The program –the software– causes the computer to carry out the programmer’s instructions in a set sequence. [...] For purposes of computing, an algorithm is a skeleton that is used to construct the program that tells the computer what to do.” PASK, G., & CURRAN, S. *Micro Man: Living and growing with computers*. London: Century, 1982, pp. 13-14

²⁹ Real Academia Española. Recuperado el 09 de Junio de 2016

que el término conlleva la idea de un “plan corporal” común que contiene las características de las diferentes especies animales.³⁰ Así, las extremidades de los vertebrados pueden variar en sus proporciones, forma y cantidad de elementos, pero estos responden al mismo modelo organizativo. Por consiguiente, el “plan corporal” prescinde de los detalles formales y dimensionales del sistema-organismo para alcanzar un nivel superior de abstracción:

“[...] while the form of the final product (an actual horse, bird or human) does have specific lengths, areas and volumes, the body plan cannot possibly be defined in these terms but must be abstract enough to be compatible with a myriad of combinations of these extensive qualities”³¹.

De acuerdo con De Landa, la secuencia de instrucciones que configura un algoritmo puede entenderse como el “material genético” o “ADN virtual” que dará lugar al edificio.³² En este sentido, el algoritmo es simultáneamente el material de trabajo y la estructura abstracta que facilita los procesos generativos computacionales.³³ El material de trabajo de esta arquitectura abstracta no son elementos geométricos dispuestos en una retícula que regula su disposición, como sucede en el método de composición elemental. Según Terzidis, el algoritmo se constituye por los “elementos” –constantes, variables, procedimientos, clases y librerías– y las “operaciones” –aritméticas, lógicas, combinatorias, relacionales y clasificadoras–, mientras que su estructura está conformada por “reglas sintácticas y gramaticales”³⁴ que constituyen un sistema interdependiente de términos en el que el valor de cada uno está influenciado por los otros.³⁵

En un algoritmo, elementos y operaciones se encuentran estrechamente relacionados. Así, en el diseño algorítmico un cambio en cualquiera de sus elementos u operaciones afecta la forma resultante. Estas interrelaciones constituyen una característica básica tanto del desarrollo del software como del proyecto arquitectónico a las que Cache denomina “asociatividad”:

³⁰ DE LANDA, M. Deleuze and the Use of Genetic Algorithm in Architecture. In LEACH, N. (Ed.), *Designing for a Digital World*. London: Wiley-Academy, 2002. p. 119

³¹ Ibídem

³² Ibídем, p. 117

³³ Watson y Crick describen por primera vez la estructura de doble hélice del ADN, en el ensayo titulado “Molecular Structure of Nucleic Acids”, que introducen de la siguiente manera: “We wish to suggest a structure for the salt of deoxypentose nucleic acid (D.N.A.)” De este modo inician describiendo su materia que conforma el ADN, esto es, el ácido desoxirribonucleico. Posteriormente describen su estructura de la siguiente manera: “While the biological of deoxypentose nucleic acid suggest a molecular structure, X-ray diffraction studies described here show the basic molecular configuration has great simplicity [...] It may be shown that the intensity distribution in the diffraction pattern of a series of points equally spaced along a helix is given by the squares of Bessel functions.” WATSON, J., & CRICK, F. Molecular Structure of Nucleic Acids. *Nature*, 171 (4356), 737-738, 1953.

³⁴ TERZIDIS. Op.cit., p. 38

³⁵ La idea del algoritmo como un sistema interdependiente de términos, responde a la noción estructuralista de “estructura” en el ámbito de la lingüística. Según Madrazo, esta noción tiene sus orígenes en el trabajo del lingüista Ferdinand de Saussure, quien expuso: “Language is a system of interdependent terms in which the value of each term result solely from the simultaneous presence of the others.” MADRAZO. Op.cit., p. 40

“Associativeness is the principle used in software that organizes the architectural project along a chain of relationships, from the first conceptual ideas to the driving of the machines that will prefabricate the component to be assembled on site. Designing on associative software program comes down to transforming the geometrical design into a programming language interface. Thus, creating a point at the intersection of two lines no longer requires the creation o a graphic element, but rather the establishment o a relationship of intersection on the basis of two relations of alignment”³⁶.

Esta asociatividad representa la transición desde un diseño que opera con geometrías a uno que actúa desde la programación e implica una lógica de diseño que precede la formalización del proyecto. La lógica de diseño correspondería al “pensamiento topológico” de Deleuze, es decir, una lógica que subyace bajo las nociones de “arquitectura abstracta”, “estructura abstracta” o “plan corporal” implícitas en el algoritmo. Así, el diseño algorítmico opera desde una “lógica topológica”, que requiere definir las reglas, las restricciones, y los objetivos de diseño mediante fórmulas matemáticas y diagramas que más allá de la apariencia del objeto arquitectónico expresan las operaciones y relaciones que lo generan. En este sentido, los algoritmos pueden entenderse como máquinas abstractas ya que:

“[Se] Actúa por *materia*, y no por sustancia; por *función*, y no por forma. Las sustancias, las formas, son de expresión ‘o’ de contenido. Pero las funciones no están ya formadas ‘semióticamente’, y las materias no están todavía ‘físicamente’ formadas. La máquina abstracta es la pura Función-Materia –el diagrama, independientemente de las formas y de las sustancias, de las expresiones y de los contenidos que va a distribuir”³⁷.

El algoritmo contiene la materia y las funciones que preceden la forma del edificio. Si las máquinas abstractas actúan con materia y funciones, y no con sustancias y formas, en el caso del algoritmo su “materia” es la información mientras que sus “funciones” son operaciones matemáticas relacionadas topológicamente. Por consiguiente, el diseño algorítmico es un diseño asociativo basado en relaciones topológicas que permite explorar soluciones a partir de una serie de operaciones finitas, consistentes y racionales. Según Woodbury, este tipo de diseño requiere del diseñador dar un paso atrás, para pasar a ocuparse no tanto de la forma sino de los procedimientos que la preceden.³⁸ Es decir, antes de explorar cualquier solución formal-espacial, el diseñador debe resolver las relaciones entre los parámetros de diseño; en palabras de Burry, debe

³⁶ CACHE, B. *Projecticles*. London: Architectural Association, 2011, pp. 68-69

³⁷ DELEUZE, G., y GUATTARI, F. *Mil Mesetas: Capitalismo y esquizofrenia* (6º:2004 ed.). Valencia: Pre-Textos, 1980, p. 144

³⁸ WOODBURY, R. *Elements of Parametric Design*. Londres; Nueva York: Routledge, 2010. p. 25

“diseñarse el diseño”.³⁹ Este “diseño del diseño” supone un cambio paradigmático para el arquitecto, ya que su trabajo deja de orientarse hacia la creación de objetos para centrarse en el diseño de procesos. Para Terzidis, esta transición del objeto al proceso es una cualidad esencial del diseño digital:

“Digital, in the true sense of the meaning, is about the reduction of a process into discrete patterns and the articulation of these patterns into new entities to be used by a computer. [...] In other words, digital is a process not a product”⁴⁰.

Según Rivka y Robert Oxman, “Parametric design is an approach to digital design founded upon relational, or associative, modeling”⁴¹. Según esta definición, en el ámbito del diseño digital el diseño algorítmico es equivalente al diseño paramétrico, ya que ambos comparten una lógica relacional y asociativa. Por consiguiente, el diseño paramétrico implica la transición desde un proceso compositivo basado en la combinación de elementos geométricos, hacia la estructuración de las relaciones topológicas que preceden la formalización del proyecto arquitectónico.

3.1.3 De lo geométrico a lo paramétrico

“The malleability of parametric systems resides in the powerful generative potential and infinite topological variations mediated by modifications of parameters. This process, termed “parametric design” in architecture [...] generally operates together with the presentation and simultaneous modification of a visual model of the object under design”⁴².

Rivka Oxman & Robert Oxman

El diseño paramétrico permite estructurar y visualizar procesos generativos, más que formas concretas. Con un modelo paramétrico el diseñador actúa sobre los parámetros que definen los elementos y las relaciones entre ellos, para conformar o transformar el objeto de diseño. En palabras de Kolarevic, “In parametric design, it is the parameters of a particular design that are declared, not its shape”⁴³. En la medida en que el modelado paramétrico se desarrolla estableciendo relaciones entre elementos, se crean interdependencias que dan lugar a geometrías asociativas; es decir, geometrías definidas y relacionadas paramétricamente, donde la reconfiguración de los parámetros actualiza

³⁹ BURRY, M. Between Intuition and Process: Parametric Design and Rapid Prototyping. In KOLAREVIC, B. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Op.cit., p. 151

⁴⁰ TERZIDIS. Op.cit., p. 39

⁴¹ OXMAN, R. & OXMAN, R. Op.cit., p. 137

⁴² Ibídem

⁴³ KOLAREVIC, B. Digital Architectures. In CLAYTON, M. & VASQUEZ DE VELASCO, G. (Edits.). *ACADIA 2000: eternity, infinity, and virtuality in architecture*. Washington: Association for Computer-Aided Design in Architecture, c2002, 2000, p. 4

la geometría-forma del modelo. Este tipo de actualización implica una transformación topológica.⁴⁴

De acuerdo con Rivka y Robert Oxman, las transformaciones topológicas hacen del modelo paramétrico un “modelo maleable” con un gran potencial generativo, debido a la multiplicidad de variaciones que pueden crearse a partir de la modificación de los parámetros del modelo. Esta maleabilidad rememora la libertad plástica que aportó el hormigón a los arquitectos modernos. Pero, si la libertad plástica asociada al hormigón venía dada por la facilidad para darle cualquier forma, para los arquitectos digitales la libertad radica en la codificación algorítmica de los procesos de generación y de transformación formal, para ejecutarlos computacionalmente y automatizar la creación de múltiples variantes. La codificación algorítmica de procesos de diseño requiere externalizar –es decir, racionalizar y sistematizar– los parámetros que se modifican para realizar las transformaciones topológicas o paramétricas del modelo. Asimismo, la codificación del proceso de diseño implica una representación abstracta y matemática del proceso, una estructuración de la secuencia de operaciones y relaciones que generan la forma: “Parametric design often entails a procedural, algorithmic description of geometry”⁴⁵.

La generación de la forma mediante modelos paramétricos es una característica esencial del diseño digital, entendido como el diseño de procesos más que de objetos; un proceso de diseño en el que el concepto “forma” se sustituye por el de “formación”⁴⁶ y en el que el arquitecto deja de “crear la forma” para “explorar la forma”⁴⁷. A continuación se estudiará cómo las herramientas de representación vinculadas al diseño paramétrico facilitan la exploración de la forma.

3.1.3.1 De lo figurativo a lo diagramático y lo topológico

Al referirse al “plan corporal” como el modelo de organización al que responden los organismos de ascendencia común,⁴⁸ De Landa sugiere la existencia de una estructura abstracta que no conoce longitudes, áreas o volúmenes específicos, ni precisa saber los detalles formales y dimensionales asociados a cualidades extensivas –magnitudes–.⁴⁹ En la medida que esta estructura abstracta prescinde de las magnitudes, ya no puede pensarse en relación al “espacio métrico” sino en un “espacio topológico”, ya que en las transformaciones topológicas –como estirar o plegar– lo único “invariable” son las

⁴⁴ BURRY, M., & MURRAY, Z. Computer Aided Architectural Design Using Parametric Variation and Associative Geometry. In LINZER, & VOIGT (Ed.), *Challenges of the Future*. Viena: eCAADe, 1997.

⁴⁵ KOLAREVIC, B. *Digital Architectures*. Op.cit., p. 4

⁴⁶ OXMAN, R. Theory and Design in the First Digital Age. In: *The International Journal of Design Studies*. 2006, pp. 249-250

⁴⁷ Según Rivka Oxman, con el diseño digital la praxis arquitectónica “Steps away from ‘form making’ and towards ‘form finding’”. In OXMAN, R. Performance-based Design: Current Practices and Recent Issues. *International Journal of Architectural Computing*, 6 (1), 2008. p. 15

⁴⁸ Véase Capítulo 3.1.2

⁴⁹ DE LANDA, M. *Deleuze and the Use of Genetic Algorithm in Architecture*. Op.cit., p. 119

relaciones que mantienen la integridad del conjunto, independientemente de las magnitudes.⁵⁰

Al operar topológicamente el arquitecto se centra en el estudio y la definición de la estructura relacional del objeto, más que de su geometría. Es decir, no se opera exclusivamente en un “espacio de diseño métrico”, en las tres dimensiones del espacio cartesiano, sino que el diseño también se produce en un “espacio topológico”.⁵¹ Para operar en este espacio el arquitecto emplea diagramas, tal como los entiende Raoul Bunschoten, como una “máquina operacional”, física y virtual, que establece “la forma organizativa de la estructura dinámica de un escenario”.⁵² Para explicar esta noción de “máquina operacional”, Bunschoten recurre a una partida de ajedrez, en la que el tablero es un diagrama que regula los movimientos de una batalla medieval de acuerdo a unas reglas virtuales. Durante una partida se despliega una estructura dinámica:

“Cada movimiento dentro de una partida de ajedrez une la precisión rigurosa del tablero con el casi infinito número de permutaciones de movimientos y posiciones de grupos de piezas. La naturaleza diagramática del tablero de ajedrez y las reglas crean configuraciones precisas pero también una interminable dinámica entre juegos de configuraciones”⁵³.

El tablero facilita un control exacto de la disposición de las piezas y permite, al mismo tiempo, su movimiento generando múltiples configuraciones durante la partida. Por consiguiente, más allá de definir una configuración geométrica, el diagrama es un mecanismo para regular formas de comportamiento;⁵⁴ una cualidad que lo convierte en la representación gráfica de un procedimiento, no de una forma.

A finales de 1990, Van Berkel y Bos diseñaron la Casa Moebius empleando diagramas para organizar las actividades cotidianas de sus dos habitantes, separándolas para luego encontrar puntos de encuentro en espacios comunes.⁵⁵ La necesidad de compaginar las actividades laborales, sociales, familiares y personales en la vivienda se resolvió por medio de una estructura circular –loop, basado en la cinta de Moebius– representada mediante diagramas (Figura 3.3). Según los arquitectos, la cinta no se transpuso literalmente a la vivienda, pero su conceptualización quedó reflejada en la iluminación, la circulación y algunos elementos arquitectónicos como la escalera.⁵⁶

⁵⁰ Ibídem

⁵¹ “In the topological space, geometry is represented [...] by parametric functions, which describe a range of possibilities”. KOLAREVIC, B. *Digital Architectures*. Op.cit., p. 2

⁵² BUNSCHOTEN, R. Diagramas: máquinas operacionales. En SORIANO, F. (Ed.) *Fisuras de la cultura contemporánea*, 2002 p. 199

⁵³ Ibídem

⁵⁴ Ibídem, pp. 198-199

⁵⁵ VAN BERKEL, B., & BOS, C. *Move* (Vol. Techniques). Amsterdam: UN Studio & Goose Press, 1999.

⁵⁶ p. 40

⁵⁶ Ibídem, p. 43

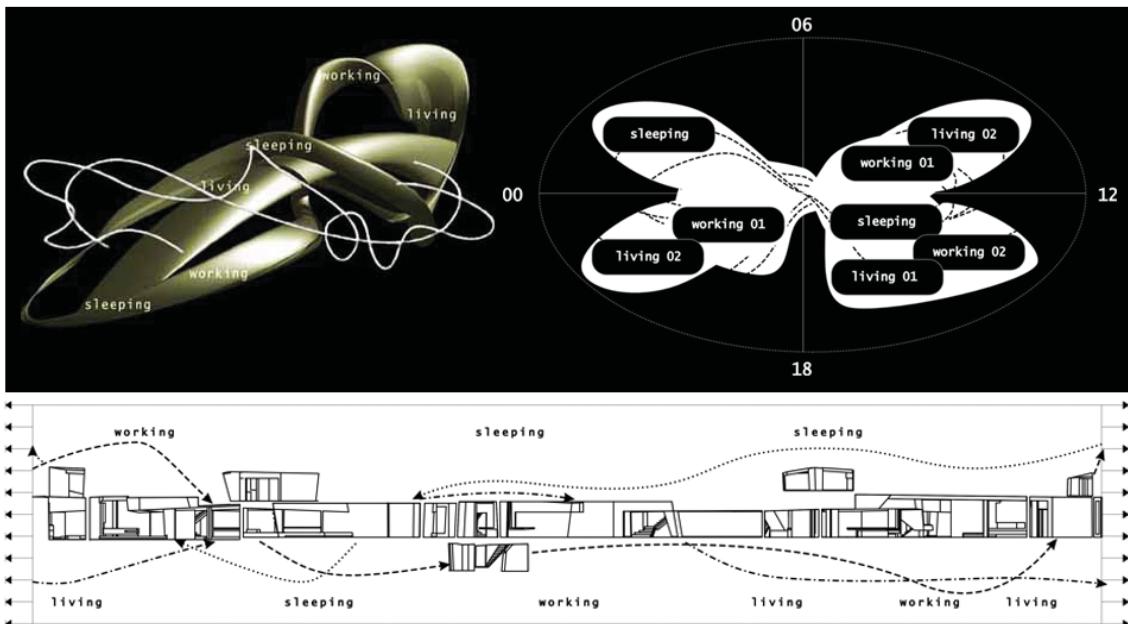


Figura 3.3 Diagramas Casa Moebius

En el diseño de la Casa Moebius, los diagramas sirvieron para representar el tiempo y el movimiento, y ayudaron a distribuir el programa de actividades y los elementos del edificio. En sí mismos estos diagramas eran una representación estática: una imagen. Los diagramas contenían, expresaban y articulaban los conceptos, los parámetros y las relaciones que configuraron el proyecto –actividades y vistas al exterior–, pero no llegaron a funcionar como la máquina abstracta que genera la forma del edificio, es decir, no sintetizaban las operaciones para generarla.

El diseño paramétrico requiere la aplicación de un conjunto de técnicas, entre las cuales Woodbury incluye los grafos (*graph-based approach*) (Figura 3.4).⁵⁷ Un grafo puede definirse como un “Diagrama que representa mediante puntos y líneas [nodos y enlaces] las relaciones entre pares de elementos y que se usa para resolver problemas lógicos, topológicos y de cálculo combinatorio”⁵⁸. Los nodos actúan como “objetos” con propiedades y funcionalidades autónomas,⁵⁹ mientras que los enlaces relacionan estos objetos para generar un sistema en el que los cambios se propagan entre ellos. Esta manera de relacionar los objetos permite organizar el proceso de diseño en subproblemas que se pueden resolver con mayor facilidad y, posteriormente, ser relacionados para generar una solución global.⁶⁰ Con el diseño paramétrico basado en grafos, es posible explorar nuevas soluciones a partir de la propagación de cambios de unos objetos a otros.⁶¹

⁵⁷ WOODBURY. Op.cit., p. 12

⁵⁸ Definición de “grafo” en matemáticas según la Real Academia Española.

⁵⁹ MONEDERO, J. *Aplicaciones informáticas en arquitectura* (Segunda ed.). Barcelona: Ediciones UPC, 2000. p. 116

⁶⁰ “[...] to see patterns in your problem, that is, to learn to divide your work into parts that can be cleanly and clearly resolved and then combined into a whole.” WOODBURY. Op.cit., p. 8

⁶¹ Ibídem, pp. 12, 15

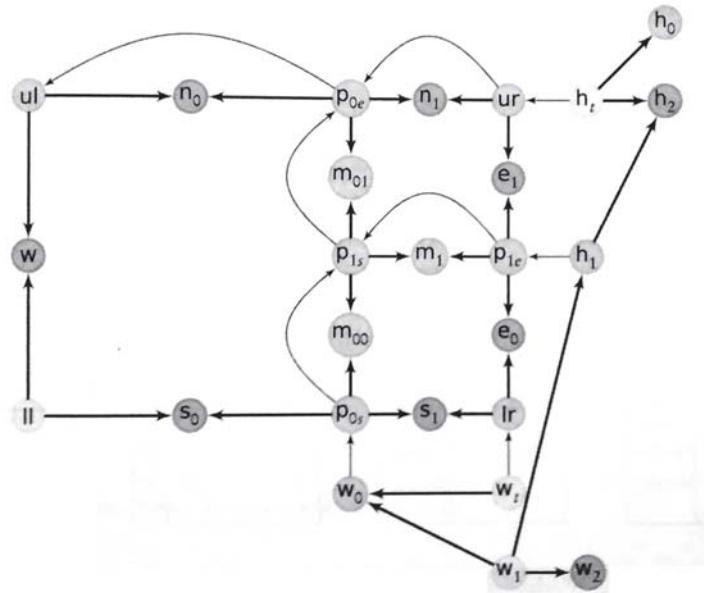


Figura 3.4 Diagrama de nodos y enlaces

Comparando los diagramas de Van Berkel y Bos con los grafos propuestos por Woodbury, se pueden identificar diferentes modos de aplicar diagramas en la arquitectura. Los diagramas de la Casa Moebius funcionaron primordialmente como herramientas visuales para comprimir información en una imagen, la de la cinta de Moebius.⁶² Por el contrario, los grafos son herramientas que generan estructuras relacionales-asociativas que facilitan el procesamiento de información. En este sentido, los grafos se corresponderían con la noción de diagrama que propone Federico Soriano:

“Nudos de información. Uno de sus constituyentes es siempre el tiempo. Definen la forma mediante procedimientos y acciones. No son irreales sino precisos y concretos. Son algoritmos gráficos. [...] Opera por detrás de la imagen, por su cara oscura. El diagrama se ejecuta por acumulación de información”⁶³.

Esta definición de “diagrama” contempla algunas de las cualidades esenciales del diseño paramétrico: la instrumentalización del tiempo, la externalización de procesos y la interconectividad. Tanto el diagrama como el diseño paramétrico encapsulan los procedimientos o acciones que definen la forma, de manera que el tiempo se erige como un factor constituyente que “opera por detrás de la imagen”.

Para instrumentalizar el tiempo, además de las técnicas tradicionales de representación –que facilitan la visualización geométrica del objeto– se requiere de diagramas que externalicen las acciones y que estructuren los flujos de información en el proceso

⁶² Este uso del “diagrama” corresponde a la definición de Van Berkel y Bos: “In general, diagrams are best known and understood as visual tools used for the compression of information”. VAN BERKEL, & BOS. Op.cit., p. 19

⁶³ SORIANO, F. Diagramas. (Soriano, F. Ed.) *Fisuras de la cultura contemporánea*, Julio de 2002, p. 4

formativo. Estos diagramas son una representación de la topología, son grafos – “algoritmos gráficos”– cuyos nodos representan visualmente las acciones que generan o transforman los elementos de un modelo paramétrico.⁶⁴ Estos grafos, descritos en lenguaje de programación, equivalen a un *script*: “Strictly speaking, to script is to write a screenplay or dialogue from which a play might be performed [...] and in computing language, ‘scripting language’ is often synonymous with ‘programing language’: it is the means by which the user gives highly specific instructions to the computer with which they are interacting”⁶⁵. De esta manera, además de un nuevo lenguaje gráfico-diagramático, la externalización de los procedimientos que definen la forma a través de un lenguaje de programación implica organizar lógicamente un proceso para que pueda ser codificado y procesado en un ordenador.⁶⁶

Los modelos paramétricos se basan en un modelo geométrico ubicado en un espacio de diseño eucliano-cartesiano y en una estructura abstracta –diagrama-grafo-algoritmo– inscrito dentro de un “espacio de diseño topológico”. Por ejemplo, los modelos paramétricos realizados con el software Rhino y Grasshopper reflejan esta doble condición: con el primero se visualiza la geometría en un espacio cartesiano; con el segundo se opera por “detrás” sobre los procesos que dan lugar a la forma (Figura 3.5).

Para construir un modelo paramétrico es necesario identificar sus “constantes” y sus “variables”.⁶⁷ Por ejemplo, para crear una línea en un modelo paramétrico se generan dos puntos especificando las coordenadas (X, Y, Z) de cada uno, y éstos se conectan a través de una curva. Los puntos y la curva son las constantes de la línea, mientras que las coordenadas que definen la posición de los puntos son las variables. Así, mientras que, según el modelado manual, una línea se genera marcando dos puntos en el espacio, la generación de una línea paramétrica requiere establecer los elementos que la componen y sus relaciones. En el caso de un cubo, para que fuera modelado paramétricamente sería necesario que fuera descompuesto en sus constantes, los ocho puntos que definen las seis superficies, y en sus variables, las coordenadas-parámetros que definen la posición de los puntos (Figura 3.6).

⁶⁴ “Visual representations are generally non-explicit with respect to presenting the structural logic behind form making and the development of the object under design. In visual parametric schema the designer interacts with parametric modeling using visual code symbols.” OXMAN, R., & GU, N. Theories and Models of Parametric Design Thinking. *eCAADe* 33. Viena, 2015. p. 4

⁶⁵ BURRY, M. Scriptig Cultures. (BURRY, M. Ed.) *Architectural Design: Scripting Cultures: Architectural design and programming*, 2011. p. 9

⁶⁶ BURRY, M. Cultural Defence. In OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture*. London; New York: Routledge, 2014, p. 174

⁶⁷ BURRY, & MURRAY. Op.cit.

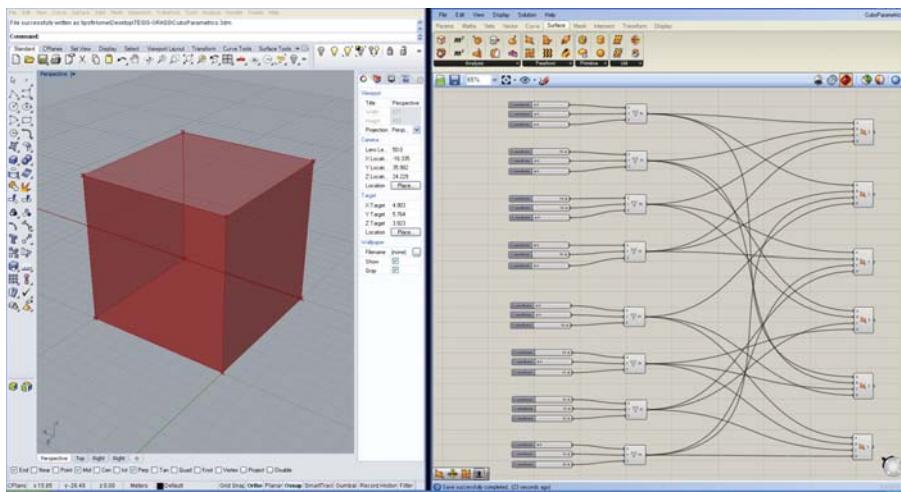


Figura 3.5 Componentes de un modelo paramétrico: modelo geométrico y estructura abstracta

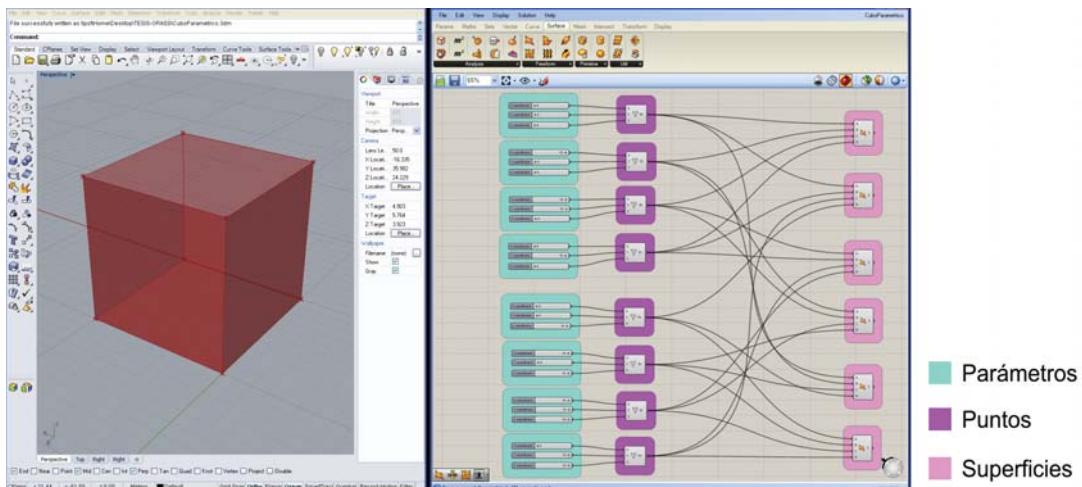


Figura 3.6 Constantes y variables que definen el proceso formativo de un cubo

La externalización del proceso de generación formal en términos de parámetros, elementos y relaciones es un proceso que permite actuar sobre el modelo geométrico, sobre la estructura abstracta, más que sobre la forma concreta. Cuando el diseñador opera sobre esta estructura la forma se actualiza automáticamente: “While the making of the model has proven somewhat complex, once made its manipulation is very simple. [...] After one or any number of changes in one operation, the model regenerates itself trying to accommodate all the new values for the parameters. It gives the user the option to accept the changes, or cancel them and return to the previous version”⁶⁸.

En resumen, la generación del objeto mediante la variación de parámetros, o la transformación de su estructura interna, hacen posible la exploración formal. Por otra parte, la visualización de esta estructura abstracta a través de diagramas-grafos-algoritmos permite descubrir las relaciones internas que conforman el objeto de diseño para, en consecuencia, llegar a comprender la complejidad inherente a la interrelación

⁶⁸ Ibídem

de los múltiples parámetros que hacen parte del proceso formativo. La representación de la estructura abstracta actuaría como un diagrama, según los describe Manuel Lima: como una cartografía de lo indiscernible que revela estructuras intangibles que son invisibles al ojo humano.⁶⁹

La naturaleza topológica del modelo paramétrico hace que su geometría sea maleable, de manera que no se trabaja con modelos estáticos orientados a la composición de una geometría específica, sino que se opera con modelos dinámicos que permiten crear múltiples formas.

3.1.3.2 De lo estático a lo dinámico

El método compositivo de Durand convertía el diseño en una serie de operaciones para combinar elementos arquitectónicos dispuestos sobre una retícula ortogonal. Este método reproducía el mecanismo cartesiano, dividiendo el edificio en sus elementos más simples para luego recomponerlos en el conjunto. Si las operaciones del método de composición elemental reproducían el método cartesiano, la retícula ortogonal que empleaba Durand evoca el espacio cartesiano. Así, el método de composición se desarrolla en un espacio neutro y estático que suprime el tiempo para poder determinar la posición precisa de los elementos.

La retícula ortogonal encarna la regularidad y el carácter estático del espacio cartesiano, pero también puede tener cualidades dinámicas, ya que es una máquina operacional que regula la disposición y articulación de los elementos arquitectónicos. La regularidad de la retícula permite infinidad de combinaciones de los elementos ubicados en ella, manteniendo control exacto pero flexible de su disposición. Bajo este punto de vista, el diseño compositivo es dinámico pero tiene lugar en un espacio neutral y estático.

De acuerdo con Lynn, el modelo digital ha facilitado la transición de la “representación” a la “abstracción”, pero distinguiéndola de la abstracción visual empleada por la arquitectura moderna⁷⁰ y definiéndola en términos generativos y evolutivos.⁷¹ Las técnicas de animación permiten representar la evolución de una forma y de las fuerzas que la configuran.⁷² Esto permite diseñar con la dimensión temporal controlando la

⁶⁹ LIMA, M. *Visual Complexity. Mapping Patterns of Information*. New York: Princeton Architectural Press, 2011. pp. 75, 80

⁷⁰ Más precisamente, Lynn se refiere a la abstracción propuesta por planteamientos como el Purismo, donde la heterogeneidad y variabilidad de las formas naturales se reducen a “Los elementos primarios [que] son la línea recta y la curva” (59), y desde los cuales se genera: “La sensación [que] sólo puede desencadenarse por la elección y la ordenación de elementos primarios. (57)” OZENFANT, A., y JEANNERET, C. E. En PIZZA, A. (Ed.) *Acerca del purismo. Escritos 1918/1926* (Segunda ed.). Madrid: El Croquis, 2004. El Neoplásticismo plantea un noción similar de la “abstracción” que será analizada en el Capítulo 4.

⁷¹ LYNN, G. *Animated Form*. In OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture*. London; New York: Routledge, 2014, p. 83

⁷² Ibídem, p. 63

transformación del objeto,⁷³ algo que Kalay considera como una característica esencial del diseño paramétrico:

“The ability to embed design rules, constraints, even goals within the object representation itself makes it an active, rather than a passive partner in the design process. Embedding rules and constraints in representation, in the form of ‘methods’ (in the parlance of object-oriented programming) or ‘parameters’ (in the parlance of parametric design), transforming an otherwise ‘passive’ representation into an ‘active’ one”⁷⁴.

El “objeto de representación activo” al que se refiere Kalay requiere programar las reglas de generación formal. Una vez se especifican las reglas de diseño es posible crear múltiples formas que estarán interrelacionadas, puesto que responden a una estructura asociativa común contenida en el algoritmo. Al programar las reglas de generación formal en un algoritmo, el diseñador opera bajo una “lógica no determinista” que facilita la exploración de soluciones que pueden, luego, evaluarse según los criterios u objetivos de diseño preestablecidos.⁷⁵

Las reglas de diseño que contiene el algoritmo permiten generar nuevos individuos de una serie, siempre distintos aunque pertenecientes a la misma “familia”⁷⁶ Esta “familiaridad” deriva de las funciones continuas generadas por algoritmos.⁷⁷ Es decir, los algoritmos pueden producir individuos o familias. Por ejemplo, un cubo modelado paramétricamente permite generar una familia de formas asociadas que comparten la misma estructura abstracta. Si las constantes de un cubo son los ocho puntos que definen seis superficies y las variables son las coordenadas que definen la posición de los puntos (Figura 3.7), al modificar los valores de las coordenadas se generan variaciones que dan lugar a una familia de formas relacionadas topológicamente (Figura 3.8).

⁷³ Ibídem, p. 78

⁷⁴ KALAY, Y. *Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design*. Cambridge (Massachusetts); London: MIT Press, 2004, p. 195

⁷⁵ “The designer employing techniques such as scripting interacts with and operates within the non-deterministic logic of the form generative environment rather than with the explicit representation of a particular form” OXMAN, R. *Theory and Design in the Digital First Age*. Op.cit., p. 250. “Rule-based algorithmic design can produce multiple, parallel design solutions. This facilitates a variety of design results that can be compared/evaluated relative to desired constraints and design objectives”. In OXMAN & OXMAN. Op.cit., p. 138

⁷⁶ BURRY, M., CECCATO, C., & SIMONDETTI, A. Mass-Customization in Design Using Evolutionary and Parametric Methods. In CLAYTON, M. & VASQUEZ DE VELASCO, C. (Eds.), *ACADIA 2000: Eternity, Infinity and Virtuality in Architecture*. Washington: Association for Computer-Aided Design in Architecture, c2002, 2000. p. 239

⁷⁷ CARPO, M. La desaparición de los idénticos: La estandatización arquitectónica en la era de la reproductibilidad digital. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009. p. 61

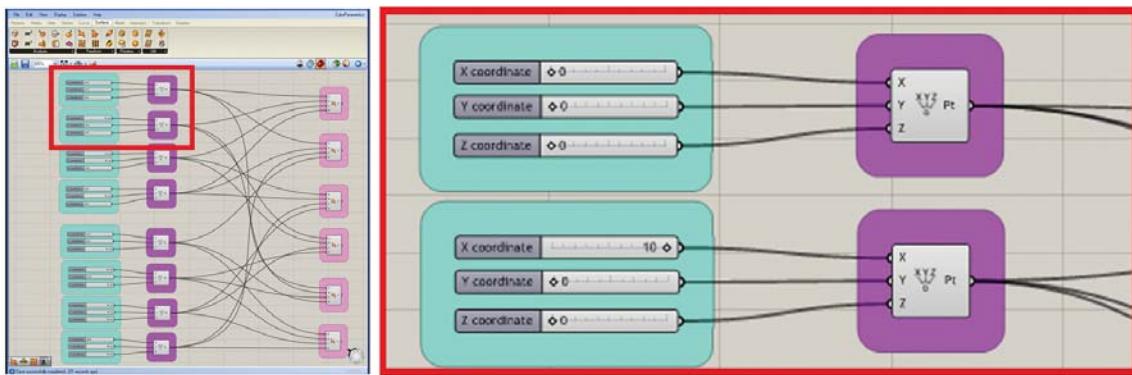


Figura 3.7 Definición de “puntos” del cubo especificando los valores (X, Y, Z) de las coordenadas

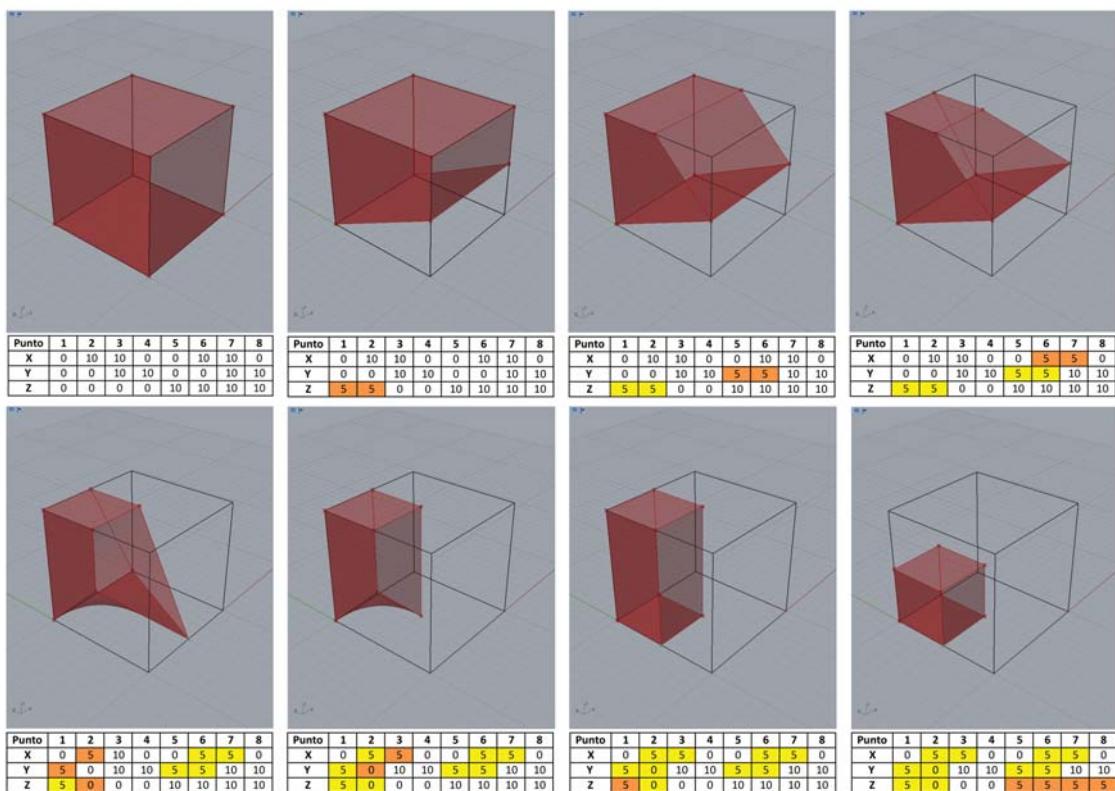


Figura 3.8 Modificación de valores de las coordenadas para generar una familia de formas relacionadas topológicamente

La generación y transformación de estas formas especificando las coordenadas de los puntos que las definen permite, luego, revisar la secuencia de operaciones a realizar para alcanzar una forma determinada. Asimismo, la modificación de parámetros da lugar a una familia de formas, más que a una forma concreta.

El dinamismo intrínseco al diseño paramétrico le diferencia de la composición elemental. La composición elemental se desarrolla en un espacio neutro y estático en el que se posicionan los elementos; el diseño paramétrico instrumentaliza el tiempo en un espacio topológico. En este contexto, la noción de “forma animada” en arquitectura,⁷⁸

⁷⁸ LYNN, G. *Animated Form*. Op.cit.

más allá de explicarse en dependencia de conceptos filosóficos o de la fluidez y sinuosidad plástica, puede entenderse como la expresión de los flujos de información que generan o transforman la forma del objeto de diseño.

3.1.4 De la computarización a la computación

“Computerization is about automation, mechanization, digitization, and conversion. Generally, it involves the digitation of entities or processes that are preconceived, predetermined, and well defined. In contrast, computation is about exploration of indeterminate, vague, unclear, and often ill-defined processes; because of its exploratory nature, computation aims at emulating or extending the human intellect”⁷⁹.

Kostas Terzidis

Para Terzidis, cabe distinguir entre dos tipos de procesos: la computarización, que implica acciones de automatización, mecanización y digitalización de elementos pre-existentes; y la computación, que conlleva la exploración de formas y procesos indefinidos. Esta diferenciación podría equipararse a los modelos paramétricos que, según Burry, pueden emplearse cuando el objeto está pre-definido o en las fases exploratorias previas.⁸⁰ Asimismo, Burry sostiene que el *scripting* – inherente al diseño paramétrico – responde tanto a la computarización como a la computación, ya que permite automatizar la generación de formas y aumenta la capacidad de explorar soluciones alternativas.⁸¹

Un modelo paramétrico aumenta la productividad en el proceso de diseño porque automatiza tareas repetitivas y facilita las modificaciones del objeto de diseño.⁸² En este sentido, el cálculo computacional permite que el tiempo invertido en realizar tareas repetitivas o variaciones formales, pueda aplicarse para explorar y transformar formas que mantienen su relación de “familia”. Por ejemplo, el proyecto mTable de Gramazio y Kohler consiste en el diseño de una mesa cuya “constante” son las cuatro patas en que se apoya, pero sus propiedades geométricas y físicas –dimensiones, material, color– son parámetros que pueden modificarse a través de un modelo digital por medio del cual el usuario interactúa usando una aplicación controlada desde el teléfono móvil. De esta forma, se crea una “familia de mesas” que comparten ciertas características (Figura 3.9).

⁷⁹ TERZIDIS. Op.cit., p. xi

⁸⁰ “[...] parametric modeling software is invaluable for both preliminary and developed design where there is a need for the definition, manipulation and visualization of complex geometry.” BURRY & MURRAY. Op.cit.

⁸¹ BURRY, M. *Cultural Defence*. Op.cit., p. 393

⁸² Ibídem, pp. 386, 393



Figura 3.9 Mesas mTable definidas por relaciones topológicas

El modelado paramétrico puede utilizarse para generar “familias” de componentes constructivos, tanto de formas que resultan de una exploración computacional-digital como de formas que han sido pre-definidas de un modo intuitivo-manual. Por ejemplo, el modelado de los 800 nudos que, aproximadamente, contiene la estructura del Tornado de Fuksas requirió de cinco modeladores que trabajaron simultáneamente durante cuatro meses.⁸³ Si se hubiese generado un modelo paramétrico del nudo, posiblemente esta tarea hubiese necesitado menos tiempo y podría haber sido realizada por un modelador. Además, si los nudos se modelan paramétricamente en lugar de modelar cada nudo por separado, se hubiese podido crear un modelo genérico que se adapte automáticamente a la geometría de la malla estructural a partir de la modificación de algunos parámetros. Con el fin de sustentar la veracidad de esta apreciación, como parte de la presente investigación, se ha realizado un modelo paramétrico a partir del diseño original.

Para crear este modelo paramétrico se requiere identificar constantes y variables; las constantes, los seis ejes de la membrana estructural correspondientes a los perfiles que articulan cada nudo; las variables, el ángulo de incidencia y el canto de los perfiles que acogen el nudo (Figura 3.10). Los ejes de la malla estructural que determinan la geometría del nudo se crean especificando la posición de los dos “puntos” que, al relacionarse, generan la curva-eje (Figura 3.11). Trazando líneas paralelas a los ejes se define el grosor de los perfiles. Estas líneas se unen con una curva cuya amplitud puede parametrizarse para ajustar la geometría del nudo a las restricciones del proceso de fabricación, como el radio de giro de las fresadoras CNC. Igualmente, el canto de los perfiles puede variar entre 12 y 17 centímetros, por lo cual, esta medida puede parametrizarse para ajustar el modelo a la variabilidad de los cantos (Figura 3.12).⁸⁴

Al modificar los puntos que definen sus ejes, la geometría del nudo se adapta a la dirección y al ángulo de los perfiles. Así, esta familia de nudos se genera fijando estos puntos y modificando los parámetros que determinan su contorno y altura (Figura 3.13). La posición de los puntos se indica por medio del modelo geométrico de la membrana o introduciendo sus coordenadas numéricamente.

⁸³ Véase Capítulo 2.3.3

⁸⁴ Los nudos del Tornado pueden recoger perfiles de diversos cantos. En el modelo realizado por el autor se ha parametrizado la altura total, es decir, como si todos los perfiles tuvieran el mismo canto, aunque este puede variar entre 12 y 17 centímetros.

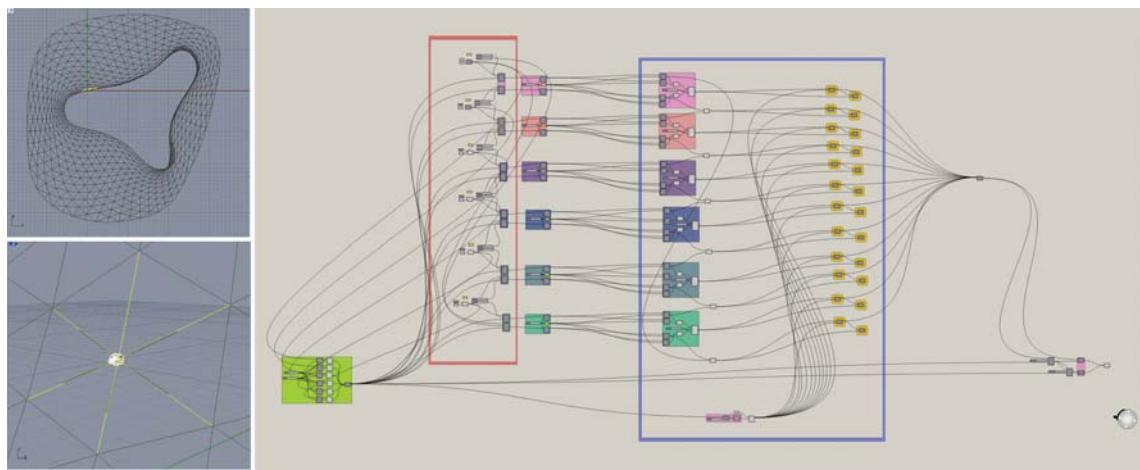


Figura 3.10 Membrana y ejes estructurales que definen cada nudo; diagrama topológico de constantes (recuadro rojo) y variables (recuadro azul) del modelo paramétrico de nudos del Tornado

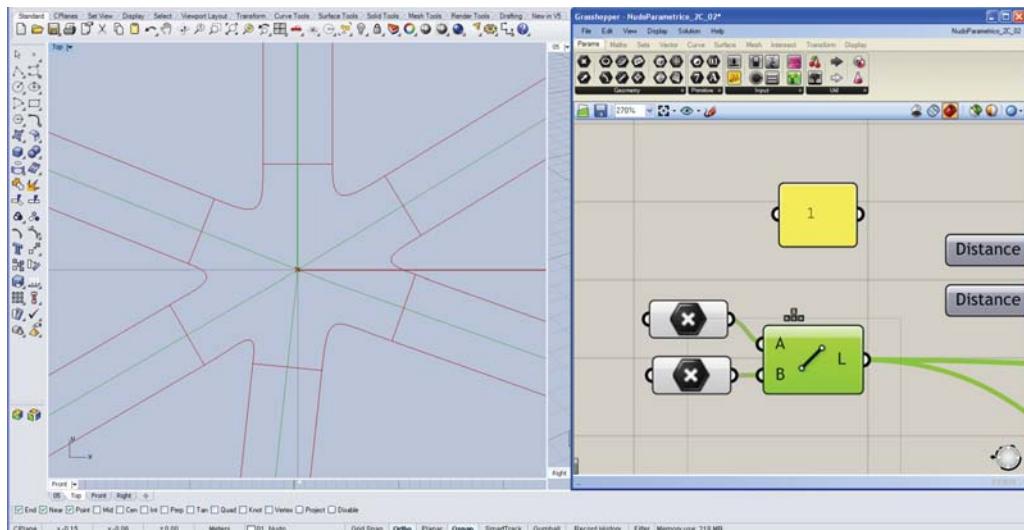


Figura 3.11 Ejes estructurales (verde) y relación topológica de los “puntos” que definen un eje

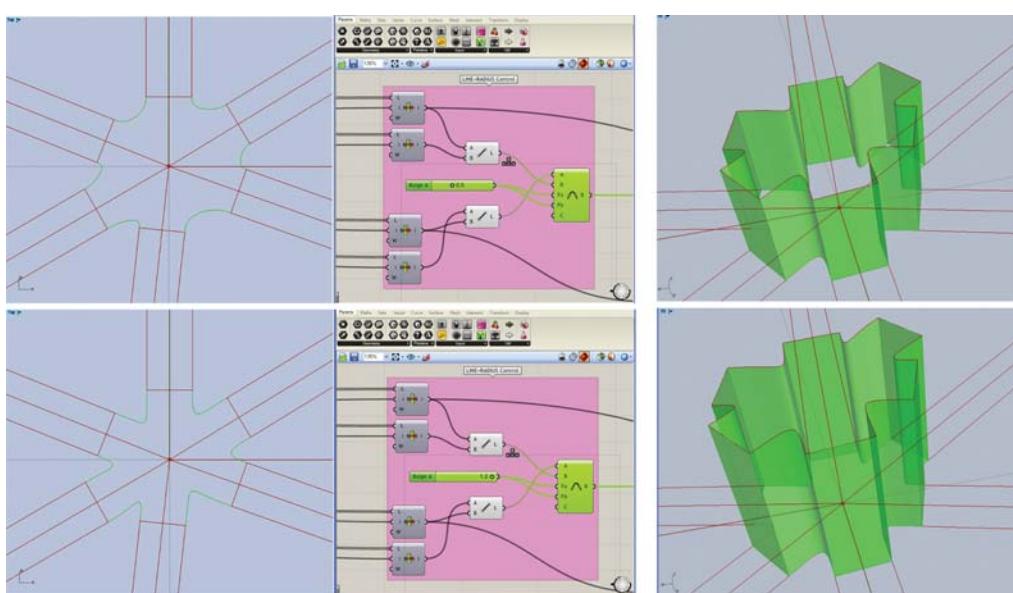


Figura 3.12 Parametrización de curvas del perfil y de la altura del nudo

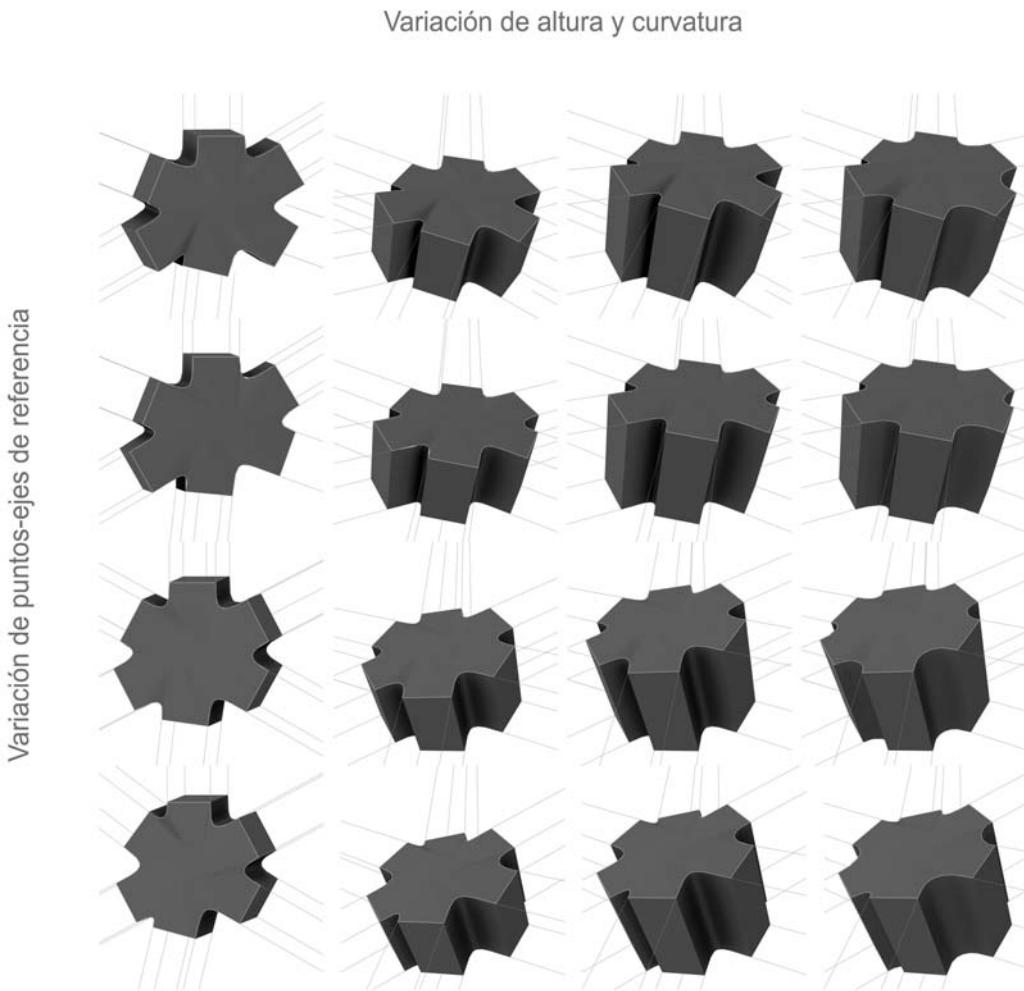


Figura 3.13 Familia de nudos paramétricos

Si consideramos las prestaciones que ofrecería un modelo paramétrico en el diseño de los nudos del Tornado de Fuksas, y en el diseño del mTable de Gramazio y Kohler, podemos reconocer la diferencia entre el modelado paramétrico y el diseño paramétrico. Cuando se modela paramétricamente una forma pre-concebida, las transformaciones formales se realizan fácilmente. En el caso de Fuksas, la forma de los nudos quedó definida en el proceso de diseño sin ayuda del cálculo computacional. Sin embargo, el nudo modelado paramétricamente puede transformarse fácilmente para crear una familia de nudos que, junto con los montantes, componen la estructura del Tornado. En este sentido, el modelo paramétrico permite generar una multiplicidad de formas a partir de un modelo pre-definido. La mTable, por otro lado, se diseña paramétricamente y el modelo paramétrico facilita la exploración de múltiples formas que no fueron pre-definidas por Gramazio y Kohler. En este caso, las transformaciones formales, facilitadas por el modelo paramétrico, responden a procesos computacionales que permiten explorar formas emergentes. Esto no significa, sin embargo, que el modelado de los nudos del Tornado no sea un proceso creativo: el diseño de un algoritmo para generar y valorar las soluciones posibles a un problema constructivo determinado ya es, en sí mismo, un acto creativo.

De acuerdo con Terzidis, cuando la computación se aplica como un recurso para explorar alternativas de un diseño amplía las capacidades de la mente humana.⁸⁵ Esta interpretación de la computación como extensión de la mente recuerda al agenciamiento maquínico de Deleuze y Guattari. Según esto, el diseñador y el ordenador no representan la oposición clásica entre organismo y mecanismo sino que conforman un nuevo conjunto a partir de nuevas conexiones que cambian su naturaleza; es decir, el par diseñador-ordenador conforma una máquina abstracta que resulta de la relación dialéctica entre el ser humano y la tecnología, en la medida en que las cualidades del diseñador no son remplazadas sino complementadas por el ordenador.⁸⁶

Esta complementariedad entre diseñador y ordenador es posible en la medida en que los *scripts*, que operan en un modelo paramétrico, faciliten el vínculo entre la capacidad cuantitativa del ordenador y la naturaleza holística del pensamiento humano. Un proceso de diseño basado en el dibujo y en el intelecto humano podría considerarse reductivo, por cuanto se orienta a una solución única. Cuando se diseña paramétricamente el ordenador permite explorar una multiplicidad de variaciones formales cuya generación sería inabordable para el intelecto humano utilizando técnicas de representación tradicionales.

La hibridación de las capacidades humanas con el poder computacional del ordenador, mediante modelos de diseño paramétricos, conlleva un proceso de retroalimentación entre ambos. Se ha planteado que la creatividad es la capacidad de superar los límites de un medio de representación para llegar a soluciones que no podrían alcanzarse a través de dicho medio.⁸⁷ En este contexto, la complementariedad entre la representación geométrica del objeto de diseño y la representación diagramática de las relaciones topológicas, permite superar los límites de la representación inherente a la geometría descriptiva, que opera en un espacio estático, para que el diseñador actúe en un espacio topológico que le permite la instrumentalización del tiempo. Según esto, la creatividad del diseño paramétrico radica primordialmente en concebir los algoritmos gráficos – diagramas – que faciliten la generación de soluciones formales impredecibles para el intelecto humano. Así, en el diseño paramétrico el diseñador deja de componer el objeto a partir de sus elementos, para centrarse en las operaciones, las relaciones y los parámetros que determinan su proceso formativo; un cambio que, a nivel teórico, queda reflejado en el reemplazo del concepto de “forma” por el de “formación”.⁸⁸

⁸⁵ TERZIDIS. Op.cit., p. xi

⁸⁶ Véase Capítulo 1.2.6

⁸⁷ “[...] creativity is only possible by going beyond the bounds of a representation, and by finding a novel solution which simply could not have been defined by that representation.” BENTLEY, P. *Evolutionary Design by Computers*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999. p. 39

⁸⁸ “[...] emerging design theory has transformed the concept of form into the concept of formation.” OXMAN, R. *Theory and Design in the First Digital Age*. Op.cit., p. 249

3.2 De la mecanización a la fabricación digital

3.2.1 Del estándar al no-estándar

Los modelos digitales permiten la evaluación, la racionalización y la fabricación de objetos, incluidos los edificios. Los modelos paramétricos, por otra parte, operan mediante transformaciones topológicas, lo que los convierte en modelos maleables que facilitan la exploración de múltiples variaciones formales a partir de la modificación de parámetros. Estos modelos han fomentado un lenguaje plástico de formas curvilíneas y fluidas, que son la expresión de la complejidad formal asociada a la arquitectura digital. Esta complejidad, vinculada con las formas irregulares resulta más manejable con la ayuda de herramientas digitales.

Estas formas curvas, fluidas e irregulares, creadas con medios digitales, se han asociado a la idea de una arquitectura “no-estándar” en la que, según Cache, el término “no-estándar” se asocia a formas originales y complejas.⁸⁹ Cache considera que estas formas perpetúan el mito romántico del arquitecto-artista según el cual cada proyecto arquitectónico es una creación única y personal,⁹⁰ donde la unicidad se traduce en un incremento de costes. Para ser viable, los costes de producción de la arquitectura no-estándar no deberían superar los de la producción industrializada:

“[The] whole difficulty of non-standard architecture lies in the sheer quantity of data that has to be generated and manipulated in order to industrially fabricate components that are totally different to each other at a cost no greater than standardized production”⁹¹.

Cache propone considerar la arquitectura no-estándar desde la perspectiva de una serie⁹² que no está basada en la repetición como en la estandarización industrial, sino en la “producción en serie de partes no idénticas [y] no se define por el elemento individual que la compone, sino por las leyes de cambio diferencial que generan la serie”⁹³. Esta producción de la arquitectura no-estándar implica la transición desde la fabricación en serie a la personalización en masa y supone, según Carpo, la “inversión completa del paradigma mecánico”,⁹⁴ o el inicio del “paradigma post-fordista” según Kolarevic,⁹⁵ ya que se hace igual de fácil y rentable producir mil objetos únicos o mil objetos iguales.⁹⁶

⁸⁹ CACHE. Op.cit., pp. 60-61

⁹⁰ Ibídem

⁹¹ Ibídem, p. 69

⁹² Ibídem, pp. 62, 68-69

⁹³ CARPO, M. *La desaparición de los identicos: La estandatización arquitectónica en la era de la reproductibilidad digital*. Op.cit., p. 61

⁹⁴ Ibídem

⁹⁵ KOLAREVIC, B. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Op.cit., p. 52

⁹⁶ En 1969 Marshall McLuhan anticipó este cambio de paradigma productivo, cuando concluyó: “once electronically controlled production has been- perfected, it will be practically just as easy and affordable to produce a million different objects as to create a million copies of the same object”. In MOREL, P. (May de 2014). Computation or Revolution. In GRAMZIO, F. & KOHLER, M. (Edits.) *Architectural Design: Made By Robots: Challenging Architecture at a Large Scale*, 2014, p. 85

La lógica de la serie inherente a la producción no-estándar⁹⁷ reside en una continuidad derivada de las “funciones continuas generadas por algoritmos que pueden utilizarse para producir elementos individuales o para crear series o familias de elementos.”⁹⁸ Por tanto, en la producción no-estándar subyace el modelado paramétrico que permite generar familias de formas relacionadas topológicamente.⁹⁹ Pero la serie no-estándar no se limita a la generación formal mediante el modelado paramétrico, sino que se extiende al proceso de fabricación controlado numéricamente.¹⁰⁰ Así, la producción no-estándar implica la continuidad entre los procesos de diseño y fabricación digital:

In order to [...] guarantee that the conception and fabrication are fully integrated, it is essential to work on the same nucleus so that we can, among other things, control the dimensions of the components from the conception stage right up to the writing of the ISO code programs for the digital machines driving the production of the object”.¹⁰¹

Esta continuidad no se limita a vincular los procesos de diseño y los de fabricación mediante el CAD/CAM, sino que, además, abre la posibilidad de establecer una relación dialéctica entre dichos procesos, en la medida en que la generación formal del proyecto arquitectónico viene influenciada por el diseño y la fabricación de elementos constructivos¹⁰² Es decir, las características físicas y materiales se convierten en inputs del proceso de diseño. Según ésto, “materiality and materialization can become the starting point of an exploratory, open-ended design process”¹⁰³. Materialidad y materialización devienen factores fundamentales en el proceso de diseño digital, superando la división precedente entre el proceso de generación de la forma y su materialización:

“Fabricating design, or fabrication design, may be considered the derivation of design formation processes through the design potential of the tool [...] the form generative potential of the tool to materialize form can be exploited as a generative paradigm”¹⁰⁴.

⁹⁷ Ibídem

⁹⁸ CARPO, M. *La desaparición de los identicos: La estandatización arquitectónica en la era de la reproductibilidad digital.* Op.cit., p. 61

⁹⁹ Véase Capítulo 3.1.3

¹⁰⁰ “The numerically controlled production processes of the past decade, which afforded the fabrication of non-standardized repetitive components directly from digital data, introduced into architectural discourse the ‘mass-customization’ and the new logics of “seriality,” i.e., the local variation and differentiation in series.” KOLAREVIC, B. *Digital Architectures.* Op.cit., p. 255

¹⁰¹ CACHE. Op.cit., p. 69

¹⁰² “[...] to design-for-construction by breaking down the whole to composite elements and distributing them to manufacturers”. BURRY & MURRAY. Op.cit.

¹⁰³ MENGES, A. Material Computation. Higher Integration in Morphogenetic Design. (CASTLE, H. Ed.) *Architectural Design*, 2 (216), 2012, p.16

¹⁰⁴ OXMAN & OXMAN. Op.cit., p. 300

En este nuevo planteamiento del diseño radica un potencial de exploración formal que puede dar lugar a nuevas formas de expresión plástica, realizando formas aparentemente complejas que surjan de una lógica constructiva basada en técnicas de fabricación digital.

3.2.2 De la complejidad plástica a la simplicidad constructiva

“Simplicity is a term in system science which describes the emergence of simplicity out of intricate and complex set of rules”¹⁰⁵.

Sawako Kajima & Michalatos Panagiotis

Kajima y Panagiotis sostienen que durante la primera década del siglo XXI se aplicaron algoritmos simples para generar formas aparentemente complejas. Esto dio lugar a una complejidad “superflua” en contraposición a una complejidad “verdadera” cuyo fin es, precisamente, el opuesto: emplear algoritmos complejos para simplificar.¹⁰⁶ La complejidad de estos algoritmos radica en la multiplicidad de parámetros interrelacionados, que incluyen las características de los materiales constructivos y de las herramientas de fabricación. De este modo, el algoritmo es más complejo porque tiene en cuenta los requerimientos constructivos durante el proceso de exploración formal. Así, la simplicidad no respondería a una simplificación de la forma “aparente” sino a la capacidad del algoritmo para tratar problemas de “complejidad organizada”, es decir, de operar con múltiples variables interrelacionadas para alcanzar resultados específicos manteniendo la tipicidad de la forma.

En los procesos de diseño, en los cuales se codifican algorítmicamente las características de los materiales y de las herramientas de fabricación para convertirlas en inputs de diseño, la complejidad deja de ser aparente. De esta manera, la materialidad y la materialización convergen en el proceso de diseño.

Las técnicas de fabricación digital varían según los materiales empleados.¹⁰⁷ Según Marta Malé-Alemany, la fabricación digital puede ser formativa, sustractiva y aditiva.¹⁰⁸ La fabricación formativa se basa en el empleo de materiales que se pueden deformar sin romperse, mediante el calor o la presión. El término “mecanizado” se aplica al uso de

¹⁰⁵ KAJIMA, S., & PANAGIOTIS, M. Simplicity. In SAKAMOTO, T., FERRE, A., & KUBO, M. (Eds.), *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture*. Barcelona: Actar, 2008. p. 130

¹⁰⁶ In recent years there is an increasing trend in architecture to exploit the ability of algorithmic design to produce complex forms by implementing relatively simple and easy formulas. This often results in the addition of unnecessary layers of complexity to a project just for the sake of producing more complex forms. [...] In contrast there is a whole class of algorithms that deal with simplification which are usually more complex and difficult to implement.” Ibídem

¹⁰⁷ SMITH, R. *Prefab Architecture: a Guide to Modular Design and Construction*. New Jersey: Wiley, 2010. p. 118

¹⁰⁸ MALÉ-ALEMANY, M. Full Print 3D.Printing Objects. In IPSER, C. (Ed.). *Fabvolution: Developments in Digital Fabrication*. Barcelona: Ajuntament de Barcelona; Institut de Cultura; Disseny Hub Barcelona, 2012. p. 17

máquinas en operaciones de fabricación sustractivas¹⁰⁹ como el corte, la perforación o el fresado de materiales como la madera, el metal o la piedra. La fabricación digital sustractiva implica la automatización de estas operaciones. La fabricación digital aditiva consiste en la solidificación de un material en polvo, líquido o fundido, superponiendo capas sucesivas que dan forma al objeto.¹¹⁰

A lo largo de la historia los objetos se han fabricado ensamblando elementos que se crean a partir de moldes o esculpiendo un material.¹¹¹ Malé-Alemany considera que las fabricaciones digital formativa y digital sustractiva representan la automatización de las técnicas de fabricación tradicionales, mientras que la fabricación digital aditiva es el nuevo paradigma de fabricación.¹¹² A pesar de esta diferenciación, las tres técnicas de fabricación digital sirven, primordialmente, para fabricar elementos constructivos que son ensamblados en obra. Así, la manufactura de elementos para ser ensamblados es una aplicación fundamental de la fabricación digital en la arquitectura.

3.2.2.1 Fabricación digital sustractiva

El “seccionamiento” es una técnica de fabricación digital sustractiva que consiste en dividir en secciones (o partes) un modelo digital. Las secciones resultantes permiten situar los ejes de corte que siguen las máquinas de fabricación digital para realizar los componentes de un pilar o una viga, por ejemplo.

Esta técnica se empleó en el Serpentine Gallery Pavilion, construido en el año 2005, y diseñado por Alvaro Siza y Eduardo Souto de Moura, junto al ingeniero Cecil Balmond (AGU).¹¹³ Se trata de un espacio de 300 m² conformado por una estructura de madera laminar bajo una cubierta de 17 metros de luz que se pliega hasta tocar el suelo y, en consecuencia, da lugar a una estructura continua entre soporte y cubierta.¹¹⁴ La estructura se compone de 427 elementos únicos de madera laminar, dispuestos sobre una retícula que se deforma para adaptarse a su entorno.¹¹⁵ Los elementos de la cubierta se diseñaron para ser ensamblados con la conexión del tipo “caja y espiga” y se fabricaron fresando láminas de madera de 69 mm (Figura 3.14).

Para definir la forma de cada elemento, el equipo de ingenieros de AGU desarrolló un algoritmo con estas restricciones: todos los elementos tienen el mismo espesor; el perfil de los elementos es diferente, pero se ensamblan de la misma manera; la arista inferior de los elementos es recta y la superior tienen un quiebre en ángulo en su parte central;

¹⁰⁹ SMITH. Op.cit., p. 118

¹¹⁰ Véase Capítulo 2.2.3.3

¹¹¹ LIPSON, H., y KURMAN, M. *La revolución de la impresión 3D*. Madrid: Anaya; Wiley, 2015, p. 28

¹¹² MALÉ-ALEMANY. Op.cit., pp. 17-18

¹¹³ Advanced Geometry Group at Arup (AGU)

¹¹⁴ MENGES, A. Manufacturing Diversity. (HENSEL, M., MENGES, A., & WEINSTOCK, M. Edits.)

Architectural Design: Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, 76 (2), 2006, p.76

¹¹⁵ SIZA, A., SOUTO DE MOURA, E., & BALMOND, C. Reciprocity, Hierarchy and Discreteness:

Serpentine Gallery Pavilion 2005. In Sakamoto, T., & Ferré, A. (Edits.). *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture*. Barcelona: Actar, 2008. p. 46

cada elemento está definido por 36 puntos de control que describen su posición en relación con los elementos adyacentes; la longitud de cada elemento cubre dos vanos de la retícula estructural.¹¹⁶ Estas restricciones se codificaron mediante ecuaciones que, en última instancia, determinaron las relaciones –paramétricas– de la familia de elementos no-estándar que componen el pabellón.¹¹⁷ La cubierta y la parte superior de las superficies perimetrales componen un cerramiento de 348 láminas de policarbonato translúcido (Figura 3.15).

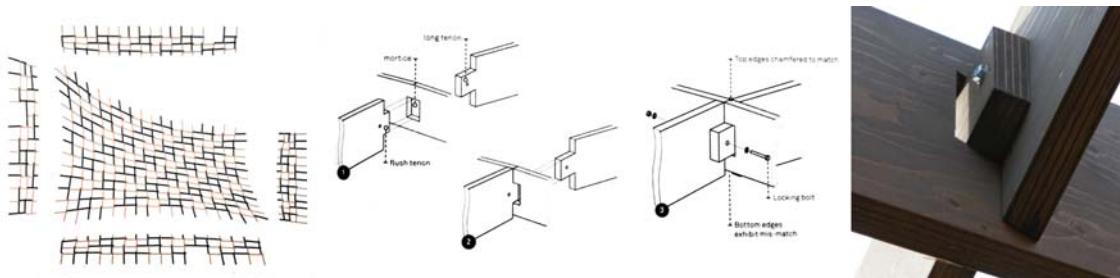


Figura 3.14 Deformación de malla; conexión caja y espiga

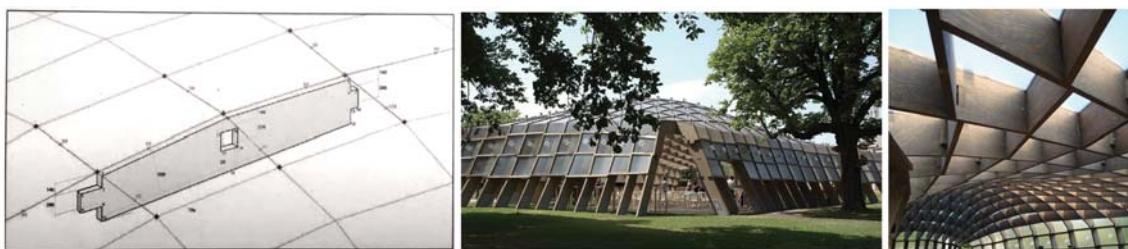


Figura 3.15 Definición de elementos estructurales; malla estructural y cerramiento

El diseño de los elementos estructurales mediante algoritmos permitió determinar los 36 puntos de control de cada lámina y su posición en el espacio mediante coordenadas. A partir del modelo digital se generaron los archivos de fabricación, extrayendo el perfil de cada elemento en un formato .dxf, y las coordenadas de los elementos estructurales en archivos de texto. Esta información fue enviada a Finnforest Merk, la empresa fabricante, que después de comprobar la concordancia entre los archivos .dxf y los archivos de texto, generó una hoja de cálculo en Excel con las coordenadas que definen las líneas de corte que debía seguir la fresadora CNC. Las 427 láminas se fabricaron en dos semanas y se montaron un mes con 10 operarios que ensamblaron las piezas manualmente. El ensamblaje requirió que cada pieza se rotulara con un código que determinaba su ubicación y el lugar que ocupaba en la secuencia de montaje.¹¹⁸

El montaje manual, el sistema de ensamblaje de caja y espiga y el uso de materiales naturales como la madera, responden a la intención de Siza y Souto de Moura por crear una arquitectura propia del *arte povera*.¹¹⁹ Pero más allá estas técnicas constructivas y

¹¹⁶ Ibídem, p. 46; IWAMOTO, L. *Digital Fabrication: Architectural and Material Techniques*. New York: Princeton Architectural Press, 2009. p.14

¹¹⁷ Ibídem

¹¹⁸ MENGES, A. *Manufacturing Diversity*. Op.cit., p. 77

¹¹⁹ IWAMOTO. Op.cit., p.14

materiales tradicionales, la realización de esta arquitectura “povera” se logró con elementos constructivos de gran precisión fabricados digitalmente y que facilitaron el ensamblaje por métodos manuales. Esta hibridación de la construcción tradicional con la fabricación digital en madera, también es llevada a cabo por Achim Menges, aunque compaginando el ensamblaje y el montaje manual con técnicas como el “teselado”.

El teselado permite generar o recubrir una superficie a partir de elementos poligonales que, sin solaparse, recubren un área libre de espacios vacíos. Según Iwamoto, el teselado se ha difundido en la arquitectura porque facilita la construcción de superficies complejas a partir de materiales laminares estandarizados.¹²⁰ Esta técnica se usa para generar superficies curvas e irregulares a partir de modelos digitales conformados por mallas poligonales de elementos cuyo tamaño está limitado por las dimensiones de los paneles disponibles.

En el ICD/ITKE Research Pavilion erigido en 2011, se aplicó la técnica de teselado inspirándose en los caparazones de tortuga y en los erizos de mar denominados “dólar de arena”, compuestos por placas poligonales discretas que, sin solaparse, recubren una superficie. Son teselas naturales que permiten a estos organismos alcanzar la máxima resistencia estructural con el mínimo material: “*less material through more form*”¹²¹, gracias a la fabricación digital.¹²²

En el dólar de arena, Menges y Knippers encontraron un principio topológico que aplicaron en el diseño del pabellón: no unir más de tres elementos laminares por cada vértice para evitar esfuerzos de flexión y generar un sistema estructural donde la transmisión de cargas solo genere esfuerzos cortantes.¹²³ Estas placas de calcio se entrelazan mediante articulaciones microscópicas a lo largo de las aristas. Menges concluye que “nature [evolves] highly performative plate structures that translates all acting forces into normal and shear stresses – thus almost entirely avoiding bending moments at these connections”¹²⁴.

¹²⁰ Ibídem, p. 36

¹²¹ MENGES, A. *Landesgartenschau Exhibition Hall*. Recuperado el 19 de 02 de 2016, de achimmenges.net: <http://www.achimmenges.net/?p=5731>

¹²² Según Menges: “CNC machinery has the potential to facilitate the economical implementation of biology’s mandate for adaptation of form and geometric differentiation. As opposed to merely transferring biomorphic patterns from biology to architecture, the transfer of knowledge happens on a systemic and performative level, through the recognitions of patterns in the way problems are solved in biology and engineering. Consequently, biomimetics is seen as a strategy for architectural and structural design.” MENGES, A., & SCHWINN, T. *Manufacturing Reciprocities*. (MENGES, A. Ed.).

Architectural Design: Material Computation, 2012. p. 122. La biomísmesis “digital” en la arquitectura, es un tema que se abordará en profundidad en el Capítulo 4.

¹²³ KRIEG, O., DIERICH, K., REICHERT, S., SCHWINN, T., & MENGES, A. Performative Architectural Morphology: Robotically manufactured biomimetic finger-joined plate structures. In ZUPANCIC, T., JUVANCIC, M., VEROVSEK, S., & JUTRAZ, A. (Edits.). *eCADDe 2011: Respecting Fragile Places*. Ljubljana: eCADDe, 2011. pp. 576, 578

¹²⁴ MENGES, A. Coalences of Machine and Material Computation. In LORENZO-EIROA, P. & SPRECHER, A. (Edits.). *Architecture in Formation: On the Nature of Information in Digital Architecture*. New York: Routledge, 2013. p. 280

En el dólar de arena, la conexión de las placas se hace mediante dientes entrelazados, de una manera análoga al ensamblaje *finger joint* que se utiliza en la construcción en madera. Con este tipo de ensamblaje, las cargas se transmiten por medio de dientes de unión –rectos o cónicos– que, ubicados en las aristas, se engarzan con los de las placas adyacentes y evitan así el pandeo generado por los movimientos de dilatación y contracción de la madera (Figura 3.16).¹²⁵ La resistencia de una superficie generada por placas es inversamente proporcional a la superficie de articulación entre ellas, de manera que las placas de menor tamaño aportan más resistencia por tener una mayor proporción de superficie de articulación. En el diseño de este pabellón, se redujo el tamaño de las placas destinadas a las zonas donde había mayor curvatura y que se encontraban expuestas a cargas de viento, zonas donde se requiere mayor resistencia.¹²⁶ Además de la resistencia estructural, otros parámetros de diseño determinaron la geometría de las placas: su tamaño se estableció en función de las planchas laminadas disponibles en el mercado y de la capacidad de los robots de fabricación. Igualmente, la dimensión y el ángulo de unión entre aristas se diseñaron en función de las técnicas y herramientas de fabricación disponibles.

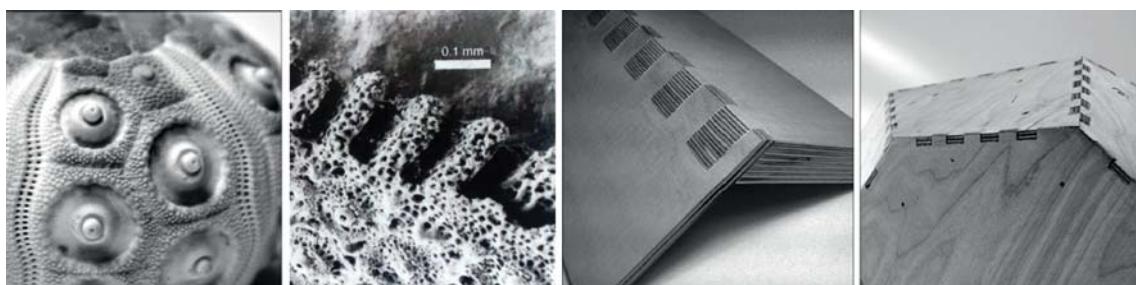


Figura 3.16 Adaptación de la tesela y del modo de unión de placas del dólar de arena a la unión de láminas de madera y al sistema de conexión finger joint

El sistema de conexión *finger joint* es una técnica tradicional utilizada desde hace 3.500 años,¹²⁷ que se utiliza primordialmente para unir elementos de madera rectos mediante dientes de unión. El CAD/CAM facilita la fabricación de placas de madera con dientes de unión de tamaños y formas diferentes, permitiendo conectar placas con grosor diversos y ángulos variables. De este modo, la fabricación digital permite la producción de placas de un solo material, cuyo ensamblaje se resuelve desde la propia geometría, sin necesidad de aglomerantes o elementos de unión adicionales. En palabras de Menges: “Robotically fabricated finger joints [...] provide form-and-force-fit joints that embed the logic of connection within the plate itself”¹²⁸.

La generación de la forma del pabellón fue el resultado de un proceso de diseño computacional. Las pruebas de carga se realizaron con prototipos físicos y con simulaciones en ordenador, los cuales ayudaron a definir la geometría de más de 850 láminas de madera diversas con un grosor de 6,5 mm. Asimismo, el cálculo

¹²⁵ KRIEG, DIERICH, REICHERT, SCHWINN, & MENGES. Op.cit., p. 575

¹²⁶ Ibídem, p. 578

¹²⁷ Ibídem, p. 575

¹²⁸ MENGES, A. *Coalences of Machine and Material Computation*. Op.cit. p. 280

computacional se aplicó para definir la geometría de más de 100.000 dientes de unión únicos.¹²⁹ Esto requirió generar un programa (NC-code o ISO-code) para controlar numéricamente los robots de fabricación digital a partir del modelo digital. El programa incluía parámetros y limitaciones relacionadas con los procesos y herramientas de fabricación; por ejemplo, la velocidad de rotación del cabezal, el fresado de la lámina por su cara superior o interior, la orientación espacial del brazo robótico o la rotación de la pieza de trabajo en la plataforma giratoria (Figura 3.17).¹³⁰



Figura 3.17 Geometría y fabricación del ICD/ITKE Research Pavilion, 2011

El ICD/ITKE Research Pavilion construido en 2011 ejemplifica lo que Menges define como un “diseño computacional integrativo” basado en la reciprocidad entre la fabricación, la forma, la materia y el comportamiento estructural.¹³¹ Este continuum digital, que abarca la generación de la forma, el análisis estructural y la fabricación digital, se volvió a aplicar –junto con los principios morfológicos, topológicos y de ensamblaje del dólar de arena– en el Landesgartenschau Exhibition Hall (2014). En este caso, el programa era más complejo ya que se requería una sala de exposiciones con dos zonas diferenciadas, aseos y cuarto de almacenaje. Además, para cumplir con la normativa, el edificio debía ser estanco, aislado térmicamente e impermeable.¹³²



Figura 3.18 Landesgartenschau Exhibition Hall

El Landesgartenschau Exhibition Hall se compone de una cáscara auto-portante, con superficie de doble curvatura, que está compuesta por planchas estructurales de madera contrachapada de 50 mm de espesor y cubre un espacio de 11x17 metros.¹³³ El edificio está compuesto de dos domos que demarcan sus zonas principales y un espacio

¹²⁹ MENGES, A., & SCHWINN, T. *Manufacturing Reciprocities*. Op.cit., p. 123

¹³⁰ Ibídem; KRIEG, DIERICH, REICHERT, SCHWINN, & MENGES. Op.cit., p. 575

¹³¹ MENGES, A., & SCHWINN, T. *Manufacturing Reciprocities*. Op.cit., p. 123

¹³² Ibídem, p. 93

¹³³ Ibídem

intersticial de curvatura invertida que los conecta. Las placas estructurales varían gradualmente su forma para dar lugar a una tesela con geometría convexa, mientras que el espacio intermedio se compone de placas cóncavas que resultan de la contracción de la forma (Figura 3.18).¹³⁴ La estructura primaria requirió la fabricación digital de 243 placas de madera diferentes que incluían más de 7.600 dientes de unión también únicos. Asimismo, el CAM se empleó para fabricar los componentes del aislamiento térmico, la impermeabilización y el revestimiento.¹³⁵

Además del teselado, Menges ha empleado a la técnica de “plegado” con la fabricación digital sustractiva. El plegado conjuga la generación formal con las prestaciones estructurales. Al plegar una superficie se aumenta su resistencia y rigidez y hace que sea auto-portante. Pero la escala de un edificio impide que su forma sea el resultado de una única acción de plegado, de manera que es necesario descomponerlo en elementos discretos que luego se ensamblan. El proceso de descomposición consiste en desplegar la superficie para hacerla plana y subdividirla en elementos que puedan ser cortados por una máquina de fabricación digital. Actualmente existe el software para desplegar automáticamente las superficies a partir de un modelo digital y determinar el grosor de las planchas que serán cortadas y ensambladas.¹³⁶ También existen herramientas CAD/CAM para realizar cortes y perforaciones y para doblar materiales que difícilmente podrían plegarse con técnicas y herramientas tradicionales.

El ICD/ITKE Research Pavilion construido en 2014-2015 es una membrana estructural de 85 m² que conforma un espacio semi-exterior y está compuesta por 151 segmentos únicos realizados con láminas de madera contrachapada que fueron cortadas, plegadas y cosidas robóticamente. Las uniones entre segmentos se diseñaron bajo los mismos principios de los anteriores pabellones. Las láminas se articulan mediante dientes de unión que se entrelazan con los de las láminas adyacentes. En este caso los dientes no se traban unos con otros, como en el *finger joint*, sino que se mantienen unidos mediante costuras. Así se evita el uso de prensas o encofrados que mantienen la presión necesaria para evitar la deslaminación (Figura 3.19).¹³⁷



Figura 3.19 Pliegue y costura de láminas de madera contrachapada

¹³⁴ Ibídem, p. 98

¹³⁵ MENGES, A. *Landesgartenschau Exhibition Hall*. Op.cit.

¹³⁶ IWAMOTO. Op.cit. pp. 63-64

¹³⁷ MENGES, A. *ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16*. Recuperado el 03 de 04 de 2017, de achimmenges.net: <http://www.achimmenges.net/?p=5822>

Cada uno de los 151 segmentos consta de tres tiras contrachapadas de haya laminada que, al plegarse y unirse, crean un elemento de doble capa que gana rigidez y estabilidad por la flexión de la madera. Las fibras longitudinales de la madera tienen una flexibilidad que les permite deformarse y retener una forma dada. Esta cualidad permite dirigir y mantener el comportamiento estructural –rigidez y fuerza– de una lámina de madera a partir del direccionamiento de sus fibras. Así, las láminas-tiras que conforman el pabellón, están compuestas de paneles de madera laminar que se disponen variando la dirección de sus fibras de acuerdo con los requisitos geométricos y estructurales, esto es, según la rigidez necesaria y el radio de curvatura de cada elemento (Figura 3.20). De este modo, en el pabellón no solo se instrumentaliza la anisotropía y la lógica estructural de la madera, sino que se crea una estructura ligera y eficiente ya que se obtiene una cáscara estructural que solo pesa 780 kg en su conjunto, a razón de 7,85 kg/m².¹³⁸



Figura 3.20 ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16

Las técnicas de seccionamiento, teselado y plegado permiten dos tipos de continuidad: la continuidad productiva, o continuum digital, y la continuidad formal, o *continuum morfológico*, que resulta de la interrelación entre forma, funcionalidad y variabilidad de los elementos de ensamblaje de series no-estándar.

3.2.2.2 Fabricación digital aditiva

En la fabricación digital, el término “aditiva” hace referencia a los métodos de impresión 3D que permiten crear objetos a partir de la superposición de capas.¹³⁹ De acuerdo con Lipson y Kurman, hay dos tipos principales de tecnologías de impresión 3D: las impresoras que depositan capas de un material blando a través de un cabezal de impresión o boquilla y las que rocían un material pulverizado que se compacta por medio de aglomerantes o temperatura.¹⁴⁰ La primera categoría se denomina “modelado por deposición fundida” (MDF). La mayoría de impresoras MDF domésticas utilizan un tipo de material termoplástico llamado ABS que se funde en la impresora para hacerlo pasar por el cabezal de impresión. En la edificación, el material predominante es el hormigón, aunque también se utilizan materiales cerámicos, metálicos y termoplásticos. A la segunda categoría pertenecen las impresoras PolyJet y D-Shape. La primera combinan un cabezal, con el cual se rocía un fotopolímero que se rigidiza, y una

¹³⁸ Ibídem

¹³⁹ LIPSON & KURMAN. Op.cit., p. 93

¹⁴⁰ Ibídем, pp. 96-97

lámpara ultravioleta –tecnología LENS (Laser Engineered Net Shaping) que rocía material en polvo y lo funde mediante un rayo láser de alta potencia–. La segunda extruye un líquido aglomerante para compactar capas de arena.¹⁴¹

Además del tipo de material utilizado, en el ámbito de la construcción el empleo de técnicas de fabricación aditiva está limitado por el tamaño de la obra. En las de mayor tamaño, se emplean impresoras cuyo tamaño supera al del edificio, para poder hacer la impresión íntegramente de forma continua. El estudio holandés DUS Architects inició en el año 2014 el proyecto “3D Print Canal House” en colaboración con la empresa Fiction Factory, con el fin de desarrollar la impresora KamerMaker (Room Maker). Con esta impresora pueden imprimirse elementos de 5 metros de altura por 2 metros de ancho y profundidad,¹⁴² con un material “bio-plástico” compuesto en 75 % por aceite vegetal de linaza, que es reciclable pues se puede fundir y reutilizar para otras impresiones. Para el proyecto se desarrolló una solución que sus diseñadores denominan “cross-sectional innovation”¹⁴³, basada en formas que se pliegan para aumentar la resistencia estructural y que, a su vez, tienen compartimentos que pueden llenarse con hormigón para aumentar la resistencia o con otros materiales que funcionen como aislamiento.



Figura 3.21 3D Print Urban Cabin y fachada de edificio temporal para Comisión Europea

Esta técnica se ha aplicado en el diseño y la fabricación del habitáculo de 8 m² denominado “3D Print Urban Cabin”, cuyos muros se generan mediante pliegues que conforman una superficie tridimensional con estabilidad estructural,¹⁴⁴ de manera que funcionan como cerramiento y estructura. El estudio DUS utilizó la KamerMaker para fabricar los elementos de la fachada de un edificio efímero que albergó las reuniones de la Comisión Europea. Estos elementos, además de servir como revestimiento, generan unos bancos en el exterior del edificio (Figura 3.21).¹⁴⁵

¹⁴¹ Ibídem, pp. 97-102, 250

¹⁴² FREARSON, A. *Dutch EU building features a facade combining tensile fabric and 3D-printed bioplastic*, 2016. Recuperado el 15 de 02 de 2017, de Dezeen: Architecture and Design Magazine: <https://www.dezeen.com/2016/01/12/european-union-3d-printed-facade-dus-architects-holland/>

¹⁴³ DUS Architects. Recuperado el 15 de 09 de 2016, de 3D Print Canal House: <http://3dprintcanalhouse.com/about-the-3d-print-canal-house-1>

¹⁴⁴ FREARSON, A. *DUS Architects builds 3D-printed micro home in Amsterdam*, 2016. Obtenido de Dezeen: Architecture and Design Magazine: <https://www.dezeen.com/2016/08/30/dus-architects-3d-printed-micro-home-amsterdam-cabin-bathtub/>

¹⁴⁵ FREARSON, A. *Dutch EU building features a facade combining tensile fabric and 3D-printed bioplastic*. Op.cit.

El Contour Crafting es una técnica que utiliza una impresora para fabricar objetos arquitectónicos in situ. Consiste en una grúa de caballete controlada por ordenador, provista de un extrusor de hormigón de alta densidad y fraguado rápido, y de un brazo robótico. Esta impresora puede utilizarse para construir viviendas de hasta dos plantas y una altura máxima de 6 metros. Una vez hecha la cimentación, la impresora se posiciona en la obra e inicia la impresión de los muros extrudiendo hormigón reforzado con fibras. A medida que la boquilla se va moviendo la capa inferior se endurece para soportar el peso de las capas siguientes. La geometría de los muros varía de acuerdo con su función estructural: si el muro no es de carga se crea a partir de dos planos paralelos que se arriostran con un plano intermedio en zigzag; si el muro es de carga, el plano intermedio se dobla (Figura 3.22).¹⁴⁶ Cuando las capas extruidas alcanzan la altura de los dinteles de las puertas y ventanas, la altura del forjado o de la cubierta, el brazo robótico coloca elementos prefabricados que, posteriormente, se recubren con el mismo hormigón. De este modo se fabrican el cerramiento estructural y los tabiques divisorios de la vivienda; además, la impresora también puede utilizarse para producir elementos de menor escala.¹⁴⁷

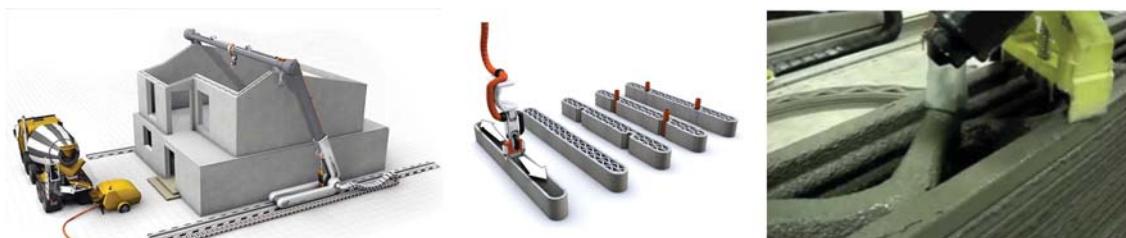


Figura 3.22 Contour Crafting

De acuerdo con Behrokh Khoshnevis, su creador, los espacios vacíos entre los muros se llenan con hormigón genérico y pueden utilizarse para insertar tuberías, cableado o refuerzos estructurales.¹⁴⁸ El Contour Crafting necesitó del desarrollo de nuevos materiales puesto que la resistencia del hormigón se reduce debido a las oquedades que se crean entre las capas impresas.¹⁴⁹ Por ello, fue necesario aumentar su resistencia a 10.000 psi, cuando la resistencia del hormigón genérico se encuentra entre 2.500 y 3.000 psi.

Por otra parte, en las obras de menor tamaño se imprimen componentes constructivos para ser ensamblados de la forma más sencilla, reduciendo los elementos de articulación. Esta lógica de ensamblaje se ha aplicado utilizando diversos materiales,

¹⁴⁶ UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. *Contour Crafting: Automated Construction: Behrokh Khoshnevis at TEDx*. Obtenido de Contour Crafting: Robotic Constructin System: <http://www.contourcrafting.org>

¹⁴⁷ SOAR, R., & ANDREEN, D. The Role of Additive Manufacturing + Physiomimetic Computational Design for Digital Construction. In MENGES, A. (Ed.) *Architectural Design*, 2012, p. 130

¹⁴⁸ UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. *Contour Crafting: Automated Construction: Behrokh Khoshnevis at TEDx*. Op.cit.

¹⁴⁹ LIM, S., BUSWELL, R., LE, T., WACKROW, R., AUSTIN, S. A., & GIBB, A. Development of a viable concrete printing process. In *28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2011)*. Seoul: International Association for Automation and Robotics in Construction, 2011. p. 666

como los ladrillos cerámicos diseñados por Building Bytes, los nudos metálicos de Arup el habitáculo en ABS diseñado por SOM. En estos casos la fabricación aditiva se basa en la impresión de un único material.

Malé-Alemany ha desarrollado una técnica que permite verter diversos materiales en un encofrado compartimentado. En las construcciones de hormigón el coste del encofrado varía entre el 40 % y el 60 % del coste total de la estructura y este porcentaje aumenta si se trata de una forma irregular.¹⁵⁰ Los encofrados se han utilizado tradicionalmente para moldear la forma exterior, pero Malé-Alemany propone una nueva técnica de fabricación de encofrados, basada en la impresión continua de un termoplástico biodegradable (PLA), con los que es posible moldear cavidades en el interior del objeto.¹⁵¹ En los primeros intentos para llevarlos a cabo, el proceso de impresión se interrumpía dando lugar a cavidades y porosidades que no solo afectaban la resistencia del molde, sino que filtraban agua. El problema se resolvió reajustando los parámetros de impresión, como las velocidades del cabezal y del flujo de material. También, fue necesario reajustar la impresora para imprimir piezas de 600 mm de altura ya que, al trabajar con una impresora RepRap de tercera generación, solo era posible imprimir piezas con altura máxima de 200 mm.¹⁵²



Figura 3.23 Moldes realizados con impresión 3D

De acuerdo con Malé-Alemany,¹⁵³ los objetos creados con este procedimiento son más ligeros y estables, por las cavidades pueden pasar las instalaciones o se pueden llenar con otros materiales para mejorar el comportamiento del objeto –estructural, térmico, acústico o de resistencia al fuego– (Figura 3.23). De este modo es posible fabricar objetos multifuncionales y con múltiples materiales, sin mezclarlos, de manera que el encofrado termoplástico puede ser extraído para su fundición y reutilización. Malé-Alemany considera que esta técnica se podría desarrollar para que sea aplicada en la fabricación de encofrados de un edificio.

¹⁵⁰ PORTELL-TORRES, J., LLOVERAS-CORBALAN, M., & MALÉ-ALEMANY, M. 3D-printed Hybrids Exploring Single Thread Printing for Complex and Multifunctional Concrete Framework. In VOYATZAKI, M. (Ed.). *What's the Matter: Materiality and Materialism at the Age of Computation*. ENHESA, 2014, p. 458

¹⁵¹ Ibídem, p. 461

¹⁵² Ibídem, p. 463

¹⁵³ Ibídem, pp. 466-467

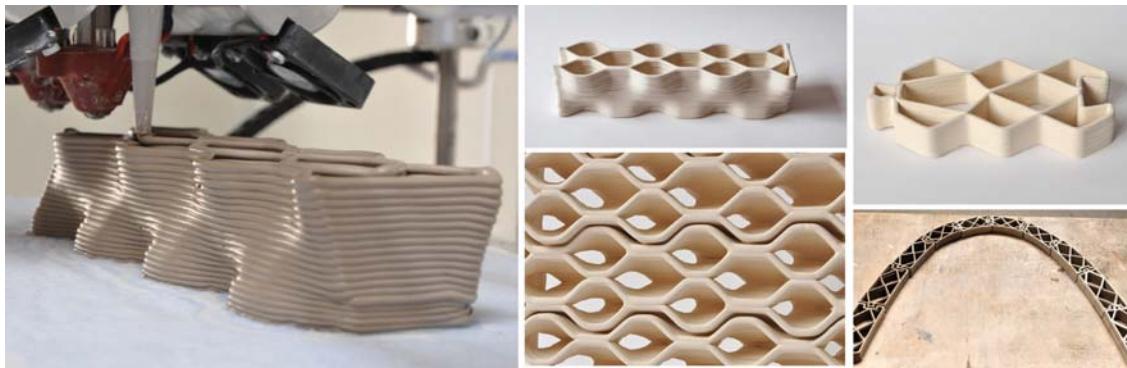


Figura 3.24 Honeycomb Brick e Interlocking Brick

Brian Peters, del estudio Building Bytes, ha desarrollado una técnica basada en el autoensamblaje de ladrillos cerámicos que pueden fabricarse con impresoras MDF domésticas, cambiándoles la boquilla de extrusión para imprimir con arcilla. Las capas de impresión tienen dos milímetros de espesor y, siguiendo una línea de impresión continua, la fabricación de un ladrillo requiere entre 15 y 20 minutos.¹⁵⁴ Peters ha diseñado con esta técnica cuatro tipos de ladrillo, dos de los cuales son autoensamblables. El Honeycomb Brick es un ladrillo modular de contorno ondulado que puede apilarse a modo de colmena. Su forma da lugar a unos “dientes de engranaje” que facilitan su articulación con los ladrillos adyacentes. Este ladrillo puede colocarse de tres maneras, de modo que permite realizar celosías o fabricar muros con cavidades para introducir las instalaciones.¹⁵⁵ El Interlocking Brick, tiene un arrostramiento interior que aumenta su estabilidad y su sistema de ensamblaje permite realizar muros, bóvedas o domos (Figura 3.24).¹⁵⁶

Salomé Galjaard, diseñadora de Arup en la sede de Ámsterdam, ha creado un nudo estructural basándose en la fabricación aditiva con metales. Como afirma la diseñadora: “You can print almost anything, but if you want to do that in a smart and financially interesting way there are rules to be taken into account”¹⁵⁷. El nudo es resultado de un proyecto de investigación que surge de un encargo sobre el diseño de una luminaria basada en el principio de “tensegridad” (*tensegrity*). La luminaria no llegó a realizarse, pero Galjaad pretendía aplicar el CAD/CAM para optimizar su forma y fabricarla digitalmente a partir de 1.600 puntos de conexión.¹⁵⁸

¹⁵⁴ PETERS, B. Building Bytes: 3D-Printed Bricks. In *Adaptive Architecture: Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*. Cambridge: ACADIA, 2013. p. 433

¹⁵⁵ Ibídem, p. 434

¹⁵⁶ BUILDING BYTES. *Interlocking Brick*. Recuperado el 06 de 11 de 2016, de Building Bytes: 3D Printed Bricks: <http://buildingbytes.info/interlocking-brick/>

¹⁵⁷ WINSTON, A. (11 de 06 de 2014). *Arup unveils its first 3D-printed structural steel building components*, 2014. Recuperado el 15 de 11 de 2016, de Dezeen: Architecture and Design Magazine: <http://www.dezeen.com/2014/06/11/arup-3d-printed-structural-steel-building-components/>

¹⁵⁸ El principio de tensegridad plantea que “las organizaciones materiales se consideran redes organizadas y mantenidas en tensión mediante el flujo energético entre elementos que nunca se tocan (como las estructuras moleculares o los sistemas planetarios), más que como objetos estáticos a compresión”. En KUBO, M., y SALAZAR, J. Una breve historia de la era de la información. *VERB: Matters*, 2004. p. 8

En la propuesta inicial, la fabricación de los nudos se basaba en la mecanización de cada una de sus piezas que serían soldadas manualmente. La investigación de Arup partió de un modelo paramétrico que facilitaba la personalización de los nudos y permitía su evaluación estructural con simulaciones. Con estas simulaciones se determinó que sobraba la mitad de la altura del nudo original y que suponía el 75 % su peso (Figura 3.25).¹⁵⁹ Con esto se logró reducir los esfuerzos estructurales de la lámpara, ya que el resto de componentes –cables y perfiles metálicos– también redujeron su tamaño; lo cual hizo disminuir el peso total en un 50 %.¹⁶⁰

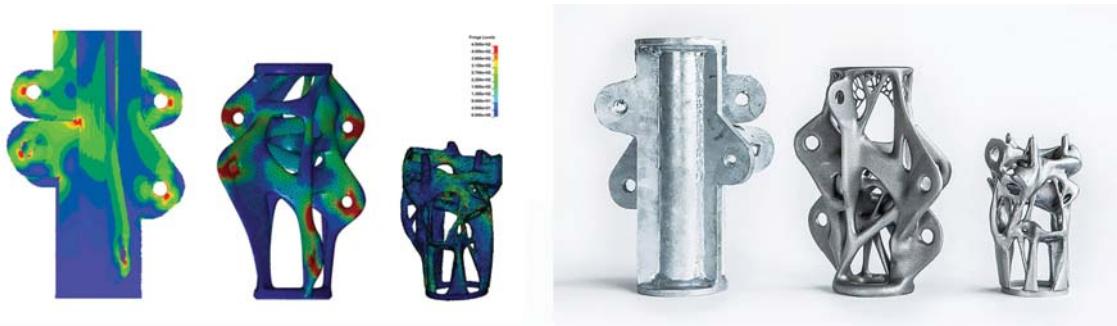


Figura 3.25 Nudo Arup

Para reducir aún más el tamaño de los nudos y, por tanto, su peso se emplearon materiales ligeros. Inicialmente se pensó fabricarlos con acero inoxidable, pero la empresa fabricante –3D Systems– imprimía con acero martensítico (*maraging steel*), un acero bajo en carbono y de alta pureza, que es más fácil de imprimir y cuatro veces más resistente que el acero de construcción.¹⁶¹ El tamaño del nudo se redujo en un 40 % porque el coste de la impresión en metal sigue siendo muy elevado y porque el tamaño de las impresoras requeridas es todavía relativamente pequeño.¹⁶²

Según Galjaard, la reducción de costes no debe evaluarse únicamente teniendo en cuenta la producción, sino que hay que considerar los costes a lo largo de todas las fases de diseño, producción, funcionamiento y reciclaje del edificio.¹⁶³ Bajo este punto de vista, la reducción de tamaño y peso de un componente constructivo que se repite múltiples veces no solo incide en el consumo de recursos materiales sino que disminuye el coste de transporte y almacenamiento durante la obra; además, la eliminación de piezas de ensamblaje reduce los costes de instalación.

Gajlaard considera que, antes de aplicar técnicas de fabricación aditiva a edificios, es necesario ganar experiencia con proyectos de menor tamaño.¹⁶⁴ El proyecto AMIE diseñado por SOM es un pequeño habitáculo autosuficiente energéticamente, cuyos

¹⁵⁹ GONCHAR, J. *Continuing Education: 3-D Printing Beyond the Prototype: Architects and designers take additive manufacturing to a new level*, 2016. Recuperado el 06 de 11 de 2016, de Architectural Record: <http://www.architecturalrecord.com/articles/11652--d-printing>

¹⁶⁰ Ibídem

¹⁶¹ WINSTON. Op.cit.

¹⁶² Ibídem

¹⁶³ Ibídem

¹⁶⁴ GONCHAR. Op.cit.

cerramiento estructural, paneles interiores y empuñaduras de puertas fueron impresos en ABS reforzado con fibra de carbono. El cerramiento está compuesto de piezas impresas en forma de C que, al ensamblarse, crean un volumen de sección cuadrada con esquinas redondeadas (Figura 3.26) y una superficie interior de aproximadamente 40 m². En el espacio entre el cerramiento y los paneles interiores se ubica el aislamiento térmico y anti-humedad, de manera que se logra un cerramiento con 79 % de superficie opaca y aislada térmicamente y un 21 % de superficie acristalada.¹⁶⁵



Figura 3.26 AMIE SOM

La fabricación aditiva conlleva una libertad plástica que está dando lugar a componentes y elementos arquitectónicos que cumplen con múltiples requisitos funcionales y hacen más eficiente el proceso constructivo. Pero esta libertad depende del desarrollo de nuevos materiales y del descubrimiento de nuevos medios y modos de trabajar con los materiales existentes.

3.2.2.3 De la forma a la función y la producción

“No hay peor enemigo de la forma que la posibilidad de disponer de todas las formas”¹⁶⁶.

Jean Baudrillard

El CAD/CAM ha abierto la posibilidad a crear y construir cualquier forma con mayor facilidad, precisión y economía, pero como advierte Baudrillard, esta aparente libertad conlleva ciertos riesgos. Uno de ellos es dar lugar a un nuevo formalismo que, como lo definió Mies, es el resultado de tomar “la forma como meta” y de un esfuerzo “que no se orienta al interior, sino al exterior”¹⁶⁷. Este formalismo que, en los inicios de la arquitectura no-estándar condujo al diseño de formas aparentemente complejas, se está reconduciendo en la medida en que el diseño y la fabricación digitales se están aplicando desde una perspectiva orientada hacia los procesos y las estructuras internas que generan la forma exterior. Este cambio de perspectiva refleja la transición desde un formalismo basado en procesos *top-down*, por los que se impone una forma a la materia,

¹⁶⁵ SKIDMORE, OWENS & MERRILL. *AMIE 1.0.*, 2017. Recuperado el 20 de 01 de 2017, de SOM: <http://www.som.com/projects/amie>

¹⁶⁶ BAUDRILLARD, J. *El complot del arte. Ilusión y desilusión estéticas*. Buenos Aires: Amorrortu, 2007, p. 108

¹⁶⁷ NEUMEYER, F. *La palabra sin artificio: reflexiones sobre arquitectura 1922/1968*. Madrid: El Croquis, 2000, pp. 393, 394

hacia el diseño de procesos *bottom-up*, en los que la forma emerge a partir de las relaciones entre el comportamiento, la geometría, el material y las técnicas de fabricación.

El formalismo se está contrarrestando ya que las múltiples posibilidades formales inherentes a la producción no-estándar vienen condicionadas por los materiales de fabricación. Si en los procesos de fabricación sustractiva la forma se diseña en función de las restricciones estructurales o constructivas, inherentes al ensamblaje de componentes cuyo tamaño está determinado por el tamaño de la planchas a mecanizar, en la fabricación aditiva el diseño está condicionado por el tipo de material o el tamaño de la impresora. Al comparar los materiales utilizados en la fabricación sustractiva y aditiva, vemos que su diferencia radica en que la primera puede trabajar con materiales tradicionales y formatos estandarizados, mientras que la segunda suele comportar el desarrollo de nuevos materiales y formatos.

La fabricación sustractiva ha permitido evolucionar a las técnicas constructivas tradicionales, como los sistemas de ensamblaje utilizados y adaptados en los proyectos de Menges o en el de Siza junto a Souto de Moura. La fabricación aditiva ha dado lugar a nuevos elementos de ensamblaje como los ladrillos cerámicos de Building Bytes o los nudos metálicos diseñados en Arup. En todos estos casos el sistema de ensamblaje forma parte de la geometría de los elementos que componen la forma conjunta, lo que se traduce en una reducción de elementos constructivos y en una mayor eficiencia productiva.

La multifuncionalidad de los elementos de ensamblaje que resulta de las técnicas de fabricación digital, sustractivas y aditivas, nos permite entender la complejidad de otra manera. Así, la complejidad deja de radicar en la forma para trasladarse a la función, al mismo tiempo que la tipicidad no se adscribe al objeto sino al componente constructivo. Es decir, la complejidad deja de ser aparente y deviene intrínseca. El empleo de la fabricación digital ya no se justifica por cuestiones formales (i.e. plásticas) sino por razones productivas, económicas y funcionales. Así, además de crear formas singulares, con la fabricación digital también se intenta aportar soluciones prácticas –por ejemplo, la reducción de los costes y la simplificación del montaje, para ahorrar trabajo y material– a partir de la producción de series no-estándar de componentes constructivos.

Con la fabricación digital la arquitectura ingresa en la nueva economía, ya que “Las máquinas tontas de la era industrial nos trajeron las economías de la estandarización, repetición y producción en masa, pero las máquinas inteligentes de la era informática pueden ofrecernos ya muy distintas economías de la adaptación inteligente y la personalización automatizada”¹⁶⁸. Esta economía emergente facilita nuevas relaciones de producción y abre nuevos mercados en los que la personalización es el nuevo paradigma que remplaza a la estandarización.

¹⁶⁸ MITCHELL, W. *E-topía: vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001, p. 159

3.3 De la producción en serie a la plataforma on-line

Las formas curvas, fluidas e irregulares que conforman el lenguaje plástico asociado a la “complejidad formal” y a la “arquitectura no-estándar”, están dejando de ser inviables en términos productivos y económicos, al utilizar CAD/CAM para diseñar y fabricar componentes multifuncionales que simplifican la construcción de edificios con este tipo de formas. Este cambio de perspectiva, desde una complejidad aparente hacia una complejidad productiva y funcional que optimiza el proceso constructivo, facilitaría la generalización de la arquitectura no-estándar por reducir sus costes y hacerla más asequible a todos. A pesar de ello, la arquitectura no-estándar debe adaptarse a las condiciones urbanas de la metrópoli para llegar a generalizarse.

Cache sostiene que la complejidad formal dificulta la integración de la arquitectura no-estándar en la trama urbana de la ciudad.¹⁶⁹ De este modo, Cache reconoce que el desarrollo de la arquitectura no-estándar debe considerarse en relación con el entorno urbano del que forma parte. La relación que establece Cache entre la arquitectura no-estándar y la metrópoli, rememora la establecida antes por Tafuri entre la arquitectura estandarizada que emerge con la industrialización y la ciudad. Tafuri sostuvo que el desarrollo de la metrópoli condujo hacia la pérdida de especificidad del objeto arquitectónico, al reducirlo a formas cúbicas que permiten su ensamblaje dentro de la regularidad de la trama urbana.¹⁷⁰ Para Tafuri, esto implicaba que el esfuerzo de crear formas singulares es inútil,¹⁷¹ y sugirió para el arquitecto un rol más adecuado a las condiciones productivas, económicas y urbanas propias de la industrialización:

“[...] in face of new techniques of [industrial] production and the expansion and rationalization of the market, the architect as producer of objects has indeed become an inadequate figure. It was no longer a question of giving form to single elements of the city, nor even to simple prototypes. The real unity of the production cycle having been identified in the city, the only suitable role for the architect was as organizer of that cycle”.¹⁷²

El proyecto de viviendas WikiHouse puede considerarse como una actualización del este rol propuesto por Tafuri, ya que se adecúa a nuevas formas de organización productiva y modelos de mercado de la era digital. El proyecto WikiHouse propone un modelo de organización productiva basado en las “redes cooperativas” que agrupan colectivos temporales según las necesidades de cada proyecto; redes que se conforman por la conexión de pequeñas y medianas empresas repartidas globalmente, para que cada parte del proceso productivo pueda encontrar su localización adecuada.¹⁷³ Esto

¹⁶⁹ CACHE. Op.cit., p. 60

¹⁷⁰ Ibídem, pp.14, 105-16

¹⁷¹ Ibídem, p.15

¹⁷² Ibídem, p.107

¹⁷³ CASTELLS, M. *La era de la información: economía, sociedad y cultura* (Segunda ed., Vol. I. La sociedad red). Madrid: Alianza, 2000, p. 159

implica una producción descentralizada que se adapta a la necesidad de operar en entornos con evolución constante y que requiere establecer nuevos códigos y protocolos de trabajo. Castells ha denominado este modelo “redes de cooperación tecnológica” y, según el sociólogo, facilitan la adquisición del diseño de un producto y la tecnología de producción.¹⁷⁴ Por otra parte, el proyecto WikiHouse responde a un nuevo modelo de mercado dentro del cual el consumidor asume roles o tareas del productor; deviene un *prosumer*.¹⁷⁵ De este modo, el proyecto plantea una transición desde el desarrollo de viviendas impulsadas por el productor-promotor, hacia viviendas promovidas por el cliente¹⁷⁶ en las que el consumidor se implica en la resolución de sus demandas y necesidades.¹⁷⁷

Para facilitar la participación del consumidor en el desarrollo de las viviendas WikiHouse, el proyecto se basa en una plataforma *on-line* que contiene modelos digitales que pueden ser descargados y modificados por los usuarios y fabricados con tecnologías CAD/CAM. Esto, no solo supone una nueva manera de diseñar, fabricar y organizar la construcción de una vivienda mediante la cooperación productiva entre el arquitecto y el cliente, sino que implica la inserción de la arquitectura en un nuevo mercado económico: el *e-commerce*.

El proyecto de viviendas WikiHouse permite al arquitecto asumir su rol como organizador del ciclo productivo, mediante la aplicación de las tecnologías digitales: el objetivo no es el diseño de formas aparentemente complejas, sino la construcción de viviendas que se integran en la ciudad y cuya construcción se basa en componentes que simplifican y reducen los costes.

¹⁷⁴ Ibídem, p. 246

¹⁷⁵ La definición de “prosumidor” en Wikipedia es la siguiente: “La palabra prosumidor, o también conocida como *prosumer*, es un acrónimo formado por la fusión original de las palabras en inglés *producer* (productor) y *consumer* (consumidor). [...] El comportamiento del prosumidor indica tendencias emergentes, tendencias que las organizaciones deben gestionar adecuadamente participando de forma activa en los medios 2.0 (sin abandonar los medios tradicionales), dando a conocer sus prácticas asociadas a la sostenibilidad, y adaptándose a los nuevos códigos de servicio. Asimismo se trata habitualmente de un consumidor exigente, que es capaz de evaluar los pros y contras de la elección de diferentes tipos de tecnología, obteniendo la información por sus propios medios o formación.”

¹⁷⁶ De acuerdo con Castells, las redes de producción descentralizadas, o transfronterizas, funcionan según estas dos configuraciones: las cadenas de mercancías impulsadas por el productor, que se da en industrias como la automoción, ordenadores, aeronáutica o maquinaria eléctrica y las cadenas de mercancías impulsadas por el cliente, que se da en industrias como la textil, calzado, juguetes o menaje de hogar.

CASTELLS. Op.cit., p. 159

¹⁷⁷ MINCHIN, J. (02 de 06 de 2015). *Entrevista en Green FabLab.* (ABONDANO, D. Entrevistador) Barcelona, España.

3.3.1 El proyecto de viviendas WikiHouse

“WikiHouse is an open source building system. Many designers, collaborating to make it simple for everyone to design, print and assemble beautiful, low-energy homes, customized to their needs”¹⁷⁸.

El proyecto WikiHouse, co-fundado por Alastair Parvin, se presenta como un sistema de vivienda revolucionario, como lo fue la vivienda en serie en los inicios del siglo XX. Su objetivo es la producción y personalización en masa de viviendas, con base en los nuevos medios y modos de producción digital. El proyecto emplea modelos de diseño paramétrico y redes de cooperación que responden a los nuevos modelos de negocio y de consumo. Gracias a ello, el consumidor –no especializado– adquiere la capacidad de auto-construir su vivienda seleccionando y adaptando los componentes constructivos y estructurales para fabricarlos y ensamblarlos sin la necesidad de recurrir a especialistas.

Consciente de la relevancia de la autoconstrucción como principal medio de acceso a la vivienda en países en vías de desarrollo, Alastair Parvin ha denominado los autoconstructores del siglo XX como “el equipo de diseño más grande de mundo, te guste o no”¹⁷⁹. Basándose en datos económicos del Reino Unido, Parvin concluye que el sueldo anual de un arquitecto recién egresado le ubica entre el 1,95 % de las personas más ricas de la población mundial y esto supone que los arquitectos diseñan para el 1 % de la población (Figura 3.27), un 1 % que concentra la riqueza y que se encarga de construir la vivienda para el otro 99 % de personas, sea desde las instituciones públicas o desde la empresa privada.¹⁸⁰ Con el propósito de invertir esta relación y permitir que los arquitectos presten sus servicios al 100 % de la población mundial, Parvin plantea nuevas estrategias de mercado, entre las cuales se encuentran la reducción de escala de los proyectos de vivienda y la promoción de un nuevo modelo económico en el cual el consumidor se transforma en agente activo: en “prosumidor”.

Parvin plantea que la producción en masa no tiene que ir asociada a grandes proyectos y economías de escala que requieran producir grandes cantidades a bajo coste. Como alternativa, se propone sustituir los proyectos de viviendas en serie realizados por grandes promotoras, en los que un bloque de viviendas ocupa la totalidad de un solar, por proyectos de vivienda a pequeña escala cuya financiación, gestión y construcción está en manos de los usuarios. Con este fin, es necesario capacitar a los ciudadanos para que puedan construir sus propias viviendas. Esta manera de afrontar la construcción de viviendas representa la transición desde la democratización del consumo hacia la democratización de la producción.¹⁸¹

¹⁷⁸ WIKIHOUSE. Recuperado el 04 de 06 de 2015, de <http://www.wikihouse.cc>

¹⁷⁹ PARVIN, A. *Alastair Parvin: Arquitectura por y para la gente*, 2013. Recuperado el 15 de 06 de 2015, de TED:

https://www.ted.com/talks/alastair_parvin_architecture_for_the_people_by_the_people?language=es

¹⁸⁰ Ibídem

¹⁸¹ Ibídem

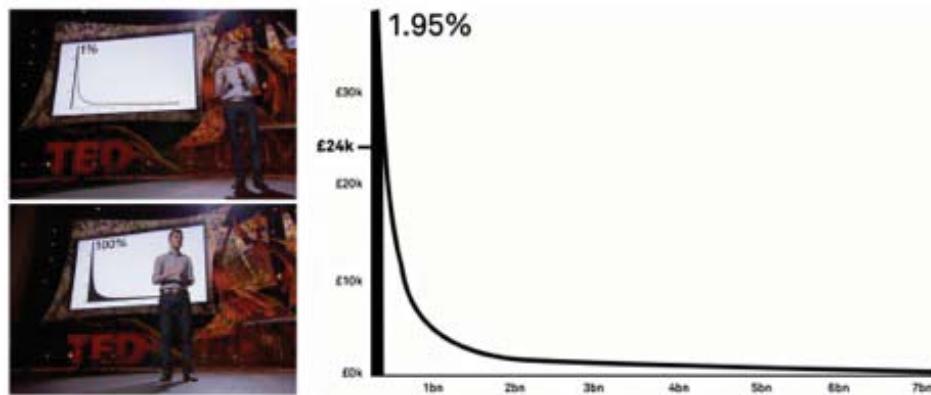


Figura 3.27 Capacidad de acceso a servicios arquitectónicos a nivel mundial

Para democratizar la construcción, Parvin propone un sistema constructivo *open source* a imagen del *open-source software* –Linux, Wikipedia, Creative Commons, Mozilla, etc.–, y el *open-source hardware*. Los archivos con la información técnica de una vivienda pueden descargarse gratuitamente. El usuario lleva a cabo su construcción asociándose a otras empresas de fabricación digital para fabricar sus componentes y luego ensamblarlos. Esto reduce los umbrales de tiempo y coste entre la producción industrial y el fabricante autónomo y, sobre todo, fomenta una producción descentralizada donde las grandes constructoras pueden sustituirse por pequeños fabricantes independientes, capaces de responder con mayor rapidez y precisión a las necesidades del cliente o las fluctuaciones del mercado.

La plataforma WikiHouse es capaz de generar una comunidad conectando diferentes nodos de fabricación autónomos con los consumidores. Se generan así redes de cooperación tecnológica –al estilo de los FabLabs– que reúnen colectivos de manera temporal según las necesidades de cada proyecto y sirven de contrapunto a la construcción masiva de viviendas, sistema que sigue siendo el modelo de desarrollo predominante.

3.3.2 La plataforma y la comunidad WikiHouse

“Uno de los modelos de negocio futuro que harán posible las tecnologías de diseño y fabricación 3D será la fabricación en la nube, una alternativa a la producción en serie, consistente en una red de nodos de producción descentralizados y de pequeño tamaño”¹⁸².

En su página web, la Fundación WikiHouse¹⁸³ se presenta como una organización independiente y sin ánimo de lucro, uno de cuyos objetivos es promover nuevas estrategias de diseño y desarrollo de la vivienda. La plataforma establece las reglas, los

¹⁸² LIPSON & KURMAN. Op.cit., p. 70

¹⁸³ WIKIHOUSE. Op.cit

protocolos y los estándares de trabajo y colaboración para construir una vivienda.¹⁸⁴ La propiedad intelectual, el dominio web y la marca WikiHouse pueden utilizarse como un bien común al ser accesibles a cualquier persona. La plataforma en sí ya es un medio de apoyo a las empresas y comunidades que la utilizan y contribuyen a su desarrollo. La plataforma está dirigida a personas no expertas y a profesionales del sector de la construcción que pueden ofrecer sus servicios y productos a través de la misma.

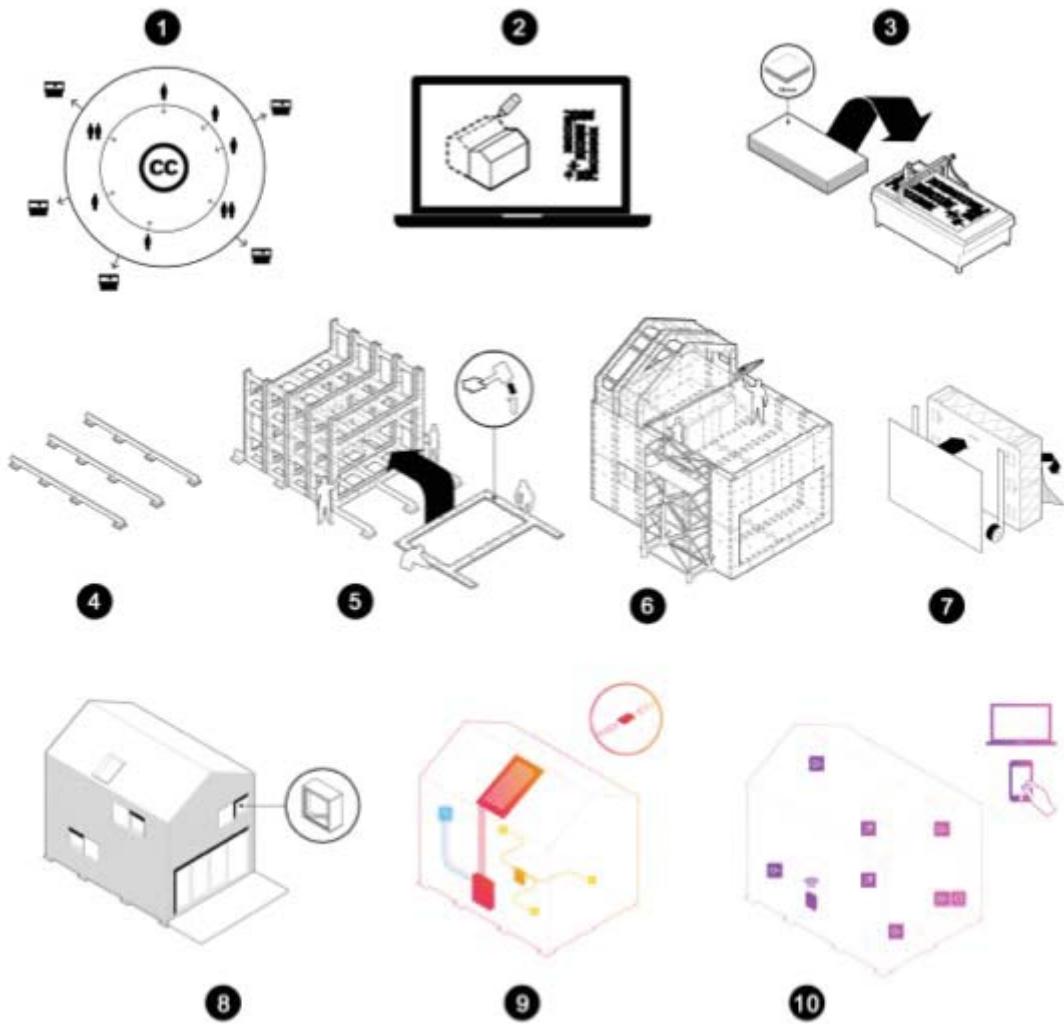


Figura 3.28 Proceso de construcción del prototipo de vivienda WikiHouse

En la página web de la fundación se describen las características de las viviendas construidas con esta plataforma (Figura 3.28): 1) un diseño abierto a nivel global, utilizando archivos de modelos digitales que se comparten y modifican bajo licencias Creative Commons, con fabricación de carácter local y empleando una red de impresoras 3D y máquinas CNC distribuidas localmente; 2) personalización en masa y asequible, en tanto que los modelos digitales pueden ser personalizados de acuerdo con las necesidades de cada cliente quienes, de manera económica, ya utilizan el software SketchUp, software gratuito que permite generar los archivos .dxf para que sean

¹⁸⁴ Esta información se basa en el documento *WikiHouse Foundation: Constitution v6.2, Abril 2015*: <http://www.wikihouse.cc/the-foundation/>

exportados a las máquinas CNC; 3) fabricación precisa y con materiales económicos, abundantes, estandarizados y sostenibles, como láminas de madera contrachapada; 4) asentamiento de la vivienda sobre “railes” de madera que pueden apoyarse sobre cualquier tipo de cimentación convencional; 5) elementos estructurales que se ensamblan y erigen manualmente, empleando piezas de anclaje y herramientas que también se fabrican con archivos que se pueden descargar desde la plataforma; 6) un diseño pensado para facilitar el montaje y evitar errores por parte de una mano de obra no cualificada –típicamente, miembros de la comunidad–, para utilizar piezas simétricas que permitan evitar su ensamble al revés o que integren el anclaje de los andamios al diseño de la estructura para hacer el montaje más seguro; 7) un cerramiento de alto rendimiento, basado en la precisión de la fabricación digital, que minimiza los residuos en el proceso constructivo y favorece el rendimiento del aislamiento térmico; 8) diseño modular para facilitar el uso de cualquier tipo de revestimiento o carpintería, así como su eventual sustitución a lo largo del tiempo; 9) una zona de servicios que facilite la colocación, la gestión y el mantenimientos de las instalaciones; 10) viviendas inteligentes creadas con tecnologías que “eduquen” a sus habitantes, permitiéndoles entender y controlar su funcionamiento.

Uno de los objetivos del proyecto WikiHouse es crear una comunidad formada por los usuarios que utilizan los archivos –*WikiHouse Commons*– y por los voluntarios que colaboran en los proyectos. El ingreso a la comunidad se hace efectivo cuando los usuarios aceptan la licencia *Creative Commons* (CC BY-SA 4.0) que les permite compartir archivos –copiarlos y redistribuirlos en cualquier medio o formato– y adaptarlos para cualquier propósito –transformarlos o generar uno nuevo a partir del original–, siempre y cuando se acredite correctamente al creador del archivo, se indiquen las modificaciones y se redistribuyan los archivos modificados bajo los mismos términos de la licencia original.¹⁸⁵

3.3.3 Realización del prototipo WikiHouse/NL en Barcelona

En la feria Construmat de Barcelona en el año 2015, Green FabLab organizó un taller para fabricar un prototipo WikiHouse/NZ. El taller consistió en la reproducción del proceso de ensamblaje y desmontaje de la versión WikiHouse V3.3 que fue diseñada en el Reino Unido, adaptada en Nueva Zelanda y fabricada en Barcelona. La reconstrucción del prototipo WikiHouse/NZ siguió el mismo proceso descrito por Space Craft Systems (Figura 3.29): 1) descarga y adaptación de los archivos de diseño; 2) fabricación local de los elementos constructivos con máquinas CNC; 3) ensamblaje de los marcos estructurales; 4) levantamiento de marcos estructurales; 5) arriostramiento de

¹⁸⁵ La acreditación apropiada de un archivo bajo las licencias Creative Commons consiste en proveer el nombre del creador y de las partes relacionadas, el aviso de copyright, una nota de la licencia, un aviso de descargo de responsabilidad y un link al archivo. En *CREATIVE COMMONS. Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0)*. Recuperado el 12 de 07 de 2015, de Creative Commons: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/#>

la estructura; 6) colocación de piezas de revestimiento.¹⁸⁶ Solo hubo una diferencia respecto a este proceso, ya que la adaptación de los archivos también implicó la parametrización de algunos componentes estructurales.¹⁸⁷

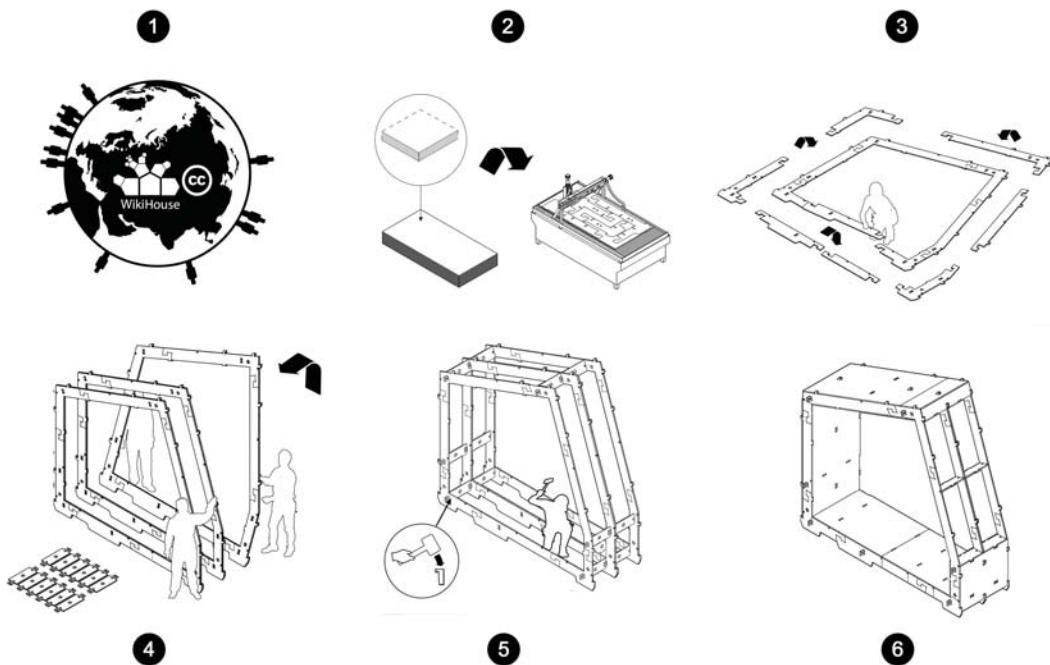


Figura 3.29 Proceso de fabricación y montaje del prototipo WikiHouse/NZ

3.3.3.1 Acceso a los archivos

La comunidad WikiHouse utiliza Google Docs para cargar y descargar archivos. Para tener acceso a ellos hay que abrir una cuenta en Gmail para poder utilizar Google Drive. Asimismo, para acceder a los archivos, los usuarios deben ser invitados por el *WikiHouse Custodian* cuya labor, según Jonathan Minchin, coordinador del Green FabLab, puede compararse con la de un bibliotecario que se encarga de controlar y mantener los libros ordenados y en buenas condiciones, solo que, en este caso, se trata de archivos digitales.¹⁸⁸ El acceso a los archivos no es completamente libre, ya que primero se debe contactar al *Custodian* para que proporcione un link al Google Drive Folder donde se encuentran los archivos de diseño (Figura 3.30). En el caso del prototipo WikiHouse/NZ, los archivos de los modelos 3D se encuentran en la carpeta “0020NZ SCS_005-13-008_Makertorium”, creada por Space Craft Systems, y los archivos 2D con las plantillas de fabricación se encuentran en la carpeta “0074 Green FabLab”, creada por el Green FabLab Barcelona.

¹⁸⁶ SPACE CRAFT SYSTEMS. *WikiHouse/NZ: Making Things Better*, 2014. Recuperado el 20 de 06 de 2015, de Space Craft: developing WikiHouse in New Zealand: <http://spacecraft.co.nz>

¹⁸⁷ La descripción del proceso se complementa a partir de las conversaciones que se dieron durante el taller con sus organizadores, Jonathan Minchin (coordinador del Green FabLab) y Alexander Walzer (arquitecto) y de la entrevista posterior con Jonathan en las instalaciones del Green FabLab (2 de Junio, 2015), lugar donde se fabricaron las piezas del prototipo.

¹⁸⁸ MINCHIN. Op.cit.

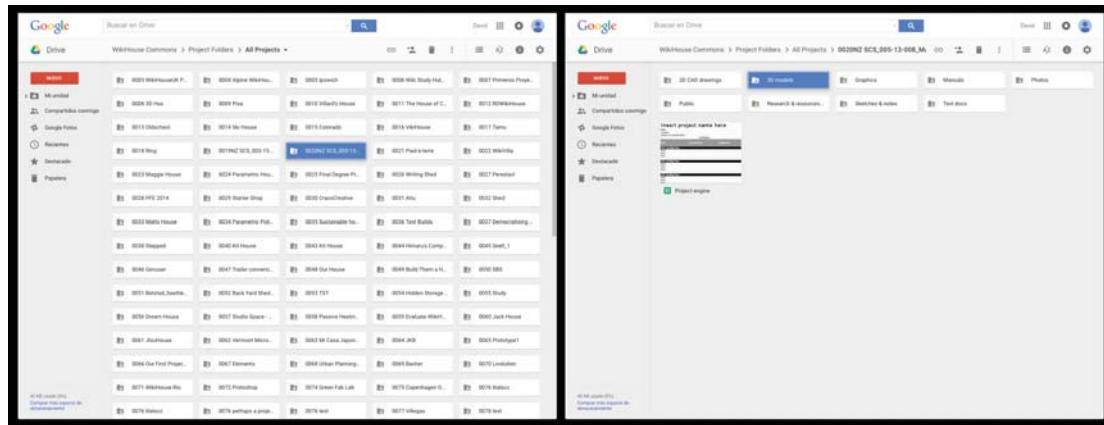


Figura 3.30 Interfaces de plataforma Google Drive para acceder a los archivos de diseño de WikiHouse V3.3

Un vez que el *Custodian* ha facilitado el acceso, se descargan los archivos en SketchUp; se adaptan y personalizan según las necesidades del usuario; se generan los archivos de fabricación con un *nesting plug-in* que transforma las piezas tridimensionales del modelo en superficies bidimensionales, las cuales se distribuyen en una plantilla con la dimensión de los paneles de madera que serán fresados; se guardan los dibujos bidimensionales en formato .dxf para que puedan ser leídos por una fresadora CNC.¹⁸⁹ En el caso del prototipo WikiHouse/NZ realizado en Barcelona, los archivos del prototipo se descargaron desde la web MatterMachine,¹⁹⁰ una plataforma online en la que Space Craft Systems inicialmente depositó sus archivos, que cuenta con un programa en red (*cloud-software*) para adaptar los archivos de diseño a través de Internet.¹⁹¹

3.3.3.2 Adaptación del modelo de diseño

El modelo de diseño se realiza en SketchUp para facilitar el acceso a una mayor cantidad de usuarios no-profesionales. Sin embargo, los archivos descargados desde la plataforma MatterMachine han sido adaptados por Space Craft Systems al software Rhino (Figura 3.31), posiblemente, porque la interoperabilidad de los archivos de fabricación generados en Rhino con las máquinas de fabricación digital es menos problemática que con archivos generados en SketchUp.¹⁹² Una vez que el Green FabLab descargó el modelo en Rhino, los componentes se parametrizaron con el fin de facilitar

¹⁸⁹ Ibídem

¹⁹⁰ MATTER MACHINE. Recuperado el 14 de 07 de 2015, de Matter Machine: <http://mattermachine.com>

¹⁹¹ Actualmente los modelos 3D del WikiHouse/NZ se encuentran colgados en la plataforma WikiHouse, lo que me ha permitido acceder a ellos, pero Minchin y Walzer tuvieron que descargarlos desde la plataforma MatterMachine, ya que en su momento no habían sido cargados aun por Space Craft System, a pesar de las condiciones de uso que exige la licencia CC BY-SA 4.0; un hecho que demuestra la dificultad de garantizar el acceso a la información, más allá de los proyectos y la leyes que promueven su libre intercambio.

¹⁹² WALZER, A. (20 de 05 de 2015). *Entrevista en Construmat 2015.* (ABONDANO, D. Entrevistador) Barcelona, España.

la adaptación del sistema constructivo a nuevas necesidades; por ejemplo, el rango de grosor que pueden tener los paneles de madera que deben ser fresados para fabricar los elementos constructivos.

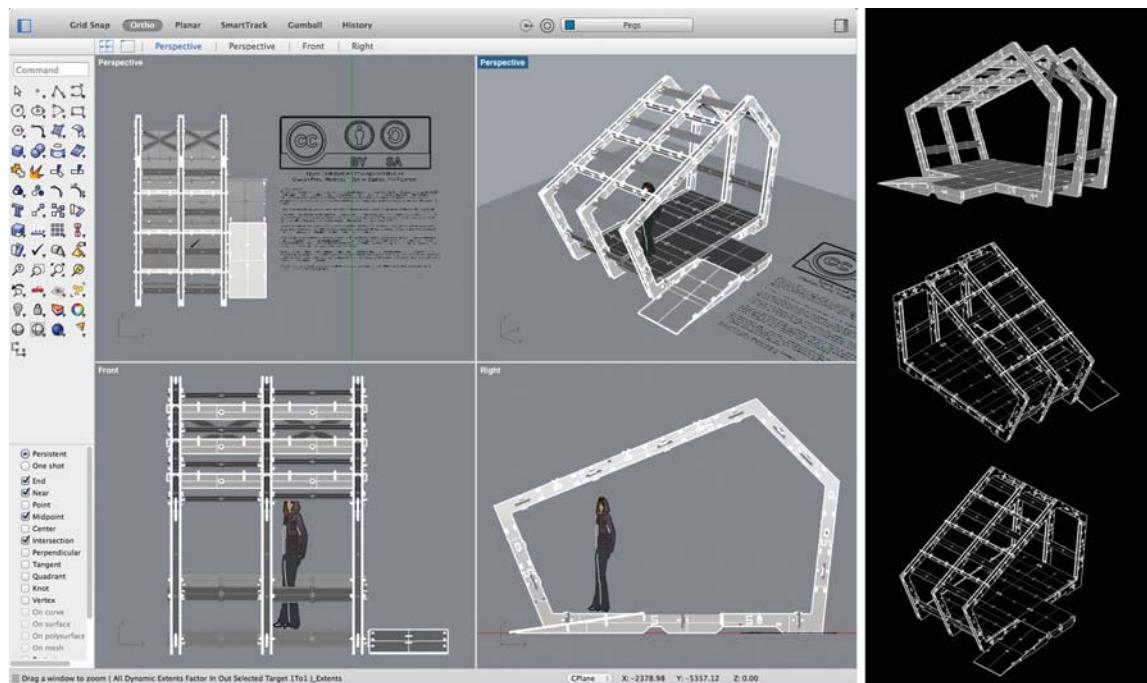


Figura 3.31 Modelo en Rhino del prototipo WikiHouse/NZ generado por Space Craft Systems



Figura 3.32 Detalle nudo: prototipo WikiHouse/NZ realizado por Green FabLab en Construmat 2015

En los modelos originales de los proyectos WikiHouse todos los elementos se fabrican a partir de paneles de madera de 18 mm de grosor, aunque suele ocurrir que las dimensiones no se ajusten exactamente al material disponible, el cual puede llegar a tener variaciones en su grosor de algunos milímetros.¹⁹³ Esta diferencia en el grosor de los paneles de madera impediría el montaje de la estructura, ya que el sistema de

¹⁹³ MINCHIN. Op.cit.

ensamblaje tiene una tolerancia de 1mm (Figura 3.32).¹⁹⁴ Al parametrizar las dimensiones de los elementos constructivos, no solo se solucionan posibles problemas de fabricación relativos al suministro de materiales con dimensiones diversas, sino que se puede adaptar el diseño a las necesidades o restricciones del emplazamiento.

La parametrización, realizada con *scripts* en el *plug-in*, Grasshopper (Figura 3.33), incluyó el grosor de los elementos constructivos y el tamaño de los agujeros interiores y perimetrales donde se ensamblan las piezas (Figura 3.34).¹⁹⁵ De esta manera, si el grosor de la madera pasa de 18 mm a 30 mm, la dimensión de los agujeros interiores y perimetrales, también cambia a 30 mm. En primer lugar se parametrizó cada elemento constructivo del modelo (color azul) y sus perforaciones (color magenta), tomando como referencia su contorno para poder extruirlo sobre el eje-vector X según el grosor de la madera; es decir, el grueso del elemento se relaciona con una dimensión variable (color verde) (Figura 3.35). Posteriormente, se parametrizaron los volúmenes que, al sustraerse de la pieza, generan las perforaciones (Figura 3.36). Así, la adaptación de los elementos constructivos a los grousos de los tableros de madera, disponibles en cada lugar, se realiza modificando únicamente un valor: el grueso del tablero.

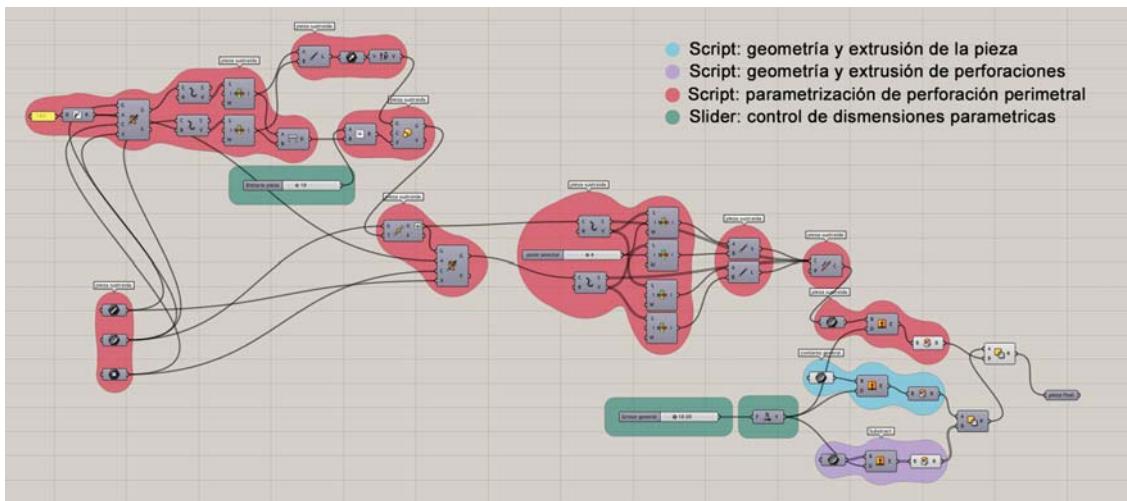


Figura 3.33 Script para parametrizar el grosor de los elementos constructivos, y el tamaño de las perforaciones

La facilidad para adaptar las dimensiones de los componentes introduciendo un valor numérico facilita el trabajo a los usuarios sin experiencia con modelos digitales. Parvin propone generar aplicaciones para SketchUp que faciliten la personalización de diferentes aspectos relativos a la forma, producción o funcionamiento del edificio; por ejemplo: los costes, la adaptación al terreno, el rendimiento energético o estructural, el sistema de instalaciones, la adecuación a la normativa, la generación de documentos o la relación con el entorno urbano.¹⁹⁶

¹⁹⁴ Ibídem

¹⁹⁵ El modelo paramétrico que aquí se presenta ha sido desarrollado con la ayuda de Francesc Bardera Collazos, miembro del grupo de investigación ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle.

¹⁹⁶ PARVIN, A. *WikiHouse Development Goals*, 2014. Recuperado el 28 de 05 de 2015, de WikiHouse: <http://www.wikihouse.cc>

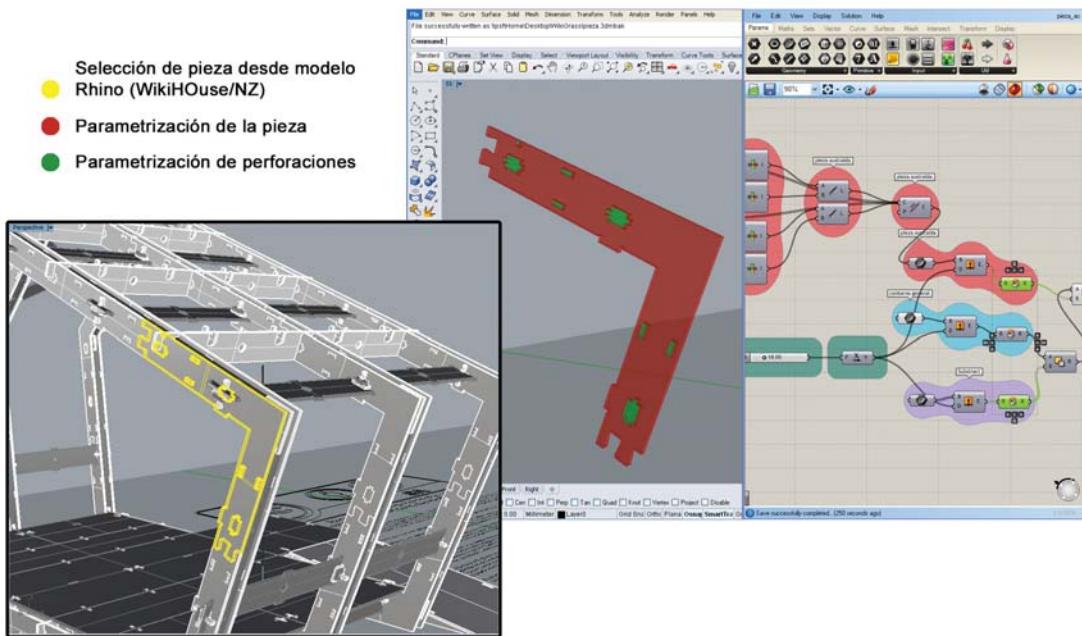


Figura 3.34 Selección de elemento constructivo a parametrizar

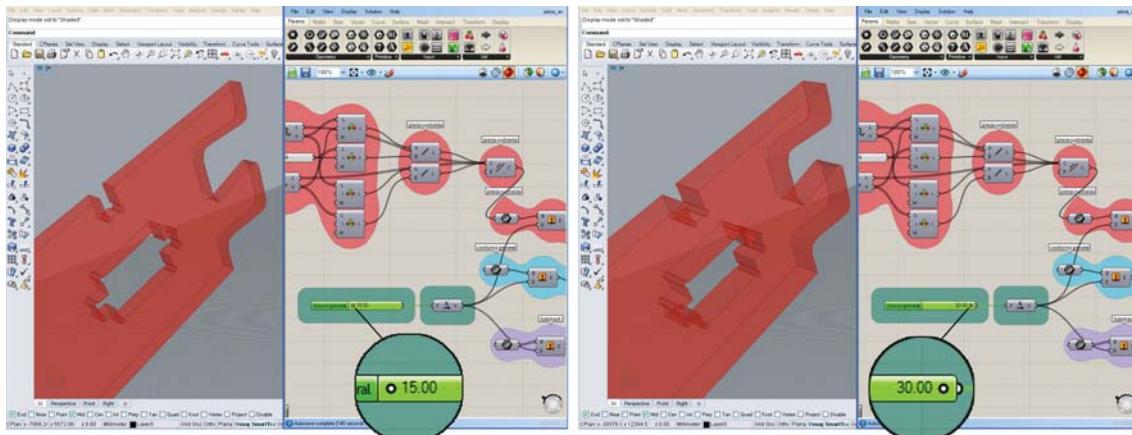


Figura 3.35 Parametrización del grosor de un elemento constructivo (15-30 mm)

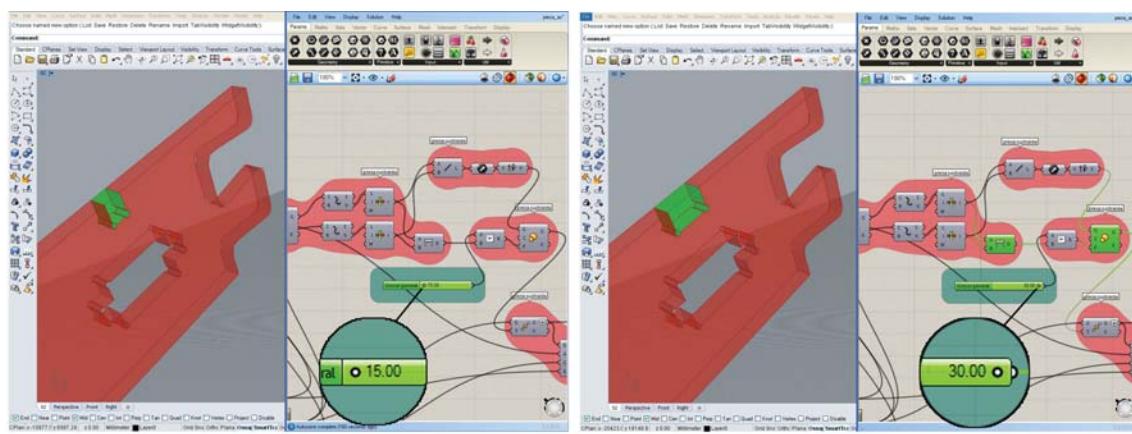


Figura 3.36 Parametrización de la perforación (15-30 mm)

3.3.3.3 Preparación de archivos para mecanizado y montaje

Los programas generados con un software CAM para la fabricación digital de una vivienda WikiHouse garantizan el correcto ensamblaje y montaje de los elementos constructivos. Así, de la misma manera en que un plano con detalles constructivos contiene las especificaciones técnicas de manera que sean entendidas por el fabricante, en la fabricación digital los “programas” –las operaciones de ejecución codificadas– son los que cumplen la función de transmitir las instrucciones a las máquinas CNC.

El primer paso fue crear las plantillas para fresar los elementos constructivos empleando el *plug-in Rhinonest*,¹⁹⁷ un software que automatiza tanto la generación del perfil 2D de las piezas, como su ubicación en la plantilla con las dimensiones de las láminas de madera (2.400 x 1.200 x 18 mm). Antes fue necesario transformar los elementos modelados como *polysurface* en *meshes* para evitar posibles problemas en la exportación y visualizar con exactitud la forma del corte.¹⁹⁸ Una vez convertidos en *meshes*, los elementos del modelo se explotaron y reagruparon de acuerdo con su tipo; por ejemplo, en el caso del sistema estructural, los elementos se dividieron en tres grupos: los marcos (*frames*), los nudos (*connectors frame*) y las riostras (*slabs section*) (Figura 3.37). Los *nesting software* están programados para optimizar la orientación y la posición de los elementos que se cortarán con máquinas CNC¹⁹⁹ pero, en este caso, la ubicación de los componentes dentro de la plantilla (planchas de madera) se hizo de forma manual porque así se conseguía mejorar la distribución realizada por el software.²⁰⁰ Para esta distribución manual se consideró una distancia mínima entre las piezas, determinada por el diámetro de la broca (6 mm).²⁰¹

Después de ubicar los perfiles de los elementos estructurales en las planchas de madera, se numeraron para facilitar su ensamblaje. De este modo se generó la plantilla de fresado que contiene los trazados que ha de seguir la cortadora. Las líneas de corte se agrupan en capas (*layers*) para establecer el orden del corte y evitar mover el panel de madera durante el proceso (Figura 3.38). El orden de las capas y la secuencia de fresado es el siguiente: contorno del panel de madera (*stock*); sujeción (*pin down*), formada por puntos de anclaje del panel de madera, para que éste no se mueva durante el fresado; grabado (*engraving*) o capa de numeración de las piezas; perfil interior (*inner profile*) o capa de generación de los contornos y perforaciones en las piezas; perfil exterior (*outer profile*) y, finalmente, la capa desde la cual se generan los contornos de las piezas. Esta capa es la última en fresarse, ya que si se hiciera primero la pieza se movería cuando se hace el grabado de la numeración o cuando se cortan los contornos interiores.²⁰² Al final de cada proceso, la respectiva plantilla se guarda como un archivo .dxf.

¹⁹⁷ WALZER. Op.cit.

¹⁹⁸ Ibídem

¹⁹⁹ McNEEL. *McNeel Wiki: RhinoNest*. Recuperado el 10 de 06 de 2015, de McNeel Wiki: <http://wiki.mcneel.com/es/rhino/rhinonest>

²⁰⁰ MINCHIN. Op.cit.

²⁰¹ WALZER. Op.cit.

²⁰² Ibídem

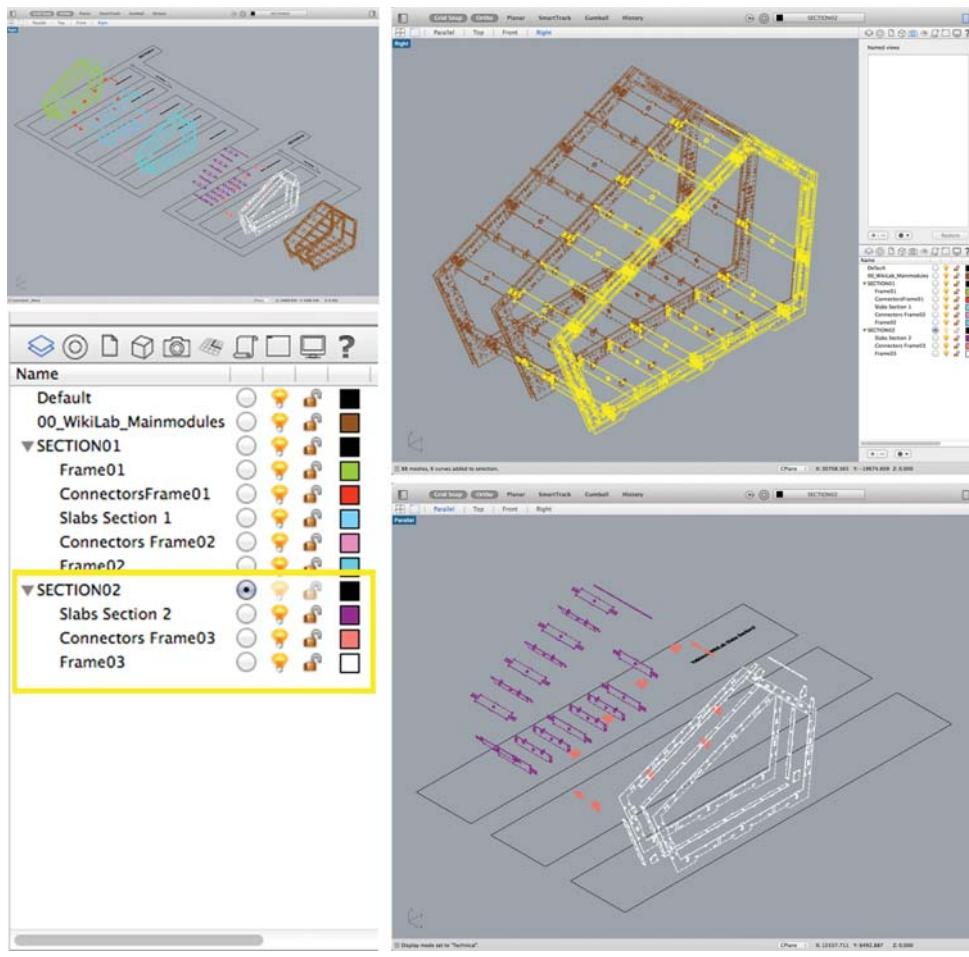


Figura 3.37 Estructura explosionada y reagrupada por los elementos que conforman las diferentes capas del modelo 3D

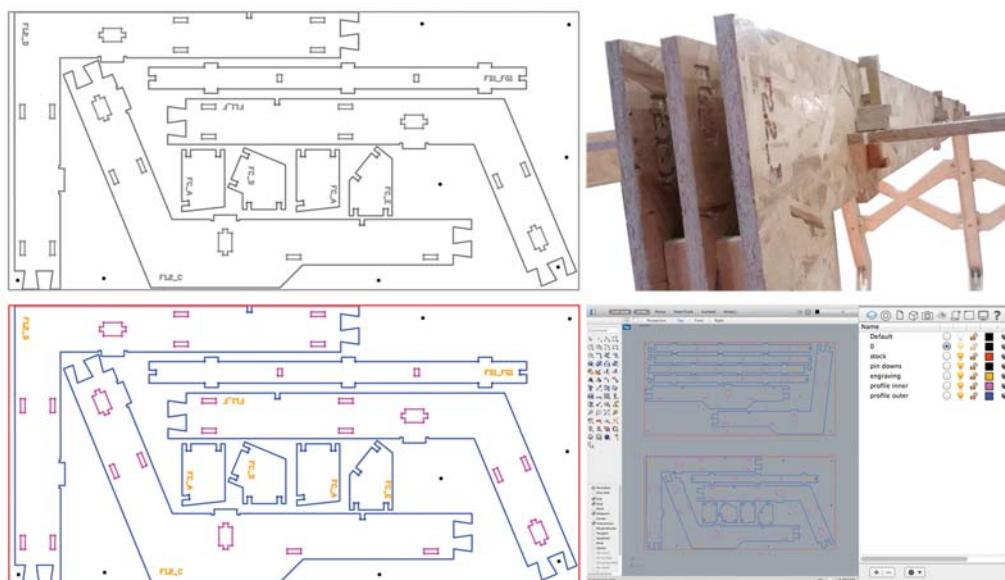


Figura 3.38 Numeración de elementos y diferenciación capas en la plantilla que establece la secuencia de fresado

Para ejecutar el proceso de fabricación digital, se genera un programa con el *plug-in* RhinoCAM, usando las especificaciones de los materiales, las herramientas y operaciones para el mecanizado con la fresadora CNC. Entre las especificaciones del programa se encuentran (Figura 3.39): 1) las dimensiones la plancha de madera que será cortada; 2) el tipo y las dimensiones de la broca; 3) la “compensación”, es decir, decidir cómo se hace el corte, por el interior o por el exterior del eje; 4) la ruta de fresado de cada una de las diferentes capas; y 5) la máquina CNC a emplear. El tamaño de las piezas permite su transporte en un coche utilitario y su manipulación y ensamblaje manual por parte de un equipo no especializado. De esta manera, el prototipo WikiHouse/NZ se construyó el día inaugural de la Feria Construmat, por un equipo de 5 a 6 personas (Figura 3.40).

Four screenshots of the RhinoCAM software interface, numbered 1 through 4.
 1. Shows a 3D model of a wooden cube and a 2D plan view with tool paths.
 2. Shows a different view of the software interface with various tool settings and a preview window.
 3. Shows a detailed tool path preview for a specific cut.
 4. Shows another view of the software interface with a preview window.

Figura 3.39 Indicación de parámetros de fabricación y simulación de mecanizado con RhinoCAM

A grid of 12 photographs documenting the assembly of the WikiHouse/NZ prototype. The images show workers on a red carpet in a large hall, progressively assembling the wooden frame from raw materials into a completed structure.

Figura 3.40 Montaje del prototipo WikiHouse/NZ en Construmat 2015

206

3.3.4 Del técnico industrial al artesano digital

El proyecto WikiHouse facilita el acceso y el uso de la tecnología para que el consumidor construya su vivienda, pudiendo prescindir de técnicos especializados. En este sentido, el proyecto representa una democratización más profunda que el sistema de la vivienda en serie, propuesto por la arquitectura moderna, ya que permite: adaptar y fabricar los componentes de un prototipo de vivienda a través de CAD/CAM, ensamblarlos con mano de obra no cualificada y generar redes cooperativas y comunidades digitales, desde las cuales las personas auto-organizan la construcción de su vivienda. Así, el CAD/CAM y las redes de cooperación tecnológica no solo ofrecen un modelo alternativo a la producción en serie, sino que brindan la oportunidad de auto-construir una vivienda, una experiencia que genera un sentido de comunidad en los participantes y les brinda la oportunidad de adquirir conocimientos sobre construcción a los que no tenían acceso.

Mediante la creación de un modelo paramétrico que puede ser descargado y adaptado por el consumidor, el arquitecto actúa como el agente que facilita la planificación y organización de la producción del edificio bajo las restricciones formales, productivas y económicas impuestas por la metrópoli, la industria y el mercado. En este contexto, el arquitecto asume un rol técnico, diferente del rol artístico sobre el cual reposaba su prestigio profesional antes de la industrialización²⁰³ y correspondiente con el papel socio-político que adopta la arquitectura tras la industrialización. Papel a partir del cual el arquitecto asume una función de inventor de soluciones innovadoras: “the architect had to assume the task of continual invention of advanced solutions, at the most generally and applicable level”²⁰⁴. Si en la época industrial este papel consistía en la planificación de la construcción de viviendas de acuerdo a los estándares de la producción en serie y la economía de escala, en la era digital emerge una nueva organización del trabajo orientada hacia proyectos de pequeña escala, que facilitan el acceso a los medios de producción –CAD/CAM– por parte del consumidor, para que se involucre en el desarrollo del proyecto y adapte el diseño de la vivienda a sus necesidades específicas.

El arquitecto del siglo XXI requiere de nuevas habilidades para emplear tecnologías CAD/CAM en el diseño y construcción de edificios. Por ejemplo, habilidades para programar los procesos de generación formal –como los que se requieren para crear los modelos paramétricos que pueden ser adaptados fácilmente por el cliente–, y para explorar el uso de nuevos materiales y técnicas de fabricación digital. Esto daría lugar a una relación más estrecha entre el arquitecto y los medios de producción, lo que puede entenderse como un regreso a la artesanía (actualizada) de la era pre-industrial.²⁰⁵

²⁰³ FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. New York: Thames & Hudson, 2000, p. 223

²⁰⁴ TAFURI, M. *Architecture and Utopia. Design and Capitalist Development*. Cambridge, Massachusetts, and London: MIT Press, 1976, p. 12

²⁰⁵ La actualización del trabajo artesanal mediante la aplicación de técnicas de producción digital puede entenderse desde la perspectiva de Sennet, quien plantea que “Toda actividad artesanal se fundamenta en

Una nueva generación de arquitectos está emergiendo que se consideran los “nuevos artesanos”, de la era digital;²⁰⁶ arquitectos que consideran necesario conocer en profundidad los materiales, herramientas y técnicas para llevar a cabo un proyecto y desplegar su creatividad. Para desenvolverse en entornos digitales, estos nuevos artesanos han de ser usuarios avanzados del software de diseño y de las herramientas fabricación digital. Algunas tareas de programación inherentes al diseño paramétrico y a la fabricación digital son asumidas por arquitectos.

alguna destreza técnica desarrollada en un alto grado”. SENNETT, R. *Artesanía, tecnología y nuevas formas de trabajo*. Barcelona: Kats; CCCB, 2013. p.13
²⁰⁶ MINCHIN. Op.cit.

Conclusiones

En este capítulo se han estudiado los cambios que las tecnologías CAD/CAM están causando en los procesos de diseño y fabricación de los edificios, en las relaciones de producción y en el rol de los profesionales en el marco de la economía digital.

Estos cambios tiene sus raíces en la racionalización y sistematización iniciada en el siglo XIX: la racionalización llevó a la creación de métodos para proyectar, y facilitó la construcción de edificios con métodos industrializados; la sistematización transformó el proyecto en una secuencia de operaciones, y su construcción en un ensamblaje de componentes. Las tecnologías digitales, el diseño paramétrico y la fabricación digital, representan la continuación de esta labor de racionalización y sistematización.

En el diseño paramétrico, los algoritmos son la expresión de un “pensamiento topológico” que, más que diseñar la forma del objeto se centra en su propiedades abstractas. Así, mientras un diseño compositivo es el resultado de combinar elementos geométricos, el diseño paramétrico se basa en algoritmos que contienen la materia-información y la estructura del proceso formativo. Estos algoritmos se visualizan a través de diagramas que sintetizan los procedimientos ejecutados por el ordenador en el proceso de diseño computacional.

En el diseño paramétrico, el objeto se configura en un espacio de relaciones en el que un modelo se transforma constantemente modificando sus parámetros. En este espacio de diseño, hay que distinguir entre el modelo geométrico y el algoritmo, es decir, entre la representación visual de un objeto y el algoritmo que lo ha generado. En el diseño paramétrico un proyecto arquitectónico se entiende como un sistema, más que como un objeto. No se diseña un objeto, sino un modelo que en sí mismo contiene todos los objetos posibles de una familia. El concepto de serie deja de estar asociado a la homogeneidad y la repetición, propias de la era industrial, para relacionarse con la heterogeneidad y singularidad.

El diseño paramétrico implica un nivel elevado de complejidad, derivado de la estructuración y computación de múltiples variables interrelacionadas. En este sentido, la noción de “complejidad” deja de asociarse a la apariencia de la forma, para relacionarse con la capacidad de resolver problemas de “complejidad organizada”, con la ayuda del ordenador. El diseño de elementos constructivos, cuya forma deriva de múltiples funciones interrelacionadas, refleja esta nueva noción de “complejidad” que, más allá de buscar un resultado plástico, aspira a simplificar el proceso constructivo.

El diseño paramétrico y la fabricación digital están dando lugar a nuevos roles profesionales . Se requieren arquitectos con conocimientos de programación para poder explotar el poder del cálculo computacional, mediante la creación de modelos paramétricos y procesos constructivos con herramientas de fabricación digital. Este rol profesional, centrado en el conocimiento de la técnica, es una actualización del rol

socio-político que empezaron a asumir los arquitectos modernos cuando se arrogaron la responsabilidad de proponer soluciones universales para democratizar la arquitectura, es decir, hacerla asequible a todos los miembros de la sociedad. En la era digital, la democratización se ha extendido a los propios usuarios, quienes, ahora, pueden colaborar en los procesos de diseño y construcción que se llevan a cabo a través de plataformas como WikiHouse.

Los cambios productivos y conceptuales derivados de las tecnologías digitales conllevan una serie de transformaciones en la producción arquitectónica. Así, se pasa del diseño de objetos al diseño de sistemas y procesos; de la forma a la formación; de la geometría a la topología; del elemento a las relaciones; de la representación a la programación; de la composición a la codificación; del concepto al diagrama; del espacio estático al dinámico; de la complejidad plástica a la constructiva; de lo estándar a la no-estándar; de la producción en masa a la personalización en masa; de la singularidad a la multiplicidad; de la democratización del consumo a la democratización de la producción.

Algunos cambios inherentes a la nueva naturaleza digital de la producción arquitectónica, reflejan y actualizan el principal acontecimiento de la Modernidad: la sustitución de la trascendencia por la inmanencia. Un cambio que transformaría el conocimiento en un modo de hacer y emanciparía la arquitectura de ideas místicas y románticas para fundamentar su dimensión simbólica en la tecnología, la ciencia y la industria.²⁰⁷ En la era digital, la inmanencia hay que encontrarla en los procedimientos y las herramientas con las cuales se concibe y construye.²⁰⁸ Entre ellos, se destacan los diagramas –como alternativa a las técnicas de representación existentes– con los cuales se actúa directamente sobre las cualidades físicas, estructurales y espaciales del proyecto arquitectónico, sin tener que recurrir a conceptos o ideologías.²⁰⁹ Asimismo, los algoritmos requieren una codificación de la forma, opuesta a su dimensión trascendental. En el diseño algorítmico la comunicación entre el diseñador y el ordenador se produce por medio de un lenguaje binario cuyos símbolos están libres de significado, para que el ordenador pueda computarlos; un lenguaje a-significante de unos y ceros.²¹⁰ Así, los algoritmos operan como máquinas abstractas a-significantes que “no engendran un efecto de significación (en un sentido lingüístico) y que son susceptibles de entrar en contacto directo con sus referentes en el marco de la interacción diagramática”²¹¹. Desde su condición a-significante, el algoritmo confiere un carácter estrictamente técnico-productivo al diseño, ya que en él reside la capacidad

²⁰⁷ Véase Capítulo 1.2.4

²⁰⁸ MAAS, W., VAN RIJS, J., & DE VRIES, N. EN DIAZ, C., Y GARCÍA, E. (Entrevistadores). *Redefiniendo las herramientas de la radicalidad*. Madrid: El Croquis, 2002. p. 30

²⁰⁹ VAN BERKEL, & BOS. Op.cit., pp. 19-21

²¹⁰ “Computing began with counting, and counting began with the realization that ‘one’ is different from ‘two’ or ‘many’ and that there is an important difference between, say, ‘two cows’ and ‘two sheep’ and an important difference between ‘two cows’ and ‘three cows’. Once quantity is divorced from quality it becomes possible to calculate. Numbers can be manipulated in ways that objects cannot. What is the square root of a cow? The question is meaningless, but the square root of a number is meaningful in our system of mathematics.” PASK & CURRAN. Op.cit., p. 5

²¹¹ GUATTARI. Op.cit., p. 133

para crear múltiples formas y funciones –soluciones– arquitectónicas. Una capacidad generativa que permite prescindir de la justificación de un diseño en términos estéticos.

En el siguiente capítulo se abordará el cambio en la concepción de la naturaleza que subyace en la arquitectura digital-algorítmica, concepción que deja al margen las consideraciones trascendentales para ocuparse de sus aspectos funcionales, aquellos que pueden instrumentalizarse en el proceso de generación formal o en el diseño del comportamiento del edificio.

Bibliografía

- BANHAM, R. *Teoría y diseño en la primera era de la máquina* (Cuarta ed.). Barcelona: Paidós, 1985.
- BAUDRILLARD, J. *El complot del arte. Ilusión y desilusión estéticas*. Buenos Aires: Amorrortu, 2007.
- BENTLEY, P. *Evolutionary Design by Computers*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999.
- BUILDING BYTES. *Interlocking Brick*. Recuperado el 06 de 11 de 2016, de Building Bytes: 3D Printed Bricks: <http://buildingbytes.info/interlocking-brick/>
- BUNSCHOTEN, R. Diagramas: máquinas operacionales. (SORIANO, F. Ed.) *Fisuras de la cultura contemporánea* (pp. 198-207), Julio de 2002.
- BURRY, M. Cultural Defence. In OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture* (pp.383-406). London; New York: Routledge, 2014
- BURRY, M. Scriptig Cultures. (BURRY, M. Ed.) *Architectural Design: Scripting Cultures: Architectural design and programming*, 8-12, 2011.
- BURRY, M., CECCATO, C., & SIMONDETTI, A. Mass-Customization in Design Using Evolutionary and Parametric Methods. In CLAYTON, M. & VASQUEZ DE VELASCO, C. (Edits.), *ACADIA 2000: Eternity, Infinity and Virtuality in Architecture* (pp. 239-244). Washington: Association for Computer-Aided Design in Architecture, c2002, 2000.
- BURRY, M., & MURRAY, Z. Computer Aided Architectural Design Using Parametric Variation and Associative Geometry. In LINZER, & VOIGT (Ed.), *Challenges of the Future* (pp. 257-266). Viena: eCAADe, 1997.
- CACHE, B. *Projectiles*. London: Architectural Association, 2011.
- CARPO, M. La desaparición de los identicos: La estandatización arquitectónica en la era de la reproductibilidad digital. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando* (pp. 59-65). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- CASTELLS, M. *La era de la información: economía, sociedad y cultura* (Segunda ed., Vol. I. La sociedad red). Madrid: Alianza, 2000.
- COLLINS, P. *Las ideas de la arquitectura moderna; su evolución (1750-1950)*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.
- CREATIVE COMMONS. *Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0)*. Recuperado el 12 de 07 de 2015, de Creative Commons: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/#>
- DE LANDA, M. Deleuze and the Use of Genetic Algorithm in Architecture. In LEACH, N. (Ed.), *Designing for a Digital World* (pp. 117-120). London: Wiley-Academy, 2002.
- DELEUZE, G., y GUATTARI, F. *Mil Mesetas: Capitalismo y esquizofrenia* (6ª:2004 ed.). Valencia: Pre-Textos, 1980.
- DURAND, J. N. *Compendio de lecciones de arquitectura*. Madrid: Pronaos, 1981.
- DUS Architects. Recuperado el 15 de 09 de 2016, de 3D Print Canal House: <http://3dprintcanalhouse.com/about-the-3d-print-canal-house-1>
- FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. New York: Thames & Hudson, 2000.
- FREARSON, A. *Dutch EU building features a facade combining tensile fabric and 3D-printed bioplastic*, 2016. Recuperado el 15 de 02 de 2017, de Dezeen: Architecture and Design Magazine: <https://www.dezeen.com/2016/01/12/european-union-3d-printed-facade-dus-architects-holland/>
- FREARSON, A. *DUS Architects builds 3D-printed micro home in Amsterdam*, 2016. Obtenido de Dezeen: Architecture and Design Magazine: <https://www.dezeen.com/2016/08/30/dus-architects-3d-printed-micro-home-amsterdam-cabin-bathtub/>
- GONCHAR, J. *Continuing Education: 3-D Printing Beyond the Prototype: Architects and designers take additive manufacturing to a new level*, 2016. Recuperado el 06 de 11 de 2016, de Architectural Record: <http://www.architecturalrecord.com/articles/11652--d-printing>

- GUATTARI, F. *Plan sobre el planta. Capitalismo mundial integrado y revoluciones moleculares.* Madrid: Traficantes de Sueños, 2004.
- HEREU, P., MONTANER, J. M., & OLIVERAS, J. *Textos de arquitectura de la modernidad.* Hondarribia (Guipúzcoa): Nerea, 1999.
- IWAMOTO, L. *Digital Fabrication: Architectural and Material Techniques.* New York: Princeton Architectural Press, 2009.
- KALAY, Y. *Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design.* Cambridge (Massachusetts); London: MIT Press, 2004.
- KAJIMA, S., & PANAGIOTIS, M. Simplexity. In SAKAMOTO, T., FERRE, A., & KUBO, M. (Edits.), *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture* (pp. 130-143) Barcelona: Actar, 2008.
- KOLAREVIC, B. (Ed.). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing.* New York; London: Taylor & Francis, 2003.
- KOLAREVIC, B. Digital Architectures. In CLAYTON, M. & VASQUEZ DE VELASCO, G. (Edits.). *ACADIA 2000: eternity, infinity, and virtuality in architecture* (pp. 251-256). Washington: Association for Computer-Aided Design in Architecture, c2002, 2000.
- KRIEG, O., DIERICH, K., REICHERT, S., SCHWINN, T., & MENGES, A. Performative Architectural Morphology: Robotically manufactured biomimetic finger-joined plate structures. In ZUPANCIC, T., JUVANCIC, M., VEROVSEK, S., & JUTRAZ, A. (Edits.). *eCADDe 2011: Respecting Fragile Places* (pp. 573-580). Ljubljana: eCADDe, 2011.
- KUBO, M., y SALAZAR, J. Una breve historia de la era de la información. *VERB: Matters*, 2-19, 2004.
- LE CORBUSIER. *Hacia una arquitectura.* Barcelona: Apóstrofe, 1998.
- LIM, S., BUSWELL, R., LE, T., WACKROW, R., AUSTIN, S. A., & GIBB, A. Development of a viable concrete printing process. In *28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2011)* (pp. 665-67). Seoul: International Association for Automation and Robotics in Construction, 2011.
- LIMA, M. *Visual Complexity. Mapping Patterns of Information.* New York: Princeton Architectural Press, 2011.
- LIPSON, H., y KURMAN, M. *La revolución de la impresión 3D.* Madrid: Anaya; Wiley, 2015.
- LYNN, G. Animated Form. In OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 63-86). London; New York: Routledge, 2014.
- MAAS, W., VAN RIJS, J., & DE VRIES, N. En DIAZ, C., Y GARCÍA, E. (Entrevistadores). *Redefiniendo las herramientas de la radicalidad.* Madrid: El Croquis, 2002
- MADRAZO, L. *The Concept of Type in Architecture. An Inquiry into the Nature of Architectural Form.* Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1995.
- MALÉ-ALEMANY, M. Full Print 3D.Printing Objects. In IPSER, C. (Ed.). *Fabvolution: Developments in Digital Fabrication* (pp. 17-55). Barcelona: Ajuntament de Barcelona; Institut de Cultura; Disseny Hub Barcelona, 2012.
- MASIERO, R. *Estética de la arquitectura.* Madrid: A. Machado Libros, 2003.
- MATTER MACHINE. Recuperado el 14 de 07 de 2015, de Matter Machine: <http://mattermachine.com>
- McNEEL. *McNeel Wiki: RhinoNest.* Recuperado el 10 de 06 de 2015, de McNeel Wiki: <http://wiki.mcneel.com/es/rhino/rhinonest>
- MENGES, A. *ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16.* Recuperado el 03 de 04 de 2017, de achimmenges.net: <http://www.achimmenges.net/?p=5822>
- MENGES, A. *Landesgartenschau Exhibition Hall.* Recuperado el 19 de 02 de 2016, de achimmenges.net: <http://www.achimmenges.net/?p=5731>
- MENGES, A. Manufacturing Diversity. (HENSEL, M., MENGES, A., & WEINSTOCK, M. Edits.) *Architectural Design: Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, 76 (2), 70-77, 2006.
- MENGES, A. Material Computation. Higher Integration in Morphogenetic Design. (CASTLE, H. Ed.) *Architectural Design*, 2 (216), 14-21, 2012.

- MENGES, A. Coalences of Machine and Material Computation. In LORENZO-EIROA, P. & SPRECHER, A. (Edits.). *Architecture in Formation: On the Nature of Information in Digital Architecture* (pp. 275-283). New York: Routledge, 2013.
- MENGES, A., & SCHWINN, T. *Manufacturing Reciprocities*. (MENGES, A. Ed.). *Architectural Design: Material Computation*, 118-125, 2012.
- MINCHIN, J. (02 de 06 de 2015). *Entrevista en Green FabLab*. (ABONDANO, D. Entrevistador) Barcelona, España.
- MITCHELL, W. (Ed.). *Environmental Design: Research and Practice; Proceedings of the EDRA 3/AR 8 Conference, University of California at Los Angeles, January 1972, Volumen 2* (Vol. 2, pp. 384-386). Los Angeles: Verlag University, 1972.
- MITCHELL, W. *E-topía: vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.
- MONEDERO, J. *Aplicaciones informáticas en arquitectura* (Segunda ed.). Barcelona: Ediciones UPC, 2000.
- MOREL, P. Computation or Revolution. (GRAMZIO, F., & KOHLER, M. Edits.) *Architectural Design: Made By Robots: Challenging Architecture at a Large Scale*, 76-87, May 2014.
- NEUMEYER, F. *La palabra sin artificio: reflexiones sobre arquitectura 1922/1968*. Madrid: El Croquis, 2000.
- OXMAN, R. Performance-based Design: Current Practices and Recent Issues. *International Journal of Architectural Computing*, 6 (1), 2008.
- OXMAN, R. Theory and Design in the First Digital Age. In: *The International Journal of Design Studies* (pp. 229-265), 2006.
- OXMAN, R., & OXMAN, R.. *Theories of the Digital in Architecture*. Londres; Nueva York: Routledge, 2014.
- OXMAN, R., & GU, N. Theories and Models of Parametric Design Thinking. *eCAADe 33*. Viena, 2015.
- OZENFANT, A., y JEANNERET, C. E. En PIZZA, A. (Ed.) *Acerca del purismo. Escritos 1918/1926* (Segunda ed.). Madrid: El Croquis, 2004.
- PARVIN, A. *WikiHouse Development Goals*, 2014. Recuperado el 28 de 05 de 2015, de WikiHouse: <http://www.wikihouse.cc>
- PARVIN, A. *Alastair Parvin: Arquitectura por y para la gente*, 2013. Recuperado el 15 de 06 de 2015, de TED: https://www.ted.com/talks/alastair_parvin_architecture_for_the_people_by_the_people?language=es
- PASK, G., & CURRAN, S. *Micro Man: Living and growing with computers*. London: Century, 1982.
- PÉREZ-GÓMEZ, A. *Architecture and the Crisis of Modern Science* (Seventh ed.). Cambridge, London: MIT Press, 1983.
- PERRAULT, C. *Ordonnance for the Five Kinds of Columns After the Method of The Ancients*. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and Humanities, 1993.
- PETERS, B. Building Bytes: 3D-Printed Bricks. In *Adaptive Architecture: Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 433-434). Cambridge: ACADIA, 2013.
- PORTELL-TORRES, J., LLOVERAS-CORBALAN, M., & MALÉ-ALEMANY, M. 3D-printed Hybrids Exploring Single Thread Printing for Complex and Multifunctional Concrete Framework. In VOYATZAKI, M. (Ed.). *What's the Matter: Materiality and Materialism at the Age of Computation* (pp. 457-468). ENHESA, 2014.
- Real Academia Española. *Real Academia Española*. Obtenido de Diccionario de la lengua española: <http://www.rae.es>
- SENNETT, R. *Artesanía, tecnología y nuevas formas de trabajo*. Barcelona: Kats; CCCB, 2013.
- SIZA, A., SOUTO DE MOURA, E., & BALMOND, C. Reciprocity, Hierarchy and Discreteness: Serpentine Gallery Pavilion 2005. In Sakamoto, T., & Ferré, A. (Edits.). *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture* (pp. 44-49). Barcelona: Actar, 2008.

- SKIDMORE, OWENS & MERRILL. *AMIE 1.0.*, 2017. Recuperado el 20 de 01 de 2017, de SOM: <http://www.som.com/projects/amie>
- SMITH, R. *Prefab Architecture: a Guide to Modular Design and Construction*. New Jersey: Wiley, 2010.
- SOAR, R., & ANDREEN, D. The Role of Additive Manufacturing + Physiomimetic Computational Design for Digital Construction. (MENGES, A. Ed.) *Architectural Design*, 126-135, March/April 2012.
- SORIANO, F. Diagramas. (Soriano, F. Ed.) *Fisuras de la cultura contemporánea*, 4-11, Julio de 2002.
- SPACE CRAFT SYSTEMS. *WikiHouse/NZ: Making Things Better*, 2014. Recuperado el 20 de 06 de 2015, de Space Craft: developing WikiHouse in New Zealand: <http://spacecraft.co.nz>
- TAFURI, M. *Architecture and Utopia. Design and Capitalist Development*. Cambridge, Massachusetts, and London: MIT Press, 1976.
- TERZIDIS, K. *Algorithmic Architecture*. Oxford MA: Architectural Press; Elsevier, 2006.
- UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. *Contour Crafting: Automated Construction: Behrokh Khoshnevis at TEDx*. Obtenido de Contour Crafting: Robotic Constructin System: <http://www.contourcrafting.org>
- VAN BERKEL, B., & BOS, C. *Move* (Vol. Techniques). Amsterdam: UN Studio & Goose Press, 1999.
- WALZER, A. (20 de 05 de 2015). *Entrevista en Construmat 2015*. (ABONDANO, D. Entrevistador) Barcelona, España.
- WATSON, J., & CRICK, F. Molecular Structure of Nucleic Acids. *Nature*, 171 (4356), 737-738, 1953.
- WIKIHOUSE. Recuperado el 04 de 06 de 2015, de <http://www.wikihouse.cc>
- WINSTON, A. *Arup unveils its first 3D-printed structural steel building components*, 2014. Recuperado el 15 de 11 de 2016, de Dezeen: Architecture and Design Magazine: <http://www.dezeen.com/2014/06/11/arup-3d-printed-structural-steel-building-components/>
- WOODBURY, R. *Elements of Parametric Design*. Londres; Nueva York: Routledge, 2010.

Capítulo 4

Cultura arquitectónica: del rechazo al retorno de la naturaleza

Introducción

El presente capítulo estudia la tercera fase de los períodos de transición, en la que surgen expresiones artísticas y funcionales como resultado de la conquista de la naturaleza por parte de la técnica.

Nuestra relación con la naturaleza está determinada por la ciencia y la industria¹ y, sobre todo, por la tecnología, por cuanto permite establecer con ella una relación productiva que determina cómo la percibimos, concebimos y explotamos.² Así, en la medida en que la producción significa un proceso de intercambio entre los seres humanos y la naturaleza mediante la tecnología, las revoluciones tecnológicas han acarreado nuevos modos de concebir e instrumentalizar la naturaleza, que a su vez han transformado la cultura arquitectónica.

Con la revolución industrial emergieron dos conceptos de “naturaleza”: por un lado, la naturaleza como reserva de materias primas, y por el otro la naturaleza que resulta de las actividades humanas:

“In social and political thought, too, ideas about nature were transformed in this period: Marx and Engels postulated two kinds of nature, the first that from man takes his materials, the second being the nature produced by man as a result of his activities, and which itself becomes a commodity”³.

En el primer caso, la naturaleza se ofrece como una fuente inagotable de recursos materiales y energéticos.⁴ El segundo supone la idea de aquella “segunda naturaleza” que, según Ortega y Gasset, está constituida por los “objetos y procedimientos creados por la técnica que forman un paisaje artificial tan tupido que oculta la naturaleza primaria tras él”⁵, y generan “una zona de creación técnica tan espesa y profunda que vino a constituir una sobrenaturaleza”⁶. El espacio por antonomasia de esta “segunda

¹ Véase Capítulo 1.1.1

² Véase Introducción

³ FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. New York: Thames & Hudson, 2000, p. 236

⁴ “La naturaleza obedece. Ella, la productora de materias primas, ha tomado conciencia de la seriedad y el caudal de sus tareas. Ya no sonriente y desenvuelta como fue una vez, sino seria y ocupada hace rendir sus campos diez veces más que antes y entrega de sus entrañas valores minerales mil veces superiores. Y nos hace comprender que depende solamente del trabajo y de la avidez de los hombres multiplicar ulteriormente la cosecha de productos orgánicos e inorgánicos. Ninguno de los productos considerados hoy preciosos parece por el momento llegar a su fin; por todas partes aparecen y emiten guíños tesoros todavía intactos de materia y energía.” RATHENAU, W. La Mecanización del Mundo. En MALDONADO, T. *Tecnica y Cultura: El debate alemán entre Bismarck y Weimar*. Buenos Aires: Infinito, 2002, p. 159

⁵ ORTEGA Y GASSET, J. *Ensimmamiento y alteración. Meditación de la técnica y otros ensayos*. Madrid: Alianza, 2014, p. 127

⁶ Ibídem.

naturaleza” es la metrópoli que, de acuerdo con Tafuri, es el organismo artificial que encarna el ciclo de producción, distribución y consumo.⁷

El análisis de las relaciones que establecen la arquitectura moderna y la arquitectura digital con la naturaleza, toma como referencia estas dos concepciones que surgen tras la revolución industrial. En el caso de la arquitectura moderna se estudiará cómo la transición hacia la “estética de la máquina” implicó el reemplazo de la naturaleza por la máquina como modelo estético. En la arquitectura digital la naturaleza se retoma como modelo arquitectónico, pero como un modelo operativo más que estético: la arquitectura digital imita los procesos de auto-regulación y auto-generación de los sistemas naturales para generar edificios que se construyen y funcionan de un modo más eficiente. A la luz de esta relación instrumental que la arquitectura digital establece con la naturaleza, se analizan los cambios a partir de los cuales las propiedades de la materia y los procesos naturales devienen en inputs de diseño que determinan la forma y el comportamiento de un edificio.

La relación entre arquitectura digital y naturaleza forma parte de una línea de pensamiento que se inicia cuando Claude Perrault distinguió la “verdad” de la “ilusión”, disociando así el conocimiento científico del pensamiento místico.⁸ Perrault consideró que las obras de la Antigüedad eran un impedimento para el progreso de la arquitectura porque, según él, la verdad de la arquitectura solo podía alcanzarse a través del método científico.⁹ Bajo la perspectiva de Perrault, las proporciones del edificio perdieron las cualidades trascendentales que vinculaban lo divino con lo terrenal. Por consiguiente, la geometría y las matemáticas adquirieron un carácter estrictamente instrumental¹⁰ mientras que la función se convertía en factor decisivo de la belleza del edificio.¹¹

A la luz de las teorías de Perrault, la arquitectura digital no imita la apariencia de la naturaleza sino sus principios y procesos intrínsecos y lo hace bajo la influencia del pensamiento sistémico y la cibernetica: en el primer caso, por tratarse de una forma de pensamiento contextual que entiende el edificio en relación con su entorno; en el segundo, por ser la ciencia que aporta las bases conceptuales para instrumentalizar los procesos de auto-organización y auto-regulación de la naturaleza. Además del pensamiento sistémico y la cibernetica, en la arquitectura digital y su relación con la naturaleza, subyace la influencia del pensamiento evolutivo:

“Darwin ha despertado nuestro interés por la historia de la tecnología natural, es decir, por la formación de los órganos

⁷ TAFURI, M. *Architecture and Utopia. Design and Capitalist Development*. Cambridge, Massachusetts, and London: MIT Press, 1976, pp. 83, 100

⁸ PÉREZ-GÓMEZ, A. *Architecture and the Crisis of Modern Science* (Seventh ed.). Cambridge, London: MIT Press, 1983, p. 25

⁹ Ibídem, p. 29

¹⁰ Ibídem, p. 32

¹¹ MASIERO, R. *Estética de la arquitectura*. Madrid: A. Machado Libros, 2003, p. 133

de las plantas y de los animales, como instrumentos de producción para la conservación de la vida”¹².

Esta “tecnología natural” se aplica a la “formación” y la “conservación” de los organismos naturales. La instrumentalización de estos procesos por los medios digitales subyace en el diseño evolutivo, que imita los procesos de auto-organización natural para generar la forma, o el diseño morfogenético, que reproduce los procesos de auto-regulación natural para diseñar el comportamiento y optimizar el rendimiento del edificio. Así, la imitación de la naturaleza por parte de la arquitectura digital, conlleva un proceso de abstracción basado en la codificación de procesos y fenómenos naturales para simularlos computacionalmente y transponerlos al diseño del edificio. En este contexto, la arquitectura digital establece una relación con la naturaleza a través de leyes científicas, principios técnicos y operaciones matemáticas, a diferencia de los criterios artísticos en que se fundamentó la estética de la máquina de la arquitectura moderna.

La primera parte de este capítulo analiza cómo la arquitectura deja de copiar las cualidades extrínsecas de la naturaleza para instrumentalizar sus procesos intrínsecos mediante las tecnologías de diseño y fabricación digital. En la segunda parte se estudia cómo la “tecnología natural” a la que se refería Marx, utilizada como un instrumento para la conservación de la vida, se alinea con la idea de “desarrollo sostenible”, surgida a partir de la segunda mitad del siglo XX, que considera la naturaleza en términos económicos, como un “capital natural”. Finalmente, la tercera parte está dedicada a analizar el diseño y construcción de una membrana estructural realizada por Alberto Pugnale junto con otros colaboradores. Este proyecto ejemplifica la instrumentalización de la naturaleza y las cualidades ornamentales que caracterizan la cultura arquitectónica de la era digital, una cultura que considera a la naturaleza un modelo productivo, económico, estético y funcional.

¹² MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. En BOTTOMORE, T. B., & MAXIMILIEN, R. (Edits.) Barcelona: Península, 1968, p. 83

4.1 De la máquina al sistema

4.1.1 De la naturaleza a la máquina

4.1.1.1 De la imitación al rechazo de la naturaleza

“[Architecture] alone is able to make forms that have no model in nature”¹³.

Otto Wagner

En el Renacimiento, Alberti consideraba que las leyes naturales de la belleza radicaban en la proporción, la armonía, y la disposición razonada de las partes respecto del todo.¹⁴ De la misma manera que la percepción de la belleza derivaba en un ejercicio de abstracción, el propio diseño se convertía en un ejercicio intelectual, en un conjunto de operaciones matemáticas y geométricas ajena a las propiedades de los materiales y a los procesos de construcción del edificio.¹⁵ La materia era el medio para representar una idea, pero no para dar forma al edificio.¹⁶ La desvinculación entre diseño y naturaleza conllevaba ignorar la influencia de los materiales en la concepción del edificio.

El movimiento moderno planteó un nuevo modelo de belleza. La autonomía de la arquitectura con respecto a la naturaleza, defendida por Wagner, es un reflejo de esa transición hacia un nuevo sentido de la belleza, luego ejemplificado en los edificios de la modernidad. Se constata una voluntad de prescindir de la naturaleza como modelo estético, y de, paralelamente, valorarla fundamentalmente como reserva inagotable de materiales a disposición del sistema industrial. En los inicios del siglo XX la máquina se convirtió en la metáfora dominante.¹⁷ Así, el futurista Sant’Elia proclamaba:

“[...] así como los antiguos tomaban su inspiración de los elementos del mundo natural, también nosotros –material y

¹³ WAGNER, O. *Sketches, Projects and Executed Buildings*. In FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. Op.cit., p. 236

¹⁴ MADRAZO, L. *The Concept of Type in Architecture. An Inquiry into the Nature of Architectural Form*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1995, p. 101-104; MASIERO. Op.cit., p. 107. Además de ser un recurso estético, la reproducción de la naturaleza en el Renacimiento respondió a motivos profesionales. Según Forty, Durante el siglo XV la fidelidad de una obra de arte para reproducir la naturaleza se consideró como el principal criterio para evaluar su calidad, pero si la poesía, la pintura y la escultura podían conseguir sus metas representando la naturaleza, con la arquitectura no sucedía lo mismo ya que esta no reproduce objetos naturales como la pintura y la escultura, ni las emociones humanas como lo hace la poesía. Esta incapacidad para representar la naturaleza impidió que la arquitectura fuera considerada como un arte mimético, por lo cual, para mantener su posición social junto a los artistas y los poetas y para diferenciarse de los gremios artesanales, los arquitectos se centraron en probar que la arquitectura era un arte con la capacidad de representar la naturaleza; una preocupación que se convirtió en el mayor dilema del pensamiento arquitectónico desde el siglo XV hasta el siglo XVIII. FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. Op.cit., p. 223

¹⁵ Véase Capítulo 2.2.3.3

¹⁶ Ibídem

¹⁷ CAPRA, F. *La trama de la vida: una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Barcelona: Anagrama, 1998, p.39

espiritualmente artificiales— debemos hallar la nuestra en el nuevo mundo mecánico que hemos creado”¹⁸.

La alusión a la máquina era un lugar común entre los artistas y arquitectos de las vanguardias modernas. Por ejemplo, el futurista Gino Severini afirmaba que “La construcción de una máquina es análoga a la construcción de una obra de arte”¹⁹; el purista Le Corbusier concluía que “El cuadro es, pues, una máquina de emocionar”²⁰, y “La máquina es, *par excellence*, un fenómeno de disciplina espiritual”; el neoplásticista Theo van Doesburg sostenía que “Toda máquina es la espiritualización de un organismo”²¹. La exaltación de la máquina por parte de las vanguardias modernas ponía de manifiesto que había sido adoptada como modelo en sustitución de la naturaleza.

Por otra parte, la arquitectura moderna de inicios del siglo XX asumía la existencia de una “segunda naturaleza” creada por la técnica y que forma un paisaje artificial tan tupido que oculta la naturaleza primaria: la metrópoli. Esta arquitectura metropolitana fue denominada por Scheerbart “arquitectura de cristal” y, según el poeta, conduciría a “la transformación de la superficie terrestre”²², de modo que “toda la naturaleza nos aparecerá bajo una luz completamente distinta”²³.

La arquitectura de cristal hacía referencia a un entorno artificial controlado por dispositivos mecánicos de calefacción y refrigeración, puertas automáticas o la sustitución de árboles por torres luminosas.²⁴ Este entorno era posible gracias a los materiales producidos industrialmente, mejores que los tradicionales: el “ladrillo quebradizo” o la “madera inflamable” eran reemplazados por materiales “duraderos” como el hierro o el hormigón y los muebles de madera por armarios, sillas y mesas de acero y cristal.²⁵ Así, de acuerdo con Mertins, la arquitectura de cristal no solo pretendía aumentar el placer y el confort,²⁶ sino que respondía a un nuevo estadio de desarrollo: “[it is] the result of natural evolution and technical development rolled into one”²⁷.

La ciudad pasó a ser entendida como parte fundamental del ciclo de producción, distribución y consumo de los bienes materiales generados por la industria.²⁸ Este organismo maquínico, también entendido como el “sistema automático de

¹⁸ SANT’ELIA, A. Mensaje. La arquitectura futurista. Manifiesto. En PIZZA, A., y GRACÍA, M. *Arte y arquitectura futurista (1914-1918)*. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia: Valencia, 2002. pp. 68-71; BANHAM. Op.cit., p. 135

¹⁹ SEVERINI, G. *Le Machinisme et l’Art: Reconstruction de l’Univers*. En BANHAM. Op.cit., p. 163

²⁰ OZENFANT, A., y JEANNERET, C. E. En PIZZA, A. (Ed.) *Acerca del purismo. Escritos 1918/1926* (Segunda ed.). Madrid: El Croquis, 2004, p. 89

²¹ VAN DOESBURG, T. Revista *De Stijl*. En BANHAM. Op.cit., p. 162

²² SCHEERBART, P. *La arquitectura de cristal*. En PIZZA, A. (Ed.) Valencia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia, 1998. p. 206

²³ Ibídem, p. 153

²⁴ Ibídem, pp. 89, 116, 216

²⁵ Ibídem, 1998, pp. 111, 95

²⁶ MERTINS, D. *Modernity Unbound*. London: Architectural Association Publications, 2012, p.16

²⁷ Ibídem

²⁸ TAFURI. Op.cit., pp. 83, 100

maquinaria”²⁹, constituyó el entorno en donde surgió el *modelo mecánico* adoptado por la arquitectura y de donde derivó la “forma abstracta” como fundamento estético de la arquitectura moderna.³⁰

4.1.1.2 De la representación a la abstracción

“Así como es correcto afirmar que la cultura, en su sentido más amplio, significa independencia con respecto a la naturaleza, no debe sorprendernos que la máquina figure en primera línea de nuestra voluntad cultural de estilo [...] Las nuevas posibilidades de la máquina han creado una estética que expresa nuestro tiempo, a la que alguna vez denominó ‘Estética de la Máquina’”³¹.

Theo van Doesburg

La sustitución de la naturaleza por la máquina como modelo respondía a la aspiración de “modernidad” de los arquitectos vanguardistas.³² Para alcanzar esta condición no solo fue necesario fundamentar la creación arquitectónica sobre principios científicos y técnicos, sino que implicó, además, el abandono de la ornamentación inspirada en las formas naturales. Más que imitar su apariencia, se llevó a cabo un proceso de abstracción por el que las formas de la naturaleza se simplificaron para dar lugar a un nuevo lenguaje plástico de formas simples, afines a las cualidades de la producción industrializada; un lenguaje de “formas rectas y limpias que la máquina puede producir mejor que la mano”³³.

El Futurismo estableció algunas de las “normas” sobre las cuales debía fundarse una arquitectura “moderna”, es decir, “una arquitectura [que] no puede estar sometida a ley alguna de continuidad histórica”³⁴; una arquitectura basada en un “nuevo ideal de belleza”³⁵ que rechazaba la decoración figurativo-escultórica para adoptar las formas simples y homogéneas que la máquina ejecuta eficazmente.

Los principios de la arquitectura futurista se formularon antes de la Primera Guerra Mundial, pero su potencial materialización se desvaneció en 1916 con la muerte de Sant’Elia. A pesar de ello, sus ideas sobrevivieron a través del grupo De Stijl, cuyos planteamientos racionalistas y abstractos buscaban también la ruptura con el pasado. Al igual que lo futuristas, De Stijl tenía como “finalidad contribuir al desarrollo de una nueva conciencia de la belleza”³⁶; una conciencia que difería de “las formas exteriores

²⁹ RAUNIG, G. *Mil máquinas. Breve filosofía de las máquinas como movimiento social*. Madrid: Traficantes de Sueños, 2008, pp. 23, 26

³⁰ BANHAM. Op.cit., p.75

³¹ En BANHAM. Op.cit., p. 190

³² Por modernidad se entiende el rechazo de modelos de otras épocas para crear uno propio, a partir del método y el pensamiento científico. Véase: Introducción de Capítulo 1.

³³ WRIGHT, F. L. En BANHAM. Op.cit., p. 192

³⁴ Ibídem, p. 133

³⁵ Ibídem, p. 135

³⁶ Ibídem, p. 159

de la naturaleza”³⁷ y consideraba la metrópoli como un nuevo escenario donde “la vida del hombre culto contemporáneo se aleja gradualmente de la naturaleza; se convierte más y más en una vida a-b-s-t-r-a-c-t-a”³⁸.

Según Van Doesburg, el “lenguaje universal” del Neoplasticismo es el resultado de un proceso de abstracción basado en “la ley de la simultaneidad, de la aniquilación y de la edificación o, en términos artísticos, de la destrucción y de la reconstrucción”. El Neoplasticismo deconstruiría la naturaleza, logrando así la “liberación del espíritu de los lazos de la naturaleza”,³⁹ la liberación del “carácter pintoresco, casual y multiforme de la naturaleza”⁴⁰ que era considerado como un obstáculo para el nacimiento del “arte universal” al cual aspiraba Van Doesburg.

Van Doesburg rechazó “la forma a priori” y “la individualidad” con el fin de alcanzar un arte universal. En el primer caso, porque asociaba la forma a priori a la “forma” en su sentido tradicional, es decir, a las formas heredadas del pasado.⁴¹ En el segundo caso, porque la individualidad se identifica con lo particular, con aquello que se opone a lo absoluto representado por la geometría. Así, Van Doesburg entendió que “Las tradiciones, los dogmas y el dominio de lo individual (lo natural) son un obstáculo para esta realización”⁴² del arte universal y defendió en su lugar “lo informe” de la arquitectura “anti-alegórica, anti-simbólica y anti-decorativa, en una palabra anti-forma”⁴³.

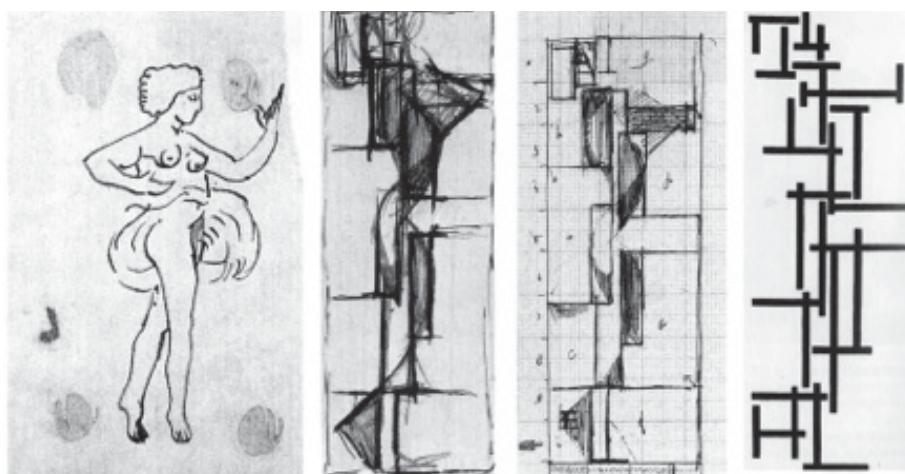


Figura 4.1 Proceso de abstracción neoplásico: Tarantella

³⁷ Ibídем, p. 161

³⁸ Ibídем.

³⁹ VAN DOESBURG, T. En CHARO, G. (Ed.). *Principios del nuevo arte plástico y otros escritos*. Valencia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia, 1985, p. 98

⁴⁰ Ibídем, p. 78

⁴¹ Ibídém, pp. 114-115, 126

⁴² Ibídém, p. 175

⁴³ Ibídém, p. 123

Con el lenguaje universal, Van Doesburg pretendía que el “elemento pictórico no significa nada más que ‘él mismo’”⁴⁴, y consideraba “la recta como medio de la expresión del futuro”.⁴⁵ Así, la pintura neoplásticista aplicó un proceso de abstracción basado en la *descomposición* de formas naturales en líneas rectas que, a la luz del método cartesiano, se *recomponen* para dar lugar a la composición abstracta (Figura 4.1). De este modo, la mística de la naturaleza –que estaba ligada a sus apariencias– fue sustituida por elementos geométricos a-significantes, al mismo tiempo que la sinuosidad, heterogeneidad e irregularidad de las formas naturales se reemplazaba con la linealidad, la homogeneidad y la ortogonalidad de la retícula cartesiana.

El Neoplasticismo aplicó un proceso de abstracción y medios de expresión informes a la pintura. El Elementarismo aplicó también estos medios a la arquitectura, con el fin de explorar las posibilidades de la expresión neoplástica en la esfera espacio-temporal.⁴⁶ El Elementarismo y el Neoplasticismo compartían algunos principios: la reducción extrema de los elementos compositivos; la equivalencia entre interior y exterior, basada en el fraccionamiento de los planos compositivos; la plástica poliédrica, en la que la configuración volumétrica queda limitada por superficies planas; y la ruptura con la simetría y la centralidad de la composición clásica, para generar un proceso compositivo que se desarrolla desde el interior hacia el exterior.⁴⁷

Los principios del Elementarismo se ven reflejados en la *Maison Particulière*, que Van Doesburg diseñó junto con Cornelis van Eesteren en 1923. El proyecto de la vivienda se compone por la articulación de superficies planas que se abren en ciertos puntos para relacionar los espacios interiores y exteriores. Además, al reemplazar los muros de carga con el esqueleto estructural, los elementos constructivos se reducen a la expresión elemental de su funcionalidad estructural o espacial: las líneas verticales y horizontales –pilares y vigas– como vectores de fuerza y los planos –muros y forjados– como elementos configuradores del espacio.

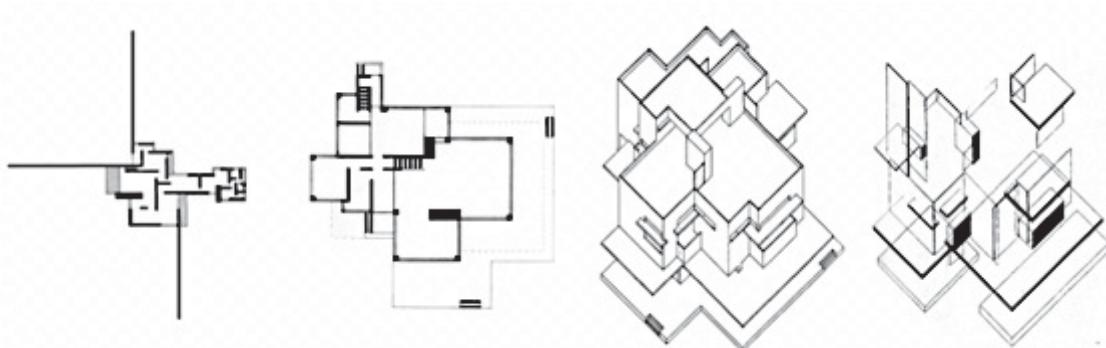


Figura 4.2 Casa de Campo en Ladrillo; *Maison Particulière*

⁴⁴ Ibídem, p. 157

⁴⁵ Ibídem, p. 129

⁴⁶ Ibídem, p. 151

⁴⁷ Ibídem, pp. 141-147

Los principios neoplásticistas y elementaristas fueron asumidos por los arquitectos modernos, como se refleja en el proyecto de la Casa de Campo en Ladrillo, diseñado por Mies en 1924. A diferencia de la Maison Particulière, Mies emplea muros de carga que se proyectan hacia el exterior (Figura 4.2). Así, “los planos que salen de dentro de la casa no se detienen en los muros exteriores –como en Van Doesburg–, sino que se extienden por el paisaje como las aspas de un molino”⁴⁸.

El proceso de abstracción que Van Doesburg concibió como un “modo de producción universal” respondía al deseo de “abandonar toda ilusión [...] y atreverse a enfrentarse con la MATERIA pura como medio de expresión más determinado y superior”⁴⁹. Pero, si el “reino del arte y de la estética es el de una gestión convencional de la ilusión”⁵⁰, Van Doesburg no abandonó la ilusión, sino que la gestionó de acuerdo con el significado de “naturaleza” predominante después de la industrialización. Primero suprimió la “ilusión” de la naturaleza rechazando el sentido trascendental de sus formas y, después, orientó la “ilusión” hacia la máquina, argumentando que “lo caprichoso de la naturaleza rural se entorpece en la metrópoli [de manera que] la materia natural la vemos en la máquina”⁵¹.

En las formas rectilíneas empleadas por el Neoplásticismo implícitamente se rechazaba el trabajo artesanal, ya que las formas creadas por el artesano, “surgiendo de un individualismo aislado o se arrogan a la independencia ilegítima, o son producto de un deseo de escapismo romántico que se niega a renunciar a tradiciones económicas, culturales y artísticas ya desvanecidas”⁵². La ruptura con la tradición y la naturaleza permitió establecer un sistema de convenciones en el que las leyes de producción industrial fueron presentadas como leyes “naturales”, necesarias y universales.⁵³ La abstracción se convirtió en el método de control formal que la industria requería⁵⁴ y, a través de ella, la arquitectura asumió la simplicidad, la homogeneidad, la linealidad y la regularidad de los productos mecanizados. Por tanto, si por “estilo” se entiende “la expresión de una particular o específica visión del mundo por parte de los artistas que han intuido más profundamente las cualidades de la experiencia humana peculiar de su tiempo”⁵⁵, el “estilo moderno” responde al alineamiento de la arquitectura con la mecanización productiva a partir de la abstracción.

⁴⁸ GIEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009., p. 572

⁴⁹ Ibídem, p. 139

⁵⁰ BAUDRILLARD, J. *El complot del arte. Ilusión y desilusión estéticas*. Buenos Aires: Amorrortu, 2007, p. 45

⁵¹ MONDRIAN, P. La realización del neo-plasticismo en la arquitectura del futuro lejano y de hoy. En JARAUTA, F., y LÓPEZ, J. (Eds.). *La nueva imagen de la pintura*. Valencia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia, 1993, p. 129

⁵² KRACAUER, S. *Escritos sobre arquitectura*. Barcelona: Mudito, 2011, p. 22

⁵³ TAFURI. Op.cit., p. 89

⁵⁴ Ibídем, p. 92

⁵⁵ COLLINS, P. *Las ideas de la arquitectura moderna; su evolución (1750-1950)*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001, p. 58

4.1.1.3 De la belleza a la economía

La teoría de Durand ha sido considerada como una “funcionalización de la teoría arquitectónica” que rechaza las cualidades trascendentales de la geometría, para tornarla en una herramienta apta para diseñar edificios económicos cuya belleza derivaba del hecho de satisfacer necesidades concretas.⁵⁶ Su teoría, formulada en los inicios del siglo XIX, no fue aceptada de manera inmediata. Durante este siglo, sus planteamientos se consideraron opuestos a la noción tradicional de belleza basada en la ornamentación. Por ejemplo, John Ruskin sostenía: “Quiero ahora hablar de este elemento de excelencia más feliz, que consiste en la noble reproducción de las imágenes de belleza derivadas principalmente de la apariencia exterior de la naturaleza orgánica”⁵⁷. Por el contrario, al orientar los objetivos de la arquitectura a la conservación y el bienestar de los seres humanos,⁵⁸ la belleza, tal como la entendió Durand, se basaba en satisfacer las necesidades prácticas de un modo económico. Por consiguiente, la decoración era considerada un gasto innecesario.

El ideal de belleza relacionado con la economía, subyace asimismo bajo el concepto de “prototipo” propuesto por la Werkbund. Hermann Muthesius, su fundador, defendió “la idea de la normalización como una virtud y la forma abstracta como base de la estética del diseño industrial”⁵⁹ y sostuvo que “más que cualquier otro arte, la arquitectura se esfuerza por alcanzar el prototipo. Solo en él puede completarse”⁶⁰. Así, tanto la Werkbund como el Neoplásticismo se oponían a lo individual y, más precisamente, a la individualidad de la producción artesanal para, así, favorecer la “universalidad” de los productos homogéneos y económicos que resultan de la producción en masa y la mecanización y con los cuales se buscaba satisfacer las necesidades homogéneas de los seres humanos.⁶¹

Además de la Werkbund y el Neoplásticismo, el ideal de belleza vinculado a la satisfacción de las necesidades humanas también fue asumido en el Purismo y la Bauhaus. Le Corbusier replanteó el “prototipo” a partir del establecimiento de unas “normas” para el diseño arquitectónico:

“Establecer una norma significa agotar todas las posibilidades prácticas y razonables, deducir un tipo reconocido conforme a las funciones, al rendimiento

⁵⁶ Véase Capítulo 1.2.4

⁵⁷ RUSKIN, J. *Las siete lámparas de la arquitectura* (Cuarta ed.). Barcelona: Alta Fulla, 2000, p. 99

⁵⁸ Véase Capítulo 1.2.4

⁵⁹ BANHAM. Op.cit., p.75

⁶⁰ Ibídem, p.80

⁶¹ Además de la Werkbund y el Neoplásticismo, la idea de las necesidades comunes pueden satisfacerse con soluciones tipo era compartida por la Bauhaus: “La creación de tipos para los objetos útiles de uso cotidiano es una necesidad social. Las necesidades vitales de la mayor parte de los hombres son fundamentalmente homogéneas.” GROPIUS, W. Principios para la producción del Bauhaus. En MALDONADO, T. (Ed.). *Técnica y cultura. El debate alemán entre Bismarck y Weimar*. Buenos Aires: Infinito, 2002, p. 244

máximo, al mínimo empleo de medios, mano de obra y materia, palabras, formas, colores, sonidos”⁶².

Las “normas” se justifican por su “productividad”, en cuanto deben maximizar el rendimiento y minimizar el empleo de medios productivos. La noción de belleza que defendía Le Corbusier está vinculada a esta aplicación de la norma: “bases primordiales: satisfacción racional del espíritu (utilidad, economía); en seguida, cubos, esferas, cilindros, conos, etc. (sensorial)”⁶³, formas cuya belleza responde a una “norma” basada en criterios de utilidad y economía.

La relación entre las formas simples y la economía del diseño fue asumida por la arquitectura moderna con la justificación de que “solo los diseños geométricamente simples pueden producirse en grandes cantidades y a bajo costo, [principio que] era común a fines de la década de 1920-1930”⁶⁴. Le Corbusier defendió esta idea con los “objetos-tipo” e hizo de ellos uno de los principios del Purismo.⁶⁵ Según Banham, el “objeto-tipo” hace referencia a “un objeto absoluto [...] producido en grandes cantidades”⁶⁶. Los puristas entendían que un objeto-tipo debía tener tres cualidades: responder a la ley de la economía, ser producidos mecánicamente y emplear una geometría simple:⁶⁷

“Si trabajamos en el interior de un edificio [...] la oficina es cuadrada, la mesa de trabajo es cuadrada y cúbica, y todo en ella tiene ángulos rectos (el papel, los sobres, las bandejas de correspondencia con su traba geométrica, los archivos, las carpetas, los registros, etc.) [...] nuestra mirada está sometida a un constante comercio con formas que son, casi todas, geometría”⁶⁸.

Le Corbusier consideró que el ángulo recto era el “ángulo-tipo”, un símbolo de perfección⁶⁹ que radica en la precisión de las formas ortogonales producidas por la máquina. A estas formas simples producidas mecánicamente les atribuyó un significado:

“The miracle of the machine thus lies in having created harmonious organs, that is to say, organs of harmony that approaches perfection to the extent that they have been purified by experience and invention”⁷⁰.

⁶² LE CORBUSIER. *Hacia una arquitectura*. Barcelona: Apóstrofe, 1998, p. 108

⁶³ Ibídем, p. 113

⁶⁴ BANHAM. Op.cit., p. 212

⁶⁵ Ibídем, p. 212

⁶⁶ Ibídем, p. 213

⁶⁷ Ibídем, pp. 215-216

⁶⁸ LE CORBUSIER. En BANHAM. Op.cit., p. 216

⁶⁹ BANHAM. Op.cit., p. 217

⁷⁰ LE CORBUSIER. *Principios de urbanismo: la carta de Atenas*. Barcelona: Planeta-Agostini, 1993, p. 125

Gropius también atribuyó cualidades estéticas y simbólicas a la producción mecanizada: la “capacidad de crear un objeto ‘bello’ se basa en el manejo soberano de todos los presupuestos económicos, técnicos y formales de donde resulta”⁷¹. Para alcanzar estos objetivos, Gropius confiaba en la “decidida aprobación del ambiente vital construido por las máquinas”, garantes de la “simplicidad en la variedad, [y] empleo estrechamente económico del espacio, material, tiempo y dinero.”⁷² La “belleza” de los productos industriales también era una cuestión ética porque, según Gropius, respondía a “la nueva moral del trabajo”⁷³.

La relación entre las formas simples –la máquina, la economía y la belleza– planteada por las vanguardias modernas, representó, según Tafuri, la introducción del público al nuevo universo dominado por la precisión inherente a las leyes de producción;⁷⁴ esto es, apelaban a la sociedad para que interiorizase y aceptase los principios y productos derivados de la mecanización, la estandarización, y la producción en masa. De este modo, la arquitectura se alineaba con las intenciones de empresarios como Henry Ford, quien pretendía dar un “sentido” o “significado” al ciclo de producción industrial:

“We want artists in industrial relationship. We want masters in industrial method –both from the standpoint of the producer and the product. We want those who can mould political, social, industrial and moral mass into a sound and shapely whole.”⁷⁵

La relación entre arquitectura e industria que cristaliza con la arquitectura moderna, se remonta a la noción de belleza planteada por Durand, responde a la racionalización y sistematización de la producción arquitectónica y establece un nuevo sistema de valores según el cual la economía reemplaza a la belleza. En este sentido, la estética de la máquina responde al “desencantamiento” derivado de la racionalización industrial que, según Weber, implicó el desplazamiento de los “mitos” a otras esferas. Así, con la industrialización de la arquitectura, el concepto de “belleza” se desplazó desde la naturaleza hacia la máquina. A partir de ello, la “utilidad” y la “economía” adquieren un sentido ético y estético que ha perdurado hasta nuestros días, y que fundamenta lo que podría denominarse como la *estética de la economía*.

⁷¹ GROPIUS. Op.cit., p. 244

⁷² Ibídem.

⁷³ Ibídem.

⁷⁴ Según Tafuri, una de las intenciones del Cubismo y de De Stijl era: “The public had to be provoked. Only in this way could it be actively introduced into the universe of precision dominated by the laws of production.” TAFURI. Op.cit., pp. 91-92. La intención de las vanguardias modernas por crear una “belleza” basada en la producción industrial, permite considerar que las intenciones, atribuidas por Tafuri al Cubismo y De Stijl, se extienden a todas ellas.

⁷⁵ FORD, H. *My Life and Work*. En TAFURI. Op.cit., p. 67

4.1.1.4 De la decoración a la forma y al material

“[...] no se puede decorar sin dinero, y que cuanto más se decore más se gasta, [por lo cual] es lógico examinar si es verdad que la decoración arquitectónica, tal y como los arquitectos la conciben, procura todo el placer que nos prometen, por lo menos si este placer compensa los gastos que ocasiona”⁷⁶.

Hasta el siglo XIX el contenido poético del edificio residió primordialmente en sus elementos decorativos. Sin embargo, tras la revolución industrial la utilidad, la economía y la eficiencia pasaron a ser considerados los valores fundamentales de una obra de arquitectura. Bajo este nuevo sistema de valores, la decoración se consideró un gasto innecesario y el “placer estético” –que, según Kant, “no presupone ningún concepto de lo que debe ser el objeto”⁷⁷– cuestionado. Según Durand, la arquitectura genera un placer derivado de una “belleza dependiente” que Kant atribuye a los objetos sometidos a un fin.⁷⁸ En este sentido, Durand siguió la tradición de Perrault, quién ya defendió que la función del edificio era un factor decisivo de su belleza,⁷⁹ y reivindicó un tipo de placer basado en las sensaciones físicas que proporciona el edificio. Desde esta perspectiva, la decoración pasa a ser a algo superfluo, al mismo tiempo que el significado del ornamento pierde importancia.

Mientras Durand defendía que los edificios debían ser confortables y económicos, Ruskin renegaba de los efectos de la industrialización y reivindicaba el placer espiritual de los elementos decorativos con formas naturales: “La arquitectura es el arte de levantar y decorar edificios construidos por el hombre, cualquiera que sea su destino, de modo que su aspecto contribuya a la salud, a la fuerza y al placer del espíritu”⁸⁰. Las ideas de Ruskin encontraron expresión en los patrones decorativos de William Morris, en la decoración interior para el Hôtel Tassel de Horta, o en el Guaranty Building de Sullivan (Figura 4.3).

Paralelamente a los trabajos de William Morris, de Víctor Horta y de Louis Sullivan, en las últimas décadas del siglo XIX se rechazó el ornamento por razones morales. El ornamento, se argumentaba, oculta “la verdad” de las estructuras y de los materiales. En este debate se confrontó la idea de “revelar” o “enmascarar” la construcción, que Gottfried Semper expresó con los términos “Bekleidung” y “Verkleidung”.⁸¹

⁷⁶ DURAND, J. N. *Compendio de lecciones de arquitectura*. Madrid: Pronaos, 1981, p. 10

⁷⁷ MASIERO. Op.cit., p. 164

⁷⁸ Ibídem

⁷⁹ Ibídem, p. 133

⁸⁰ RUSKIN. Op.cit., p. 5

⁸¹ FANELLI, y GARGIANI. Op.cit., p. 12



Figura 4.3 Patrones decorativos; Hôtel Tassel; Guaranty Building

Henry van de Velde contribuyó a este debate afirmando que “la revuelta contra la mentira de las formas y el pasado era un revuelta moral”⁸². Por otra parte, Hendrik Petrus Berlage introdujo un nuevo lenguaje arquitectónico con el edificio para la Bolsa de Ámsterdam (1898), utilizando muros de ladrillo sin revoco para resaltar el material o eliminando el capitel de las columnas uniéndolas con la superficie plana del muro. De este modo, la variedad de elementos decorativos fue reemplazada por la unidad de las superficies planas, mientras que las cualidades de los materiales se exponían en su estado “puro” (Figura 4.4).

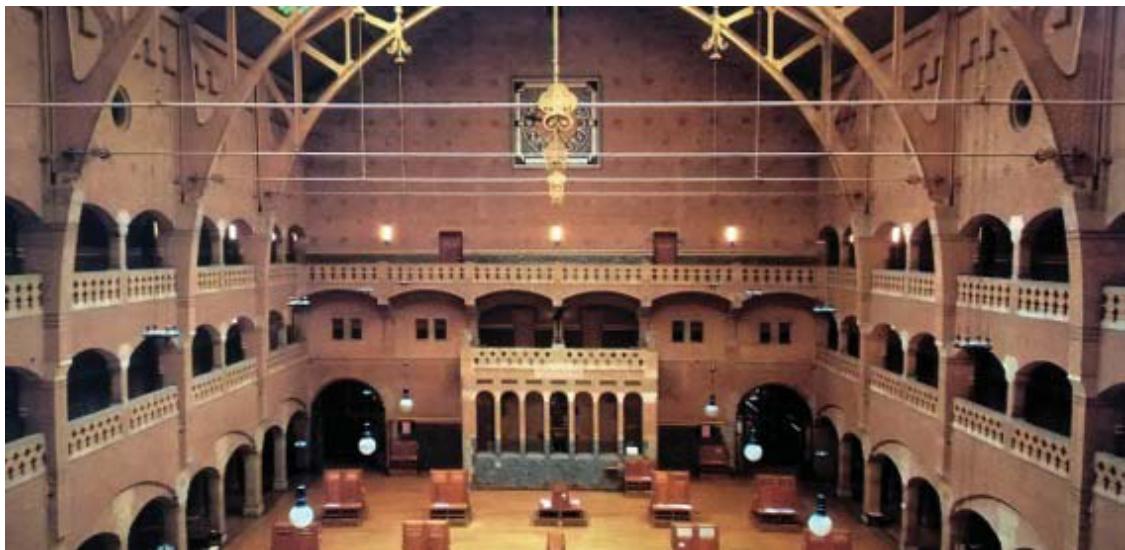


Figura 4.4 Bolsa de Ámsterdam

Paralelamente a Van de Velde y Berlage, Adolf Loos consideraba que la forma y el material eran la alternativa moderna al ornamento de la cultura clásica. En su ensayo “Ornamento y delito”, Loos relacionaba el ornamento con lo primitivo y lo delictivo, situando su origen en los tatuajes de las tribus papúas. Loos no juzgaba moralmente esa ornamentación que consideraba propia de la cultura de esas tribus pero impropia del hombre moderno, porque “lo que es natural para el papúa [...] resulta en el hombre

⁸² GIEDION. Op.cit., p. 305

moderno un fenómeno de degeneración” y, en consecuencia, concluía que “la evolución de la cultura es proporcional a la desaparición del ornamento de los objetos utilitarios.”

A pesar de las objeciones de carácter moral y cultural expuestas por Loos, su oposición al ornamento se fundamentaba en razones productivas y económicas, como los sueldos bajos que se pagaba a los oficios de talla y adorno o las largas jornadas laborales sin una retribución económica satisfactoria que tenía que soportar el artesano:

“Ornamento es fuerza de trabajo malgastada y, por ello, salud malgastada. Así fue siempre. Hoy, además, también significa material malgastado y ambas cosas significan capital malgastado”⁸³.

La reprobación del ornamento, por tanto, implicaba también el rechazo al trabajo artesanal.⁸⁴ De acuerdo con Loos, el “delito” del ornamento radica en el trabajo mal remunerado que se requería para producirlo.⁸⁵ Así, Loos prefería pagar cuarenta coronas por unos zapatos que valían treinta, pero solo si eran lisos,⁸⁶ sin adornos.

Loos no renegaba de las cualidades ornamentales de una obra, sino que las trasladaba de los elementos decorativos a la forma y la materia:

“Pero el artista, el arquitecto, siente primero el efecto que quiere alcanzar y ve después, con su ojo espiritual, los espacios que quiere crear [...] ese efecto viene dado por los materiales y por la forma”⁸⁷.

El “efecto” creado por el material correspondería al “placer” al que da lugar sin recurrir al juicio intelectual. Al considerarse un elemento que genera exclusivamente un efecto sensorial, se entiende que el ornamento deja de funcionar como medio de comunicación y, por consiguiente, deja de ser significativo. En este sentido, de acuerdo con Moussavi y Kubo, Loos habría rechazado la función social del ornamento:

“[...] para Loos el ornamento era un delito. En su opinión, las sociedades tradicionales los habían utilizado como medio de diferenciación, pero la sociedad moderna no tenía ninguna necesidad de enfatizar la individualidad, sino todo lo contrario, debía eliminarla. Por eso, para Loos la

⁸³ LOOS, A. *Ornamento y Delito*. En OPEL, A., y QUETGLAS, J. (Edits). *Adolf Loos. Escritos I 1897-1909*. Madrid: El Croquis, 1993, p. 351

⁸⁴ En este sentido Loos declaró: “al jornalero se le va arrebatando de las manos lentamente el poder, ya que se ha encontrado a alguien que produce el trabajo cuantitativo mejor y más barato: la máquina.” LOOS, A. *Dicho en el vacío 1897-1900*. Valencia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia, 2003, p.145

⁸⁵ Ibídem, p.144

⁸⁶ LOOS, A. *Ornamento y Delito*. Op.cit., p. 354

⁸⁷ LOOS, A. *Dicho en el vacío 1897-1900*. Op.cit., p. 150

ornamentación había perdido su función social y se había vuelto innecesaria”⁸⁸.

Pero, más allá de enfatizar la individualidad o la homogeneidad de la sociedad moderna, el sentido de la ornamentación en la arquitectura moderna, fundamentada en la forma y el material, respondía a un sistema de valores derivado del sistema de producción industrial, valores adoptados tanto por la sociedad como por la arquitectura moderna.

El vínculo que establece Loos con la industrial mediante la negación de la decoración inherente al trabajo artesanal, forma parte del proceso por el que la máquina devino el modelo estético de la arquitectura, en sustitución de la naturaleza. Mientras que la abstracción reemplazó la irregularidad de las formas naturales por las líneas rectas producidas mecánicamente, el nuevo sistema de valores priorizaba la utilidad, la eficiencia y la economía, o las cualidades ornamentales intrínsecas de las formas y los materiales producidos industrialmente, dando lugar al modelo mecánico bajo el cual operó la arquitectura moderna.

Con la sustitución de la naturaleza por la máquina como modelo estético, el movimiento moderno creó unas formas que respondían a los imperativos de la razón, es decir, a la eficiencia, la economía y la funcionalidad de los productos industriales. En la arquitectura digital la naturaleza retorna como modelo operativo, de manera que ya no se copia su apariencia por motivos estéticos, sino que se imitan sus procesos y cualidades intrínsecas para crear edificios más económicos, eficientes y funcionales.

⁸⁸ MOUSSAVI, F., y KUBO, M. *La función del ornamento*. Barcelona: Actar & Harvard Graduate School of Design, 2008. p. 6

4.1.2 De lo estético a lo operativo

4.1.2.1 De lo extrínseco a lo intrínseco

4.1.2.1.1 De la copia a la imitación

En la era digital la arquitectura ha vuelto su mirada hacia la naturaleza, pero bajo un enfoque diferente: la naturaleza deja de ser entendida como un modelo visual y se torna en un modelo abstracto. Esta concepción de la naturaleza se corresponde con el doble significado de la palabra “*forma*” en latín, que abarca dos términos griegos: *morphe*, en referencia a la forma sensible, y *éidos*, que se refiere a la forma conceptual.⁸⁹ El doble sentido del término ha perdurado a lo largo del tiempo, por ejemplo, en el concepto de “mímesis” de Platón que ilustra la diferencia entre lo particular y lo universal, entre la apariencia sensible y forma abstracta,⁹⁰ entre la forma visible y su proceso generativo. Igualmente, Aristóteles entendió la “*forma*” y la “*materia*” como dos componentes inseparables de la misma substancia y, al igual que Platón, entendió la forma como la estructura inteligible de las cosas, aunque encarnada en la materia.⁹¹ Así, Aristóteles concibió la forma como una potencia –virtual– inseparable de la materia, que busca realizarse en la forma actual.⁹²

En las teorías estéticas del siglo diecinueve, la diferenciación entre la forma sensible y la forma conceptual de la naturaleza, fue reformulada por Quatremère de Quincy, quien contrapuso la “imitación” a la “copia”.⁹³ Según Quatremère, la “repetición” consiste en la copia exacta de las apariencias de las formas naturales, de su imagen; la “imitación”, por otra parte, reproduce sus principios abstractos. Así, Quatremère planteó dos tipos de relación entre las formas artísticas y las de la naturaleza: una sensible, sobre todo visual, que atiende a sus cualidades extrínsecas y una inteligible, que se centra en la forma abstracta o patrón que subyace en la forma visible.⁹⁴

Las teorías de Quatremère tuvieron poca aceptación entre sus contemporáneos.⁹⁵ Pero en el debate sobre la arquitectura digital sus teorías adquieren nueva vigencia si las revisitamos bajo la luz de los modelos conceptuales desarrollados por el pensamiento sistémico y la cibernética. Las tecnologías digitales permiten aprehender, cuantificar y recrear las cualidades de la naturaleza de una manera que no es accesible a los sentidos. Gracias a ello, la arquitectura puede adoptar una visión más compleja de las cualidades abstractas de la naturaleza –*éidos*, forma conceptual, forma abstracta, principios formativos, leyes naturales– al poder codificarlas y procesarlas para convertirlas en inputs de un diseño. Así, mientras el movimiento moderno reemplazó la naturaleza por la máquina como modelo arquitectónico, la arquitectura digital la retoma como modelo, pero para asimilarla por medio de una máquina computacional.

⁸⁹ MADRAZO. Op.cit., p. 19

⁹⁰ Ibídем, pp. 58, 63

⁹¹ Ibídем, p. 20

⁹² Ibídем, pp. 20-21

⁹³ Ibídем, p. 193

⁹⁴ Ibídем, pp. 185-196

⁹⁵ FORTY. A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. Op.cit., p. 226

4.1.2.1.2 De la forma sensible a la conceptual

El abandono de la representación y su sustitución por la abstracción en el nuevo lenguaje plástico de Van Doesburg se basaron en dejar de copiar la forma aparente de la naturaleza para pasar a imitar los principios que subyacen en ella, tal como defendió Quatremère. La abstracción requerida para ello exige distinguir lo particular de lo universal y hacer suyo un lenguaje universal que la libera del carácter individual y multiforme de la naturaleza en favor del carácter absoluto y permanente de la geometría, con el fin de alcanzar una expresión plástica compuesta por elementos informes y a-significantes.⁹⁶

El diseño computacional también se basa en un lenguaje universal, pero en un lenguaje de programación y no en un lenguaje plástico; un lenguaje que, también, opera con elementos informes y a-significantes, pero cuya finalidad no es definir la forma aparente de una creación artística, sino capturar la estructura abstracta implicada en su forma. Van Doesburg dejó de copiar las formas aparentes que existen en la naturaleza para imitar los principios de su producción mecánica. De manera diferente, con el nuevo enfoque del retorno a la naturaleza como modelo arquitectónico, la imitación de la producción mecánica está siendo reemplazada por la imitación de los procesos de la producción natural; el interés pasa de la “tecnología mecánica”, que centra su atención en la estructura de las formas, a la “tecnología natural”, que centra su atención en los procesos determinantes de la formación y conservación de animales y plantas.⁹⁷

La transición desde una tecnología mecánica a una tecnología natural supone que los procesos de la naturaleza pasan a ser considerados el factor constituyente de la realidad, más allá de sus sustancias.⁹⁸ En este contexto, la tecnología natural imita los procesos de generación y conservación que el pensamiento sistémico ha formulado en términos de conectividad entre elementos y relaciones entre ellos y su entorno. Así, el edificio no se concibe como un objeto aislado, sino se diseña aplicando una lógica de interconexión que define su forma y su comportamiento en relación con el entorno. De este modo el interés del arquitecto se dirige hacia las cualidades fenomenológicas de la naturaleza, más allá de las meramente objetivas y adopta un enfoque conductista –no plástico– refrendado por la cibernetica, ciencia que se orienta hacia el control del comportamiento de máquinas, organismos y sistemas, aplicando el principio de retroalimentación (*feedback*). Según Wiener, la “retroalimentación” se define de la siguiente manera:

“[The] control of a machine on the basis of its actual performance rather than its expected performance is known as feedback”⁹⁹.

⁹⁶ Véase Capítulo 4.1.2

⁹⁷ MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. Op.cit., p. 83

⁹⁸ WHITEHEAD, A. N. The Concept of Nature. In WEINSTOCK, M. Morphogenesis and the Mathematics of Emergence. *Architectural Design*, 74 (3), 2004. p. 13

⁹⁹ WIENER, N. *The Human Use of Human Beings. Cybernetics and Society*. London: Free Association Books, 1989, p. 24

En el artículo “Behaviour, Purpose and Teleology”, Rosenblueth, Wiener y Bigelow definen el “comportamiento” como los cambios de un organismo causados por su entorno; cambios que pueden ser motivados por el propio organismo o responder a estímulos exteriores.¹⁰⁰ Cuando derivan del propio organismo, responden a un “comportamiento activo”, que a su vez se divide entre “comportamiento orientado” a un objetivo y “comportamiento no-orientado”. El comportamiento orientado está constituido por acciones voluntarias entre las que se deben distinguir las orientadas a la (Rosenblueth, Wiener, & Bigelow, 1943) retroalimentación –acciones teleológicas– y las no-orientadas a la retroalimentación.

Cuando un sistema se diseña teniendo en cuenta la retroalimentación, puede auto-regularse creando una disposición circular de elementos conectados donde la información del entorno –input– se propaga a través de los elementos del sistema hasta que la información del último –output– retroalimenta al primero.¹⁰¹ Esto implica un comportamiento “inteligente” del sistema, en la medida en que la información sobre el rendimiento pasado se utiliza para determinar acciones en el presente y generar información que incide sobre acciones futuras.¹⁰² De este modo se crea una lógica anticipatoria y adaptativa orientada a la modificación de los objetivos del sistema, respondiendo a la información que recibe del entorno. Así, según Terrence Deacon, se genera un sistema en el que “La inteligencia tiene que ver con la elaboración de respuestas adaptativamente relevantes a contingencias medioambientales complejas, de manera consciente o inconsciente”¹⁰³.

Los primeros efectos de la teoría de sistemas y la cibernetica sobre el pensamiento arquitectónico se plasmaron en *La significación arquitectónica de la cibernetica* (1969), de Gordon Pask, donde se plantea que “los arquitectos son, primero y ante todo, proyectistas de sistemas que se han visto forzados, a lo largo de más o menos los últimos cien años, a interesarse cada vez más por las propiedades organizativas (es decir, intangibles) de los sistemas de desarrollo, comunicación y control”¹⁰⁴ Bajo este punto de vista, el edificio se concibe como un sistema insertado en un ecosistema superior con el cual interactúa permanentemente.¹⁰⁵ Con ello, el funcionamiento del edificio incluye procesos de retroalimentación con el individuo, la sociedad y el medioambiente, procesos que se diseñan fijando un conjunto de normas de actuación.

¹⁰⁰ ROSENBLUETH, A., WIENER, N., & BIGELOW, J. Behavior, Purpose and Technology. *Philosophy of Science*, 10 (1), 1943, p. 18

¹⁰¹ CAPRA. Op.cit. p. 75

¹⁰² KUBO, M., y SALAZAR, J. Una breve historia de la era de la información. *VERB: Matters*, 2004, p. 3

¹⁰³ DEACON, T. *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia*. Barcelona: Tusquets, 2013. p. 502

¹⁰⁴ PASK, G. La significación arquitectónica de la cibernetica. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009. pp. 15-16

¹⁰⁵ Ibídem, p. 18

Pask propone el concepto de “mutualismo arquitectónico”, entendido como una característica dinámica del edificio,¹⁰⁶ un estado reactivo donde el edificio se comunica con el habitante –por un sistema de sensores y ordenadores que responden a estímulos visuales y táctiles– y responde automáticamente a sus necesidades, aplicando procesos de retroalimentación que le permiten al edificio aprender y adaptarse a los patrones comportamentales del usuario.¹⁰⁷ En el diseño de estos estados reactivos se imita el principio de *homeostasis*, es decir, se recrea el proceso de los organismos vivos para mantenerse en estado de equilibrio dinámico con su entorno.¹⁰⁸ En este sentido, el edificio se diseña como un organismo o sistema que intercambia información con su entorno para autorregular flujos de materia y energía. De esta manera, el edificio asimila a un organismo adaptativo y el espacio se entiende como un entorno interactivo.

La aplicación de la retroalimentación no se reduce a la auto-regulación comportamental del edificio. Según Pask, también puede usarse para generarlo, de acuerdo con el mutualismo arquitectónico: “Volvamos el paradigma del diseño sobre sí mismo, apliquémoslo a la interacción entre el diseñador y el sistema que diseña en lugar de a la interacción entre el sistema y la gente que lo habita”¹⁰⁹. De este modo, el mutualismo arquitectónico sugiere el agenciamiento del edificio y el entorno a través de una retroalimentación que regula su funcionamiento y el agenciamiento entre arquitecto y ordenador, derivado de la interacción entre el diseñador y el ordenado. Así, mientras la auto-regulación conlleva la interacción entre el sistema-edificio y su entorno, al plegar el mutualismo arquitectónico sobre sí mismo se produce una interacción entre el diseñador y el ordenador, interacción que determina el proceso organizativo desde el cual emerge la forma.

La auto-organización de un sistema implica la emergencia espontánea de orden por la conformación de nuevas estructuras y comportamientos determinados por bucles internos de retroalimentación.¹¹⁰ Para instrumentalizar estos bucles el diseñador debe describirlos con ecuaciones no-lineales que luego puedan ser procesados con ordenadores. Esto implica una nueva concepción y descripción de la naturaleza que Georg Vrachliotis explica en los siguientes términos:

“Since the age of cybernetics began, attempts have been made to use computer models to convert almost every natural dimension, every natural standard, every natural process into a mathematical model”¹¹¹.

¹⁰⁶ Ibídem

¹⁰⁷ Ibídem, pp. 24-25

¹⁰⁸ CAPRA. Op.cit., p. 77; WIENER. Op.cit., p. 135

¹⁰⁹ PASK. Op.cit., pp. 26-27

¹¹⁰ CAPRA. Op.cit., pp. 101-103

¹¹¹ VRACHLIOTIS, G. Flusser's Leap: Simulation in the Technical Thought in Architecture. In GLEINIGER, A., & VRACHLIOTIS, G. (Edits.). *Simulation: Presentation Technique and Cognitive Method*. Basilea; Boston; Berlín: Birkhäuser, 2008, p. 65

De acuerdo con Vrachliotis, bajo la influencia de la cibernetica, la naturaleza dejó de ser un modelo figurativo e idílico para tornarse en un modelo procesal y operativo, susceptible de ser modelado matemáticamente. En esta misma línea, Pask sostuvo que la labor del arquitecto es programar el comportamiento del edificio, al igual que hace el propio sistema, pero actuando en un nivel superior:

“el diseñador controla la construcción de los sistemas de control y, en consecuencia, el diseño es el control del control; es decir, que el diseñador hace prácticamente el mismo trabajo que su sistema, pero opera a un nivel más alto en la jerarquía organizativa”¹¹².

La cibernetica y la teoría de sistemas aportaron modelos conceptuales que condujeron a una re-conceptualización de la naturaleza desligada de su carácter trascendental y romántico.¹¹³ La arquitectura digital, por otra parte, interpreta la naturaleza mediante un modelo analítico-operativo,¹¹⁴ codificando sus leyes en ecuaciones y algoritmos que se computan para generar la forma o para controlar el comportamiento del edificio en interacción con el entorno.

4.1.2.2 De la abstracción a la simulación

“In the cybernetics age, a phenomenon is recognized as valid when it can be ‘constructed as a model in such a way that it possesses the same behavior as its prototype in all details, and even the same uncertainties’ without necessarily being a faithful imitation”¹¹⁵.

Erich Hörl

La cibernetica sentó las bases de la concepción operativa de la naturaleza, pero su instrumentalización en el diseño digital reside en las técnicas de simulación. Esto supone la transición de la “abstracción” hacia la “recreación” de la naturaleza, en la medida en que: “To ‘simulate’ simply means to re-create the phenomena of our lifeworld in computers by means of numeric *representations*”¹¹⁶. Así, la instrumentación de fenómenos naturales en el diseño arquitectónico parte de su codificación en fórmulas matemáticas, pero se hace efectiva en la interacción entre el

¹¹² PASK. Op.cit., p. 27

¹¹³ STERLING, B. En VAN MENSVOORT, K., & GRIVINK, H.J. (Edits.). *Next Nature: Nature changes along with us*. Barcelona: Actar, 2011. p. 15

¹¹⁴ VRACHLIOTIS. Op.cit., pp. 64-65

¹¹⁵ MOLES, A. Kybernetik, eine Revolution in der Stille. In HÖRL, E. *Knowledge in the Age of Simulation: Metatechnical Reflections*. In GLEINIGER, A., & VRACHLIOTIS, G. (Edits.), *Simulation: Presentation Technique and Cognitive Method*. Basel: Birkhäuser, 2008. p. 94

¹¹⁶ GRAMELSBERGER, G. The Epistemic Texture of Simulated Worlds. In GLEINIGER, A., & VRACHLIOTIS, G. (Edits.), *Simulation: Presentation Technique and Cognitive Method*. Basel: Birkhäuser, 2008, p. 83

edificio y su entorno. En este contexto, según Picon, “la forma arquitectónica se convierte en algo parecido a un acontecimiento”¹¹⁷.

Entender la forma del edificio como acontecimiento es el reflejo de una “transición epistémica” en la cual la producción de conocimiento dejó de basarse en la “representación” para hacerlo en la “simulación”.¹¹⁸ Un cambio que se inició en la segunda mitad del siglo XX, cuando los fenómenos naturales se reproducían con modelos matemáticos para simular su comportamiento. Esto requirió asumir las incertidumbres y contingencias de la naturaleza, codificarlas en fórmulas matemáticas e introducir la dimensión temporal en su representación para recrear sus patrones organizativos y de comportamiento. De este modo, se racionalizó la concepción de la naturaleza y, por consiguiente, se produjo un “desencantamiento” correspondiente al principio de racionalización que predomina en la sociedad moderna.¹¹⁹

Bajo este desencantamiento se empezó trabajar con modelos climáticos y estructuras moleculares a fin de optimizar sistemas constructivos o desarrollar estructuras formalmente complejas y procesos interactivos.¹²⁰ Desligándose de la imagen trascendental de la naturaleza para instrumentalizar sus procesos, la arquitectura estableció una relación que tuvo repercusiones similares a lo que Baudrillard describe como la “desilusión” del cine: “La ilusión se marchó en proporción a esa tecnicidad, a esa eficiencia cinematográfica. El cine actual ya no conoce ni la alusión ni la ilusión: lo conecta todo de un modo hipertécnico, hipereficaz, hipervisible.”¹²¹ Sin la “ilusión” inherente a la concepción romántica de la naturaleza, sin su imagen figurativa cargada de simbolismo, la arquitectura adoptó una visión operativa que orientó su interés hacia los sistemas dinámicos no-lineales.

La simulación digital implicó una transición desde la imagen estática-iconográfica de la naturaleza hacia la recreación de sus acciones en el espacio-tiempo, con lo que modificó la relación entre arquitectura y naturaleza bajo dos aspectos: se pasó de una aprehensión primordialmente visual a una más compleja, que incluye otros sentidos, y dejó de representar su apariencia para centrarse en la codificación y procesamiento de sus estructuras y comportamiento intrínseco.

¹¹⁷ PICON, A. Arquitectura, ciencia, tecnología y el reino de lo virtual. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009. p. 135

¹¹⁸ HÖRL. Op.cit., p. 94

¹¹⁹ WEBER, M. *La ética protestante y el espíritu del capitalismo*. Barcelona: Brontes, 2012. p.53

¹²⁰ VRACHLIOTIS. Op.cit. p. 63

¹²¹ BAUDRILLARD. Op.cit. p. 14

4.1.2.2.1 De lo visual a lo operacional

“Mide lo medible y haz medible lo que no lo sea”¹²².

Galileo Galilei

Según su etimología, “perspectiva” significa visión clara y a través.¹²³ Un significado que manifiesta la máxima de Galileo, quien excluyó de la ciencia todo aquello que no pudiera visualizarse y cuantificarse, condujo a la “desaparición” del fenómeno.¹²⁴ Pero el advenimiento de la transparencia mediática permitió ver más allá de las limitaciones espaciales y físicas de la realidad objetiva y material,¹²⁵ de modo que fue posible aprehender los procesos naturales a través de “un espacio nuevo, un espacio de fenómenos que sólo podían visualizarse a través del uso de pantallas, mapas y diagramas”¹²⁶. La arquitectura digital sigue operando bajo postulados que se establecieron durante la revolución científica, pero su concepción de la naturaleza es diferente debido a las categorías visuales y perceptivas facilitadas por la transparencia mediática:

“Por un lado, vemos a una escala mucho más amplia que nuestros antecesores inmediatos mediante los satélites y los modelos informáticos. Por otro, somos capaces de observar microestructuras como si estuviesen ante nuestros ojos”¹²⁷.

Estas categorías visuales corresponden a la concepción de la naturaleza que se formó a mediados del siglo XX, a partir de la teoría de sistemas y de la ingeniería genética. De acuerdo con Philip Ursprung, la visión de la naturaleza estuvo influenciada por las fotografías de nuestro planeta obtenidas durante el viaje lunar en 1968, que mostraban la naturaleza como un sistema autónomo, finito y vulnerable. Según Ursprung:

¹²² GALILEI, G. Carta a la gran duquesa Cristina. En CHAMBERS, S. & COSTAIN, A. (Edits.). *Deliberation, Democracy, and the Media*. New York: Rowman & Littlefield, 2000, p. 207

¹²³ Según Frampton: “According to its etymology, perspective means rationalized sight or clear seeing, and as such it presupposes a conscious suppression of the senses of smell, hearing and taste, and a consequent distancing from a more direct experience of the environment.” FRAMPTON, K. *Labour, work and architecture*. New York: Phaidon, 2002, p. 89. Esta racionalización de la vista se dio en la medida en que la perspectiva supuso la representación de la tercera dimensión en el espacio bidimensional, gracias a la regulación del espacio pictórico en una retícula de coordenadas verticales y horizontales donde los elementos quedan relacionados por un sistema uniforme. GÄNSHIRT, C. *Tools for Ideas. An Introduction to Architectural Design*. Basilea, Boston, Berlín: Birkhäuser, 2007, pp. 160-168. Así, la perspectiva significó ser una herramienta de diseño para racionalizar el espacio que, no solo aportó precisión científica a la representación gráfica –desde la coordinación de la distancia, el tamaño y el movimiento–, sino que sentó las bases de la lógica y del sistema de coordenadas que regula el espacio cartesiano. De este modo, la perspectiva transformó el sentido del espacio pictórico, ya que –si anteriormente los elementos se organizaban según una jerarquía de valores– con la perspectiva la relación simbólica de los objetos se tornaba en una relación visual al mismo tiempo que convertía lo visual en una relación cuantitativa, pues los objetos quedaban introducidos en y regulados por un sistema de magnitudes. MUMFORD, L. *Técnica y Civilización*. Madrid: Alianza, 1997, p. 6

¹²⁴ Véase Capítulo 4.1.1

¹²⁵ Véase Capítulo 2.2.1

¹²⁶ PICON. Op.cit., p. 133

¹²⁷ Ibídem, p. 138

“El término ‘naturaleza’ fue sustituido pues por la idea de sistemas holísticos y equilibrios de fuerzas de los que el hombre formaba parte, pero cuyo futuro también podía ayudar a conformar”¹²⁸.

La visión de la naturaleza como sistema también se vio impulsada con el surgimiento de grupos ambientalistas que rechazaron la división categórica entre lo “natural” y lo “artificial”, al entender que la naturaleza primaria y la segunda naturaleza creada por la humanidad son parte de un mismo sistema.¹²⁹ La arquitectura intentó responder a esta visión eco-sistémica, y se preocupó de los efectos medioambientales que genera el consumo de recursos materiales y energéticos en la construcción y el funcionamiento de los edificios. En consecuencia, la arquitectura fue entendida como una práctica que influye considerablemente sobre el futuro del planeta, al mismo tiempo que el edificio empezó a evaluarse de acuerdo con el impacto que genera en el ecosistema del que forma parte.¹³⁰

Por otra parte, la visualización y comprensión de la estructura de la naturaleza a escala microscópica, cuyo paradigma es la estructura del ADN descubierta por James Watson y Francis Crick, facilitó esta reformulación de la naturaleza. De acuerdo con Ursprung, a partir de la visualización del ADN surgió una nueva relación entre diseño y naturaleza, ya que la estructura de doble hélice “se convirtió en el nuevo emblema de la naturaleza”¹³¹ y permitió descodificar su lenguaje para dominarla.¹³² La ingeniería genética permitió “la decodificación, manipulación y reprogramación final de los códigos de información de la materia viva”¹³³ y, gracias a ello, fue posible instrumentalizar la composición de la materia como input de diseño y los procesos formativos y regulativos de la naturaleza. Después del descubrimiento de la estructura del ADN, la naturaleza fue entendida como un sistema dinámico del cual pueden extraerse sus principios generativos, organizativos y adaptativos para que puedan ser aplicados al diseño arquitectónico:

“[...] el proceso creció para convertirse en algo más importante que el producto, el sistema en algo más importante que la forma y el acontecimiento en algo más importante que el objeto”¹³⁴.

¹²⁸ URSPRUNG, P. La doble hélice y el planeta azul: la visualización de la naturaleza en el siglo XX. En ÁBALOS, I. (Ed.). *Naturaleza y artificio: el ideal pintoresco en la arquitectura y el paisajismo contemporáneos*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009. p. 247

¹²⁹ FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. Op.cit., p. 238

¹³⁰ Ibidem, pp. 238-239

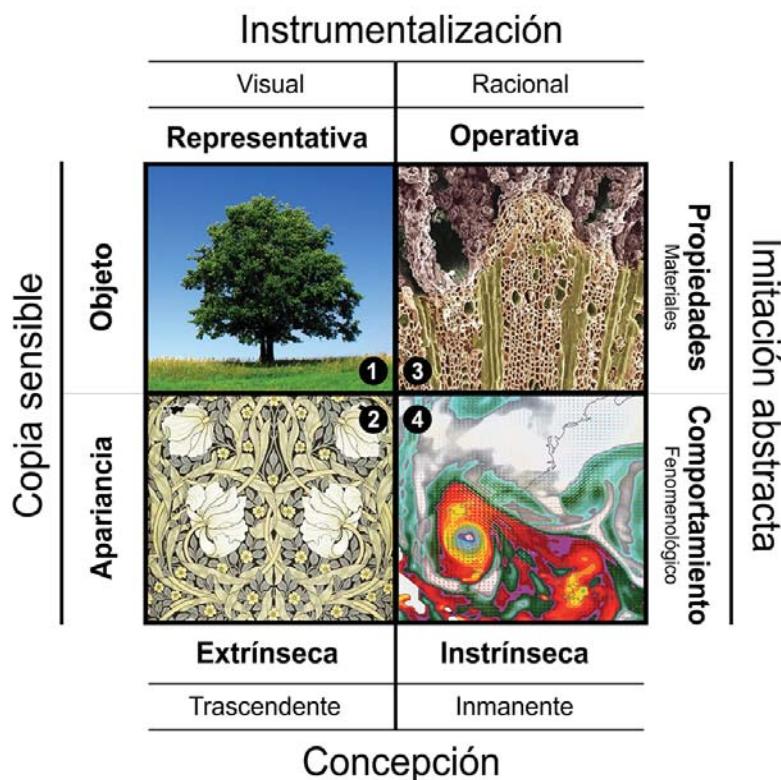
¹³¹ URSPRUNG. Op.cit., p. 246. La descripción de la estructura del material genético (ADN) de Watson y Crick fue en 1953, pero esta se popularizó en 1968 cuando Watson publicó “La doble hélice”.

¹³² URSPRUNG. Op.cit., p. 247

¹³³ CASTELLS, M. *La era de la información: economía, sociedad y cultura* (Segunda ed., Vol. I. La sociedad red). Madrid: Alianza, 2000, p. 60

¹³⁴ URSPRUNG. Op.cit. p. 248

En la época de la genética y la cibernetica es posible comprender la naturaleza más allá de sus cualidades objetivas y visuales, para concebirla como un eco-sistema del cual interesa conocer las propiedades y el comportamiento que emerge de las relaciones entre objetos, más allá de los objetos en sí (Figura 4.5). De acuerdo con Tomás Maldonado, esto representa la suplantación del concepto de “función” por el de “comportamiento”, la sustitución del concepto de “órgano” por el de “red” y la transición de lo “lineal” hacia lo “no-lineal”.¹³⁵ Así, en los años 1960 se inició un alineamiento de la arquitectura con la ciencia que cristalizó en la “biomimética”, una relación entre arquitectura y naturaleza a partir de la ciencia que estudia los modelos naturales para imitarlos e inspirarse en sus diseños y procesos a fin de resolver problemas de los seres humanos.¹³⁶ En el ámbito de la teoría arquitectónica, Alberto Estévez ha acuñado el término “arquitecturas genéticas” para referirse a esta nueva relación que la arquitectura establece con la naturaleza, que respondería a un “organicismo digital [que] es la vanguardia arquitectónica de los primeros años del siglo XXI”,¹³⁷.



Leyenda: 1) Imagen de árbol. 2) Patrón decorativo de William Morris.
3) Estructura interna de la madera. 4) Simulación de fenómeno climático

Figura 4.5 La naturaleza como modelo arquitectónico

¹³⁵ “In terms of Maldonado’s demonstration, this means: the concept of function has been supplanted by that of behavior, the object-like organ by the concept of the network, and the linear by the non-linear.” VRACHLIOTIS. Op.cit., p.75

¹³⁶ BENYUS, J. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: Harper Perennial, 2002. p.1

¹³⁷ ESTÉVEZ, A. *Arquitecturas genéticas II: medios digitales y formas orgánicas*. Barcelona: SITES Books / ESARQ, 2005. p.19

Con el recurso a la biomímesis la arquitectura digital adopta un “diseño ecológico” de bases científicas,¹³⁸ orientado a la optimización de la forma y el comportamiento del edificio. Por ejemplo, mediante los procesos biodinámicos se estudia como la naturaleza minimiza el uso de materiales, y cómo consigue optimizar su resistencia al ensamblarlos de un modo anisótropo mediante la combinación de geometrías diversas organizadas jerárquicamente (Figura 4.6).¹³⁹ Así vista, la naturaleza deja de ser considerada un modelo de belleza para pasar a ser un modelo de eficiencia productiva y funcional:

“The study of the organization of material and biological structures has, until recently, proceeded from the widely accepted view that evolution develops –over very long time periods– optimized, efficient and strong structures”¹⁴⁰.

La biomímesis no solo sugiere una relación de carácter operativo entre arquitectura y naturaleza, sino que tiene en cuenta además la dimensión temporal y la interacción del objeto arquitectónico con su entorno. Este *modelo sistémico* de la naturaleza atiende a su funcionamiento y organización interna, a sus fenómenos además de su materia, para establecer con ella una relación instrumental más que metafórica y, así, dejar de ser considerada un modelo visual para ser considerada un modelo operacional.

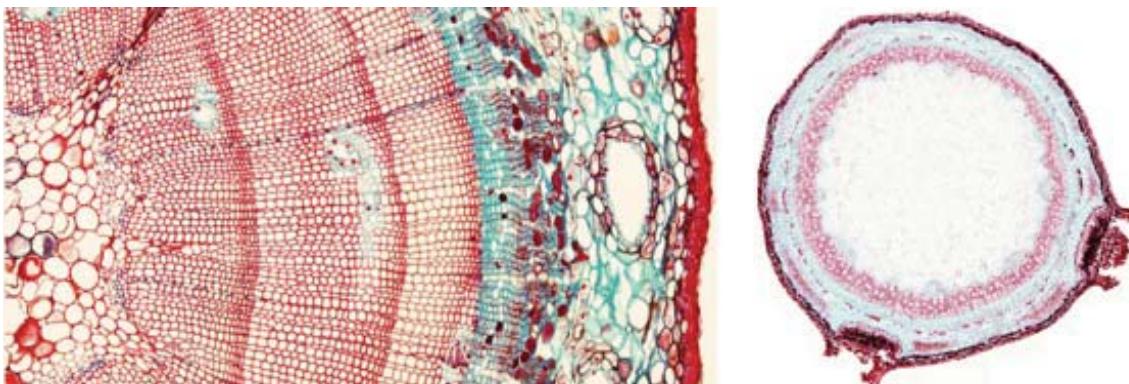


Figura 4.6 Organización anisótropa de tallo secundario de *gimnosperma* y de tallo secundario de *dicotiledónea sambuco*

La sustitución de la imagen de la naturaleza por la recreación de su comportamiento significa, en términos de Baudrillard, la “des-imaginación de la imagen” de la naturaleza. Según Baudrillard, esto conlleva prescindir de la posibilidad de ilusión, ya que “una imagen es justamente una abstracción del mundo en dos dimensiones, es lo que quita una dimensión al mundo real e inaugura, de ese modo, la potencia de la

¹³⁸ “Biomimetics considered as a biological design science promotes research in several fields relevant to morphogenetics in architecture and ecological design.” OXMAN, R., & OXMAN, R.. *Theories of the Digital in Architecture*. Londres; Nueva York: Routledge, 2014, p. 193

¹³⁹ JERONIMIDIS, G. Biodynamics. (HENSEL, M., MENGES, A., & WEINSTOCK, M. Edits.).

Emergence: Morphogenetic Design Strategies, 74 (3), 2004, p. 92

¹⁴⁰ WEINSTOCK, M. Self-Organization and Material Constructions. (CASTLE, H. Ed.) *Architectural Design*, 76 (2), 2006. p. 27

ilusión”¹⁴¹. Pero el ordenador nos hace “entrar en la imagen, [y] al recrear una imagen realista en tres dimensiones (agregando incluso una especie de cuarta dimensión a lo real para volverlo hiperreal), destruye esa ilusión”¹⁴². Es decir, la imagen deja de ser solo imagen y se convierte en imagen de síntesis o imagen numérica,¹⁴³ visible en las pantallas.

4.1.2.2.2 De la imagen al código

“Although Cartesian dualism is no longer a viable philosophical model, faith in mathematics and logic as the only legitimate way of thinking is still commonplace.”¹⁴⁴

Alberto Pérez-Gómez

“Vilém Flusser diagnosed not only the progressive digitization of visual media, but also the mathematicization of the technical-scientific world. Both aspects seem to virtually fuse at the level of the modeling and visualization of numerical simulation”¹⁴⁵.

Georg Vrachliotis

La ciencia ha “matematizado” nuestra visión del mundo a partir del Renacimiento¹⁴⁶ y esta matematización ha obligado a que la arquitectura replanteé su relación con la naturaleza. Entre los siglos XIX y XXI se ha pasado de considerar a la naturaleza como la representación iconográfica de la belleza, a su codificación matemática para simular su comportamiento. Como resultado de esta transición, las cualidades trascendentales de la naturaleza han sido reemplazadas por modelos que explican su funcionamiento; su imagen romántica –modelo para la arquitectura– por procesos algorítmicos para generar formas y evaluar sus prestaciones. Los arquitectos modernos otorgaron un sentido simbólico a la geometría y a las matemáticas, pero con la tecnologías digitales estas pasan a ser instrumentos para diseñar la forma de un edificio y simular su comportamiento.

Desde el Renacimiento las matemáticas sirvieron para representar con precisión la realidad física, de modo que las connotaciones metafísicas, místicas y trascendentales que mantuvo en la Antigüedad empezaron a ser ignoradas.¹⁴⁷ Según Pérez-Gómez¹⁴⁸, el concepto de *mathesis* que surge en la cultura griega en torno al siglo VII a. C. se refería a lo que podía ser aprehendido: lo invariable, lo familiar, lo accesible y su expresión era el número. El número simbolizó lo invariable en un plano abstracto, mientras que en la

¹⁴¹ BAUDRILLARD. Op.cit., pp. 15-16

¹⁴² Ibidem

¹⁴³ Ibidem

¹⁴⁴ PÉREZ-GÓMEZ. Op.cit., pp. 6-7

¹⁴⁵ VRACHLIOTIS. Op.cit., p. 67

¹⁴⁶ GRAMELSBERGER. Op.cit., p. 85

¹⁴⁷ PÉREZ-GÓMEZ. Op.cit., p. 4

¹⁴⁸ Ibídem, pp. 8-10

esfera sensible este papel lo cumplían los sistemas lógico-matemáticos utilizados por la astrología para aprehender el cosmos. Estos sistemas estaban ordenados por reglas que mantuvieron un carácter simbólico a lo largo de la historia, por cuanto encarnaban un conocimiento vinculado al orden trascendental del cosmos. Así, el vínculo entre la arquitectura y las matemáticas abarcaba cuestiones metafísicas que llevaban implícitas las leyes astrológicas.

Tras la revolución científica, con el consecuente tránsito de la astrología a la astronomía, el carácter simbólico de la geometría y las matemáticas fue alterado por una concepción del universo en que los fenómenos complejos del cosmos y de la naturaleza dejaron de ser nociones especulativas explicadas por mitos y creencias y se convirtieron en sucesos repetibles, mesurables y predecibles.¹⁴⁹ Así se tomó conciencia de la capacidad humana para conocer la naturaleza por medio de instrumentos técnicos que permiten reducir la realidad a leyes y conceptos racionales deducidos científicamente.¹⁵⁰ En este contexto, las cualidades trascendentales de la forma arquitectónica, explicadas hasta ahora en términos metafóricos, fueron paulatinamente descritas en términos de operaciones geométricas o matemáticas libres de cualquier significado simbólico.¹⁵¹ El rechazo absoluto de las cualidades místicas del número y la geometría cristalizó con la metodología de diseño de Durand:

“[...] number and geometry finally discarded their symbolic connotations. From now on, proportional systems would have a character of technical instruments, and geometry applied to design would act merely as a vehicle for ensuring its efficiency”¹⁵².

Y por ello:

“Geometry and mathematics were now purely formal disciplines, devoid of meaning, value or power except as instruments, as instruments of technological intentionality”¹⁵³.

Los arquitectos comenzaron a considerar su disciplina en términos técnicos. Los problemas de diseño podían resolverse con ayuda de dos herramientas conceptuales: el número y la geometría.¹⁵⁴ Pero, en los inicios del siglo XX, las vanguardias modernas intentaron restituir su carácter simbólico. Por ejemplo, el Purismo argumentaba que la

¹⁴⁹ MUMFORD, L. *El Pentágono del Poder. El Mito de la Máquina*, Volumen 2. Logroño: Pepitas de Calabaza, 2011, p. 48

¹⁵⁰ Al reconocer su autonomía para llegar al conocimiento, según Lewis Mumford: “los hombres reanudaban su búsqueda de la salvación no en el cielo sino en la tierra; y no aspiraban a mejorar su situación mediante [...] la gracia divina, sino por sus propios esfuerzos, agotadores y sistemáticos”. Ibídem, p. 68. Asimismo, con la sustitución de la fe religiosa por la fe científica, el científico se convirtió en el mediador que “mantiene la humanidad con algo que está más allá de sí misma”. RORTY, R. *Objetividad relativismo y verdad*. Barcelona: Paidós, 1996, p. 57.

¹⁵¹ PÉREZ-GÓMEZ. Op.cit., pp. 6-7

¹⁵² Ibídem, p. 311

¹⁵³ Ibídem, p. 11

¹⁵⁴ Ibídem, pp. 10-11

“sensación plástica” está provocada por el orden matemático¹⁵⁵ y aludía a la “sana moralidad” de las formas rectangulares,¹⁵⁶ mientras que el Neoplásticismo entendió que “la arquitectura se separa más y más de lo arbitrariamente –caprichoso y desordenado– pintoresco, para dirigirse cada vez más hacia [...] el orden matemático”¹⁵⁷. Van Doesburg entendió que el orden matemático se alcanzaba utilizando geometrías rectas.¹⁵⁸ Así, Neoplásticismo y Purismo dieron un sentido moral y trascendental a las geometrías simples.

Como expuso Banham, la geometría y las matemáticas tuvieron un valor trascendental para la arquitectura moderna: los sólidos regulares simbolizaban la exactitud de la producción mecánica y las matemáticas dotaban a las creaciones de la arquitectura de un “prestigio tecnológico”¹⁵⁹ Sin embargo, Buckminster Fuller sostenía que la arquitectura internacional, derivada del movimiento moderno, mantuvo un vínculo superficial con la ciencia y la tecnología, ya que la simplificación geométrica de los edificios modernos no respondía a principios científicos sino al atractivo comercial de su imagen de modernidad para la sociedad moderna.¹⁶⁰

En nuestra época, Weinstock critica la fundamentación pseudocientífica de la arquitectura y plantea la necesidad de un enfoque matemático más profundo para desarrollar una arquitectura digital. Primero, porque la superación de las geometrías ortogonales, a las que obliga la producción mecanizada, requiere de mayor precisión en la definición formal para poder trabajar con tecnologías de fabricación digital. Segundo, porque la complejidad formal, que facilita el CAD, debe partir del control y del rigor matemático. Tercero, para evitar la proliferación de procesos de diseño que presumen de seguir una metodología científica, pero carecen de instrumentos matemáticos e integridad teórica.¹⁶¹

El rigor matemático permite controlar la complejidad formal en el diseño digital, describiendo las relaciones entre los elementos para poder procesarlos. Así, la geometría de una forma biológica o computacional no se reduce a la descripción de su figura, sino a la codificación de los principios y operaciones de su proceso formativo.¹⁶² Esta instrumentación de la naturaleza, según Vrachliotis, se lleva a cabo mediante las técnicas de simulación digital.¹⁶³ Además, según Weinstock, requiere nuevos conceptos y protocolos de diseño:

“The task for architecture is to delineate a working concept of emergence and to outline the mathematics and processes that

¹⁵⁵ OZENFANT & JEANNERET. Op.cit., pp. 55, 69

¹⁵⁶ Véase Capítulo 3.2.1

¹⁵⁷ VAN DOESBURG. Op.cit., p. 94

¹⁵⁸ Véase Capítulo 4.2.1

¹⁵⁹ BANHAM. Op.cit., pp. 319-320

¹⁶⁰ BUCKMINSTER FULLER, R. En BANHAM. Op.cit., p. 317

¹⁶¹ WEINSTOCK, M. *Morphogenesis and the Mathematics of Emergence*. Op.cit., pp. 11-12

¹⁶² Ibídem, p. 14

¹⁶³ VRACHLIOTIS. Op.cit., p.67

can make it useful to us as designers. This means we must search for the principles and dynamics of organization and interaction, for the mathematical laws that natural systems obey and can be utilized by artificial constructed systems”¹⁶⁴.

La codificación de los principios y procesos organizativos desde los cuales emergen las formas naturales, para que puedan ser aplicados como inputs de diseño computacional obliga, según Weinstock, a la matematización de la práctica y la teoría arquitectónica contemporánea. En consecuencia, más allá de la abstracción visual, el diseño computacional requiere una abstracción no-visual basada en principios matemáticos; esto es, una abstracción basada en un lenguaje a-significante –números, fórmulas, algoritmos– que el ordenador puede procesar. De este modo se reemplazan las cualidades figurativas de la naturaleza por su codificación.¹⁶⁵ Por ejemplo, en la simulación del pensamiento humano no se representa el cerebro en la forma que estamos acostumbrados a verlo, sino que se define en códigos matemáticos para recrear la actividad neuronal de manera computacional (Figura 4.7).

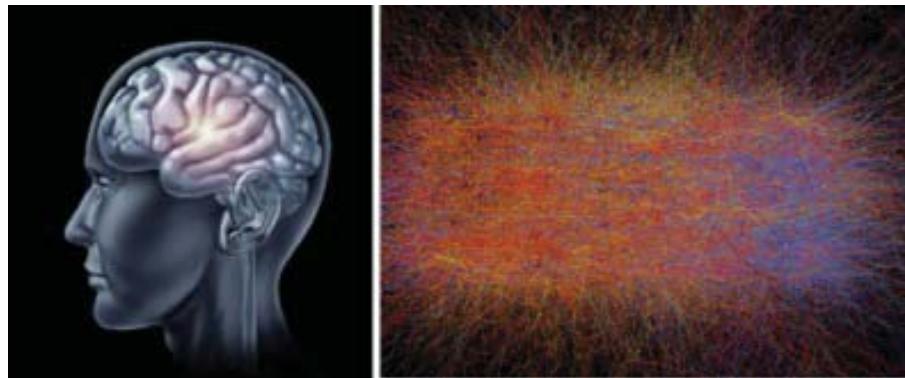


Figura 4.7 Representación figurativa y abstracta del pensamiento humano

Las imágenes generadas por una simulación digital se basan en datos, teorías científicas y modelos matemáticos. Así, más allá de las imágenes figurativas generadas por una simulación, lo que interesa son los datos, teorías y modelos que las soportan, ya que aportan el conocimiento –datos e información– para operar y tomar decisiones de diseño que pueden valorarse matemáticamente. En este sentido, la simulación digital conduce al “fin de la representación”. Según Baudrillard “hay dos formas de escapar de la trampa de la representación: por su deconstrucción interminable [o] saliendo sencillamente de la representación, olvidando todo afán de lectura, de interpretación, de desciframiento, olvidando la violencia crítica del sentido y del contrasentido”¹⁶⁶ La arquitectura moderna representa la primera forma de escupar la trampa de la representación, al descomponer las formas naturales en figuras geométricas ortogonales. La arquitectura digital consuma el segundo escape de la representación. En primer lugar, porque, al emplear procesos de simulación, ignora la imagen aparente de las

¹⁶⁴ WEINSTOCK, M. *Morphogenesis and the Mathematics of Emergence*. Op.cit., p. 11

¹⁶⁵ GRAMELSBERGER. Op.cit., pp. 84-85

¹⁶⁶ BAUDRILLARD. Op.cit., p. 43

formas y se centra en “proporcionar un conjunto de restricciones que permitan ciertos modos de evolución”¹⁶⁷. En segundo lugar, porque los datos y las imágenes generadas con técnicas digitales eluden una lectura crítica.

La simulación facilita un nuevo modo de valorar un proyecto arquitectónico, centrándose en la consecución de resultados medibles y cuantificables.. Con la simulación digital se deja de lado la valoración estética para centrarse en la evaluación cuantitativa.

4.1.2.3 Del nacimiento al crecimiento

“The role of the architect here, I think, is no so much to design a building or a city as to catalyze them: to act that they may evolve”¹⁶⁸.

Gordon Pask

El término “naturaleza” tiene su raíz en el término latino *natura*, cuyo sentido deriva de la palabra griega *physis*, que significó “crecimiento”. Posteriormente, los romanos asociaron el término *natura* a todo lo que se origina por “nacimiento”, siendo este el significado que ha predominado en la cultura occidental y que opone lo “natural” a lo “hecho” por los seres humanos, lo natural a lo cultural.¹⁶⁹ Como exponen Koert van Mensvoort y Hendrik-Jan Grievink, con la ingeniería genética y el control climático se ha debilitado la distinción entre “lo hecho artificialmente” y “lo que nace naturalmente”. Los términos “naturaleza” y “cultura” dejan de diferenciar “lo nacido” de “lo fabricado” para distinguir “lo controlable” de “lo incontrolable”. Así, la noción de “naturaleza” que prevalece en la actualidad, retorna al significado original de “crecimiento”.¹⁷⁰

La idea de “crecimiento” subyace tras los principios del diseño evolutivo, en el cual se considera que los objetos no son diseñados por humanos sino que evolucionan en un modelo digital que reproduce las leyes evolutivas de la naturaleza.¹⁷¹ La concepción e instrumentación de la naturaleza, que se dan en el diseño evolutivo, pueden remitirse al término alemán “Gestaltung” que –según Mertins– se utilizó para referirse de un modo simultáneo a la “forma” y al “proceso de formación”, al proceso auto-generativo por el que emerge la forma aparente.¹⁷² El diseño evolutivo comprendería la forma sensible de un objeto –su apariencia– y la forma abstracta que percibe el intelecto, es decir, la “Gestalt”. El término alemán “Bildung” haría referencia al proceso que da lugar a la

¹⁶⁷ PASK. Op.cit., p. 25

¹⁶⁸ PASK, G. In FRAZER, J. *An Evolutionary Architecture*. London: Architectural Association, 1995. p. 7

¹⁶⁹ VAN MENSVOORT & GRIVINK. Op.cit., p. 13

¹⁷⁰ Ibídem.

¹⁷¹ BENTLEY, P. *Evolutionary Design by Computers*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999, p. 1-2

¹⁷² “Gestaltung, which was used in technical discourse as well as aesthetics and biology and referred simultaneously to form and the process of formation.” MERTINS. Op.cit., p. 170

forma.¹⁷³ En este sentido, el diseño evolutivo sería la manifestación de un proceso generativo basado en una forma prototípica, tal como ocurría, según Goethe, con la planta originaria – “Urpflanze”– que subyacía en todas las creaciones de la naturaleza:

“The archetypical plant will be the strangest growth the world has ever seen [...] With such a model, and with the key to it in one’s hands, one will be able to contrive an infinite variety of plants. They will be strictly logical plants – in other words, even though they may not actually exist, they could exist.”¹⁷⁴

Con la ingeniería genética, lo que Goethe planteó como una “planta arquetípica”, se correspondería con el ADN, puesto que contiene las instrucciones que controlan el proceso de crecimiento de las formas naturales. El diseño evolutivo imita los mecanismos que tiene la naturaleza para generar organismos a partir de un código genético.

4.1.2.3.1 De la evolución natural a la computacional

La imitación del comportamiento simbiótico y el equilibrio metabólico del ambiente natural en el ambiente construido constituye la base la “arquitectura evolutiva” propuesta por Frazer, quien considera la arquitectura como una forma de “vida artificial”, sujeta, al igual que en la naturaleza, a principios morfogenéticos, códigos genéticos y a procedimientos de replicación y selección.¹⁷⁵ Frazer propuso un “modelo evolutivo para la arquitectura”, en donde la evolución natural devendría en proceso generativo de la forma arquitectónica¹⁷⁶ y lo definió en estos términos:

“El modelo evolutivo requiere un concepto arquitectónico para que pueda ser descrito en forma de ‘código genético’. Un programa informático muta y desarrolla este código en una serie de modelos que responden a un entorno simulado. Más tarde se evalúan los modelos en dicho entorno y se utiliza el código de aquellos que funcionan bien para repetir el ciclo hasta que se selecciona un estado particular de desarrollo que genere un prototipo en el mundo real.”¹⁷⁷

Para aplicar el modelo evolutivo al diseño arquitectónico, es necesario definir:

¹⁷³ FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. Op.cit., p. 149; MENGES, A. Material Systems, Computational Morphogenesis and Performative Capacity. In OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture*. New York: Routledge, 2014. p. 197

¹⁷⁴ GOETHE, J. W. In FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. Op.cit., 2000, p. 155

¹⁷⁵ FRAZER. Op.cit., p. 9

¹⁷⁶ Ibídem.

¹⁷⁷ FRAZER, J. Un modelo natural para la arquitectura. La naturaleza del modelo evolutivo. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009. p. 30

“un guión de código genético, normas para el desarrollo del código, traducción del código a un modelo virtual, la naturaleza del entorno para el desarrollo del modelo y, sobre todo, criterios de selección”¹⁷⁸.

Por consiguiente, el primer paso para aplicar este modelo consiste en la codificación del concepto arquitectónico, en describir el “concepto en términos de normas generativas”¹⁷⁹, donde las “normas son constantes, pero el resultado varía en función de los materiales o las condiciones ambientales”¹⁸⁰. El concepto arquitectónico se despoja así de sus atributos culturales y se convierte en un modo de hacer libre de interpretación. Así, según Frazer, el concepto de “crecimiento” –entendido como acción y el efecto del trabajo realizado por un organismo sobre sí mismo– puede instrumentalizarse en el diseño a través del cálculo computacional: “The growth of an organism and the evolution of species are at the same time processes of calculation, of becoming and of design”¹⁸¹.

Esta arquitectura evolutiva deriva de las leyes naturales, a partir de las que se establecen metodologías de diseño para generar la forma. Estos principios de diseño son congruentes con la teoría de sistemas, la cibernetica, la biología evolutiva y la genética; ciencias todas ellas de las que la arquitectura evolutiva toma prestados modelos y teorías para aplicarlos computacionalmente en el proceso de diseño.

La “computación evolutiva”, de acuerdo con Bentley,¹⁸² se centra en la búsqueda de alternativas por medio de algoritmos para encontrar la mejor solución en un “espacio de búsqueda” que contiene todas las posibles soluciones a un problema. Los algoritmos de búsqueda se inspiran en los procesos evolutivos de la naturaleza, de modo que la búsqueda se realiza haciendo evolucionar diversas soluciones simultáneamente. Pero la evolución no se especifica en el algoritmo, sino que es una propiedad emergente. Es decir, el algoritmo se programa para que evolucione, generando y manteniendo una “población” de soluciones, dentro de las cuales las mejores tienen “descendencia” y las peores “mueren”. Las soluciones “crías” heredan las características de sus “parientes” pero con variaciones aleatorias. Este ciclo, según el cual las mejores “crías” sobreviven y crean descendencia, se repite hasta alcanzar una solución óptima. Así, la “evolución del diseño” consiste en generar nuevas soluciones mutando las existentes y en aplicar un criterio de selección que elimine las que menos satisfacen los objetivos de diseño y que haga permanecer las mejores para que tengan descendencia. En el proceso de selección, cada solución se evalúa para determinar su “aptitud”, es decir, el grado de satisfacción de los objetivos preestablecidos.

¹⁷⁸ Ibídem

¹⁷⁹ Ibídem, p. 33

¹⁸⁰ Ibídem, p. 35

¹⁸¹ Ibídem, p. 116

¹⁸² BENTLEY. Op.cit., pp. 5-7

La computación evolutiva se ha desarrollado primordialmente a partir de cuatro técnicas: los algoritmos genéticos, la programación evolutiva, las estrategias evolutivas y la programación genética.¹⁸³ La arquitectura evolutiva se plantea el uso de algoritmos genéticos, considerando tales los que replican con mayor fidelidad la evolución natural.¹⁸⁴

Los algoritmos genéticos fueron desarrollados por John Holland con el fin de explicar el proceso adaptativo de los sistemas naturales y, a partir de ello, diseñar sistemas artificiales. Estos algoritmos operan en dos tipos de espacios: el espacio de búsqueda, que contiene las soluciones codificadas –denominadas “genotipos”– y el espacio de soluciones, conformado por los resultados aceptados y formalizados que se denominan “fenotipos”.¹⁸⁵ Es decir, en los algoritmos genéticos hay una “población” de soluciones o “individuos”, constituida por un genotipo y sus correspondientes fenotipos (Figura 4.8). Los fenotipos están configurados por múltiples parámetros que determinan las características del objeto, mientras que los genotipos son la versión codificada de estos parámetros. Los parámetros codificados se definen como “genes” y cuando se les atribuyen valores se tornan en “alelos”.¹⁸⁶ A un conjunto de genes en un genotipo se le denomina “cromosoma”. Para evaluar la aptitud-calidad de la solución, el genotipo debe actualizarse en el fenotipo.¹⁸⁷

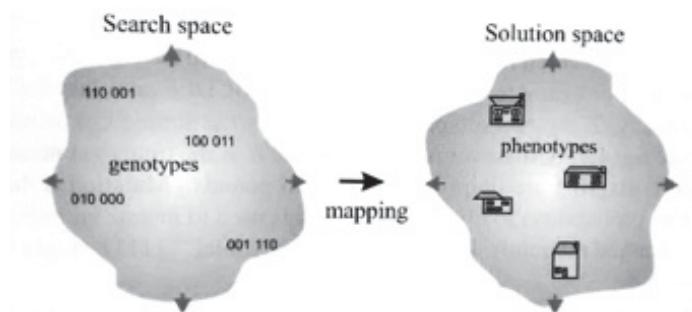


Figura 4.8 Espacio de búsqueda y espacio de soluciones

La evolución es una propiedad de los algoritmos genéticos que, según Bentley,¹⁸⁸ implica una sucesión de operaciones. Primero, a los genotipos se les atribuyen valores aleatorios para generar múltiples fenotipos, que se evalúan y valoran de acuerdo con los objetivos. A partir de estos valores se determina cuantas copias de cada individuo se ubican en el espacio denominado “piscina de apareamiento”, donde se escogen aleatoriamente dos individuos para que entrecrucen sus genes y generen el genotipo de

¹⁸³ Ibídem, p. 7

¹⁸⁴ Ibídem, p. 8

¹⁸⁵ Ibídem.

¹⁸⁶ Según la RAE, el término “alelo” significa: “Cada una de las formas alternativas de un gen que ocupan el mismo lugar en los cromosomas homólogos y cuya expresión determina las características del mismo rasgo de organización, como el color de los ojos.” En Real Academia Española. Recuperado el 12 de Noviembre de 2016

¹⁸⁷ BENTLEY. Op.cit., pp. 8-9

¹⁸⁸ Ibídem, pp. 9-11

las nuevas crías.¹⁸⁹ Esto genera una mutación del genotipo de los parientes, la cual implica el cambio de un valor-alele del cromosoma; por ejemplo, el cromosoma mutaría de “111111” a “110111”. Este proceso de cruce y mutación de “crías” (Figura 4.9) se repite hasta generar una nueva población donde los parientes han sido reemplazados por nuevas crías. A continuación estas nuevas crías se evalúan y reproducen hasta que emerge una solución satisfactoria o hasta que el algoritmo reproduce un número determinado de generaciones sin alcanzar una solución satisfactoria. En este contexto, el término “reproducción” adquiere un sentido biológico, por cuanto se refiere a un proceso de copia, cruce y mutación para criar nuevas generaciones.

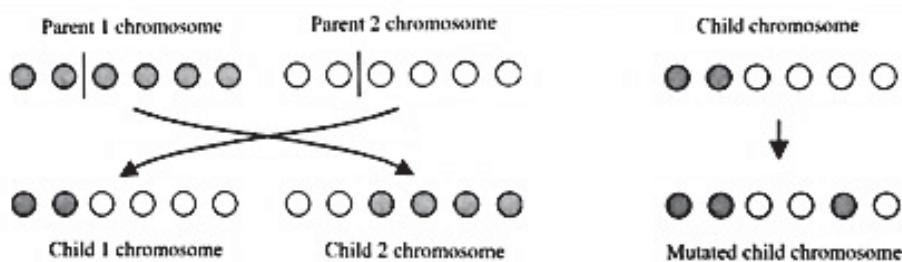


Figura 4.9 Entrecruzamiento y mutación de genotipos

La evolución computacional ocurre si se cumplen cuatro condiciones inherentes a la evolución natural: reproducción, herencia, variación y selección.¹⁹⁰ A diferencia de la evolución natural, la evolución computacional requiere tres condiciones adicionales: la iniciación, la evaluación y la terminación.¹⁹¹ La iniciación se produce estableciendo los parámetros que conforman un individuo y asignándole diferentes valores para generar múltiples soluciones. Con la evaluación, la evolución se orienta hacia las soluciones que mejor satisfacen los objetivos de diseño preestablecidos. En la medida en que una solución no puede evaluarse en un entorno natural, se evalúa computacionalmente con técnicas de simulación digital. Por último, deben establecerse criterios de terminación para detener la evolución al alcanzar una solución satisfactoria o cuando no se logra ninguna después de un cierto tiempo.

El diseño evolutivo requiere representaciones dinámicas de un proyecto para poder modelar su comportamiento. En este contexto, el edificio se concibe como una forma de vida artificial que presenta patrones de comportamiento condicionados por la comunicación y adaptación a las fluctuaciones del entorno. De esta manera, según Frazer, se logra un procedimiento ambientalmente sensible que da lugar a una “arquitectura evolutiva [que] mostrará un metabolismo [...] Mantendrá una estabilidad

¹⁸⁹ Por ejemplo, si el cromosoma de los parientes es “ABCDEF” y “abcdef”, y si se ordena-programa el cruce de dos genes, el genotipo de las crías generadas por el algoritmo podría ser “ABcdef” o “abCDEF”.

¹⁹⁰ Ibídem, 1999, p. 26

¹⁹¹ Ibídem

con el entorno mediante interacciones de retroalimentación negativa y promoverá la evolución mediante retroalimentación positiva”¹⁹².

La arquitectura evolutiva propuesta por Frazer parte de la premisa de que la información es la base de la vida¹⁹³ y plantea el proyecto arquitectónico como un metabolismo que evoluciona a partir de un código mediante la ejecución de las operaciones inherentes a los procesos de auto-organización y auto-regulación que condicionan tanto la vida artificial como la natural. Este código –genético– es la expresión de lo que Caspar Friedrich Wolff, fundador de la embriología, describió en el siglo XVII como la “fuerza esencial” desde la cual la materia desorganizada se consolida como un organismo.¹⁹⁴ Así, entendiendo que la arquitectura evolutiva es “una propiedad del proceso de organización de la materia, en lugar de una propiedad de la materia organizada”,¹⁹⁵ –en la que actúa el código o algoritmo genético que contiene las operaciones que determinan la forma y el comportamiento del edificio– puede considerarse que el algoritmo es la fuerza esencial que impone la forma.

De acuerdo con Goethe, los seres humanos buscan infundir su espíritu en los objetos que producen.¹⁹⁶ En el caso de la arquitectura evolutiva trasciende la fuerza esencial de la naturaleza, a través del código genético que ordena la materia y la energía. A la luz del “juicio estético” de Kant, quien atribuye al “concepto interno” de la forma el “placer” intelectual que el espectador percibe del mundo exterior,¹⁹⁷ puede considerarse que el placer estético causado por la imitación de la naturaleza en el diseño evolutivo radica en la materialización de los códigos que regulan sus procesos de crecimiento y conservación. Bajo la perspectiva de D’Arcy Thompson, si la forma es el diagrama de las fuerzas que actúan sobre un organismo,¹⁹⁸ la sensación estética se produce al percibir esas fuerzas.

La arquitectura evolutiva encarna la ilusión por el código y por su aplicación para “generar” proyectos arquitectónicos haciéndolos “crecer” como formas de vida artificial en un entorno digital. Igualmente, la arquitectura evolutiva refleja la fascinación por la matematización de la naturaleza, que en última instancia, remite a la transposición del plano de trascendencia al plano de inmanencia que caracteriza la modernidad:

¹⁹² FRAZER, J. *Un modelo natural para la arquitectura. La naturaleza del modelo evolutivo*. Op.cit., pp. 37-38

¹⁹³ Ibídем, p. 29

¹⁹⁴ MERTINS. Op.cit., p. 160

¹⁹⁵ FRAZER, J. *Un modelo natural para la arquitectura. La naturaleza del modelo evolutivo*. Op.cit., p. 37

¹⁹⁶ “For in man’s nature there is a will to create form which becomes active the moment his survival is assured. As soon as he does not need to worry of fear [...] he casts around for a material into which he can breathe his spirit.” GOETHE, J. W. In FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. Op.cit., p. 231

¹⁹⁷ Forty resume el juicio estético de Kant de la siguiente manera: “Aesthetic judgment, the perception of what the mind pleasant, occurs through its ability to recognize in the external world features that satisfy the internal concept of form.” FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. Op.cit., p. 231

¹⁹⁸ WEINSTOCK, M. Evolution and Computation. In OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture*. New York: Routledge, 2014. p. 212

“[...] on the plane of immanence, mathematics begins to operate differently than it does within philosophies of transcendence where it secures a higher level of being. On the plane of immanence, mathematics is done constructively, solving problems and generating new entities”¹⁹⁹.

Tanto los procesos de auto-organización como la matematización de la naturaleza han dado lugar a nuevas ilusiones en la arquitectura digital, las cuales radican en la auto-creación de la forma y el diseño del comportamiento, imitando la autonomía que tienen los sistemas vivos para auto-organizarse y auto-regularse. La instrumentalización de estos procesos naturales en el diseño evolutivo prescinde del aura mística de la naturaleza, en la medida que esta se racionaliza, cuantifica y codifica para ser instrumentalizada en calidad de funciones dentro de un proceso de diseño computacional. A pesar de ello, estos procesos codificados llevan consigo otros fenómenos incontrolables como la emergencia y, precisamente, en esta ausencia de control residen nuevas cualidades estéticas de la arquitectura digital.

4.1.2.3.2 De lo controlable a lo incontrolable

“Science clearly is a way of solving problems [...] Science is a way [...] of finding, interpreting, and facing facts, and of making the facts of nature the servants of man”²⁰⁰.

Warren Weaver

La transición desde una concepción de la naturaleza que distingue entre lo hecho y lo que nace a otra basada en la contraposición entre lo controlable de lo incontrolable, significa un cambio cultural. En la arquitectura evolutiva, la disolución entre lo hecho y lo nacido y la noción de lo incontrolable, subyacen bajo la emergencia de formas arquitectónicas que resultan de procesos computacionales de evolución.

La *emergencia computacional* de formas arquitectónicas implica una ausencia de control que puede equipararse a la sensación estética de “lo sublime” en la Ilustración. En la Antigüedad, lo sublime era “aquella experiencia estética que se distingue de lo bello, haciendo que irrumpa la desmesurada grandiosidad de aquello que antes era ordenado”²⁰¹. En el siglo XVIII, Kant distinguió entre el carácter finito, acabado y mensurable de lo bello, y el carácter infinito, inacabado e incommensurable de lo sublime y diferenciaba, a su vez, entre “lo sublime matemático” y “lo sublime dinámico”.²⁰²

¹⁹⁹ MERTINS. Op.cit., p. 163

²⁰⁰ WEAVER, W. Science and Complexity (1948). *E:CO*, 6 (3), 65-74, 2004, p. 72

²⁰¹ MASIERO. Op.cit., p. 62

²⁰² FERRATER MORA, J. *Diccionario de filosofía. Tomo II*. Buenos Aires: Sudamericana, 1974 p. 732

Lo matemáticamente sublime es engendrado por la experiencia de aquello que no puede medirse y, en este sentido, los fenómenos naturales perdieron su sublimidad cuando pudieron cuantificarse e instrumentalizarse. Lo dinámicamente sublime es engendrado por la presencia de la fuerza y del poder incommensurable. En este sentido, la “fuerza esencial” –inherente al ADN y al algoritmo genético– no solo es incommensurable por la infinidad de fenotipos que puede generar, sino que representa el “poder” formativo de los procesos evolutivos. Así, el diseño computacional encarna una *sublimidad matemática* que reside en la multiplicidad de posibilidades que emergen durante el proceso de diseño, las cuales no pueden concebirse, medirse o controlarse apriorísticamente.

La emergencia de formas arquitectónicas a través de procesos evolutivos de diseño es el resultado de aplicar las técnicas de modificación genética en el diseño arquitectónico. Según Philippe Morel, estas técnicas convierten la “naturaleza” en “producto” y dejan de ser una materia prima.²⁰³ Es el caso de los bosques reproducidos desde la bioingeniería, en los que “la materia está completamente instrumentalizada; son las necesidades del mercado las que conducen a transformar la composición de la madera de un árbol”²⁰⁴. En este sentido, el mercado es el entorno que establece las leyes de selección –artificial– que determinan si un producto de diseño “sobrevive” o no:

“[All] possibilities press to become realities, subject only to rules of economic optimization as calculated by the invisible hand of the market, which, as added bonus, promises to select only the best of all possible worlds”²⁰⁵.

Bajo esta perspectiva, el mercado representa una “naturaleza incontrolable” que determina la selección y evolución de los objetos de diseño en el entorno habitado, es decir, una segunda naturaleza creada por la técnica.²⁰⁶ Por el contrario, la “materia” forma parte de la “naturaleza controlada”, en la medida en que su desarrollo puede programarse para que adquiera propiedades específicas que se aplican en la creación y optimización del entorno construido. Esta *programación material* puede conducir a una homogeneización de la naturaleza que “nace”, pues queda determinada por las reglas de optimización económica impuestas por el mercado. Para Morel, este riesgo se evitaría con “una programación de la materia que mantenga el principio de incertidumbre y genere posibilidades”²⁰⁷.

De acuerdo con Morel, la “incertidumbre” y la “novedad” evitarían la subyugación de los productos de naturaleza programada por las fuerzas del mercado. La incertidumbre

²⁰³ MOREL, P. Investigación sobre el paisaje biocapitalista. *VERB: Natures*, 2006. p. 225

²⁰⁴ Ibídem, p. 227

²⁰⁵ CACHE, B. *Projecticles*. London: Architectural Association, 2011, p. 26

²⁰⁶ Además del mercado, otros fenómenos de naturaleza incontrolable son el tráfico vehicular y los virus informáticos, o los virus biológicos y los fenómenos cósmicos; si los primeros son hechos por la humanidad, los segundos nacen de la naturaleza primaria. VAN MENSVOORT, & GRIVINK. Op.cit., p. 13

²⁰⁷ MOREL. Op.cit., p. 227

es más abordable con mejores herramientas de representación e instrumentos de medida más precisos. En este sentido, la simulación digital se presenta como la herramienta que proporciona la certidumbre y el control de la materia, mientras la novedad requiere entender los principios que gobiernan las propiedades de los organismos en un nivel superior y que, a menudo, difieren de los principios que rigen las propiedades en un nivel inferior.²⁰⁸ La novedad surge cuando se da la formación de una estructura o proceso de orden superior, a partir de la interacción entre componentes –menores y más simples– de un orden inferior.

Deacon considera la “incertidumbre” y la “novedad” propiedades emergentes, tal como las describió el filósofo George Henry Lewes en el siglo XIX. Lewes formuló la teoría de emergencia a partir de sus estudios de los procesos mentales y vitales de los organismos y concluyó:

“Cada resultante es o una suma o una diferencia de fuerzas cooperantes; su suma cuando sus direcciones son la misma, y su diferencia cuando sus direcciones son contrarias. Además, cada resultante es claramente trazable en sus componentes, porque estas son homogéneas y mesurables. Con los [procesos] emergentes, en cambio, ocurre que, en vez de sumar un movimiento mesurable a un movimiento mesurable, o cosas de una clase a otros individuos de su clase, hay una cooperación entre cosas de clases dispares. Lo emergente es distinto de sus componentes en la medida que estos son incommensurables, y no puede reducirse a su suma o su diferencia”²⁰⁹.

Por ello, a diferencia del mecanicismo que se dedica a estudiar las propiedades elementales, la emergencia se centra en las propiedades y las dinámicas interactivas de un organismo. La simple agregación de componentes y de sus interacciones no explica la organización ni su funcionamiento.²¹⁰ Por otra parte, el mecanicismo cartesiano consideró la realidad y, por consiguiente, la vida y la mente como obra de Dios.²¹¹ El mecanicismo consideró los organismos como obra de un poder divino ubicado en lo más alto de una cadena que desciende a lo terrenal, a través de las personas, los animales y las plantas, hasta llegar a la materia inorgánica. Pero la “emergencia” invierte este orden al proponer que la fuente de la vida y la inteligencia no reside en fuerzas extraterrenales sino en la materia; es decir, observa los procesos vitales y

²⁰⁸ Ibídem, p. 168

²⁰⁹ LEWES, G. L. *Problems of Life and Mind*. En DEACON. Op.cit., p. 161

²¹⁰ Deacon considera que Lewes pudo haberse inspirado en John Stuart Mill, quien “encontraba especialmente chocante las discontinuidades de propiedades que podían generarse mediante interacciones combinatorias de dos sustancias tóxicas y peligrosas como el cloro gaseoso y el sodio metálico, el producto el sal común. [...] Mill pensaba que este cambio radical de propiedades era análogo a la lógica combinatoria que produjo la vida a partir de la mera química.” DEACON. Op.cit., p. 162

²¹¹ En “Meditaciones metafísicas y otros textos”, Descartes afirma: “Con el nombre de Dios entiendo una sustancia infinita, independiente, sumamente inteligente, sumamente poderosa que me ha creado a mí y cualquier otra cosa que exista, si existe.” DESCARTES, R. *El discurso del método*. En ANDRÉS, R (Ed.). *Descartes, vida, pensamiento y obra*. Madrid: Planeta DeAgostini, 2007, p. 152

mentales a través de “las lentes del materialismo: [como procesos] reducibles a materia en movimiento”²¹².

La emergencia también comporta una “organización funcional adaptativa” –o “diseño funcional” de los organismos para adaptarse al medio– al asumir que la adaptación de las especies reside en la herencia de rasgos, la competencia por recursos para desarrollarse y reproducirse y la mutación.²¹³ En este contexto, la inteligencia no reside en procesos mentales sino en la capacidad de un sistema para adaptarse al medio mediante el intercambio de información, materia y energía.

El concepto de “emergencia” introduce una concepción de la “vida” y la “inteligencia” que sustituye la visión trascendental mecanicista por procesos morfodinámicos. En la arquitectura, la emergencia es una cualidad del diseño evolutivo-generativo con carácter inmanente más que trascendente. Si la forma no se pre-concibe sino que emerge, la arquitectura se aleja del diseño que sigue la línea filosófica creacionista, que considera que la forma es una idea impuesta a la materia,²¹⁴ y se alinea con la filosofía *emergentista* según la cual la forma es un fenómeno de orden superior, con coherencia y autonomía propias, que emerge de las interrelaciones de componentes de orden inferior.

En los procesos de diseño que dan lugar a la emergencia de nuevas estructuras y comportamientos, las propiedades materiales de bajo nivel se distinguen de las propiedades formales de alto nivel: las primeras responden a procesos mecánicos, es decir, a interacciones mesurables y aditivas que son predecibles; por el contrario, las segundas son complejas e impredecibles, porque surgen de interacciones no aditivas (no-lineales) entre elementos de nivel inferior. En otras palabras, las propiedades de orden inferior son computables, mientras que las de orden superior no lo son porque están ausentes y sólo emergen a través del cómputo. A pesar de esta diferencia, las propiedades (superiores) de las formas emergentes no están desvinculadas de las propiedades (inferiores) de la materia, simplemente no pueden predecirse o preconcebirse a partir de las propiedades de los niveles inferiores. Por consiguiente, si en un proceso de diseño emergen las propiedades formales a partir de las propiedades materiales y organizativas de sus componentes, deja de ser un proceso *top-down*, que otorga una posición jerárquica superior a la forma aparente, para pasar a ser *bottom-up* que, según Neri Oxman, es el modo como “diseña la naturaleza”:

“In nature, it appears, the hierarchical sequence form-structure-material is inverted bottom-up as material informs structure which, in turn, informs the shape of naturally design specimens [...] Nature as a model for Design is an approach

²¹² DEACON. Op.cit., p. 161

²¹³ Ibídem, p. 164

²¹⁴ Véase capítulo 2.2.3.2

which favors matter (materials) as central and significant factor associated with the generation of form”²¹⁵.

A partir de esta lógica *bottom-up*, el diseño evolutivo incorpora la incertidumbre y la novedad, factores que, según Morel, evitan que los productos de diseño –de naturaleza programada– estén determinados por las demandas del mercado. La incertidumbre surge porque en un proceso de diseño evolutivo emergen propiedades referidas a la forma y al comportamiento del edificio, que no pueden predecirse aunque se conozcan las propiedades de los genotipos. La novedad surge de la computación simultánea de múltiples parámetros de diseño, ya que, a partir de ella, emergen propiedades organizativas y estructurales que no existen en los componentes aislados. Esto no solo mantiene la incertidumbre y la novedad, sino que crea la ilusión de generar formas nuevas, es decir, formas cuya creación está más allá de las facultades cognoscitivas del ser humano, y que solo emergen si se instrumentalizan las leyes evolutivas y los procesos auto-organizativos de la naturaleza.

La ilusión de crear sistemas arquitectónicos “vivos” instrumentalizando los procesos de auto-organización natural, permite considerar que la emergencia aporta un “encanto” al proceso de diseño computacional que contrarresta la negación de lo simbólico propia de la arquitectura digital. Pero este encanto no conduce a una arquitectura digital que recurra a discursos ideológicos o simbólicos. Por el contrario, la emergencia da lugar a una arquitectura de carácter inmanente, a procesos de diseño que operan con flujos, materiales, máquinas y deseos que con independencia de su naturaleza diversa, remiten a un mismo “plan de consistencia” o “plano de inmanencia” que se opone al plano de referencia.²¹⁶ Con la emergencia, la arquitectura puede prescindir de las idealidades trascendentales, para centrarse en transformaciones reales como la morfogénesis.

La morfogénesis es la creación de formas que evolucionan en el espacio-tiempo²¹⁷. Como sostiene Jeronimidis, “In the morphogenesis of biological mechanisms, it is the animation of geometry and the material that produce form.”²¹⁸ El origen del término se remonta a 1926, cuando el biólogo Paul Weiss acuñó empleó “Morphodynamik” para describir los procesos que dan lugar al desarrollo de las formas animales a partir de regularidades en la interacción celular.²¹⁹ Actualmente, el término “morfodinámica” se utiliza con mayor frecuencia en las disciplinas “que se centran en las propiedades geométricas que tienen que ver con la formación de estructuras celulares, tejido y planes

²¹⁵ OXMAN, N. *PhD Thesis: Material-based Design Computation*. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2010, p. 145

²¹⁶ “PLAN DE CONSISTENCIA: los flujos, los territorios, las máquinas, los universos de deseo, con independencia de su diferencia de naturaleza, se remiten al mismo plano/plan de consistencia (o plano/plan de inmanencia), que no debe confundirse con un plano de referencia. En efecto, las diferentes modalidades de existencia de los sistemas de intensidades no ataúnen a idealidades trascendentales, sino a procesos de engendramiento y a transformaciones reales.” GUATTARI, F. *Plan sobre el planta. Capitalismo mundial integrado y revoluciones moleculares*. Madrid: Traficantes de Sueños, 2004, p. 138

²¹⁷ WEINSTOCK, M. *Morphogenesis and the Mathematics of Emergence*. Op.cit., p. 12

²¹⁸ JERONIMIDIS. Op.cit., p. 92

²¹⁹ DEACON. Op.cit., p. 250

corporales”²²⁰. Pero en términos más generales, la “morfodinámica” sirve para “caracterizar la organización dinámica de una clase de fenómenos diversos, pero que comparten la tendencia a organizarse espontáneamente debido a una perturbación constante, pero sin la intervención extrínseca de influencias específicas que impone esa regularidad. [La] diversidad dinámica interna a menudo se reduce a muchos órdenes de magnitud”²²¹.

El diseño morfodinámico se basa en la implementación de procesos de organización material que constituyen las propiedades geométricas de un sistema y que emergen espontáneamente a partir de patrones o regularidades intrínsecas que se amplifican desde el nivel molecular al macroscópico. En la medida en que la organización sea espontánea, suele denominarse “auto-organización” e indica que las formas geométricas no son impuestas sino que surgen en virtud de las características intrínsecas de los componentes del sistema y de sus interacciones como respuesta a una perturbación constante, que puede ser local o provenir del entorno. Así, los procesos morfodinámicos se definen por su dinámica interna y no por la forma que generan,²²² de modo que al ser aplicados en el diseño morfodinámico, la forma emerge en función de los principios que rigen los procesos dinámicos:

“Geometry has a subtle role in morphogenesis. It is necessary to think of the geometry of a biological or computational form not only as a description of the fully developed form, but also as a set of boundary constraints that act as a local organizing principle for self-organization during morphogenesis”²²³.

Según Jeronimidis, para instrumentalizar los procesos morfodinámicos en el diseño arquitectónico, debe reconocerse que los organismos son sistemas materiales en los que carece de sentido diferenciar entre material y estructura, dado que la fuerza y el movimiento son el resultado de la interacción entre material, estructura, sensores, y fuentes de energía.²²⁴ Igualmente, el proceso de formación y las capacidades dinámicas de los sistemas materiales son consecuencia de unos mismos factores: “Geometry and material hierarchies produce dynamics. Biodynamics are achieved by a system of pre-tensioning and variation of turgor pressure [liquid or hydrostatic pressure] in differentiated geometrical arrangements to produce different kinds of movements”²²⁵. De este modo, la imitación de procesos morfodinámicos conlleva una lógica *bottom-up*: “employ material capacities rooted in the microscopic structure [...] to inform computational design process operating at the macro-level of the material system”²²⁶.

²²⁰ Ibídem, p. 251

²²¹ Ibídem, p. 249

²²² Ibídem, p. 258

²²³ WEINSTOCK, M. *Morphogenesis and the Mathematics of Emergence*. Op.cit., p. 14

²²⁴ JERONMIDIS. Op.cit., pp. 92, 94

²²⁵ Ibídem, p. 92

²²⁶ MENGES, A. Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design. (MENGES, A. Ed.) *Architectural Design: Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, 82 (2), 2012, p. 42

Este modo de instrumentalizar la materia se denomina “diseño computacional basado en la materia” (Material-based Computational Design) e implica una concepción compleja de la materia que, según Menges, “opens up a vast search space for design, as most materials are complex and display non-linear behavior when exposed to dynamic environmental influences and forces”²²⁷.

La imitación de procesos morfodinámicos está contribuyendo a replantear las cualidades cinéticas de la arquitectura. En los inicios del siglo XXI, el movimiento de elementos arquitectónicos se lograba con dispositivos mecánicos controlados por ordenadores.²²⁸ El diseño morfodinámico permite, además, considerar la materia como mecanismo cinético, explotando las cualidades dinámicas de la materia para adaptarse a estímulos del entorno. Hensel y Menges consideran que, de este modo, los “efectos materiales” se extienden más allá del ámbito visual al incluir efectos térmicos, acústicos o lumínicos que son el resultado de la respuesta del material a los estímulos externos. Asimismo, esto supone una alternativa a la noción de *performance* del edificio ya que, más allá de la optimización o eficiencia basada en un solo criterio, es posible incluir otros parámetros como la lógica constructiva y los mecanismos adaptativos de la materia.²²⁹

Según Weinstock, la gestión energética de un sistema –captura y transmisión de energía– está profundamente interrelacionada con su morfología: “Living forms are able to construct and dynamically maintain themselves by exchange of energy and material through their surfaces”²³⁰. Bajo esta perspectiva, el edificio se concibe como un sistema sensible y reactivo, como una forma de vida. Esta visión de edificio como organismo vivo, significa “an understanding that performance and behavior can be inputs to the process of design rather than functions applied later to a form”²³¹. En este sentido, la *performance* se erige como un concepto fundamental para concebir el edificio como un sistema vivo.

La morfodinámica y la emergencia son cualidades de la naturaleza que pueden trasladarse a sistemas arquitectónicos diseñados mediante procesos evolutivos-computacionales. En este contexto cabe entender un edificio como un sistema vivo e inteligente, capaces de aprender de su propio comportamiento: “los sistemas vivos son sistemas cognitivos y el proceso de vivir es un proceso de cognición”²³². Una idea que está materializándose con el desarrollo de una arquitectura inteligente, donde “inteligencia” tiene que ver con la elaboración de respuestas adaptativamente relevantes a las contingencias del entorno –natural o construido-. En la arquitectura digital la

²²⁷ Ibidem, p. 37

²²⁸ Véase Capítulo 2.2.1

²²⁹ HENSEL, M., & MENGES, A. Inclusive Performance: Efficiency Versus Effectiveness: Towards a Morpho-Ecological Approach for Design. (HENSEL, M., & MENGES, A. Edits.) *Architectural Design*, 78 (2), 2008, pp. 55-56

²³⁰ WEINSTOCK, M. Metabolism and Morphology. *Architectural Design*, 78 (2), 26-36, 2008, p. 27

²³¹ Ibídem.

²³² MATURANA, H. En CAPRA. Op.cit., p. 114

inteligencia está relacionada con la adaptación y, en la medida en que un edificio puede responder a las contingencias del entorno, puede considerarse como un sistema vivo e inteligente.

La inteligencia y la adaptación en la arquitectura evolutiva se basan en la instrumentalización de las leyes naturales aportadas por la ciencia y en su codificación matemático-algorítmica que les permite ser aplicadas al diseño del edificio mediante técnicas de diseño computacional. Los fundamentos técnicos, matemáticos y científicos de la arquitectura evolutiva sientan las bases de un nuevo paradigma estético basado en lo sublime dinámico y lo sublime matemático, dos cualidades estéticas que surgen del empleo de algoritmos genéticos para generar formas impredecibles.

4.1.3 Del modelo mecánico al modelo sistémico

La estética de la máquina, asociada a la arquitectura moderna resultó del reemplazo de la naturaleza por la máquina como modelo arquitectónico. Es decir, fue la transición del modelo natural al modelo mecánico en la arquitectura que conllevaría la fusión entre el arte y la industria a través de las vanguardias. La Werkbund defendió “lo universal” para facilitar la homogeneidad de la mecanización productiva y la estandarización industrial. El Neoplasticismo desarrolló esta idea como un proceso de abstracción que suprimiría lo irregular y lo variable de las formas naturales, para crear un “lenguaje universal” de líneas y ángulos rectos que se adaptaban a las formas simples –lineales y regulares– que la máquina produce mejor que el artesano. El Purismo y la Bauhaus relacionaron la simplicidad formal con el diseño económico y, bajo esta premisa, se desarrolló una noción de “belleza” basada en la capacidad de la máquina para crear productos útiles y económicos. Así, la “belleza” quedaría vinculada a la utilidad y a la economía, entendidas como cualidades que permiten satisfacer las necesidades universales de las personas. A partir de ello, emergió lo que puede considerarse una “estética de la economía” que atribuye cualidades éticas y estéticas a las formas derivadas de la estandarización y la mecanización industrial.

La arquitectura digital ha asumido la estética de la economía introducida por las vanguardias modernas, pero desde un posicionamiento operativo más que plástico. El movimiento moderno creó un lenguaje plástico que reemplazaría la reproducción figurativa de la naturaleza por las formas simples y homogéneas derivadas de la industrialización. En este contexto, como sostuvo Gropius, su aportación consistió en “inventar y crear formas nuevas que simbolizan ese rumbo”²³³. Así, la estética, introducida por el movimiento moderno, respondió a la intención de dar significado a los productos derivados de la industria utilizando un lenguaje formal que representaba y simbolizaba el advenimiento de la era maquinista.

Contrariamente a la arquitectura moderna, que atribuyó a la forma un valor artístico y simbólico, la arquitectura digital prescinde de estas cualidades para centrarse en la producción material en sí. En este sentido, la arquitectura digital sería una “disciplina material”, tal como propone Ciro Najle:

“Material Discipline is an agenda that develops forms of architectural intelligence via internal consistency, and breeds sense without the need of a transcendental apparatus validating what we do. [It] aims at overcoming the dependence of architecture on ideological systems of value and externalized parameters of legitimization. [It] embraces the broader material processes with which our field is inherent committed, processes vitally ingrained in matter and often imperceptible [...] Understanding architecture as a material discipline means developing procedures that concretely explore complexity and

²³³ GROPIUS, W. En BANHAM. Op.cit., p. 312

exploit non-linearity of the material behavior that have always pre-existed architecture, but have always remained obscured by the conventions of representation”²³⁴.

De acuerdo con Najle, al convertirse en una “disciplina material”, la arquitectura no solo prescinde de su dimensión simbólica, sino que establece una relación con la naturaleza basada en la instrumentalización de sus procesos y propiedades intrínsecas. Esta relación con la naturaleza subyace tras la arquitectura evolutiva, para la que la naturaleza es fundamentalmente una fuente de información.

La imitación de los procesos intrínsecos de la naturaleza-materia también conlleva lo que Najle describe como “inteligencia arquitectónica”; una “inteligencia” que, en la arquitectura evolutiva, radica en la capacidad del edificio para generar respuestas adaptativamente relevantes a contingencias medioambientales; es decir, una arquitectura con cualidades cognitivas propias. Para lograr este tipo de respuestas es necesario traducir los procesos de auto-regulación y auto-organización natural en ecuaciones no-lineales para computarlos, simularlos e instrumentalizarlos como inputs de diseño. Así, la arquitectura digital opera con los códigos de información de la materia viva, para generar formas, que como las de la naturaleza, son resultado de procesos de cambio, crecimiento y desarrollo.

La arquitectura evolutiva concibe el proyecto como el resultado de un proceso evolutivo y el edificio como un “metabolismo” que regula su comportamiento en respuesta a los estímulos del entorno. De este modo la naturaleza actúa como un modelo operativo, no representativo, de la misma manera que el edificio deja de entenderse como un objeto aislado para convertirse en un sistema abierto, como una totalidad cuyas propiedades emergen de las relaciones entre sus componentes, de la interacción entre estos y de la interacción del conjunto con el entorno.

La arquitectura evolutiva y la arquitectura morfogenética equiparan los edificios con los organismos naturales, al entender que ambos son sistemas con metabolismo que funciona capturando, transformando y distribuyendo materia y energía. Desde esta perspectiva metabolista, el término “sistema” adquiere un nuevo de significado: con la industrialización, el edificio se entendió como un sistema constructivo compuesto de elementos estandarizados ensamblados; con el advenimiento de las tecnologías digitales, el edificio pasa a considerarse un sistema material cuya formación conlleva interrelaciones más complejas que la simple articulación de elementos.²³⁵ Esto implica

²³⁴ NAJLE, C. Interview: Ciro Najle. With Pablo Lorenzo-Eiroa and Aaron Sprecher. In LORENZO-EIROA, P., & SPRECHER, A. (Edits.). *Architecture in Formation. On the Nature of Information in Digital Architecture*. Nueva York: Routledge, 2013, p. 239

²³⁵ “Material systems are considered not so much as derivatives of standardized building systems and elements, but rather as generative drivers in the design process. Extending the concept of material systems by embedding their material characteristics, geometric behaviour, manufacturing constraints and assembly logics within an integral computational model promotes an understanding of form, material, structure, and behaviour not as separate elements, but rather as complex interrelations.” HENSEL, M., & MENGES, A. Op.cit., p. 56

una concepción sistémica del edificio en la cual ya no tiene sentido diferenciar sus cualidades materiales, estructurales, espaciales, morfológicas, sensitivas, funcionales o de comportamiento.

Según la terminología de Deleuze y Guattari, esta concepción sistémica de un edificio se correspondería a una *máquina abstracta*,²³⁶ por cuanto el edificio y su entorno dejan de entenderse bajo la oposición entre lo nacido y lo hecho, o entre lo natural y lo artificial, y pasan a conformar un *agenciamiento maquínico* que ya no enfrenta el sistema-edificio al sistema-entorno, sino que los entrelaza para conformar un sistema superior o “segunda naturaleza”. Por tanto, la concepción del edificio como *sistema* se contrapone a la relación biunívoca entre forma y función de la arquitectura moderna, ya que postula la existencia de múltiples concatenaciones, emparejamientos y conexiones entre ellas.

De acuerdo con esta concepción sistémica que comprende a la arquitectura y a la naturaleza, la distinción entre “obra de arquitectura” y “producto de la naturaleza”: pueden existir “productos de la arquitectura” y “obras de la naturaleza”. Con la ingeniería genética las obras de la naturaleza pueden transformarse en productos con características específicas para un determinado proceso de fabricación. La producción natural pasa a ser, así, un proceso controlado que suprime la incertidumbre y que puede generar productos homologables a los industriales. Si “la obra posee algo de irremplazable y único mientras que el producto puede repetirse y de hecho resulta de gestos y actos repetitivos”,²³⁷ puede concluirse que la ingeniería genética convierte la naturaleza en un producto. Más aún, el diseño evolutivo y el diseño morfogenético, al introducir la incertidumbre y la emergencia en el proceso de diseño, dan lugar a obras arquitectónicas equiparables a las producidas por la naturaleza.

Los nuevos significados de términos como “obra”, “inteligencia”, “vida” o “sistema”, así como el agenciamiento maquínico entre el sistema-edificio y el sistema-entorno, reflejan la sustitución del modelo mecánico por el modelo sistémico: el primero representó la sustitución de la naturaleza por la máquina como modelo para la arquitectura; el segundo implica el retorno de la naturaleza como modelo, a través de la máquina –computacional-. Este cambio en la concepción de la naturaleza conlleva el tránsito de su representación a su recreación, de su copia a su imitación, de su forma sensible a su forma abstracta, de sus cualidades extrínsecas a las intrínsecas, de su apariencia a su comportamiento, de su imagen a sus principios, y de sus cualidades trascendentales a las emergentes.

El modelo sistémico comporta el retorno de la naturaleza mediante las tecnologías digitales y la aplicación de la “tecnología natural” que atiende a la formación y la conservación de los organismos. El diseño evolutivo y el diseño morfogenético

²³⁶ Véase el capítulo “Introducción” para una explicación de conceptos como “agenciamiento”, “máquina abstracta” o “desterritorialización”.

²³⁷ LEFEBVRE, H. *La producción del espacio*. Madrid: Capitán Swing, 2013, p. 127

representan la transición del concepto de “forma” al de “formación”, por cuanto los procesos evolutivos de la naturaleza y los fenómenos intrínsecos de la materia se instrumentalizan como inputs de diseño en la generación de la forma arquitectónica. Esto requiere cuantificar y codificar los procesos y fenómenos naturales para que se puedan computar y, con ello, pierden su aura mística porque la incommensurabilidad y la incertidumbre, que anteriormente le otorgaban un sentido sublime a la naturaleza, pierden su potencia de ilusión bajo la certeza de la tecno-ciencia. Es decir, la naturaleza se hace controlable, ya que sus propiedades intrínsecas y sus procesos fenomenológicos pueden llegar a comprenderse, suprimiendo así cualquier incertidumbre y encanto. Pero esto no implica una pérdida de la ilusión en la arquitectura evolutiva puesto que los procesos computacionales, que la sustentan, encarnan la ilusión de crear edificios que se comportan como sistemas vivos. De este modo, se crea un nuevo paradigma estético relacionado con lo sublime dinámico y lo sublime matemático, aunque –en este caso– la ilusión estética deja de fundamentarse en el arte y en las creencias místicas para hacerlo sobre la ciencia y la tecnología.

En el nuevo paradigma estético la arquitectura digital opera de acuerdo con las leyes de la de “segunda naturaleza”, en la que el mercado tiene un poder de selección –artificial– determinante de las posibilidades de “supervivencia” de los objetos creados por la industria. Así, la incommensurabilidad y la incertidumbre que anteriormente se otorgaba a la naturaleza, recae ahora en el mercado. La emergencia de una multiplicidad de formas arquitectónicas desde procesos de diseño formativos –generativos y evolutivos– basados en la instrumentación de leyes naturales a través del cálculo computacional, es un factor que mantiene la incommensurabilidad, la incertidumbre y la potencia de la ilusión de la naturaleza. Pero el mercado tiene el poder de selección que determina si estas formas arquitectónicas “sobreviven” en la “segunda naturaleza” creada por la técnica.

Por otra parte, el modelo sistémico conlleva la imitación de procesos de conservación de los organismos naturales para crear una arquitectura que se adapta a las contingencias del entorno. En este sentido, el modelo sistémico subyace bajo el diseño biomimético que se inspira en modelos científicos y procesos naturales para crear una arquitectura ecológica donde se optimizan la forma y el comportamiento del edificio para reducir el impacto medioambiental, con el fin garantizar la conservación del entorno natural. En este contexto, la imitación de los procesos de conservación aporta significado a la arquitectura digital; un significado ligado a la satisfacción de las necesidades materiales más que de las trascendentales. La arquitectura digital actualiza, en relación con la era digital, lo que Benjamin describió como el sueño colectivo compartido por la técnica y la arquitectura, asociado al deseo de la arquitectura por aplicar las técnicas y materiales empleados por la industria.²³⁸

²³⁸ BENJAMIN, W. *Obra de los pasajes* (Vol. 1). Madrid: Abada, 2013, p. 268

En la sección siguiente se profundizará en la relación entre la sostenibilidad y la arquitectura digital. Asimismo, se tratará sobre el significado del *ornamento digital* en la arquitectura y la transición desde una estética de la economía, basada en la máquina, a una fundamentada en la naturaleza. Se estudiará el modo en que la instrumentación de las propiedades intrínsecas de la materia se traduce en una nueva expresión plástica, al mismo tiempo que la interacción y adaptación del edificio a su entorno crea nuevos efectos ornamentales. Igualmente se reconocerá cómo la arquitectura adaptativa encarna la ilusión mecanicista por crear autómatas,²³⁹ así como el retorno de los fenómenos tras su “desaparición” a partir de la revolución científica.

²³⁹ MUMFORD, L. *El Pentágono del Poder. El Mito de la Máquina, Volumen 2*. Op.cit., p. 137

4.2 Del ornamento plástico al interactivo

A partir de la filosofía de Edmund Husserl, Pérez-Gómez plantea que el significado de cualquier sistema deriva de dos dimensiones: una formal o sintáctica, que se corresponde con la estructura del sistema en sí, con las relaciones entre sus elementos; y una trascendental o semántica, que hace referencia a la manera en que vivimos y experimentamos el mundo.²⁴⁰ De acuerdo con Pérez-Gómez, la arquitectura rechazó su dimensión trascendental reemplazando el contenido poético del edificio por explicaciones formales, a partir de una modernización que llevó a refutar las connotaciones metafísicas que prevalecieron desde la Antigüedad. Con la modernización la arquitectura abandonó su dimensión semántica, de manera que el significado del edificio recayó sobre su carácter sintáctico.

Las cualidades comunicativas y sensoriales atribuibles al ornamento arquitectónico son las funciones y condiciones que Moussavi y Kubo consideran “contingentes” o “necesarias”.²⁴¹ Por contingencia del ornamento se refieren a sus funciones decorativas o comunicativas, a la posibilidad o no de que el ornamento pueda transmitir un mensaje. Al plantearlo como necesidad se refieren a la capacidad de generar afectos y sensaciones que “eluden la necesidad de codificación del lenguaje y son capaces de transformarse en el tiempo y el espacio”.²⁴² A la luz de estos planteamientos, la comunicación de un mensaje codificado fue la única función contingente que mantuvo el ornamento moderno.

La arquitectura moderna introdujo un lenguaje plástico que prescindía de los elementos figurativos-decorativos y asignaba a la forma y al material del edificio la tarea de comunicar la manera en que vivimos y experimentamos el mundo. Así, el significado de la arquitectura moderna derivó de su dimensión formal, basada en el método de composición desde el cual se establecen las relaciones entre los elementos arquitectónicos para generar la forma y de su dimensión trascendental, que otorga sentido a los materiales constructivos y la forma arquitectónica respecto de la realidad productiva y sociocultural. Este sentido, o mensaje, es una cualidad ornamental que radica en la capacidad del sujeto para decodificarlo e interpretarlo, mientras que el ornamento como necesidad implica la transmisión de una sensación o afecto con independencia del individuo,²⁴³ al mismo tiempo que se produce a través del material pero no se conserva en él.²⁴⁴ En la arquitectura digital los mensajes y las sensaciones consustanciales al ornamento se han transformado.

²⁴⁰ PÉREZ-GÓMEZ. Op.cit., 1983, p. 5

²⁴¹ MOUSSAVI, & KUBO. *La función del ornamento*. Op.cit.

²⁴² Ibídem

²⁴³ “Las sensaciones, perceptos y afectos son seres que valen por sí mismos y exceden cualquier vivencia. Están en ausencia del hombre [...] los afectos son precisamente los devenires no humanos del hombre”. DELEUZE, G., & GUATTARI, F. *¿Qué es la filosofía?* Barcelona: Anagrama, 1993. pp. 165, 170

²⁴⁴ “Lo que por derecho se conserva no es el material, que solo constituye la condición de hecho, sino, mientras se cumpla esta condición (mientras el lienzo, el color o la piedra no se deshagan en polvo), lo que se conserva en sí es el percepto o el afecto.” Ibídem, p. 167

4.2.1 Del mensaje democrático al ecológico

Con la estandarización, fruto de la industrialización, el producto artesanal llegó a ser un objeto de culto a inicios del siglo XX debido a su carácter único.²⁴⁵ La producción artesanal era considerada por Muthesius un problema cultural que debía erradicarse, integrando a los artistas, diseñadores y arquitectos en la industria a través de una organización que fomentara la adopción de sus métodos: la Deutscher Werkbund. Esta integración respondía también a fines económicos, ya que Muthesius consideraba que habría una recesión económica en Alemania si los productos continuaban siendo producidos de manera artesanal.²⁴⁶

El mismo año de la fundación de la Werkbund, Peter Behrens fue nombrado consultor de diseño de la empresa AEG. Durante la inauguración de la Feria de Primavera en la sede de la Werkbund, Behrens pronunció un discurso en el que defendió el valor publicitario de la forma artística. De acuerdo con Kracauer, Behrens “se proponía demostrar la importancia que adquiere el objeto bien formado también en un sentido absolutamente comercial”²⁴⁷, ya que “una buena configuración es siempre rentable en términos económicos, [y que] lo estético y lo económico siempre caminan juntos de forma armónica”²⁴⁸. De acuerdo con Behrens una “buena forma” resulta de una necesidad económica que, en el caso de la industria, es la rentabilidad. Por tanto, era necesario diseñar objetos con formas simples que minimizasen los costes materiales y de producción, prescindiendo de ornamentos.

A la luz de los cambios productivos, económicos y culturales generados por la industria, Kracauer sostuvo que la “realidad espiritual que constituía el caldo de cultivo [del] patrimonio ornamental ya no existe”²⁴⁹. Desaparecía así el poder simbólico del ornamento, de manera que la ornamentación del producto artesanal se contraponía a la simplicidad formal de los productos industriales, dotados de un valor ético y moral por ser considerados como objetos con formas congruentes con los sistemas de producción y, en consecuencia, verdaderas.²⁵⁰

Los principios económicos y técnicos inherentes a la producción industrial adquirieron el carácter de atributos de una belleza basada en la simplicidad: “Simplicidad en la variedad, empleo estrechamente económico del espacio, material, tiempo y dinero”²⁵¹. De acuerdo con Gropius, la belleza de un objeto surge del proceso de producción “con la ayuda de las fuerzas mecánicas (vapor y electricidad), del propio trabajo material en vista de la satisfacción de las necesidades vitales y para procurarles productos en serie a un precio inferior y de calidad superior a aquellos hechos a mano”²⁵². Se puede deducir

²⁴⁵ MASIERO. Op.cit., p.162

²⁴⁶ BANHAM. Op.cit., p. 73

²⁴⁷ KRACAUER, S. Op.cit., p. 18

²⁴⁸ Ibídem, p. 19

²⁴⁹ Ibídem, p. 23

²⁵⁰ Ibídem

²⁵¹ GROPIUS. Op.cit. 244

²⁵² Ibídem

de ello que la belleza de las formas simples estaba ligada a la necesidad de producir y suministrar bienes materiales a bajo coste para promover la conservación y el progreso de las sociedades industrializadas.

La idea de satisfacer las necesidades sociales a través de productos con formas simples y homogéneas formaría parte del “Proyecto Moderno” que, según Maldonado

“[...] no es otra cosa que el proyecto democrático, proyecto que parte de la convicción de que una sociedad moderna no solo es deseable sino también factible; que una sociedad democrática, asegurando a sus miembros el pleno ejercicio de libertad y de justicia, así como la equidad en la distribución de la riqueza, puede abrir un proceso de emancipación respecto a los valores y las creencias del pasado y contribuir a una transformación de la vida cotidiana de los hombres”²⁵³.

En este proyecto moderno, el rechazo del ornamento no solo respondía a la creación de un estilo arquitectónico que rompía con los valores del pasado, sino a la idea de facilitar a las masas de consumidores de la sociedad industrial el acceso a todo tipo de productos, incluida la vivienda. En este contexto, la simplicidad formal de los edificios modernos, con sus superficies planas, son el reflejo de una austeridad que fue necesaria para sustentar el estado de bienestar y el crecimiento de la población urbana en las sociedades industriales.²⁵⁴

La preocupación por mejorar las condiciones de la vida cotidiana, por democratizar el acceso a la vivienda y por mejorar la calidad de vida, constituye el “gran mensaje” y el “gran valor” de la arquitectura moderna,²⁵⁵ más allá de la revolución plástica representada por las formas simples o “puras”. El valor que las vanguardias modernas otorgaron a estas formas estaba unido a la necesidad de incrementar la producción, según los criterios económicos establecidos por la industria, así como a la necesidad ética de socializar el consumo. Esta ética democrática era compartida por la arquitectura moderna y por la industria. De esta manera, la arquitectura asumió el “ideal de progreso” de las sociedades modernas, que Forty describe en los siguientes términos:

“What is described as progress in modern societies is in fact largely synonymous with the range of changes brought about by industrial capital. Among the benefits are more food, better transport and greater abundance of goods. But it is particularly of capitalism that each beneficial innovation also

²⁵³ MALDONADO, T. *¿Es la arquitectura un texto?* Buenos Aires: Infinito, 2004, p. 62

²⁵⁴ Según Castells; “Los efectos positivos de las nuevas tecnologías industriales sobre el crecimiento económico, los niveles de vida y el dominio humano de una naturaleza hostil [quedó] reflejado en el alargamiento espectacular de la esperanza de vida, que no había mejorado de forma constante antes de 1750” CASTELLS. Op.cit., p. 67. Asimismo, Ortega y Gasset expone: “Europa desde el siglo V hasta 1800 [...] no consigue llegar a más de 180 millones de habitantes. Pues bien, de 1800 a la hora presente, por tanto, un poco más de un siglo después, ha alcanzado la cifra de unos 500 millones de hombres [...] En un solo siglo ha crecido pues trece veces y media”. ORTEGA Y GASSET. Op.cit., p.127

²⁵⁵ MALDONADO, T. *¿Es la arquitectura un texto?* Op.cit., p. 65

brings a sequence of other changes, not all of which are desired by all people so that, in the name of progress, we are compelled to accept a many great distantly related and possibly unwanted changes”²⁵⁶.

La contradicción inherente al “progreso moderno”, por los resultados no deseados que acarrea, se vio reflejada en la socialización de la vivienda mediante la producción en serie, aunque aceptando su comercialización en un mercado guiado por las leyes del rédito.²⁵⁷ Al hacerlo, la arquitectura moderna se transformó en un producto para el consumo en masa y quedó sujeta a los intereses de la especulación.²⁵⁸ La industrialización facilitó el crecimiento urbano desmesurado que, entre otras consecuencias, condujo al deterioro medioambiental que hoy se intenta mitigar desde el desarrollo sostenible.

En los inicios del siglo XX se consideraba que los recursos naturales eran inagotables y que su explotación sólo estaba limitada por la técnica.²⁵⁹ En aquel momento la capacidad productiva era mucho más limitada, por lo cual se supuso que la naturaleza tenía la capacidad de recuperarse de los efectos negativos causados por la industria y el crecimiento urbano. En consecuencia, el impacto ambiental causado por la expansión urbana no formaba parte de las preocupaciones de la industria ni de la arquitectura moderna.²⁶⁰ A mediados del siglo XX, sin embargo, comenzó a plantearse la necesidad de una política para evitar la destrucción ambiental causada por la mala gestión de residuos, el cambio climático, la destrucción de otras formas de vida y el consumo desmesurado de recursos materiales y energéticos. Wiener reflexionaba así en 1950:

“We have modified our environment so radically that we must now modify ourselves in order to exist in this new environment. We can no longer live the old time. Progress imposes not only new possibilities for the future but new restrictions”²⁶¹.

A partir de 1960 empezó a tenerse conciencia de la interconectividad y fragilidad de los ecosistemas, así como del impacto que la sobre población y la sobreexplotación producían en la naturaleza. Se reconocía la finitud y caducidad de los recursos necesarios para la supervivencia y el bienestar humano y, sobre todo, que su explotación desmesurada conduciría a una situación crítica que Buckminster Fuller describió así en 1969:

“[...] we must first acknowledge that the abundance of immediately consumable, obviously desirable or utterly

²⁵⁶ FORTY, A. *Objects of Desire. Design and Society since 1750*. London: Thames & Hudson, 1986, p. 11

²⁵⁷ TAFURI. Op.cit., pp. 47-48

²⁵⁸ MALDONADO, T. *¿Es la arquitectura un texto?* Op.cit., p. 67

²⁵⁹ RATHENAU, Op.cit.. p.161

²⁶⁰ BRAUNGART, M., & McDONOUGH, W. *Cradle to Cradle*. London: Vintage, 2009. p. 25-26

²⁶¹ WIENER. Op.cit., p. 46

essential resources have been sufficient until now to allow us to carry on despite our ignorance. Being eventually exhaustible and spoilable, they have been adequate only up to this critical moment. This cushion-for-error of humanity's survival and growth up to now was apparently provided just as a bird inside of the egg is provided with liquid nutriment to develop it to a certain point.²⁶²

La toma de conciencia respecto de la finitud de los recursos naturales responde al cambio de un “imaginario de progreso” hacia un “imaginario de catástrofe” que cohesiona las sociedades modernas.²⁶³ Para Fuller, este cambio implicaba también a la industria ya que “las autoridades industriales [...] han pasado de la gran preocupación de explotar los recursos originales a la de mantener las ‘ruedas’ que gestionan girando”²⁶⁴. Igualmente, el imaginario de catástrofe tuvo consecuencias políticas y, en este sentido, Fuller denunciaba que “los dirigentes políticos [...] han anunciado al mundo de consumidores potenciales sus respectivos intentos de ‘subir’ los niveles de vida de todos los pueblos del mundo al *convertir la alta potencialidad de la técnica a través del diseño*”²⁶⁵. El informe “The Limits of Growth”, encargado por el Club de Roma en 1972, contribuyó a la toma de conciencia sobre los límites de los recursos naturales:

“If present growth trends in the world population, industrialization, pollution, food production, and resource depletion continue unchanged, the limits to growth in this planet will be reached sometime within the next hundred years. The most probable result will be the sudden death and uncontrollable decline in both population and industrial capacity”,²⁶⁶.

Posteriormente, el informe “Nuestro futuro en común” de las Naciones Unidas (1987) introdujo el concepto de “desarrollo sostenible” con el fin de garantizar a las generaciones futuras la satisfacción de sus necesidades; una sostenibilidad que implicaba una redefinición de la riqueza para incluir el “capital natural” es decir, el conjunto de recursos naturales y sistemas vivos que tienen un valor incalculable en términos monetarios,²⁶⁷ y los mecanismos para regularlo.²⁶⁸

²⁶² BUCKMINSTER FULLER, R. (03 de 08 de 2010). *Operating Manual for Spaceship Earth*. Recuperado el 27 de 07 de 2012, de Buckminster Fuller Institute: bfi.org/about-bucky/resources/books/operating-manual-spaceship-earth/chapter-5-general-system-theory

²⁶³ “Si en otros tiempos la cohesión de nuestras sociedades se mantenía por el imaginario del progreso, hoy se mantiene por el imaginario de la catástrofe.” BAUDRILLARD, J. *Pantalla Total*. Barcelona: Anagrama, 2000. p. 159

²⁶⁴ En BUCKMINSTER FULLER, R. *El capitán etéreo y otros escritos*. Murcia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de las Región de Murcia, 2003. p. 248

²⁶⁵ Ibídem, p. 249

²⁶⁶ BRAUNGART & McDONOUGH. Op.cit., p. 49

²⁶⁷ HAWKEN, P., LOVINS, A., & LOVINS, H. *Natural Capitalism: The Next Industrial Revolution*. Londres; Washington: Earthscan, 2010. pp. 2-3

²⁶⁸ ROGERS, R., y GUMUCHDJIAN, P. *Ciudades para un pequeño planeta*. Barcelona: Gustavo Gili, 2000. p. 5

El desarrollo sostenible no fue asumido de forma inmediata por la arquitectura. De acuerdo con Ken Yeang, la mayoría de arquitectos no proyectaban de un modo sostenible y mostraba su ignorancia respecto del diseño ambientalmente responsable.²⁶⁹ A pesar de ello, el concepto de desarrollo sostenible se generalizó en la práctica profesional tras ser asumido en los ámbitos políticos, económicos e industriales. Es decir, cuando la sociedad en su conjunto reconoció que los límites del progreso no radican en la capacidad productiva o en el capital financiero de las empresas, sino en las reservas de capital natural. A finales de 1990, el arquitecto Richard Rogers advertía del riesgo de “una catástrofe medioambiental de magnitudes jamás afrontadas por la humanidad”²⁷⁰.

Braungart y McDonough propusieron una “política de cambio” para revertir la tendencia que seguía el crecimiento incontrolado.²⁷¹ La crisis medioambiental se planteó como una oportunidad para rediseñar los modos de crecimiento:

“The waste, pollution, crude products, and other negative effects [...] are not the result of corporations doing something morally wrong. They are the consequence of outdated and unintelligent design”²⁷².

En el ámbito de la arquitectura, esta apelación al diseño sostenible ofrecía la oportunidad para actualizar el mensaje del proyecto moderno y reorientarlo hacia la mejora de las condiciones de la vida cotidiana de la sociedad contemporánea. Pero, al igual que los objetivos democratizadores del proyecto moderno fueron desvirtuados por la especulación, en el caso de la sostenibilidad podría ocurrir lo mismo. De acuerdo con Mark Jarzombek, el desarrollo sostenible también se ha visto influenciado por intereses industriales y políticos, ya que el término “sostenibilidad” se ha utilizado como parte de la estrategia comercial de empresas e instituciones. En primer lugar, porque se ha utilizado para crear nuevos mercados basados en las “tecnologías verdes”. En segundo lugar, porque el término “sostenibilidad” se emplea como referente de una ética de la “responsabilidad medioambiental” que se está explotando con fines políticos y monetarios.²⁷³ Desde este punto de vista, Jarzombek establece la siguiente relación entre la arquitectura y el desarrollo sostenible:

²⁶⁹ YEANG, K. *Proyectar con la naturaleza: bases ecológicas para el proyecto arquitectónico*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999. pp. 1-2

²⁷⁰ ROGERS, y GUMUCHDJIAN. Op.cit., p. 1

²⁷¹ La “política de cambio” se puede resumir en las siguientes palabras de Braungart y McDonough. “Once you understand the destruction taking place, unless you do something to change it, even if you never intended to cause this destruction, you become involved in a strategy of tragedy, or you can design and implement an strategy of change.” BRAUNGART & McDONOUGH. Op.cit., p. 44

²⁷² Ibídem, p. 43

²⁷³ JARZOMBEK, M. Molecules, Money and Design. The Question of Sustainability's Role in Architectural Academe. *Thresholds* (18), 1999. pp. 33-34

“In recent years, there has been a growing interest in the Project of Sustainability as the site where ethical commitment, architectural practice, capitalism and good design could come together”²⁷⁴.

El concepto de “sostenibilidad” no solo ha ayudado a establecer una nueva relación entre la arquitectura y las fuerzas económicas, sino que ha renovado su compromiso ético desde una nueva concepción de la naturaleza dejando de entenderla como fuente inagotable de materias primas para concebirla como capital natural que debe cuidarse y regenerarse. Esto significa que la arquitectura se desvincula del “capitalismo convencional”, que no asume el deterioro de la naturaleza en los costes de producción y se inscribe en un “capitalismo natural” que cuida del ecosistema –porque contiene, provee y sostiene toda la economía–, limita el desarrollo económico –con base en la disponibilidad y funcionalidad del capital natural– y rechaza los sistemas económicos mal diseñados y los patrones de consumo derrochadores que causan pérdidas de capital natural.²⁷⁵ La optimización del consumo de los recursos naturales, por tanto, constituye la piedra angular del capitalismo natural y de la arquitectura sostenible.

Este mismo objetivo, conservar el capital natural, es el que persigue la biomímesis en el ámbito del diseño:²⁷⁶ salvaguardar el capital natural –el medioambiente– sin renunciar a los altos niveles de producción alcanzados por la industria ni al estado de bienestar conseguido por las sociedades industrializadas. La conservación de la naturaleza y el desarrollo sostenible tiene un interés social, político y comercial que condiciona la arquitectura de la era digital y le permite actualizar el mensaje ético-democrático de la arquitectura moderna, cuyo objetivo era mejorar la vida cotidiana de las personas, sustituyéndolo por un mensaje ético-ecológico que busca contribuir a su supervivencia. En este sentido, la relación que la arquitectura digital establece con la naturaleza, mediante el concepto de sostenibilidad y la biomímesis, encarna un “pensamiento progresista” que, según Tafuri, otorgaría significado a las cosas a partir de una realidad que trasciende el orden existente y apunta hacia un futuro utópico.²⁷⁷

4.2.2 De la utopía a la e-topía

La “utopía”, tal como la entiende Tafuri, es una visión estructural de la totalidad, la visión de una realidad presente y en proceso de transformación que funciona como un sistema cuyo objetivo es romper las relaciones del orden existente y recuperarlas a un nivel superior.²⁷⁸ El nuevo estadio que buscaba alcanzar el movimiento moderno se basaba en la socialización del consumo y el desarrollo industrial, que derivó en una crisis medioambiental a mediados del siglo XX e hizo necesario replantear los modelos

²⁷⁴ Ibídem, p. 32

²⁷⁵ HAWKEN, LOVINS, & LOVINS. Op.cit., p. 9

²⁷⁶ Ibídem, p. 10

²⁷⁷ TAFURI. Op.cit., pp. 52-53

²⁷⁸ Ibídem, p. 53

económicos basados en el desarrollo ilimitado. Las tecnologías digitales formaron parte de la actualización del proyecto moderno, y contribuyeron a adecuarlo a las premisas del desarrollo sostenible. De acuerdo con Mitchell, se trataba ahora de transformar la utopía en e-topía

“crear *e-topías*, ciudades económicas y ecológicas que funcionen de manera más inteligente [para] satisfacer potencialmente nuestras propias necesidades sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas”²⁷⁹.

Mitchell propuso diseñar nuevas ciudades a partir de principios como la desmaterialización, la desmovilización, la personalización en masa, el funcionamiento inteligente y la transformación moderada.²⁸⁰ Entre ellos, la personalización en masa y el funcionamiento inteligente son los más determinantes para la arquitectura digital. Según Mitchell, con la personalización en masa se supera la inflexibilidad de la producción en serie, ya que “un tamaño único nunca está ajustado del todo. Si se fabrica un marco estructural con elementos uniformes, algunos estarán necesariamente sobredimensionados”²⁸¹. Desde este punto de vista, Mitchell equiparó el modelo T de Ford, que “lo ofreció en cualquier color, siempre que fuera negro”²⁸², con la arquitectura estandarizada de Mies, que “exploró la sobria poesía de las formas simples [...] y produjo edificios de acero y cristal que eran bien negros”²⁸³.

Recientemente, Gramazio ha planteado que la estandarización y la simplicidad formal pueden superarse desde la “flexibilidad” productiva que aporta el CAD/CAM y que permite conseguir la complejidad formal de manera eficiente y sostenible, al “reducir el coste de la forma” minimizando el consumo de materiales.²⁸⁴ Así, Gramazio sostiene que la automatización cambiará la lógica de la construcción desde la repetición hacia la diferenciación²⁸⁵, aportando mayor flexibilidad a los edificios.

De acuerdo con Mies, la “flexibilidad” de la arquitectura moderna se encuentra en los espacios diáfanos que posibilita el esqueleto estructural y que pueden ser usados de múltiples maneras.²⁸⁶ Esta flexibilidad, por tanto, es una cualidad espacial del edificio apreciada por sus ocupantes, mientras que la flexibilidad a la que se refiere Gramazio es una cualidad que aportan las herramientas de fabricación digital y sus beneficiarios son los diseñadores, constructores y promotores de un proyecto. En este sentido, el

²⁷⁹ MITCHELL, W. *E-topía: vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001, pp. 155-156

²⁸⁰ Ibídem, p. 156

²⁸¹ Ibídem, p. 160

²⁸² Ibídem

²⁸³ Ibídem

²⁸⁴ GRAMAZIO, F. *Lift Conference Videos: Fabio Gramazio - Digital Materiality in Architecture*.

Recuperado el 15 de 01 de 2017, de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=Uwr2TkRugtg&t=112s>

²⁸⁵ Ibídem

²⁸⁶ MERTINS. Op.cit.

CAD/CAM aporta una flexibilidad productiva que hace la arquitectura más sostenible y económica al optimizar la producción, y traslada la flexibilidad en el uso del espacio a la variabilidad formal y a la multifuncionalidad de las superficies (Figura 4.10).

Por su parte, Mitchell explica el “funcionamiento inteligente” tomando como ejemplo la automatización funcional del sistema eléctrico de una vivienda. Un edificio provisto de sensores y controladores no solo apaga y enciende las luces según la presencia del habitante, sino que regula la iluminación, la calefacción y el aire acondicionado, adaptando el ambiente tanto a las pautas de comportamiento del usuario como a la variación de las tarifas eléctricas.²⁸⁷ Oxman y Menges han aplicado este funcionamiento inteligente en sus diseños sostenibles y biomiméticos.



Figura 4.10 Nueva Galería Nacional; Centre Pompidou-Metz

Oxman propone “to apply Nature’s strategies in design of forms to real world products and processes [...] to define a new approach to Sustainable Design as we know it”²⁸⁸. Para alcanzar este “diseño sostenible”, Oxman imita la generación formal, la adaptación y el crecimiento de un organismo natural, de manera que la forma queda determinada por la función y se adapta a condiciones específicas.²⁸⁹ Según Oxman, esta adaptación formal-funcional, que facilita la personalización en masa, dará lugar al desarrollo de “sustainable design products without assemblies and joints that support smooth transformations between properties”²⁹⁰. En otras palabras, Oxman propone un diseño sostenible, basado en nuevos materiales, que varían gradualmente sus propiedades internas para adaptarse a las necesidades mecánicas y funcionales inherentes a la forma del producto.

Menges plantea aplicar el CAD/CAM para desarrollar un diseño sostenible y personalizado empleando materiales tradicionales como la madera. En vista de los retos medioambientales que hoy tiene por delante el sector de la edificación, Menges propone convertir un material tradicional como la madera en material del futuro debido a sus “virtudes medioambientales”²⁹¹. La madera es un material que se obtiene de los árboles

²⁸⁷ MITCHELL, W. *E-topía "Vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos"*. Op.cit., p. 162

²⁸⁸ OXMAN, N. *PhD Thesis: Material-based Design Computation*. Op.cit., p. 139

²⁸⁹ Ibídem, pp. 141, 283, 293

²⁹⁰ Ibídem, p. 141

²⁹¹ MENGES, A. *Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design*. Op.cit., p. 37

los cuales utilizan energía solar para transformar el dióxido de carbono en oxígeno; por tanto, en su producción se emplea la energía limpia y renovable: “wood is one of the few highly energy-efficient, naturally renewable and fully recyclable building materials we currently have at our disposal”²⁹².

El recurso a la madera como material para una construcción sostenible no responde únicamente a criterios de eficiencia energética, sino también a cuestiones éticas y de mercado. Según Morel, “Las tendencias ecológicas y legislativas, así como un nuevo sentido de responsabilidad social, son una oportunidad para ampliar la cuota de mercado de productos de madera en el entorno construido”²⁹³. Pero, en estos mercados la madera no proviene de bosques naturales, ya que los árboles son genéticamente modificados para hacerlos más ecológicos y económicos.²⁹⁴

Gramazio reconoce que la automatización productiva puede aumentar el desempleo y la pérdida de valores sociales,²⁹⁵ ya que con el CAD/CAM se fabrican productos sin intermediación humana.²⁹⁶ Gramazio argumenta que la automatización industrial ya causó desempleo, de modo que la automatización digital continuará contribuyendo a la disminución de los trabajos poco cualificados que serán sustituidos por máquinas controladas por los operarios igualmente poco cualificados.²⁹⁷ Gramazio sugiere afrontar el problema desde una visión menos generalista de la tecnología, que atienda a las necesidades específicas de la economía y al mercado laboral en cada lugar y utilice las técnicas de fabricación digital para crear sistemas constructivos que permitan integrar la mano de obra local.²⁹⁸

La e-topía de Mitchell, como las propuestas de Gramazio, Oxman y Menges, comparten la visión de la tecnología como medio para mejorar las condiciones de vida de las sociedades modernas. En la era de la industrialización, se trataba de mejorar el bienestar social construyendo edificios de formas simples y regulares que redujeran su precio. Con la fabricación digital, la simplicidad y regularidad formal pierden su sentido ético-social pues dejan de representar un ahorro económico, ya que es posible crear formas complejas que cumplan con los criterios de sostenibilidad, reduciendo el consumo de recursos materiales, productivos y económicos. Si el mensaje utópico de la arquitectura moderna se fundamentó en la ilusión de aumentar el bienestar social con la estandarización, el de la e-topía de la arquitectura –en la era digital– lo hace en la ilusión de garantizar la conservación y los niveles de bienestar de las sociedades industrializadas a partir de la personalización en masa.

²⁹² Ibídem

²⁹³ Morel, 2006, p. 236

²⁹⁴ Ibídem

²⁹⁵ GRAMAZIO, F. Lift Conference Videos: Fabio Gramazio - Digital Materiality in Architecture.

²⁹⁶ Ibídem

²⁹⁷ Ibídem

²⁹⁸ Ibídem

4.2.3 De lo lineal a lo no-lineal

El efecto o sensación que produce un edificio es una cualidad ornamental que la arquitectura moderna atribuyó a la forma y los materiales.²⁹⁹ De este modo, el valor estético se desvinculó de los elementos decorativos que reproducían las formas naturales para asociarse a las formas simples.

La arquitectura digital recobra la naturaleza como modelo de belleza, pero no se limita a copiar su apariencia externa sino que imita sus estructuras; es decir, las tramas irregulares e intrincadas que conforman los sistemas naturales, las cuales responden a principios funcionales más que estéticos.

La sistematización del diseño aplicando una retícula de ejes primarios y secundarios sobre la cual se disponen los elementos arquitectónicos³⁰⁰ fue fundamental para la industrialización de la arquitectura. Sobre la retícula se ubicaban los elementos estructurales y los componentes constructivos de dimensiones estándar. Las retículas ortogonales se corresponden con los paneles planos y con los módulos rectangulares.³⁰¹ De este modo, la retícula era, para la arquitectura moderna, un sistema organizativo que garantizaba la regularidad y la homogeneidad, y facilitaba la repetición.

La retícula estructural desaparece tras el cerramiento en las obras de Behrens, quien defendió “una arquitectura que presente superficies lo más inmóviles y compactas posibles”³⁰², o en las de Loos, que utilizaba el revoco para crear superficies lisas y continuas.³⁰³ Por el contrario, Perret consideraba que la retícula estructural debía ser visible en la fachada,³⁰⁴ mientras que Mies convertiría la linealidad, la modularidad y la regularidad de la retícula estructural en un lenguaje plástico (Figura 4.11). La retícula, materializada en los rascacielos, simbolizaba la precisión inherente a la producción industrial; una tipología de edificio que, según Tafuri, era la reencarnación de la catedral gótica entendida como espacio de reunión de la colectividad y símbolo de una actitud espiritual que exalta la idea del trabajo en la era moderna.³⁰⁵

²⁹⁹ Véase Capítulo 4.1.1.4

³⁰⁰ Véase Capítulo 3.1.1

³⁰¹ “Grids are a geometric system of organization allowing building components and prefabricated elements to have standard dimensions. These are generally based on square and rectangular organizations thus creating straight components, flat panels, and boxlike modules, although not necessarily. Structural systems are often placed on an axial grid, while panels and modules are developed on a modular grid.” SMITH, R. *Prefab Architecture: a Guide to Modular Design and Construction*. New Jersey: Wiley, 2010. p. 125

³⁰² BEHRENS, P. Arte y técnica. En MALDONADO, T. (Ed.), *Técnica y cultura. El debate alemán entre Bismarck y Weimar*. Buenos Aires: Infinito, 2002. p. 111

³⁰³ FANNELLI, G., y GARGIANI, R. *El principio del revestimiento*. Madrid: Akal, 1999, p. 254

³⁰⁴ “What mattered to Perret was that the frame should be apparent, though not necessarily represented literally.” FORTY, A. *Concrete and Culture: a Material History*. Londres: Reaktion, 2013, p. 25

³⁰⁵ TAFURI, M. *The Sphere and the Labyrinth. Avant-Gardes and Architecture from Piranshi to the 1970s* (1987 ed.). Cambridge (MA); London: MIT Press, 1980, pp. 172-174



Figura 4.11 Edificio de apartamentos en Génova, de Hennebique; Edificio de aparcamientos en París, de Perret; Apartamentos Lake Shore Drive, de Mies

Después de la Segunda Guerra Mundial empezó a cuestionarse el significado que los arquitectos modernos otorgaron a las formas simples y lineales.³⁰⁶ En los años 1960 Shadrach Woods diseñó, junto con Georges Candilis y Alexis Josic, dos proyectos que se oponen al lenguaje plástico y a la monumentalidad del rascacielos de la modernidad: la reconstrucción del Centro de Fráncfort y la Universidad Libre de Berlín (Figura 4.12). Woods propuso el uso de la trama como mecanismo para crear una arquitectura “sistémica” que sería más flexible y adaptable a los deseos y necesidades de las personas: “We feel that Web [...] may provide a way to approach the search for systems and, hence, for a true poetic discovery of architecture”³⁰⁷.

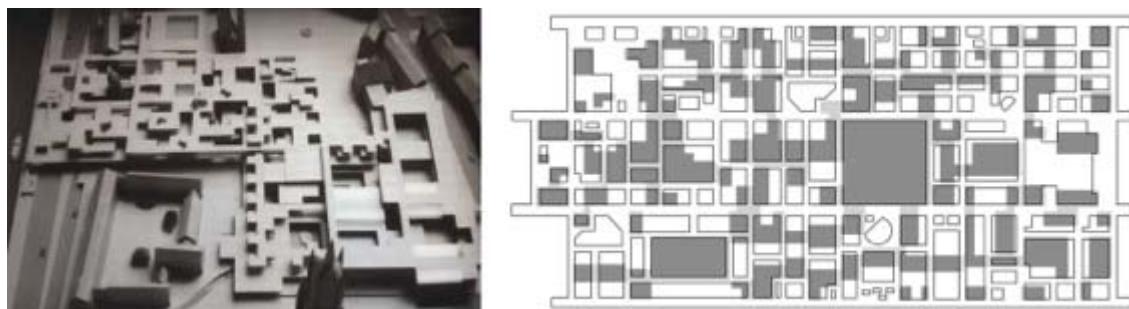


Figura 4.12 Proyectos de Centro de Fráncfort y de la Universidad Libre de Berlín

La flexibilidad y adaptabilidad en la Universidad Libre facilitaba la transformación del edificio a lo largo del tiempo. La forma del edificio es porosa y permeable y sus células espaciales se articulan mediante una red de caminos. La red se conforma por ejes de circulación primarios, secundarios y terciarios que generan una trama ortogonal y asimétrica sobre la cual se organiza el programa. Así, la trama opera como sistema de soporte más que como estructura fija y asimila los cambios que se producen en distintos

³⁰⁶ “[...] it seems clear that we must dispense with the use of symbols and monuments, for the century has cast aside these cultural authority.” WOODS, S. Web. *Le Carré Bleu* (3-4), 1998, p. 45

³⁰⁷ Ibídem, p. 46

momentos, a diferentes velocidades y escalas. La trama disuelve la rigidez del objeto arquitectónico operando como una estructura que coexiste e incorpora elementos para enfrentar diversas circunstancias a corto plazo y para adaptarse a los cambios del programa a largo plazo.³⁰⁸ Esta posibilidad de modificar la configuración del edificio hace que opere como un sistema abierto e indefinido, como un objeto informe cuya movilidad no se reduce a la circulación, sino que comprende, asimismo, la posibilidad de suprimir o añadir elementos del edificio sin comprometer su integridad y funcionamiento.³⁰⁹

Además de los proyectos de Candilis y Woods, otros grupos como los Metabolistas, el Team X o Archigram plantearon –en la misma época– diversos proyectos en que la retícula no actúa exclusivamente como sistema de ejes estructurales para configurar un volumen cerrado y compacto, sino que se entiende como una estructura abierta y flexible que regula los cambios morfológicos a lo largo del tiempo (Figura 4.13).

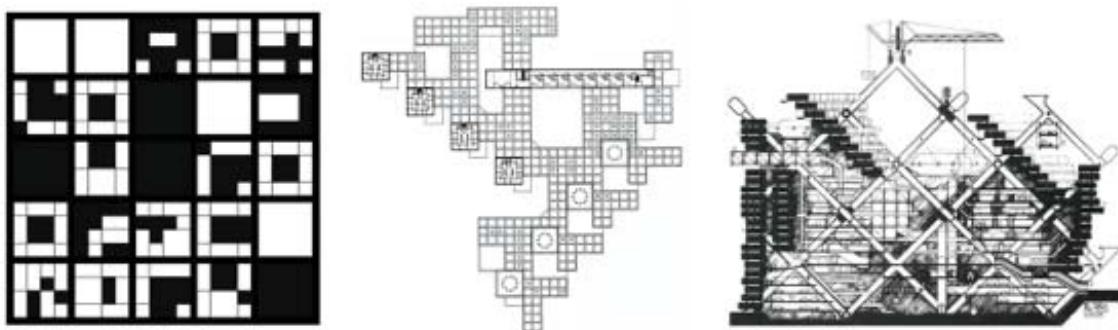


Figura 4.13 Ciudad de la agricultura, de Kurokawa; Orfanato Amstelveenseweg, de Van Eyck; Plug-in City, de Archigram

Ante la flexibilidad de estos proyectos, las formas lineales, regulares y compactas de la arquitectura moderna aparecen como rígidas e inertes. A pesar de ello, comparten el hecho de basarse en elementos estandarizados cuya disposición se regula mediante una retícula ortogonal que, al distinguir la estructura del cerramiento, presenta “la pared como superficie abstracta no tectónica”³¹⁰. Por el contrario, en la arquitectura digital la aplicación de la retícula refleja lo que Latour describe como “un irrefrenable proceso de hibridación de todas las realidades contrapuestas”,³¹¹ de modo que la separación entre estructura y cerramiento se disuelve. Así, bajo la perspectiva de Latour, en la

³⁰⁸ TZONIS, A., & LEFAIVRE, L. Beyond Monuments, Beyond Zip-a-Tone. Shadrach Woods's Berlin Free University, a Humanist Architecture. *Le Carré Bleu* (3-4), 1998. p. 21

³⁰⁹ Esta flexibilidad se logró desarrollando soluciones técnicas que facilitasen la transformación y el crecimiento, por ejemplo: una estructura atornillada que permite montar y desmontar partes del edificio; cerramientos móviles basados en una retícula modular, con base en una unidad estructural de 30cm o la inexistencia de fachadas exteriores. SALVADÓ, T. ¿Por qué la Freie Universität de Berlín debería ser un mat-building? *Documents de Projectes d'Arquitectura* (27-28), 2011. pp. 55-57

³¹⁰ FANNELLI, y GARGIANI. Op.cit., p. 253

³¹¹ MALDONADO, T. Todavía la técnica. Un "tour d'horizon". En MALDONADO, T. (Ed.). *Técnica y cultura: el debate alemán entre Bismarck y Weimar*. Buenos Aires: Infinito, 2002, p. 293

arquitectura digital se está produciendo una hibridación de funciones y elementos a través de dos operaciones: “por traducción, o sea por conjunción de dos entidades originariamente contrapuestas y por inscripción, o sea por la asunción de una nueva modalidad expresiva que falta en las dos categorías de procedencia”³¹².

En la arquitectura digital las operaciones de traducción e inscripción no solo implican la hibridación de la estructura y el cerramiento; igualmente, conllevan la hibridación de elementos contrapuestos como la estructura y el ornamento, o la estructura y la decoración, para dar lugar a una nueva modalidad expresiva que podría definirse *estructural ornamental* o *funcional decorativa*; una nueva expresión plástica que se está logrando por imitación de las propiedades intrínsecas de la materia-naturaleza mediante modelos matemáticos, procesos computacionales de diseño y técnicas de fabricación digital.

El Watercube, de PTW Architects, es un prisma cuadrangular cuyo cerramiento contiene una malla estructural. La geometría de la red se compone de dos poliedros que se repiten indefinidamente de acuerdo con un modelo propuesto por los científicos Denis Weaire y Robert Phelan. El modelo determina el modo más eficiente de dividir el espacio con células de igual volumen, usando un poliedro de 14 lados al 75% y un poliedro de 12 lados al 25%.³¹³ El mismo modelo se emplea para explicar las agrupaciones geométricas de los cristales o de las burbujas de agua en el estado en que se hallan cuando forman la espuma (Figura 4.14).³¹⁴

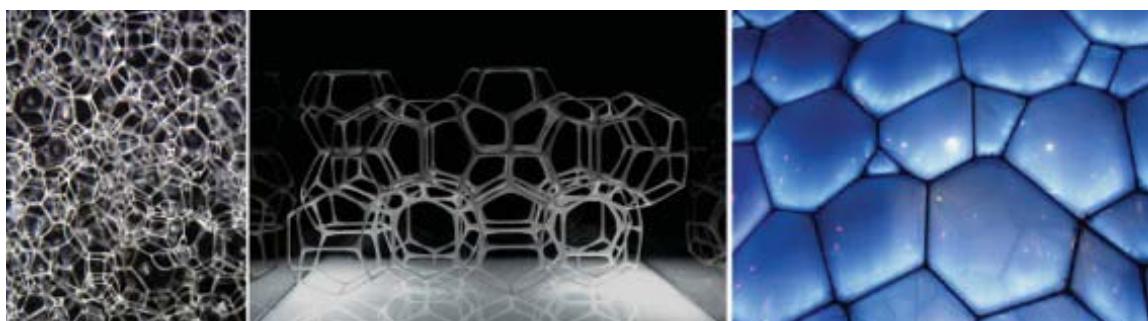


Figura 4.14 Espuma de jabón; módulo Weaire-Phelan; detalle de fachada

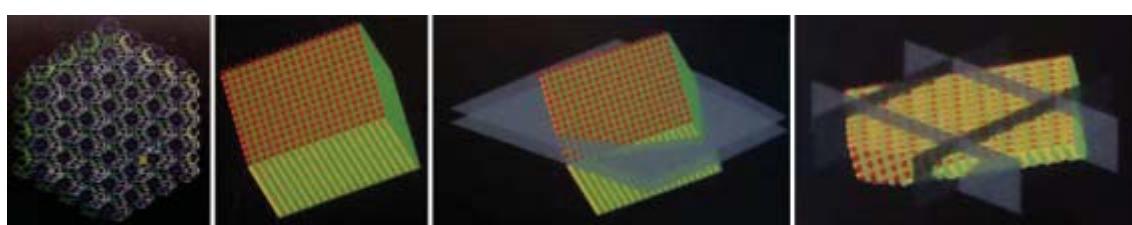


Figura 4.15 Rotación y sección del modelo 3D de la malla estructural

³¹² Ibídem, p. 294

³¹³ PTW ARCHITECTS. Calado de espuma. Centro Nacional de Natación. *Arquitectura Viva* (118-119), 2008, p. 102

³¹⁴ WEINSTOCK, M. *Self-Organization and Material Constructions*. Op.cit., p. 35; PTW ARCHITECTS. Op.cit., p. 102

Durante el proceso de diseño, el módulo Weaire-Phelan fue codificado y procesado para generar un modelo digital de la malla estructural. Inicialmente, la apariencia de la red era regular, mientras que los módulos estaban dispuestos perpendicularmente respecto de los planos de suelo y fachada. Por este motivo se rotó y seccionó el modelo de la malla para darle una apariencia de aleatoriedad (Figura 4.15). La malla estaba compuesta por 4.000 polígonos diferentes, por lo cual se aplicaron algoritmos que redujeron la composición a 7 polígonos repetidos en la cubierta y 16 polígonos en la fachada.

La geometría de la malla se convirtió en la estructura sustituyendo los nodos y enlaces del modelo por montantes y nudos de articulación.³¹⁵ Asimismo, el algoritmo utilizado para generar la geometría fue editado para introducir cambios que afectaban la distribución de cargas en la estructura, como era el caso de añadir una puerta. Este tipo de cambios no afectó la posición de los elementos estructurales, pero sí modificó las dimensiones de los elementos afectados. Inicialmente se generaron 12.000 nudos de conexión diferentes para unir 24.000 elementos diversos; la aplicación de un algoritmo redujo la composición de la estructura a tubos metálicos de 10 longitudes diferentes y tres circunferencias distintas. Los montantes perimetrales tenían la sección cuadrada para facilitar el anclaje de los elementos de fachada, mientras que las conexiones internas tenían sección circular y los nudos eran esféricos (Figura 4.16). Así, la estructura se conformó por 30 montantes diferentes y 4 tipos de nudos³¹⁶ que dieron lugar a un cerramiento de 3,6 metros de grosor y una cubierta de 7,2 metros de canto y que se revisitó con cojines fabricados con EFTE. Las propiedades aislantes de los cojines generan un efecto invernadero que calienta el aire en su interior y se utiliza para calentar los espacios interiores mediante un sistema que permite la circulación de aire.³¹⁷



Figura 4.16 Detalle de esquina superior; estructura perimetral; estructura interna

El Watercube encarna la nueva expresividad plástica del ornamento digital, en su vertiente estructural no-lineal y genera una relación ambigua entre forma y estructura, ambigüedad que se resuelve acudiendo a la metáfora y el simbolismo. Según Chris Bosse (PTW Architects), la forma cúbica alude a la mitología china en la que el cuadrado es figura primordial y es, al mismo tiempo, el contrapunto de la forma de las

³¹⁵ PTW, A., ARUP, & CSCEC. Watercube. ACTAR. *VERB: Natures*. Barcelona: ACTAR, 2006. p. 73

³¹⁶ Ibídem.

³¹⁷ PTW ARCHITECTS. *Calado de espuma. Centro Nacional de Natación*. Op.cit.

burbujas (Figura 4.17).³¹⁸ Contrariamente a esta aproximación a la forma, el ICD/ITKE Research Pavilion 2010 de Menges es una forma armónica y expresiva que resulta de las propiedades del propio material.



Figura 4.17 Watercube

En el ICD/ITKE Research Pavilion 2010, Menges desarrolla un proceso de diseño computacional que utiliza las cualidades estructurales de la madera a nivel microscópico para informar la macro-escala de la red-sistema estructural. La información obtenida de la madera es el elemento generador del diseño, de manera que las propiedades intrínsecas y el comportamiento del material no se entienden como restricciones o limitaciones, sino como el origen de la forma.³¹⁹ A partir de esta comprensión, las propiedades de la madera se instrumentalizan para generar una estructura flexible cuyas prestaciones estructurales son óptimas respecto del peso y la cantidad de material requerido.

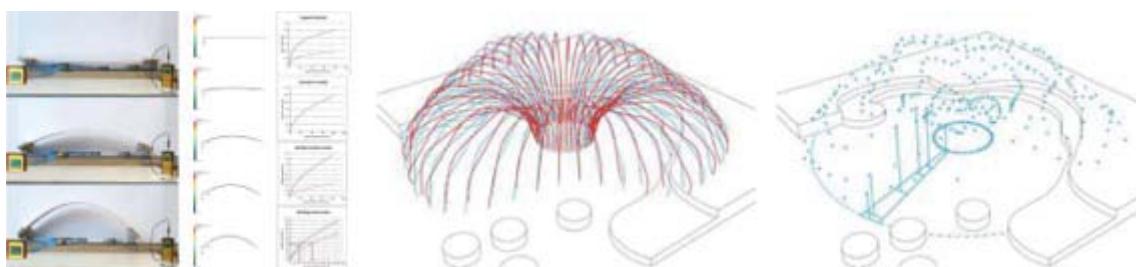


Figura 4.18 Ensayos físicos y esquemas geométricos de polilíneas y nodos

El proyecto partió de experimentos sobre la capacidad auto-formativa de una estructura de madera laminar.³²⁰ En primer lugar, las láminas de madera contrachapada de 6,5 mm se sometieron a diferentes niveles de compresión para obtener sus límites de arqueamiento. De acuerdo con los resultados de estos ensayos, se creó un modelo paramétrico desde el cual se generó un esquema geométrico de polilíneas y nodos

³¹⁸ Ibídem, pp. 69-85

³¹⁹ MENGES, A. *Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design*. Op.cit., p.36

³²⁰ MENGES, A. Coalences of Machine and Material Computation. In LORENZO-EIROA, P., & SPRECHER, A. (Edits.), *Architecture in Formation: On the Nature of Information in Digital Architecture*. New York: Routledge, 2013. p. 278

(Figura 4.18). Posteriormente, se creó un algoritmo que utiliza las polilíneas y los nodos para generar la geometría de las superficies –*Nurbs Surface Geometry*–.³²¹



Figura 4.19 Análisis estructural

Los resultados de los ensayos físicos sirvieron para relacionar el comportamiento mecánico de la madera con la geometría del pabellón:³²² las láminas de madera se diseñaron para que las secciones arqueadas y las sometidas a tracción se alternasen a lo largo de su dimensión longitudinal (Figura 4.19). Consecuentemente, la forma del pabellón responde al equilibrio entre las fuerzas del sistema estructural:

“[...] una estructura tensiactiva formada por una compleja red de puntos de articulación y vectores de fuerza cuya disposición responde a las propiedades mecánicas de las delgadas láminas de madera contrachapada con que está construido el pabellón”³²³.

Cada lámina se componía de 6 o 7 segmentos de formas diferentes. Con el objetivo de evitar la concentración de momentos flectores sobre un eje, se varió la posición de las juntas a lo largo de la estructura. Esto requirió calibrar la geometría y el comportamiento del material usando métodos de análisis de elementos finitos, además de aplicar un algoritmo para determinar la ubicación de los puntos de unión. Estos puntos se diseñaron de manera que pudieran ser ensamblados mecánicamente sin elementos de unión adicionales. El pabellón se erigió con 80 láminas auto-portantes, compuestas de 6 o 7 segmentos determinados por el cambio de posición de los puntos de unión. Para configurar el sistema se requirieron 500 segmentos únicos y tres tipos de juntas dispuestas en aproximadamente 1.500 ángulos. La heterogeneidad morfológica de los componentes se solventó fabricando las láminas con una máquina de control numérico de 6 ejes (Figura 4.20).³²⁴

³²¹ Posteriormente se generaron diversos sub-algoritmos –*subroutines*– del algoritmo principal del modelo central de información, para desarrollar diferentes aspectos del proyecto, como el modelo geométrico, el análisis solar o la información necesaria para la fabricación asistida por ordenador. FLEISCHMMAN, M., LIENHARD, J., & MENGES, A. Computational Design Synthesis. Embedding Material Behaviour in Generative Computational Processes. In Zupancic, T., M. Juvancic, Verovsek, S., & Jutraz, A. *Respecting Fragile Places*. Ljubljana: eCAADe & UNI Ljubljana, Faculty of Architecture, 2011. pp. 762-763

³²² Ibídem, p. 764

³²³ MENGES, A. Megabytes de madera. Del CAD al nuevo Diseño Computacional. *Arquitectura Viva* (137), 24-27, 2011. p. 26

³²⁴ FLEISCHMMAN, LIENHARD, & MENGES. Op.cit., p. 762



Figura 4.20 Detalle de ensamblaje; fabricación de láminas; montaje manual

El uso del CAD/CAM en el ICD/ITKE Research Pavilion 2010 y en el Watercube, aporta una flexibilidad productiva que fue fundamental para lograr la no-linealidad plástica y funcional –inherente a los sistemas naturales– de sus mallas estructurales. Contrariamente a esta flexibilidad productiva, en los proyectos de los años 1960 la flexibilidad es funcional y deriva de una retícula ortogonal que sirve para organizar y modificar la configuración formal a lo largo del tiempo. Se puede deducir de ello que la “arquitectura sistémica” de los años 1960 presenta una flexibilidad programática-espacial que beneficia a los usuarios, mientras que los principales beneficiarios de la flexibilidad productiva que aporta CAD/CAM son los arquitectos y constructores.

La irregularidad de las mallas estructurales de la arquitectura digital, contrasta con la ortogonalidad de las empleadas por arquitectura moderna y la arquitectura de los años 1960. El esqueleto estructural permitió a la arquitectura moderna separar la estructura del cerramiento. Sin embargo, ambos elementos permanecieron formalmente unidos ya que eran la expresión de una misma malla estructural. Por el contrario, las mallas estructurales de la arquitectura digital hibridan la estructura y el cerramiento en una superficie única en la que confluyen formas no-lineales y complejas. En este sentido, las mallas estructurales de la arquitectura digital reflejan la nueva condición de la superficie arquitectónica, en la cual, según Picon, “depth becomes literally embedded in the skin”³²⁵. Este nuevo tipo de “profundidad” también explica el proceso de hibridación de las realidades contrapuestas al cual se refiere Latour y a partir del cual emerge un *ornamento funcional* que combina parámetros estructurales, constructivos, plásticos, funcionales, económicos, materiales y significativos.

³²⁵ PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Basilea: Birkhauser, 2010, p. 85

4.2.4 De la superficie a la interfaz

En su ensayo titulado “Transparencia: literal y fenomenal”,³²⁶ Colin Rowe y Robert Slutzky vinculan la “transparencia literal” a las cualidades físicas de un objeto, esto es, a las propiedades de los materiales que lo componen. La “transparencia fenomenal”, por su parte, se atribuye al sujeto, porque es una propiedad que surge de la interpretación que el individuo hace de una obra. Así, en el caso de una obra de arquitectura, la “transparencia literal” se atribuye al material, por ejemplo el vidrio, mientras que la “transparencia fenomenal” es el resultado de la percepción simultánea de configuraciones espaciales alternativas sobrepuertas visualmente. La “transparencia literal” fue el recurso empleado por la arquitectura moderna en sustitución de la decoración.³²⁷ El rechazo de la decoración por parte de la arquitectura moderna otorgó a la transparencia del vidrio un sentido moral, pues entiende que “desenmascara” la estructura del edificio para “revelar su verdad”.³²⁸

La arquitectura digital ha dado lugar a un ornamento que actúa de mediador entre el edificio y su entorno. Esta cualidad interactiva se percibe más claramente a partir del análisis de la obra de arte desde la “estética de la recepción”,³²⁹ que distingue entre la “obra” en sí, que representa el objeto o producto material generado por el artista, y el “texto”, que puede ser el mensaje o la sensación generada por la interacción con el sujeto que interpreta la obra. De esta manera, se entiende que la “obra de arte” está conformada por el creador, el producto y el receptor³³⁰ y su contenido o “texto” se genera a partir de la interacción entre la “obra” y el receptor. En otras palabras, “el texto solo tiene un sentido potencial que, al actualizarse en el proceso de su recepción, constituye la obra”³³¹. Bajo este punto de vista, la “obra” es un objeto que debe ser interpretado, pero en la era digital puede ser un objeto que prescinde de la interpretación porque es capaz de cambiar su apariencia y su comportamiento a partir de su interacción con el entorno.

El Futurismo asoció el “movimiento” a la velocidad de la máquina y lo representó con formas curvilíneas. Filippo Tommaso Marinetti manifestó su fascinación por la máquina y su velocidad, declarando que el “mundo se ha enriquecido con una nueva

³²⁶ ROWE, C., & SLUTZKY, R. Transparencia: literal y fenomenal. En C. Rowe, *Manierismo y arquitectura y otros ensayos* (Tercera ed.). Gustavo Gili, 1999.

³²⁷ MOUSSAVI, y KUBO. Op.cit.

³²⁸ Mies expresa la idea de “desenmascarar” cuando plantea la siguiente relación entre el muro cortina y el esqueleto estructural: “Al colocar el cerramiento perimetral [...] se aniquila la idea estructural que es la base necesaria para la configuración artística, ocultándola generalmente tras una trivial mescolanza formal carente de sentido [...] El nuevo principio estructural [...] se manifiesta con claridad si se emplea el vidrio para realizar las paredes exteriores”. NEUMEYER, F. *La palabra sin artificio: reflexiones sobre arquitectura 1922/1968*. Madrid: El Croquis, 2000, p. 362

³²⁹ La “estética de la recepción” surge a mediados del siglo XX como contrapunto al pensamiento estético Moderno, donde la recepción de la obra de arte se basa en contemplación y, por tanto, en la pasividad del espectador. La fundaron Hans Robert Jauss, y Wolfgang Iser en la universidad alemana de Constanza.

³³⁰ SÁNCHEZ VÁZQUEZ, A. De la estética de la recepción a la estética de la participación. En MARCHÁN, S. (Ed.), *Real / Virtual en la estética y la teoría de las artes*. Barcelona; Buenos Aires; México: Paidós, 2006. p. 17

³³¹ Ibídem, p. 19

belleza, la belleza de la velocidad. Un automóvil de carreras [...] es más hermoso que la victoria alada de Samotracia”³³². Asimismo, Antonio Sant’Elia sostuvo que la aceleración de la vida metropolitana exigía una nueva arquitectura:

“Como si nosotros, acumuladores y generadores de movimiento, con nuestras prolongaciones mecánicas, con el ruido y con la velocidad de nuestra vida, pudiésemos vivir en las mismas casas, en las mismas calles construidas para [...] hombres de cuatro, cinco o seis siglos atrás”³³³.

El Futurismo presentó el dinamismo –movimiento, aceleración, velocidad– como una cualidad esencial de la vida metropolitana, que ayudaría a romper con el pasado y la tradición arquitectónica para crear una nueva sensibilidad basada en el gusto por lo ligero, lo práctico, lo efímero y lo veloz.³³⁴ Esta fascinación por el dinamismo se manifestó en el proyecto Cittá Nuova (1914) de Sant’Elia, en donde el tráfico se organiza en diferentes niveles –líneas de tranvía, calles para coches, pasarelas peatonales– (Figura 4.21). Según Antonio Pizza, estos flujos de movimiento son la base sobre la cual se erige la metrópoli, al mismo tiempo que materializan “el principio de dinamismo [y] de la velocidad, otorgando un significado ontológico al tema de la circulación mecánica”³³⁵.

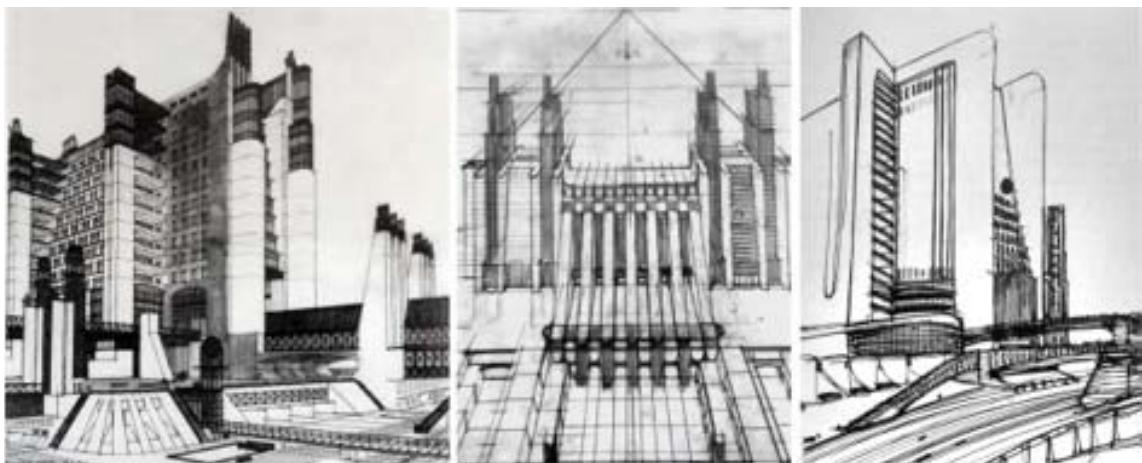


Figura 4.21 Cittá Nuova

En su expresión plástica, el dinamismo se representó por medio de formas diagonales y superficies curvilíneas que se oponen a “las líneas perpendiculares y horizontales, las formas cúbicas y piramidales, estáticas [y] extrañas a nuestra nueva sensibilidad”³³⁶. La Torre Einstein de Mendelsohn, 1921, fue de los primeros edificios en materializar el dinamismo propuesto por el Futurismo. Según Banham, la torre está concebida “como si el edificio consistiera en un blando material plástico manipulado por una mano

³³² En BANHAM. Op.cit., p. 113

³³³ En PIZZA, A., y GRACÍA, M. *Arte y arquitectura futurista (1914-1918)*. Op.cit., p. 68

³³⁴ Ibídem, pp. 70-71

³³⁵ Ibídem, p.36

³³⁶ BANHAM. Op.cit., p. 135

gigante”³³⁷. Zevi, por su parte, lo describió “[como] un bloque unitario, hinchado de materia solidificada, plasmado de un solo golpe”³³⁸. De acuerdo con estos historiadores, el dinamismo inherente a las líneas oblicuas de la torre se consigue por las cualidades plásticas y monolíticas del hormigón, pero, en realidad, sólo la base y la parte superior fueron realizadas en hormigón armado mientras que el cuerpo central es un muro de ladrillo revocado.³³⁹ De este modo, la Torre Einstein presenta un dinamismo plástico que se justifica metafóricamente, pero que comporta contradicciones entre la forma, los materiales y las técnicas de construcción (Figura 4.22).



Figura 4.22 Torre Einstein

Para superar este tipo de contradicciones que, en última instancia, surgen del recurso a la metáfora como mecanismo generador de la forma, en la era digital se construyen edificios cuyas fachadas actúan como una superficie-interfaz que generan sensaciones-efectos libres de mensajes y metáforas. En términos de Peter Zumthor, la sensación estética de la superficie-interfaz no recurriría a la “magia del pensamiento”, basada en la armonía entre sentimiento y razón, sino que se guía por la “magia de lo real” que se orienta a la creación de sensaciones atmosféricas.³⁴⁰

Durante la primera década del siglo XXI, la arquitectura experimentó con superficies-pantalla, por ejemplo, en el Kunsthaus, la Torre Agbar, el edificio Greenpix, la Galería Centrality o el Centro Comercial Iluma (Figura 4.23). Pero las imágenes generadas por las fachadas de estos edificios no responden a su interacción con el entorno, sino que más bien reflejan lo que Virilio describe como un “bombardeo de imágenes que reemplaza las palabras”³⁴¹. Para Lipovetsky y Serroy, estas superficies-pantalla se dirigen a un “nuevo espectador” que se estremece no tanto por lo que las imágenes cuentan sino por el efecto de sus colores, sonidos, formas, y ritmos.³⁴² Así, estas fachadas tornan el edificio en un objeto lúdico que, como diría Guy Debord, es

³³⁷ Ibídem, p. 180

³³⁸ ZEVI, B. *Enrich Mendelsohn*. Barcelona: Gustavi Gili, 1984. pp. 15-16

³³⁹ Ibídem, p. 47

³⁴⁰ ZUMPTHOR, P. *Atmósferas*. Barcelona: Gustavo Gili, 2006. pp. 17-19

³⁴¹ VIRILIO, P. *La bomba informática*. Madrid: Cátedra, 1999, p. 47

³⁴² LIPOVETSKY, G., y SERROY, J. *La pantalla global. Cultura mediática y cine en la era hipermoderna*. Barcelona: Anagrama, 2009. pp. 52-53

contrario al diálogo³⁴³ y produce efectos desde el “lenguaje del espectáculo [...] hecho con los signos de la producción imperante”³⁴⁴.



Figura 4.23 Kunsthauas Graz, de Cook; Torre Agbar, de Nouvel; Edificio Greenpix, de Giostra & Partners; Galería Centrivity, de UN; Centro Comercial Iluma, de WOHA & Interactive Architects.

Contrariamente a las superficies-pantalla, las fachadas sudeste y sudoeste del edificio Media-TIC de Ruiz-Geli, 2007, son interfaces mediante las cuales el edificio interactúa con su entorno físico y adapta su funcionamiento según la información que recibe y procesa. Estas dos fachadas modifican su composición para mejorar el rendimiento energético del edificio, adaptándose en tiempo real a parámetros como la temperatura y la radiación solar. La fachada sudoeste, que recibe aproximadamente seis horas de sol al día funciona como un filtro que se adapta dinámicamente a la incidencia de la luz solar modificando su configuración física. La transformación de la fachada se produce porque sus capas interior y exterior son láminas EFTE dispuestas para generar un colchón de aire interior que se mezcla con nitrógeno cuando la incidencia de la luz solar, detectada por los sensores de temperatura, es elevada. El nitrógeno aumenta la densidad del aire y genera una “nube” opaca que mejora el aislamiento térmico y reduce el factor solar de 0,35 a 0,19 (Figura 4.24).

La fachada sudeste también recibe seis horas de sol al día, pero está compuesta por diversos cojines conformados de tres láminas EFTE configuradas a modo de diafragma: la lámina exterior es transparente mientras que las láminas intermedia e interior están formadas por patrones invertidos que, al unirse, generan una capa opaca. Así, cada cojín contiene tres láminas y dos cámaras de aire intermedias. La lámina intermedia se une con la interior por medio de un sistema neumático que, al insuflar aire a una de las cámaras, desinfla la cámara contigua (Figura 4.25). Este movimiento se regula de

³⁴³ Ibídem

³⁴⁴ DEBORD, G. *La Sociedad del Espectáculo*. Valencia: Pre-Textos, 2008. p. 39

acuerdo con la información que el edificio recibe de un sistema de sensores similar al de la fachada sudoeste. De este modo, la circulación de aire entre las cámaras evita el uso de mecanismos para el desplazamiento de las láminas que regulan la radiación solar, lo que, a su vez, supone un ahorro energético. Por consiguiente, la fachada opera cinéticamente utilizando gases en su interior que modifican la sensación ambiental y mejoran el confort en el interior. Esto genera una variación atmosférica a lo largo del tiempo, con cambios de iluminación y temperatura, que producen variadas sensaciones.



Figura 4.24 Media-TIC: fachada suroeste

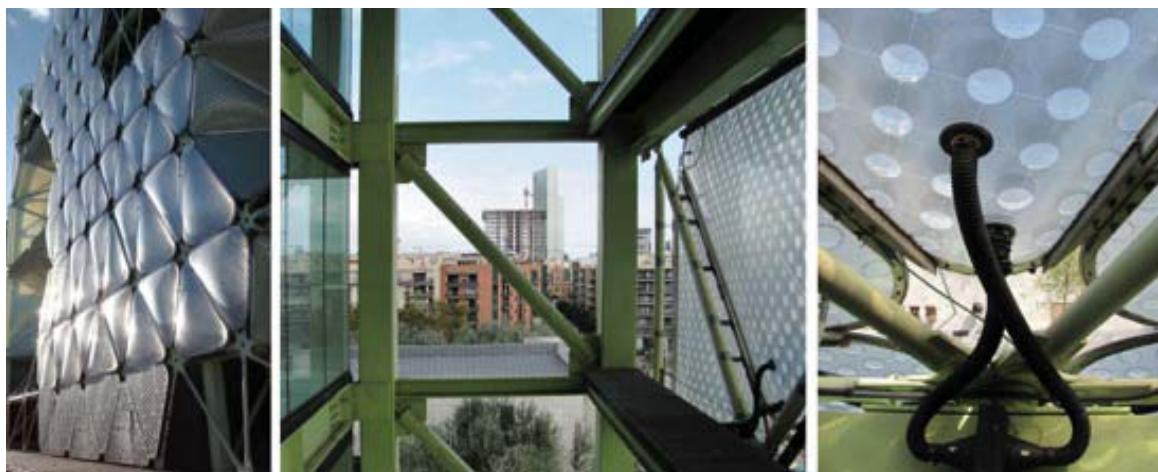


Figura 4.25 Media-TIC: fachada sureste

El Media-TIC es un ejemplo de arquitectura interactiva que utiliza la superficie de cerramiento como una interfaz. Al igual que los primeros edificios interactivos, como la Torre de los Vientos o el Instituto Árabe de París, la interacción del Media-TIC se consigue mediante dispositivos tecnológicos –mecánicos o electrónicos– que captan información del entorno y generan una respuesta. Menges, por otro lado, propone un cambio de paradigma en la arquitectura interactiva, para pasar de lo mecánico a lo biológico.³⁴⁵ Para ello, Menges propone estrategias de diseño que instrumentalizan las propiedades intrínsecas de la naturaleza, como sus cualidades higroscópicas, esto es, la

³⁴⁵ MENGES, A. Material Capacity: Embedded Responsiveness. *Architectural Design*, 2012. p. 54

capacidad de algunas plantas –piñas de ciprés o pino– para equilibrar su humedad interior en respuesta a los cambios de la humedad ambiental.³⁴⁶

La capacidad de las piñas para regular la humedad ambiental es un ejemplo de “programación fisiológica” que, junto con las cualidades anisótropas de la madera, Menges utiliza para generar edificios que no requieren dispositivos tecnológicos para adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno. Las plantas coníferas absorben agua y la incorporan químicamente a las fibras moleculares de celulosa. Cuando la humedad relativa decrece, las piñas absorben y fijan el agua molecularmente, pero cuando aumenta la humedad ambiental el agua se expulsa y se reduce la distancia entre las fibras. De este modo, aumenta la resistencia del conjunto debido a la unión interfibrilar al mismo tiempo que se reduce su dimensión por el efecto de compactación.³⁴⁷ A partir de ensayos físicos, se consigue determinar que cualquier absorción o expulsión de agua, fijada interfibrilarmente por debajo del punto de saturación fibrilar de la madera –que se encuentra entre el 27% y el 30% del contenido de humedad³⁴⁸– genera un cambio dimensional. Esto produce un movimiento sobre el eje transversal de la piña –perpendicular al tallo–, debido a las cualidades anisótropas de la madera (Figura 4.26).

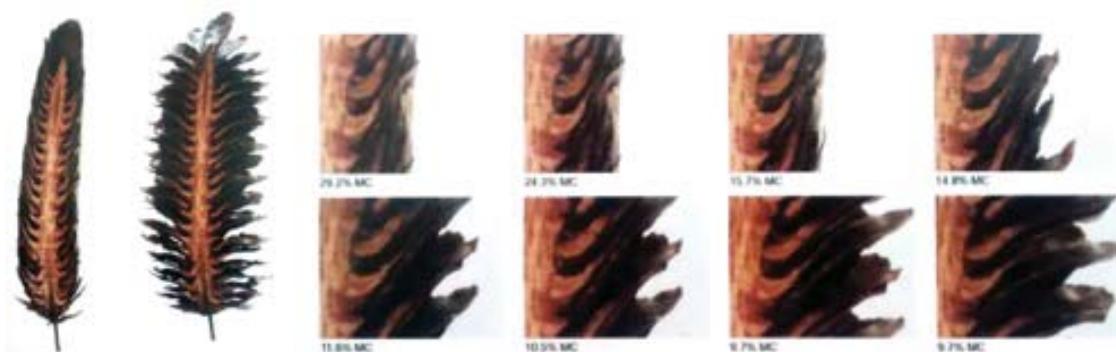


Figura 4.26 Comportamiento higroscópico de plantas coníferas

Basándose en los principios higroscópicos y anisótropos de las coníferas, Menges crea elementos compuestos de madera de arce y madera sintética que reaccionan de manera distinta a los cambios de humedad en el ambiente. Los elementos lineales que se crean a partir de estos componentes se configuran teniendo en cuenta la disposición de los elementos naturales y sintéticos; su relación dimensional, es decir, la ratio entre la longitud, el ancho y el espesor del elemento; la direccionalidad de las fibras de la madera; la geometría del elemento y el control de la humedad durante su fase de

³⁴⁶ La higroscopia implica la capacidad de una sustancia para absorber humedad de la atmósfera cuando está seca, o de expulsarla cuando está colmatada, manteniendo así su nivel de humedad en equilibrio con la humedad relativa del entorno. Ibídем, p. 54

³⁴⁷ Un efecto que sigue produciéndose aun cuando el tejido celular de la planta haya muerto, por cuanto esta posibilidad reside en la capacidad intrínseca del material para interactuar con el entorno. Ibídém, p. 55

³⁴⁸ La saturación fibrilar de la madera implica su capacidad para absorber agua y fijarla molecularmente. El contenido de humedad corresponde a la proporción entre el peso del agua y el peso de la madera que la contiene.

fabricación.³⁴⁹ La variación de estos parámetros permite crear módulos compuestos de dos láminas con propiedades diversas: al exponerse a una humedad del 40%, una lámina se pliega mientras la otra se mantiene recta, pero si la humedad aumenta al 70% se genera una reacción opuesta, de manera que la lámina recta se pliega mientras la curvada se endereza (Figura 4.27).



Figura 4.27 Programación fisiológica de láminas de madera

A partir de la agregación de módulos compuestos de dos elementos laminares y de geometría cuadrada, pueden generarse superficies que se adaptan a los cambios climáticos y se amoldan a las condiciones del lugar. Con el fin de mejorar la adaptabilidad de este tipo de superficies, se generó un módulo hexagonal que se utilizó en el diseño del Faz Summer Pavilion. En esta estructura, cuando llueve las láminas se cierran y crean una superficie impermeable; si cesa la lluvia el cambio de la humedad hace que se plieguen para facilitar la ventilación (Figura 4.28).

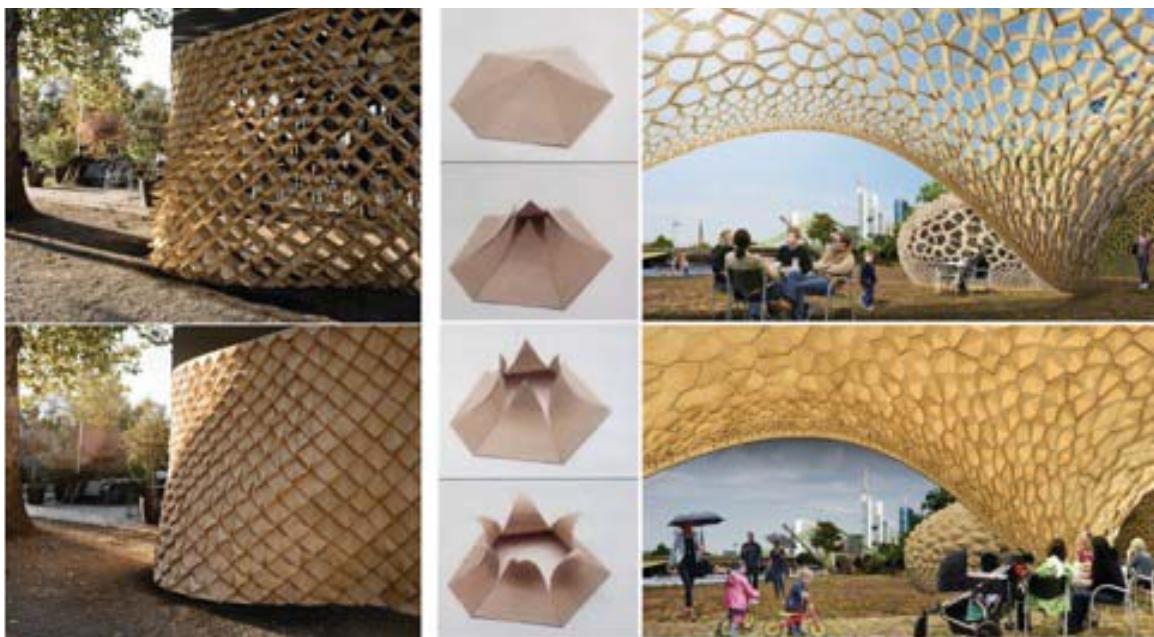


Figura 4.28 Superficie sensible a cambios climáticos; módulo hexagonal; Faz Summer Pavilion

³⁴⁹ Ibídem, pp. 56-57

La reacción dinámica del Faz Summer Pavilion, del Media-TIC o de los edificios con superficies-pantalla, es una cualidad ornamental que más allá de dar significado produce una estimulación sensorial inducida por el edificio. En el caso de las superficies-pantalla se produce una estimulación visual no-comunicativa, que no genera diálogo con el espectador ni con el entorno y pueden ser consideradas, por tanto, decorativas. Por el contrario, el Media-TIC y el Faz Summer Pavilion establecen una interacción con el entorno que es operativa más que decorativa: el edificio responde al entorno con el fin de optimizar el consumo de recursos materiales y energéticos y mantener la sensación de bienestar en el espacio interior. De este modo, los cambios se orientan a conseguir optimización funcional y confort, pero esto no les impide crear un efecto decorativo-lúdico, igual que en el caso de las superficies-pantalla, o adquirir un sentido o significado ecológico por minimizar el impacto ambiental.

La capacidad de estos edificios para actualizar su apariencia y comportamiento es una cualidad ornamental sin precedentes que ha transformado el modo en que un edificio transmite mensajes y sensaciones. En este sentido, dicha capacidad constituye un *ornamento técnico-funcional* que alude a la conservación y el bienestar de los seres humanos. Según Lévy, cuando adquiere la capacidad de actualizarse, el objeto arquitectónico se “virtualiza” porque puede pasar de un estado a otro en respuesta a los cambios del entorno.³⁵⁰ Así, más allá de la actualización de los mensajes y sensaciones que se generan a través del ornamento tradicional por la interpretación que el individuo hace de ellos, lo que se actualiza con el ornamento digital es la obra arquitectónica en sí. El edificio se transforma en un objeto sensible y dinámico, es decir, expresivo, cinético, interactivo y performativo. Este ornamento, digital e interactivo, refleja la transición desde ornamento determinado por el sentimiento estético, hacia uno funcional y económico basado en la eficiencia y la eficacia.

4.2.5 De la productividad a la performatividad

El aumento de la productividad, el ahorro de material y de tiempo de trabajo obtenidos con la mecanización y la organización productiva, eran objetivos fundamentales de la industrialización.³⁵¹ Las sociedades industriales se caracterizan por “una actitud ‘economicista’ (maximización, optimización, menor costo) no sólo hacia los recursos naturales, sino hacia todos los aspectos de la vida”³⁵². En la arquitectura moderna, esta actitud cristalizó en un lenguaje formal de líneas rectas y superficies planas con un significado ético y estético, al presentarse como formas “puras” y “éticas”.

³⁵⁰ En términos generales, Pierre Lévy diferencia la “actualización” de la “virtualización” de la siguiente manera: “La actualización iba de un problema a una solución. La virtualización pasa de una solución dada a un (otro) problema.” LÉVY, P. *¿Que es lo virtual?* Barcelona, Buenos Aires, Ciudad de México: Paidós, 1999, p. 13

³⁵¹ Véase Capítulo 3.2.1

³⁵² WEBER, M. *Gesammelte Politische Schriften*. En BELL, D. *El advenimiento de la sociedad post-industrial*. Madrid: Alianza, 2006, p. 87

En los años 1950, a partir de la cibernetica, la actitud economicista cambia cuando la sociedad se concibe como un sistema auto-regulado en el que, según Lyotard, “la armonía de las necesidades y las esperanzas de los individuos o grupos con las funciones que asegura el sistema sólo es un componente adjunto de su funcionamiento; la verdadera fiabilidad del sistema, eso para lo que él mismo se programa como una máquina inteligente, es la optimización de la relación global de sus input con sus output, es decir, su performatividad”³⁵³. Bajo la noción de performatividad, la actitud economicista se extendió de la fase productiva a la fase operativa, de modo que abarcó tanto la eficiencia productiva como la eficacia funcional.

La productividad y la performatividad forman parte de las “fuerzas” visibles e invisibles que conforman la sociedad y que la arquitectura utiliza, según Moussavi, para vincularse culturalmente a ella a través del ornamento.³⁵⁴ De esta manera, si la sociedad redefine sus modos y relaciones de producción,³⁵⁵ el ornamento digital se adapta a los nuevos principios de productividad y performatividad inherentes a los modos y las relaciones de producción de la sociedad digital.

Según Castells, la “producción en red” representa el nuevo paradigma de productividad y el nuevo agente del capitalismo.³⁵⁶ Así, las tramas no-lineales que caracterizan el lenguaje plástico de la arquitectura digital expresan las relaciones que estructuran la actual producción global, cuyos procesos descentralizados, interconectados y sincrónicos se organizan mediante redes telemáticas. Una organización productiva opuesta a la linealidad, secuencialidad y fragmentariedad de la cadena de montaje (Figura 4.29). Igualmente, en la medida en que las relaciones de producción engloban las relaciones de poder,³⁵⁷ las mallas estructurales-ornamentales expresan la organización del capital y los mercados.³⁵⁸

Por otra parte, Castells sugiere que el “espíritu del informacionalismo” está basado en una cultura multifacética que, en el ámbito laboral, tiene su reflejo en los trabajadores multifuncionales.³⁵⁹ En este contexto, las mallas también pueden considerarse como una expresión del espíritu del informacionalismo, puesto que son elementos arquitectónicos multifacéticos y multifuncionales que operan simultáneamente a nivel estructural, ornamental, ambiental y espacial. En este contexto, la performatividad del diseño arquitectónico se orienta a la “eficacia” y, sobre todo, hacia una “eficacia biológica”, resultado de un proceso de desarrollo que comprende una amplia gama de criterios.³⁶⁰

³⁵³ LYOTARD, J. F. *La condición postmoderna* (Décima ed.). Madrid: Cátedra, 2008. p. 30

³⁵⁴ MOUSSAVI, y KUBO. Op.cit. p.2

³⁵⁵ LEFEBVRE. Op.cit. p. 91

³⁵⁶ CASTELLS. Op.cit. pp. 251-253

³⁵⁷ LEFEBVRE. Op.cit. p. 92

³⁵⁸ Según Lefebvre, “el capitalismo posee muchos componentes: el capital fundario, el capital comercial y el capital financiero [...] Estas diversas razas de capital (y de capitalistas), junto con los diversos mercados que traman –el mercado de productos, el mercado laboral, el mercado de los conocimientos, el mercado de los capitales y el mercado del suelo– constituyen el capitalismo.” LEFEBVRE. Op.cit. p. 71

³⁵⁹ CASTELLS. Op.cit. pp. 209, 253

³⁶⁰ Ibídem.

Según Kolarevic, la pluralidad funcional asociada a la performatividad del edificio, no solo responde a las técnicas de diseño digital que permiten trabajar simultáneamente con múltiples parámetros, sino que implica la aceptación de la sostenibilidad como objetivo generalizado de la economía y de la sociedad.³⁶¹



Figura 4.29 Seagram Building, de Mies; Estadio Olímpico de Pekín, de Herzog & De Meuron

La performatividad implica un cambio de la eficiencia por la eficacia por cuanto no se trata, únicamente, de optimizar los recursos materiales y económicos durante la construcción del edificio, sino de optimizar su funcionamiento. En este contexto la naturaleza se revela como un modelo arquitectónico:

“Nature’s way, materials are to be designed for highly customized functions rather than simply be selected and assigned to preconceived shapes. This requires the [...] utilization of heterogeneous and variable properties that may potentially correspond to a given set of performance criteria. [...] Such materials are responsive in the sense that their microstructure is optimized to specific performance requirements”³⁶².

Esta manera de entender la naturaleza, como un modelo de producción que conjuga elementos heterogéneos en un sistema multifuncional, responde a la noción de “sistema material” propuesta por Hensel y Menges, un sistema basado en la interrelación de parámetros formales, materiales, estructurales y comportamentales.³⁶³ En este contexto, la concepción de la naturaleza responde a la distinción, establecida por la cibernetica entre el “patrón de organización” de un sistema y su “estructura física”, a partir de la cual se reconoció la red como patrón de organización de un sistema; esto es, el patrón que determina las relaciones entre sus componentes y que se manifiesta a través de su

³⁶¹ KOLAREVIC, B. Computing the Performative. En OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture*. London: Routledge, 2014. p. 105

³⁶² OXMAN, N. *PhD Thesis: Material-based Design Computation*. Op.cit., p. 32

³⁶³ Véase Capítulo 4.2.3.2

estructura.³⁶⁴ En este sentido, las mallas estructurales-ornamentales son la manifestación plástica de la concepción e instrumentalización de la naturaleza que subyace en el modelo sistémico; en otras palabras, la malla es la imagen sistemática de la naturaleza en la arquitectura digital y resulta de imitar sus cualidades intrínsecas y su performance.

La red es el paradigma del nuevo *estilo digital*, entendiendo “por estilo, solamente la expresión unitaria resultante de todas las manifestaciones espirituales de una época”³⁶⁵. En este sentido, el ornamento digital expresa el vínculo de la arquitectura con nuestra cultura multifacética y con la complejidad inherente a los procesos no lineales que conforman tanto la naturaleza primaria como los sistemas productivos y económicos globales.

Las transformaciones en la apariencia del edificio debidas a la interacción con el entorno pueden producir un efecto lúdico que no requiere interpretación. Asimismo, los cambios de la estructura física del edificio y de su ambiente interior como reacción a los cambios en el entorno, no solo son la manifestación de un ornamento que no requiere interpretación, sino que simplemente se siente. En este contexto, los estímulos visuales y las sensaciones de bienestar y confort son cualidades del ornamento digital que lo emancipan de la interpretación asociada al ornamento tradicional. Asimismo, el edificio se convierte en un objeto sensible y activo, cuya performance está relacionada con los procesos de auto-regulación de los sistemas naturales.

La doble condición del ornamento digital, como fenómeno y como interacción, actualiza las nociones de “transparencia física” y “transparencia fenomenal” planteadas por Rowe y Slutzky. El ornamento basado en mallas estructurales-ornamentales que imitan la organización no-lineal de los sistemas naturales, se asocia a cualidades físicas del edificio al igual que la “transparencia física” responde a las propiedades materiales del vidrio. El ornamento interactivo, basado en procesos de auto-regulación y adaptación, se asocia a las condiciones espaciales del edificio, como la “transparencia fenomenal”, y no depende de la interpretación pues producen efectos o sensaciones físicas debidas a cambios de temperatura, iluminación, o humedad. Así, el ornamento interactivo que emerge de la performance del edificio, más allá de dar significado a la arquitectura, tiene consecuencias económicas y ecológicas porque manifiesta los cambios comportamentales-performativos que mejoran el rendimiento del edificio. Asimismo, la estética de la economía, que durante el siglo XX se basó en la productividad, actualmente se expande a la performatividad; es decir, si la belleza del edificio anteriormente se asociaba a la eficiencia constructiva, hoy se asocia, también, a su comportamiento eficaz.

³⁶⁴ CAPRA. Op.cit., pp. 171-172

³⁶⁵ BEHRENS. Op.cit., p. 102

4.3 Del diseño digital a la fabricación tradicional

La relación que la arquitectura digital ha establecido con la naturaleza mediante técnicas como el diseño evolutivo, está dando lugar a una nueva complejidad plástica que resulta del cómputo simultáneo de múltiples variables de diseño. El trabajo de investigación de Alberto Pugnale se centra en el diseño y la construcción de membranas estructurales ligeras y eficaces: “The search for form is highly dependent on the materials and construction techniques used, but also on the final structural performance. Otherwise, the structure won’t be lightweight”³⁶⁶. Uno de sus trabajos es la membrana estructural realizada en la Universidad del Melbourne en el marco del curso ‘Issues in Technology’, en colaboración con Sofia Colabella, Sergio Pone y Alessandro Liuti. En este trabajo se explora la hibridación del diseño computacional con técnicas de construcción tradicional para crear membranas estructurales ligeras y resistentes.

4.3.1 De la tradición a la innovación

Pugnale aplica el diseño evolutivo para desarrollar estructuras complejas que minimicen el consumo de recursos naturales. Esto supone crear diseños arquitectónicos alineados con el desarrollo sostenible, adoptando una visión racional –no romántica– de la naturaleza. La aplicación del diseño evolutivo y del diseño morfogenético al diseño de estructuras permite crear mallas no-lineales que se asemejan a las estructuras creadas por la naturaleza. Con sus estructuras, Pugnale aspira a reproducir la simplicidad de los procesos que sigue la naturaleza en sus creaciones y, al mismo tiempo, preservar los vínculos con la tradición constructiva de la era pre-digital.³⁶⁷ En la construcción con técnicas digitales, la simplificación se consigue con elementos producidos con técnicas CAD/CAM que se ensamblan fácilmente. Por ejemplo, los pabellones de Menges o las viviendas Wikihouse se construyen con elementos cuyas juntas son indisociables de su forma y requieren de la fabricación digital para ser manufacturados con precisión y para reducir las tolerancias. Así, para evitar que el diseño digital quede limitado por la aplicación de herramientas de fabricación digital, Pugnale sugiere conjugar el diseño innovador (high-tech) con la construcción tradicional (low-tech); esto es, combinar el diseño digital con los procesos de auto-construcción que requieren mano de obra no cualificada y tecnologías simples.³⁶⁸

³⁶⁶ MELBOURNE SCHOOL OF DESIGN. *Digital design and construction meets ancient technology*. Recuperado el 26 de 04 de 2017, de University of Melbourne: <https://msd.unimelb.edu.au/digital-design-and-construction-meets-ancient-technology>

³⁶⁷ Ibídem

³⁶⁸ PUGNALE, A. (15 de 02 de 2017). *Entrevista con Alberto Pugnale*. (ABONDANO, D. Entrevistador) Skype.

4.3.2 Del high-tech al low-tech

El objetivo de Pugnale es la generación y optimización de la forma, con base en principios estructurales y en la aplicación de algoritmos genéticos, explotando el poder del cálculo computacional para ensayar diversas soluciones a un problema de diseño. De esta manera, no se parte de una solución predefinida, sino que se generan formas de manera aleatoria (*free-form*) hasta conseguir una que se pueda construir. En este sentido, Pugnale considera que los algoritmos genéticos imitan el proceder de la naturaleza, ya que en la evolución natural no hay un fin preestablecido.³⁶⁹ Sin embargo, las formas diseñadas digitalmente deben poderse construir y, si no es posible, es porque se alejan de los principios de la naturaleza.³⁷⁰



Figura 4.30 Elementos estructurales fabricados con listones de madera estandarizados y herramientas simples

Los elementos constructivos de la membrana se fabricaron con listones de madera estandarizados y herramientas simples utilizadas por los estudiantes (Figura 4.30). La membrana se compone de cinco módulos cuyos elementos se fabricaron en taller con sierras mecánicas y, luego, fueron ensamblados *in situ* con tornillos por un equipo de 16 estudiantes. Los módulos ensamblados configuran una retícula plana en forma de cruz que se dispuso sobre el suelo (Figura 4.31) se plegó y elevó hasta una altura de coronación de 3,5 m, utilizando mástiles y poleas, y empleando la fuerza de tan sólo cuatro personas (Figura 4.32).³⁷¹

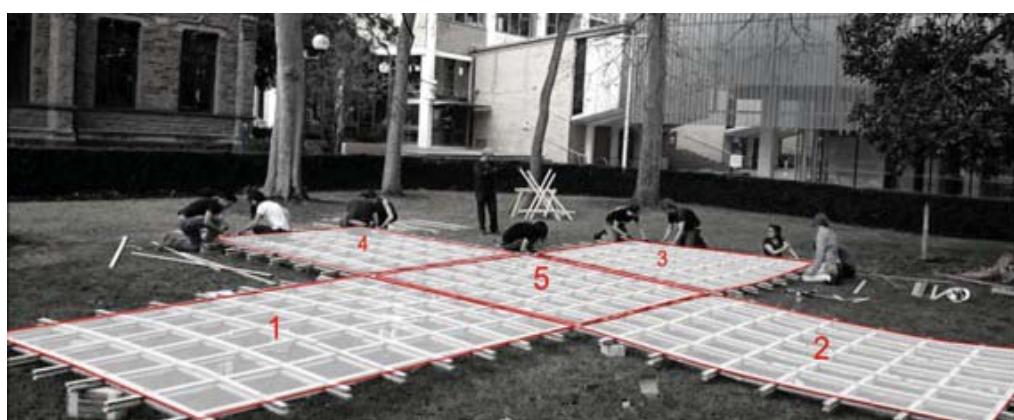


Figura 4.31 Despliegue de 5 módulos ensamblados

³⁶⁹ Ibídem.

³⁷⁰ Ibídem.

³⁷¹ Ibídem.

La resistencia de la membrana radica en su geometría de doble curvatura que se aprovecha de las propiedades elásticas de la madera. Componen la membrana cinco módulos que generan una malla principal que, una vez levantada, se refuerza con elementos diagonales que conforman a una malla secundaria (Figura 4.33). La membrana alcanza una luz de 7,5 m con un grosor de 78 mm, por lo que puede considerarse una estructura ligera que cubre una luz con poco material.³⁷² Este ahorro de material se consigue optimizando la forma de la estructura mediante el cómputo simultáneo de múltiples variables de diseño. Así, la conjugación de los diversos parámetros que definen la forma de la membrana, hace que su comportamiento se asemeje al de los sistemas naturales; una cualidad que, según Pugnale, la hace más “sostenible”³⁷³ (Figura 4.34).

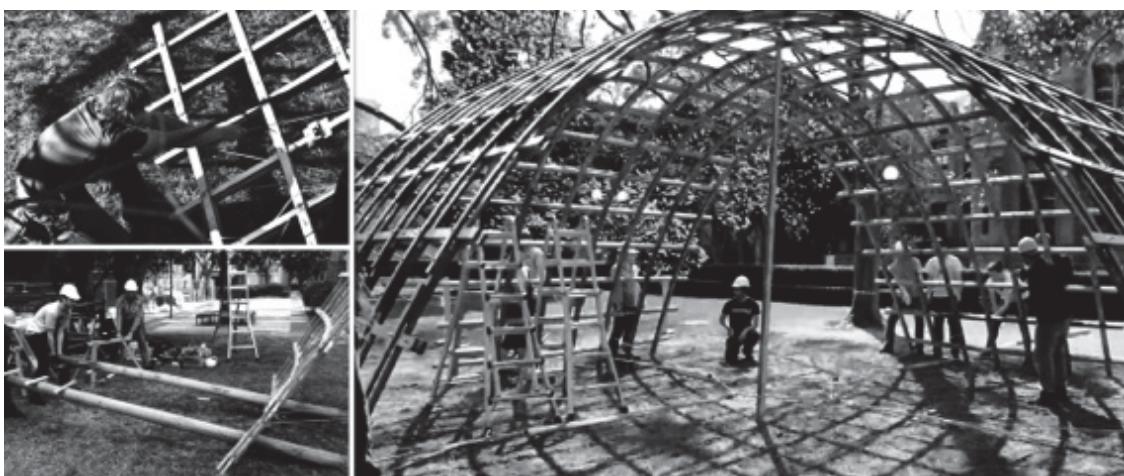


Figura 4.32 Levantamiento de la membrana con mástiles y poleas

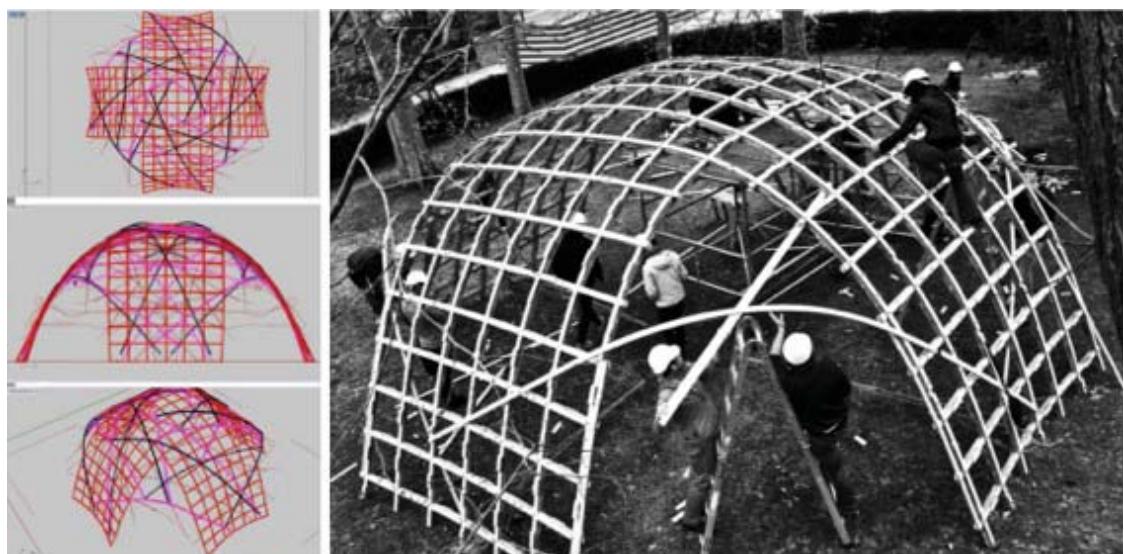


Figura 4.33 Diseño y construcción de la malla de refuerzo diagonal

³⁷² Ibídem.

³⁷³ Ibídem.



Figura 4.34 La red como la nueva morfología de la naturaleza adoptada por la arquitectura

Conclusiones

La cultura arquitectónica que se conformó tanto en los inicios del siglo XX como en los del siglo XXI constituye un hecho histórico, tal como lo entendieron Benjamin y Weber: la expresión del “sueño colectivo” por aplicar las técnicas y los materiales facilitados por el desarrollo tecnológico³⁷⁴ y del “desencantamiento” que desplazó las ilusiones y el sentido de la arquitectura a nuevos ámbitos. En la arquitectura moderna el sueño colectivo giró en torno a las posibilidades artísticas y funcionales de la máquina, que dieron lugar a una estética alineada con los modos, los medios y los principios de la producción industrial, y a un ideal de mejorar las condiciones de la vida con una arquitectura económicamente asequible producida industrialmente. En la arquitectura digital las posibilidades artísticas y funcionales radican en la aplicación del cálculo computacional para generar formas que reproducen la organización intrínseca y los procesos que lleva a cabo la naturaleza, para crear edificios interactivos que adaptan su comportamiento a las contingencias medioambientales con el fin de optimizar su rendimiento y crear efectos espaciales.

El deseo de “ser modernos” condujo, indirectamente, al rechazo de la naturaleza y de las formas inspiradas en ella. Las cualidades simbólicas y estéticas ligadas a la apariencia de la naturaleza perdieron su “encanto” y fueron suprimidas a partir de un proceso de abstracción basado en la deconstrucción de la forma mediante geometrías simples. Esto implicó el fin de la representación de la naturaleza y dio lugar a un lenguaje plástico basado en elementos geométricos lineales. Al mismo tiempo, se despojó a la naturaleza de sus cualidades trascendentales para considerarla solo como reserva de materias primas. La metrópolis se erigió como el entorno característico de la civilización moderna, regulada por las leyes de la industria y el mercado que, con ello, se proclamaron leyes “naturales”. En este contexto emergió una estética de la máquina que alineó el arte y la arquitectura con la producción industrial y la metrópoli.

La estética de la máquina se desarrolló conjuntamente desde el arte y la arquitectura: el Futurismo abarcó la pintura, la escultura, la poesía y la arquitectura; Theo van Doesburg vinculó el Elementarismo arquitectónico con el arte neoplásticista; Le Corbusier desarrolló el Purismo en el arte y aplicó sus principios a la arquitectura; la arquitectura de Gropius y Mies no puede separarse de la experimentación plástica del Bauhaus. Este vínculo entre arte y arquitectura mantuvo vivo un “sentimiento estético” que se desplazó de lo natural a lo maquínico. Así, si el arte y la estética tienen como función la gestión de la ilusión, la estética de la máquina fue el mecanismo empleado por las vanguardias modernas para gestionar la ilusión creada por el advenimiento de la máquina; gestión que implicó el desplazamiento del “encantamiento” por la naturaleza hacia el “encantamiento” por la máquina. Por el contrario, la cultura arquitectónica, desarrollada en torno a las tecnologías digitales, prioriza las leyes científicas sobre los principios artísticos y rechaza recurrir a la apariencia, la ideología o el simbolismo

³⁷⁴ Véase conclusión de Capítulo 1

inherente a las formas. A pesar de ello, la arquitectura digital tiene unas cualidades estéticas, ideológicas y simbólicas que la caracterizan, al igual que los arquitectos digitales tienen ilusiones y sueños colectivos que guían su trabajo.

Algunas de las ilusiones o sueños colectivos de la arquitectura digital giran en torno a la fusión entre naturaleza y tecnología. Es esta una ilusión basada en la imitación de los procesos de auto-organización y auto-regulación que determinan la generación y conservación de los organismos naturales. Asimismo, esta percepción de la naturaleza está ligada a las categorías visuales y perceptivas que aporta la transparencia mediática: la macro-visión posibilitada por satélites permite entender la naturaleza como un gran sistema que funciona holísticamente y la micro-visión permite adentrarnos en la materia para comprender su estructura molecular y su comportamiento.

Las ilusiones asociadas a la micro-visión de la naturaleza se centran en su organización intrínseca y, más precisamente, en la posibilidad de decodificar, manipular y reprogramar los códigos de información que controlan el crecimiento de la materia viva para aplicarlos en el diseño evolutivo. En estas técnicas se entiende que el proyecto arquitectónico no es “diseñado” por personas, sino que “evoluciona” computacionalmente aplicando leyes de la evolución natural. En este contexto, el edificio se concibe como una forma de vida artificial y presenta patrones de comportamiento que generan la ilusión de reproducir un sistema que puede llegar a comportarse como un organismo vivo.

Desde los procesos de diseño evolutivo emergen propiedades y formas que no han sido preconcebidas en la mente de un diseñador. Esta emergencia comporta una sensación estética asociada a las cualidades de lo “sublime dinámico”, esto es, un sentimiento estético asociado a la presencia de una fuerza o poder incommensurable. En los inicios de la embriología, el ADN se consideró una “fuerza esencial” para que la materia desorganizada se consolidase como un organismo o, en los términos de Aristóteles, una “potencia virtual” que da lugar a la forma. Así entendido, el código genético representa una fuerza incommensurable, o potencia virtual, en la que se fundamenta el sentimiento estético de la arquitectura evolutiva cuya ilusión radica en el potencial de crear formas que están más allá del alcance del intelecto humano y en la posibilidad de generar edificios que sean sistemas abiertos. De este modo, la ilusión estética está ligada a la incertidumbre y espontaneidad inherente a la emergencia de propiedades sistémicas y al comportamiento dinámico del edificio en razón de su interacción con el entorno.

La ilusión de crear edificios que se generan y se comportan como organismos vivos es un objetivo que implica más al diseñador que el usuario. Sin embargo, los edificios que interactúan y se adaptan al entorno, generan efectos y sensaciones que experimenta el usuario consciente o inconscientemente. De esta manera, la instrumentalización de la naturaleza para crear edificios interactivos y adaptativos, conlleva la primacía de la “sensación” sobre el “sentimiento”, esto es, el abandono de las cualidades

comunicativas del ornamento, basadas en la transmisión de un mensaje, en favor de la creación de efectos como el confort o la excitación sensorial.

Los efectos y sensaciones fisiológicas de la arquitectura adaptativa dan sentido a un ornamento digital cuyo carácter es instrumental, no metafórico. Si el “movimiento” en la arquitectura moderna fue una cualidad plástica asociada a formas curvilíneas y fluidas, en la arquitectura adaptativa corresponde a cambios de comportamiento que tienen consecuencias funcionales resultantes de procesos de auto-regulación que afectan las prestaciones del edificio. En este sentido, la arquitectura digital se acerca a la e-topía de Mitchell, que plantea un futuro con edificios inteligentes cuyo funcionamiento responde automáticamente a las necesidades del habitante y con ciudades económicas y ecológicas que funcionan de manera inteligente. Un ideal, que no solo responde a la visión de los movimientos ambientalistas que rechazaron la división categórica entre lo “natural” y lo “artificial” cuando entendieron que la naturaleza primaria y la segunda naturaleza, artificial, son parte de un mismo sistema. Esta automatización de la arquitectura, y también de la ciudad, responde al interés compartido por la economía, la política, la industria y el diseño, por desarrollar entornos sostenibles que reduzcan el consumo de recursos y minimicen los daños medioambientales.

Aunque la automatización de la arquitectura contribuye al desarrollo de ciudades sostenibles, no garantiza que sirva para transmitir el compromiso medioambiental de la arquitectura. Es decir, la arquitectura sostenible conlleva un mensaje ornamental que es contingente pero, en la arquitectura cuyo funcionamiento se adapta automáticamente a los cambios de entorno, esta contingencia se compensa por la estimulación de los sentidos. Así, el ornamento digital actúa en consonancia con una sociedad en la que “ya no se quiere únicamente vivir mejor, en el confort y el consumo de bienes [...], sino vivir más intensamente, desarrollar la intensidad nerviosa de la vida”³⁷⁵. En este sentido, el efecto ornamental creado por la arquitectura interactiva responde al deseo de vivir más intensamente, en la medida en que las superficies arquitectónicas se convierten en interfaces-pantalla que estimulan visualmente al habitante, transformando la apariencia que presentan o que modifican las condiciones ambientales por la creación de efectos atmosféricos.

La arquitectura adaptativa responde al deseo de vivir más intensamente, pero, también, al interés colectivo por la sostenibilidad que hoy se presenta como un objetivo necesario para la conservación y bienestar de las sociedades industrializadas. La biomimética, como estrategia de diseño para alcanzar una arquitectura sostenible, no sólo responde al deseo colectivo de un mejor futuro, sino que sitúa la arquitectura digital en las nuevas economía y ética del trabajo, basadas en la conservación del capital natural. En este sentido, el diseño biomimético promueve una arquitectura de vanguardia acorde con los intereses de la industria y la economía, pero que implica una nueva relación entre arquitectura y naturaleza: la naturaleza retorna como modelo codificado

³⁷⁵ VIRILIO, P. *El arte del motor. Aceleración y realidad virtual*. Buenos Aires: Manantial, 1996. p.132

matemáticamente y carente de su aura mística. Así, mientras la naturaleza fue para la arquitectura moderna una reserva de materias primas, en la arquitectura digital se presenta como una fuente de información para diseñar edificios más eficaces.

La arquitectura digital se inscribe en el proyecto moderno, en la medida en que se orienta a mejorar la calidad de vida en las sociedades industrializadas. En otras palabras, la arquitectura digital asume el rol sociopolítico de la arquitectura moderna, responder al sueño colectivo de mejorar la vida cotidiana desarrollando soluciones técnicas y universales. Mientras que la arquitectura moderna expulsó a la naturaleza, la de la era digital la recobra como modelo sistémico a partir del cual se crean edificios capaces de asegurar la conservación de los bienes naturales y el bienestar de las personas.

Este cambio de perspectiva está asociado al propósito de establecer una arquitectura digital sobre bases científicas, para que la valoración de un edificio no dependa de un juicio estético sino que se base en métodos experimentales.. En este contexto, cabe valorar las prestaciones de un edificio en términos de eficiencia productiva y eficacia funcional, más allá de los términos de la belleza en el sentido clásico. La arquitectura digital pone de manifiesto el “fin de la representación” y se rebela contra cualquier afán de lectura o interpretación. Es una arquitectura de carácter inmanente que prescinde de cualquier relación místico-trascendental con la naturaleza para justificarse y pasa a valorarse por su capacidad para conservar el capital natural en sus fases de producción y de funcionamiento.

La transición desde un pensamiento de bases estéticas hacia uno epistemológico, ha transformado, aunque no suprimido, las cualidades simbólicas del ornamento arquitectónico. Esta transformación se refleja en la actualización de la relación entre la arquitectura y la naturaleza según la cual la no-linealidad es una expresión plástica de la arquitectura digital. Esta expresión no solo responde a la adopción de la red como una “morfología natural” sino que expresa los ideales colectivos de una sociedad comprometida con el medio ambiente. Mientras la no-linealidad se erige en característica del *ornamento plástico* de la arquitectura digital, el *ornamento interactivo* es de carácter fenomenológico y opera a través del espacio creando sensaciones derivadas de la optimización funcional y el aumento de confort o de la estimulación sensorial con fines lúdicos. Así, el ornamento interactivo encarna el retorno de los fenómenos naturales, después de su “desaparición” como resultado de la revolución científica.

El ornamento digital deriva del modelo sistémico adoptado por la arquitectura, modelo que se asocia con una instrumentalización de la naturaleza característica de la civilización de nuestro tiempo. Es la expresión de un sueño colectivo fomentado por el desarrollo tecnológico conducente al desarrollo de sistemas –edificios o ciudades– que actúan como formas de vida, difuminando así las fronteras entre lo natural y lo artificial.

Bibliografía

- BANHAM, R. *Teoría y diseño en la primera era de la máquina* (Cuarta ed.). Barcelona: Paidós, 1985.
- BAUDRILLARD, J. *Pantalla Total*. Barcelona: Anagrama, 2000.
- BAUDRILLARD, J. *El complot del arte. Ilusión y desilusión estéticas*. Buenos Aires: Amorrortu, 2007.
- BEHRENS, P. Arte y técnica. En MALDONADO, T. (Ed.). *Técnica y cultura. El debate alemán entre Bismarck y Weimar* (pp. 100-114). Buenos Aires: Infinito, 2002.
- BELL, D. *El advenimiento de la sociedad post-industrial*. Madrid: Alianza, 2006.
- BENJAMIN, W. *Obra de los pasajes* (Vol. 1). Madrid: Abada, 2013.
- BENTLEY, P. *Evolutionary Design by Computers*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999.
- BENYUS, J. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: Harper Perennial, 2002.
- BRAUNGART, M., & McDONOUGH, W. *Cradle to Cradle*. London: Vintage, 2009.
- BUCKMINSTER FULLER, R. *El capitán etéreo y otros escritos*. Murcia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de las Región de Murcia, 2003.
- BUCKMINSTER FULLER, R. (03 de 08 de 2010). *Operating Manual for Spaceship Earth*. Recuperado el 27 de 07 de 2012, de Buckminster Fuller Institute: bfi.org/about-bucky/resources/books/operating-manual-spaceship-earth/chapter-5-general-system-theory
- CACHE, B. *Projecticles*. London: Architectural Association, 2011.
- CAPRA, F. *La trama de la vida: una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Barcelona: Anagrama, 1998.
- CASTELLS, M. *La era de la información: economía, sociedad y cultura* (Segunda ed., Vol. I. La sociedad red). Madrid: Alianza, 2000.
- CHAMBERS, S. & COSTAIN, A. (Edits.). *Deliberation, Democracy, and the Media*. New York: Rowman & Littlefield, 2000.
- COLLINS, P. *Las ideas de la arquitectura moderna; su evolución (1750-1950)*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.
- DEACON, T. *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia*. Barcelona: Tusquets, 2013.
- DEBORD, G. *La Sociedad del Espectáculo*. Valencia: Pre-Textos, 2008.
- DELEUZE, G., & GUATTARI, F. *¿Qué es la filosofía?* Barcelona: Anagrama, 1993.
- DESCARTES, R. El discurso del método. En ANDRÉS. R (Ed.). *Descartes, vida, pensamiento y obra* (pp. 218-273). Madrid: Planeta DeAgostini, 2007.
- DURAND, J. N. *Compendio de lecciones de arquitectura*. Madrid: Pronaos, 1981.
- ESTÉVEZ, A. *Arquitecturas genéticas II: medios digitales y formas orgánicas*. Barcelona: SITES Books / ESARQ, 2005.
- FANNELLI, G., y GARGIANI, R. *El principio del revestimiento*. Madrid: Akal, 1999.
- FERRATER MORA, J. *Diccionario de filosofía. Tomo II*. Buenos Aires: Sudamericana, 1974.
- FLEISCHMAN, M., LIENHARD, J., & MENGES, A. Computational Design Synthesis. Embedding Material Behaviour in Generative Computational Processes. In Zupancic, T., M. Juvancic, Verovsek, S., & Jutraz, A. *Respecting Fragile Places* (pp. 759-767). Ljubljana: eCAADe & UNI Ljubljana, Faculty of Architecture, 2011.
- FORTY, A. *Objects of Desire. Design and Society since 1750*. London: Thames & Hudson, 1986.
- FORTY, A. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. New York: Thames & Hudson, 2000.
- FORTY, A. *Concrete and Culture: a Material History*. Lóndres: Reaktion, 2013.
- FRAMPTON, K. *Labour, work and architecture*. New York: Phaidon, 2002.

- FRAZER, J. *An Evolutionary Architecture*. London: Architectural Association, 1995.
- FRAZER, J. Un modelo natural para la arquitectura. La naturaleza del modelo evolutivo. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando* (pp. 29-38). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- GÄNSHIRT, C. *Tools for Ideas. An Introduction to Architectural Design*. Basilea, Boston, Berlín: Birkhäuser, 2007.
- GIEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009.
- GLEINIGER, A., & VRACHLIOTIS, G. *Simulation: Presentation Technique and Cognitive Method*. Basel; Boston; Berlín: Birkhäuser, 2008.
- GRAMAZIO, F. *Lift Conference Videos: Fabio Gramazio - Digital Materiality in Architecture*. Recuperado el 15 de 01 de 2017, de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=Uwr2TkRugtg&t=112s>
- GRAMELSBERGER, G. The Epistemic Texture of Simulated Worlds. In GLEINIGER, A., & VRACHLIOTIS, G. (Edits.), *Simulation: Presentation Technique and Cognitive Method* (pp. 83-90). Basel: Birkhäuser, 2008.
- GROPIUS, W. Principios para la producción del Bauhaus. En MALDONADO, T. (Ed.). *Técnica y cultura. El debate alemán entre Bismarck y Weimar* (pp. 243-246). Buenos Aires: Infinito, 2002.
- GUATTARI, F. *Plan sobre el planta. Capitalismo mundial integrado y revoluciones moleculares*. Madrid: Traficantes de Sueños, 2004.
- HAWKEN, P., LOVINS, A., & LOVINS, H. *Natural Capitalism: The Next Industrial Revolution*. Londres; Washington: Earthscan, 2010.
- HENSEL, M., & MENGES, A. Inclusive Performance: Efficiency Versus Effectiveness: Towards a Morpho-Ecological Approach for Design. (HENSEL, M., & MENGES, A. Edits.) *Architectural Design*, 78 (2), 54-63, 2008.
- HÖRL, E. Knowledge in the Age of Simulation: Metatechnical Reflections. In GLEINIGER, A., & VRACHLIOTIS, G. (Edits.), *Simulation: Presentation Technique and Cognitive Method* (pp. 93-105). Basel: Birkhäuser, 2008.
- JARZOMBEK, M. Molecules, Money and Design. The Question of Sustainability's Role in Architectural Academe. *Thresholds* (18), 32-38, 1999.
- JERONMIDIS, G. Biodynamics. (HENSEL, M., MENGES, A., & WEINSTOCK, M. Edits.). *Emergence: Morfogenetic Design Strategies*, 74 (3), 90-95, 2004.
- KOLAREVIC, B. Computing the Performative. En OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 103-111). London: Routledge, 2014.
- KRACAUER, S. *Escritos sobre arquitectura*. Barcelona: Mudito, 2011.
- KUBO, M., y SALAZAR, J. Una breve historia de la era de la información. *VERB: Matters*, 2-19, 2004.
- LE CORBUSIER. *Hacia una arquitectura*. Barcelona: Apóstrofe, 1998.
- LE CORBUSIER. *Principios de urbanismo: la carta de Atenas*. Barcelona: Planeta-Agostini, 1993.
- LEFEBVRE, H. *La producción del espacio*. Madrid: Capitán Swing, 2013.
- LÉVY, P. *¿Que es lo virtual?* Barcelona, Buenos Aires, Ciudad de México: Paidós, 1999.
- LIPOVETSKY, G., y SERROY, J. *La pantalla global. Cultura mediática y cine en la era hipermoderna*. Barcelona: Anagrama, 2009.
- LOOS, A. *Dicho en el vacío 1897-1900*. Valencia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia, 2003.
- LOOS, A. Ornamento y Delito. En OPEL, A., y QUETGLAS, J. (Edits.). *Adolf Loos. Escritos I 1897-1909* (pp. 346-355). Madrid: El Croquis, 1993.
- LYOTARD, J. F. *La condición postmoderna* (Décima ed.). Madrid: Cátedra, 2008.
- MADRAZO, L. *The Concept of Type in Architecture. An Inquiry into the Nature of Architectural Form*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1995.

- MALDONADO, T. Todavía la técnica. Un "tour d'horizon". En MALDONADO, T. (Ed.). *Técnica y cultura: el debate alemán entre Bismarck y Weimar* (273-298). Buenos Aires: Infinito, 2002.
- MALDONADO, T. *¿Es la arquitectura un texto?* Buenos Aires: Infinito, 2004.
- MARX, K. *Sociología y Filosofía Social*. En BOTTO MORE, T. B., & MAXIMILIEN, R. (Edits.) Barcelona: Península, 1968.
- MASIERO, R. *Estética de la arquitectura*. Madrid: A. Machado Libros, 2003.
- MELBOURNE SCHOOL OF DESIGN. *Digital design and construction meets ancient technology*. Recuperado el 26 de 04 de 2017, de University of Melbourne: <https://msd.unimelb.edu.au/digital-design-and-construction-meets-ancient-technology>
- MENGES, A. Megabytes de madera. Del CAD al nuevo Diseño Computacional. *Arquitectura Viva* (137), 24-27, 24-27, 2011.
- MENGES, A. Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design. (MENGES, A. Ed.) *Architectural Design: Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, 82 (2), 34-51, 2012.
- MENGES, A. Material Capacity: Embedded Responsiveness. *Architectural Design*, 52-59, 2012.
- MENGES, A. Coalences of Machine and Material Computation. In LORENZO-EIROA, P., & SPRECHER, A. (Edits.), *Architecture in Formation: On the Nature of Information in Digital Architecture* (pp. 275-283). New York: Routledge, 2013.
- MENGES, A. Material Systems, Computatinal Morphogenesis and Performative Capacity. In OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 195-208). New York: Routledge, 2014.
- MERTINS, D. *Modernity Unbound*. London: Architectural Association Publications, 2012.
- MITCHELL, W. *E-topía: vida urbana, Jim, pero no la que nosotros conocemos*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.
- MONDRIAN, P. La realización del neo-plasticismo en la arquitectura del futuro lejano y de hoy. En JARAUTA, F., y LÓPEZ, J. (Eds.). *La nueva imagen de la pintura* (pp.123-138). Valencia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia, 1993.
- MOREL, P. Investigación sobre el paisaje biocapitalista. *VERB: Natures*, 224-245, 2006.
- MOUSSAVI, F., y KUBO, M. *La función del ornamento*. Barcelona: Actar & Harvard Graduate School of Design, 2008.
- MUMFORD, L. *Técnica y Civilización*. Madrid: Alianza, 1997.
- MUMFORD, L. *El Pentágono del Poder. El Mito de la Máquina, Volumen 2*. Logroño: Pepitas de Calabaza, 2011.
- NAJLE, C. Interview: Ciro Najle. With Pablo Lorenzo-Eiroa and Aaron Sprecher. In LORENZO-EIROA, P., & SPRECHER, A. (Edits.). *Architecture in Formation: On the Nature of Information in Digital Architecture* (pp. 238-245). Nueva York: Routledge, 2013.
- NEUMEYER, F. *La palabra sin artificio: reflexiones sobre arquitectura 1922/1968*. Madrid: El Croquis, 2000.
- ORTEGA Y GASSET, J. *Ensimismamiento y alteración. Meditación de la técnica y otros ensayos*. Madrid: Alianza, 2014.
- OXMAN, N. *PhD Thesis: Material-based Design Computation*. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- OXMAN, R., & OXMAN, R.. *Theories of the Digital in Architecture*. London; New York: Routledge, 2014.
- OZENFANT, A., y JEANNERET, C. E. En PIZZA, A. (Ed.) *Acerca del purismo. Escritos 1918/1926* (Segunda ed.). Madrid: El Croquis, 2004.
- PTW ARCHITECTS. Calado de espuma. Centro Nacional de Natación. *Arquitectura Viva* (118-119), 102-117, 2008.

- PTW, A., ARUP, & CSCEC. Watercube. ACTAR. *VERB: Natures* (pp. 66-87). Barcelona: ACTAR, 2006.
- PASK, G. La significación arquitectónica de la cibernetica. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando* (pp. 15-28). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- PÉREZ-GÓMEZ, A. *Architecture and the Crisis of Modern Science* (Seventh ed.). Cambridge, London: MIT Press, 1983.
- PICON, A. Arquitectura, ciencia, tecnología y el reino de lo virtual. En ORTEGA, L. (Ed.). *La digitalización toma el mando* (pp. 123-144). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- PICON, A. *Digital Culture in Architecture: an Introduction to the Desing Professions*. Basilea: Birkhauser, 2010.
- PIZZA, A., y GRACÍA, M. *Arte y arquitectura futurista (1914-1918)*. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia: Valencia, 2002.
- Pugnale, A. (2014). *Issues in Technology: Design and Construction Workshop*. Recuperado el 05 de 05 de 2017, de albertopugnale.com: <http://www.albertopugnale.com/portfolio/issues-in-technology/>
- PUGNALE, A. (15 de 02 de 2017). *Entrevista con Alberto Pugnale*. (ABONDANO, D. Entrevistador) Skype.
- RATHENAU, W. La Mecanización del Mundo. En MALDONADO, T. *Tecnica y Cultura: El debate alemán entre Bismarck y Weimar* (pp. 153-181). Buenos Aires: Infinito, 2002.
- RAUNIG, G. *Mil máquinas. Breve filosofía de las máquinas como movimiento social*. Madrid: Traficantes de Sueños, 2008.
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. *Real Academia Española*. Obtenido de Diccionario de la lengua española: <http://www.rae.es>
- ROGERS, R., y GUMUCHDJIAN, P. *Ciudades para un pequeño planeta*. Barcelona: Gustavo Gili, 2000.
- RORTY, R. *Objetividad relativismo y verdad*. Barcelona: Paidós, 1996.
- ROSENBLUETH, A., WIENER, N., & BIGELOW, J. Behavior, Purpose and Technology. *Philosophy of Science*, 10 (1), 18-24, 1943.
- ROWE, C., & SLUTZKY, R. Transparencia: literal y fenomenal. En C. Rowe, *Manierismo y arquitectura y otros ensayos* (Tercera ed. pp. 155-178). Gustavo Gili, 1999.
- RUSKIN, J. *Las siete lámparas de la arquitectura* (Cuarta ed.). Barcelona: Alta Fulla, 2000.
- SALVADÓ, T. ¿Por qué la Freie Universität de Berlín debería ser un mat-building? *Documents de Projectes d'Arquitectura* (27-28), 52-61, 2011.
- SÁNCHEZ VÁZQUEZ, A. De la estética de la recepción a la estética de la participación. En MARCHÁN, S. (Ed.), *Real / Virtual en la estética y la teoría de las artes* (pp. 17-28). Barcelona; Buenos Aires; México: Paidós, 2006.
- SCHEERBART, P. *La arquitectura de cristal*. En PIZZA, A. (Ed.) Valencia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia, 1998.
- SMITH, R. *Prefab Architecture: a Guide to Modular Design and Construction*. New Jersey: Wiley, 2010.
- TAFURI, M. *Architecture and Utopia. Design and Capitalist Development*. Cambridge, Massachusetts, and London: MIT Press, 1976.
- TAFURI, M. *The Sphere and the Labyrinth. Avant-Gardes and Architecture from Piranshi to the 1970s* (1987 ed.). Cambridge (MA); London: MIT Press, 1980.
- TZONIS, A., & LEFAIVRE, L. Beyond Monuments, Beyond Zip-a-Tone. Shadrach Woods's Berlin Free University, a Humanist Architecture. *Le Carré Bleu* (3-4), 4-43, 1998.
- URSPRUNG, P. La doble hélice y el planeta azul: la visualización de la naturaleza en el siglo XX. En ÁBALOS, I. (Ed.). *Naturaleza y artificio: el ideal pintoresco en la arquitectura y el paisajismo contemporáneos* (pp. 243-251). Barcelona: Gustavo Gili, 2009.

- VAN DOESBURG, T. En CHARO, G. (Ed.). *Principios del nuevo arte plástico y otros escritos*. Valencia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia, 1985.
- VAN MENSVOORT, K., & GRIVINK, H.J. (Edits.). *Next Nature: Nature changes along with us*. Barcelona: Actar, 2011.
- VIRILIO, P. *La bomba informática*. Madrid: Cátedra, 1999.
- VIRILIO, P. *El arte del motor. Aceleración y realidad virtual*. Buenos Aires: Manantial, 1996.
- VRACHLIOTIS, G. Flusser's Leap: Simulation in the Technical Thought in Architecture. In GLEINIGER, A., & VRACHLIOTIS, G. (Edits.). *Simulation: Presentation Technique and Cognitive Method* (pp. 63-80). Basilea; Boston; Berlín: Birkhäuser, 2008.
- WEAVER, W. Science and Complexity (1948). *E:CO*, 6 (3), 65-74, 2004.
- WEBER, M. *La ética protestante y el espíritu del capitalismo*. Barcelona: Brontes, 2012.
- WEINSTOCK, M. Morphogenesis and the Mathematics of Emergence. *Architectural Design*, 74 (3), 10-17, 2004.
- WEINSTOCK, M. Self-Organization and Material Constructions. (CASTLE, H. Ed.) *Architectural Design*, 76 (2), 34-41, 2006.
- WEINSTOCK, M. Metabolism and Morphology. *Architectural Design*, 78 (2), 26-36, 2008.
- WEINSTOCK, M. Evolution and Computation. In OXMAN, R., & OXMAN, R. (Edits.). *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 209-220). New York: Routledge, 2014.
- WIENER, N. *The Human Use of Human Beings. Cybernetics and Society*. London: Free Association Books, 1989.
- WOODS, S. Web. *Le Carré Bleu* (3-4), 44-47, 1998.
- YEANG, K. *Proyectar con la naturaleza: bases ecológicas para el proyecto arquitectónico*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999.
- ZEVI, B. *Enrich Mendelsohn*. Barcelona: Gustavi Gili.
- ZUMPTHOR, P. *Atmósferas*. Barcelona: Gustavo Gili.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Aportación de una metodología de análisis que reconstruye la relación histórica entre la arquitectura moderna y la arquitectura digital

Este trabajo de investigación se ha basado en una metodología que –a partir de la interrelación entre tres categorías (Materialidad, Producción, Cultura) y de la relación dialéctica entre arquitectura moderna y digital– ha permitido analizar en paralelo las relaciones entre los modos de producción –industrial e informacional– con la arquitectura de cada época. Este estudio paralelo entre los procesos productivos que subyacen en la arquitectura moderna y la arquitectura digital ha permitido trazar continuidades y discontinuidades históricas que revelan la influencia de la tecnología sobre la arquitectura y sobre la profesión de arquitecto (Figura 5.1).

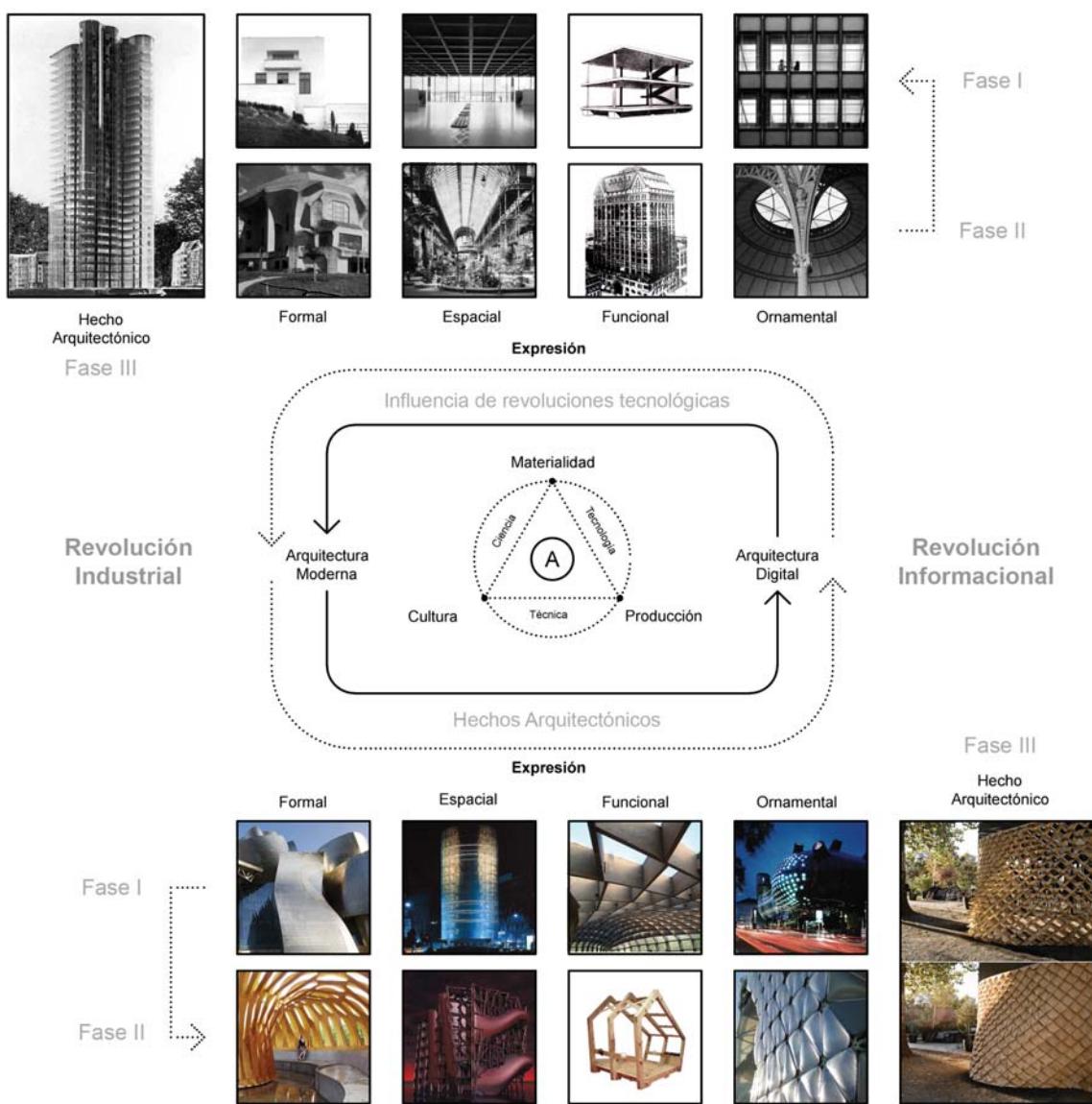


Figura 5.1 Aplicación y resultados de la metodología de análisis diseñada para el estudio de la arquitectura moderna y la arquitectura digital

Algunas de las expresiones formales de la arquitectura moderna derivan de la libertad plástica que aportó el hormigón, y de la regularidad formal resultante de emplear elementos constructivos estandarizados que requieren geometrías simples para poder ser producidos masiva y mecánicamente. Contrariamente a la regularidad y la linealidad plástica de la arquitectura en hierro y estandarizada –que predomina en la arquitectura moderna frente a las formas sinuosas y continuas del hormigón–, en la arquitectura digital predominan las formas irregulares y no-lineales que resultan de la liberación plástica inherente al CAD y de la eficiencia productiva del CAM. En una primera etapa, la aplicación del CAD/CAM propició la creación de formas sinuosas que eran concebidas escultóricamente sin considerar las propiedades de los materiales o los procesos constructivos. Más adelante se tuvieron en consideración los materiales y los protocolos de fabricación, pero para convertirlos en parámetros de diseño, dando lugar a construcciones que tornan cualidades intrínsecas de los materiales constructivos en expresiones plásticas.

Las expresiones espaciales de la arquitectura moderna se caracterizaron por la creación de un espacio diáfano que resulta del esqueleto estructural, metálico o de hormigón, y por la continuidad entre el espacio interior y el exterior que facilita la transparencia del vidrio. En este sentido, Mies consideró que el espacio era flexible porque se podía utilizar de múltiples maneras; Moholy-Nagy, como un continuo que resulta de reemplazar el muro de carga por el esqueleto estructural y el cerramiento de vidrio; Hildebrand como un campo de fuerzas generado y transformado por el movimiento de las personas; y, finalmente, Giedion lo entendió como un continuo “espacio-tiempo” que da lugar a una multiplicidad de relaciones entre interior y exterior. Sin oponerse a sus concepciones modernas, en la arquitectura digital el espacio también se asocia a las nociones de “transparencia” y de “continuidad”, pero en este caso como una transparencia mediática que torna el edificio en una interfaz que “manifiesta” fenómenos invisibles, o como una continuidad entre el espacio físico y el ciberespacio mediante las TIC. Estas nuevas continuidades han tornado el espacio arquitectónico en un campo animado en el que se intercambia información entre el ciberespacio y el entorno físico.

Las expresiones funcionales que caracterizan la arquitectura moderna están vinculadas a los nuevos materiales y a los procesos constructivos basados en la mecanización, la estandarización, la prefabricación y la producción en masa. La resistencia del metal y el hormigón fueron básicas para el desarrollo de una arquitectura en altura, mientras que la industrialización de la construcción redujo costes materiales y productivos de manera que hizo posible la producción viviendas en serie. En este contexto, la regularidad y la simplicidad formal fueron estrategias de diseño para crear una arquitectura económica y alineada con el sistema de producción industrial. Según Tafuri, esto supuso la comercialización de la arquitectura moderna y puso de manifiesto la vocación sociopolítica del arquitecto, quien entendió que su papel era facilitar soluciones prácticas y universales.

En la arquitectura digital la irregularidad y la complejidad formal no suponen un aumento de costes, en la medida que la personalización en masa suprime las diferencias productivas y económicas entre la fabricación de formas simples o complejas. La aplicación del CAD/CAM permite alcanzar una nueva complejidad formal a partir de la simplificación del proceso constructivo, mediante el diseño y la fabricación de componentes cuyas formas irregulares y únicas responden múltiples funciones. El diseño y construcción de viviendas con el sistema WikiHouse es un ejemplo de este tipo de complejidad, que transciende los aspectos formales para transformar el rol sociopolítico del arquitecto, tal como lo expuso Tafuri, y actualizarlo en el marco de la nueva sociedad digital, que representa una nueva utopía democrática en tanto que el usuario asume el control sobre el proceso de diseño y construcción, gracias a las tecnologías digitales. Asimismo, el proyecto WikiHouse muestra como la arquitectura digital puede abrirse a nuevos mercados y modos de organización facilitados por Internet, como el e-commerce y a las redes de cooperación tecnológica.

Las exclusión del ornamento por parte de la arquitectura moderna se ha explicado por la necesidad de disponer de un lenguaje formal adaptado a los requisitos de la producción industrializada. Este rechazo del ornamento conllevó además el abandono de las formas de la naturaleza como modelo estético. La crítica moderna al ornamento se manifestó en la fascinación futurista por la máquina, en la “arquitectura de cristal” de Scheerbart, en el ideal de belleza que subyace bajo el concepto de “prototipo” de la Werkbund, la crítica de Loos, las contra-construcciones de Van Doesburg, y las formas puras de Le Corbusier. Por el contrario, la arquitectura digital ha retomado la naturaleza como modelo a través del ordenador, y evita justificar sus producciones con principios estéticos para hacerlo sobre principios técnicos y científicos basados en una concepción e instrumentalización de la naturaleza considerada como modelo operativo: la naturaleza se ha tornado en fuente de información para crear edificios que se construyen de manera más eficiente y que se comportan de manera más eficaz, dando como resultado un ornamento que no es simbólico sino funcional, que no solo transmite un mensaje sino que busca optimizar las prestaciones, el control ambiental y el confort. En este sentido podría entenderse que el ornamento digital carece de “significado”, aunque los efectos ornamentales resultantes de imitar los procesos auto-regulación natural han dado lugar a una arquitectura adaptativa cuyo comportamiento busca reducir el consumo de recursos naturales, un objetivo acorde con el desarrollo sostenible.

El ornamento digital actualiza la vocación sociopolítica de la arquitectura al responder al propósito del proyecto de la modernidad de mejorar la vida cotidiana de las personas, dentro de los parámetros actuales. Pero igualmente pone de manifiesto una de las principales contradicciones de la arquitectura en su relación con las revoluciones tecnológicas: al alinearse con la industria, creando una arquitectura estandarizada para reproducirse en serie, la arquitectura moderna democratizó el acceso a la vivienda pero al mismo tiempo fomentó un gran consumo de recursos que condujo la crisis ambiental a la cual se enfrenta actualmente la arquitectura digital.

Este análisis paralelo de la arquitectura moderna y la arquitectura digital no solo ha evidenciado la contradicción inherente al “progreso moderno”, un progreso que comporta beneficios pero también resultados no deseados, sino que también ha permitido reintroducir la arquitectura moderna en el discurso de la arquitectura digital, y a partir de ello reconocer un nuevo sentido en las tecnologías de diseño y fabricación digital que va más allá de la innovación tecnológica, la eficiencia productiva o la generación formal. De este modo, la arquitectura digital nos permite aproximarnos a la arquitectura moderna desde una perspectiva distinta y, al mismo tiempo, las relaciones que se establecen con la arquitectura moderna amplían el marco interpretativo de la arquitectura digital más allá de sus técnicas, herramientas y materiales, para contemplarlas en su contexto productivo y cultural.

5.2 Cambios en los sistemas productivos que subyacen en las expresiones formales, funcionales y culturales características de la arquitectura digital

La arquitectura digital es consecuencia de las fuerzas productivas que inciden en el conjunto de la sociedad, sometida en la actualidad a una profunda transformación como resultado del desarrollo e implantación de las tecnologías digitales en todos sus ámbitos.

A raíz de este estudio hemos podido constatar que la aplicación de las tecnologías de la información en los procesos de diseño y construcción de edificios ha dado lugar a una nueva “materialidad digital” cuya materia prima es la información procesada por ordenadores. Así, el uso de la información como materia prima en el diseño y en la fabricación digital está en la base de los cambios materiales, productivos y culturales que cristalizan en las expresiones plásticas, espaciales, funcionales y ornamentales características de la arquitectura digital.

La arquitectura digital es el resultado de las múltiples interrelaciones que se dan en tres ámbitos: material, productivo y cultural. Por ejemplo, el cómputo de información con un modelo digital para evaluar el proyecto o para producir la información que controla las máquinas de fabricación digital, es un cambio productivo que se traduce en nuevas maneras de concebir un proyecto arquitectónico, y de valorarlo estéticamente. Así, el *continuum productivo* inherente al CAD/CAM no solo implica una libertad plástica basada en la transición de la estandarización a la personalización en masa en el sector de la construcción, sino que supone un cambio en la cultura arquitectónica. Esta nueva cultura, derivada de la aplicación de las tecnologías digitales, abandona la homogeneidad formal de la arquitectura moderna como principio productivo y estético, y se aleja de la simplicidad inherente a la estandarización para acoger formas singulares y aparentemente más complejas.

La noción de “complejidad” subyace en las formas que resultan de la aplicación de las tecnologías digitales en el proyecto de arquitectura. Esta complejidad no se asocia

únicamente a las formas sinuosas, intrincadas e irregulares; además, está relacionada con la posibilidad de abarcar, con la ayuda de la tecnología, la totalidad de los procesos de diseño y construcción, de una manera holística y continua, superando la separación entre ambos procesos que ha venido prevaleciendo desde el Renacimiento. Esta complejidad radica en la posibilidad de concebir y materializar formas capaces de responder a una multiplicidad de criterios formulados en términos de parámetros interrelacionados. Así, en la arquitectura digital una forma puede ser, aparentemente, tan simple como la que resulta de un proceso compositivo tradicional y de la estandarización, pero intrínsecamente compleja, ya que integra una multiplicidad de relaciones entre los parámetros que determinan el diseño y la construcción del edificio. Se trata pues de una complejidad intrínseca al objeto diseñado (y al modelo digital que lo representa), más que visual.

Un edificio puede ser formalmente simple pero ser intrínsecamente complejo cuando la forma de sus elementos constructivos es capaz de integrar múltiples funciones. Estos componentes simplifican la construcción del edificio y optimizan su rendimiento. De esta manera, la complejidad se asocia a la eficiencia productiva y a la eficacia funcional; a los procesos inherentes a la construcción y funcionamiento más que a la plasticidad del objeto arquitectónico. El diseño de estos componentes multifuncionales comporta un mayor conocimiento de los materiales, las técnicas y las herramientas de diseño y fabricación digital, para poderlas adaptar a las necesidades de cada proyecto. Esto implica una relación más estrecha entre el arquitecto y los medios de producción – intelectuales y materiales–, relación que está ayudando a recuperar la esencia de la profesión de arquitecto como constructor, tras la especialización –división del trabajo entre arquitectos e ingenieros– que cristalizó con la industrialización.

El cambio del foco de interés desde lo aparente a lo inmanente, de lo superficial a lo constitutivo, y del objeto al proceso, explica la nueva relación entre la arquitectura y la naturaleza en la era digital. El movimiento moderno rechazó la naturaleza como modelo estético porque se asociaba con el pasado y con la tradición. La arquitectura digital ha retomado la naturaleza como modelo pero, más que copiar sus formas aparentes, imita su organización y sus procesos generativos y adaptativos, siguiendo el camino iniciado por la teoría de sistemas y la cibernetica.

Esta relación entre la arquitectura digital y la naturaleza también se manifiesta en la materialidad digital, por cuanto conlleva la aprehensión, cuantificación, codificación y computación de fenómenos naturales, para simularlos e instrumentalizarlos en el diseño del edificio, de su forma y de su funcionamiento. Los procesos de auto-organización y auto-regulación, propios de la naturaleza, se instrumentalizan en la arquitectura digital: el primero, en el proceso generativo; el segundo, en el diseño de su comportamiento en relación al entorno siempre cambiante.

De acuerdo con los principios de la cibernetica, en el diseño basado en la morfogénesis los patrones organizativos de un sistema se manifiestan en su estructura física. Así, la

instrumentalización de los patrones que determinan la configuración de la materia permite generar tramas estructurales no-lineales y multifuncionales como las que produce la naturaleza. Estas estructuras, que reproducen la morfología y la complejidad de las creaciones de la naturaleza, son una expresión plástica característica de la arquitectura digital: en primer lugar, porque su forma no es concebida por el arquitecto, sino que emerge del cómputo de parámetros interrelacionados; y en segundo lugar, porque solo se pueden construir aplicando técnicas de fabricación digital. Por otra parte, las cualidades plásticas de estas estructuras dotan a la obra de arquitectura de un carácter “natural”, ya que la naturaleza no “produce” productos a partir de la repetición, sino que “crea” obras siempre únicas, pero basadas en procedimientos que se repiten.

La instalación de dispositivos conectados a redes de información, como sensores y actuadores, está dando lugar a una arquitectura que, imitando los procesos de auto-regulación natural, es capaz de adaptarse a los cambios del entorno. Al hacerlo, las cualidades ambientales del edificio cambian, y el espacio adquiere una nueva dimensión fenomenológica. Con las tecnologías digitales se está creando una arquitectura “inteligente”, entendiendo por “inteligencia” la capacidad del edificio para dar respuesta a contingencias medioambientales, partiendo de la información obtenida del mismo entorno. Con ello surge una nueva expresión ornamental, que no reside en las propiedades materiales y formales del objeto arquitectónico, sino en los efectos audiovisuales y hápticos que transforman –controladamente– el espacio arquitectónico.

Las cualidades plásticas y espaciales de la arquitectura, resultado de instrumentalizar la naturaleza mediante tecnologías digitales, conforman un ornamento digital determinado por principios económicos y funcionales. Esta instrumentalización convierte a la naturaleza en un modelo operativo, más que estético, y la explota como fuente de materias primas, no ya de materiales para construir el edificio, sino de información para concebir su forma y controlar su comportamiento.

5.3 Innovación y hechos arquitectónicos en la arquitectura digital

Los modelos digitales se han utilizado para diseñar formas irregulares y sinuosas que parecen novedosas cuando se comparan con las formas regulares y ortogonales que caracterizaron la arquitectura moderna. Sin embargo, este tipo de formas –denominadas libres o orgánicas– han existido siempre en la arquitectura. En los años 1990 las formas irregulares creadas en el ordenador no llegaron a construirse, y su existencia quedó limitada a las imágenes de síntesis. Actualmente, la fabricación de estas formas no-estandarizadas mediante tecnologías CAD/CAM es más común.

La auténtica innovación en la arquitectura, derivada de la aplicación de las tecnologías digitales, puede reconocerse en los agenciamientos que se producen entre la materialidad y la producción, y en la relación que se establece con la naturaleza mediante estas tecnologías: el agenciamiento materia-información, que se produce cuando la información digital se materializa en un edificio; el agenciamiento arquitecto-ordenador, cuando el intelecto y las habilidades del proyectista se complementan con el poder de cálculo computacional y el agenciamiento edificio-entorno, cuando el edificio se retroalimenta con la información obtenida del entorno.

El agenciamiento materia-información supone la materialización y actualización –en el espacio actual– de la información contenida en un entorno o en un modelo digital. Esta materialización-actualización se produce a través de la forma, el espacio o el funcionamiento del edificio y es fundamental para alcanzar soluciones de diseño innovadoras, pero, en sí misma, no supone un proceso de diseño o un objeto arquitectónico innovador. Por ejemplo, el uso de un modelo digital para controlar el proceso de fabricación digital de un elemento constructivo da lugar a la actualización de información digital a través del mismo, pero este elemento puede formar parte de un edificio que se diseñó mediante el método de composición elemental utilizado por los arquitectos modernos, es decir, sin ayuda del cálculo computacional.

El agenciamiento arquitecto-ordenador amplia las capacidades del proyectista, en la medida en que se pueden aplicar algoritmos para trabajar simultáneamente con múltiples variables de diseño interrelacionadas, algo que no está al alcance de la mente humana. En este proceso de diseño, asistido algorítmicamente, el arquitecto no recurre a los métodos de representación y de composición tradicionales, visuales y estáticos, sino que estructura las operaciones que procesa el ordenador para generar una forma. Esta estructuración del proceso requiere un sistema de representación dinámico, basado en diagramas de los flujos de información que determinan la forma. Asimismo, implica operar en un espacio de diseño topológico –además del geométrico– en el que se instrumentaliza el tiempo. Estas transformaciones inherentes al diseño algorítmico –configuración de procesos, sistemas de representación dinámicos, espacio de diseño topológico, instrumentalización del tiempo– transforman la naturaleza del diseño que pasa a centrarse más en el proceso que en el producto.

En el diseño algorítmico-paramétrico no solo supone el agenciamiento arquitecto-ordenador, además, con éste se superan los límites de la representación basada en la geometría cartesiana y descriptiva, al emplear en su lugar diagramas que sintetizan las relaciones y las operaciones generadoras de la forma. Mediante los diagramas se representa el proceso más que el objeto en sí. Para convertirlos en procesos ejecutables por el ordenador, las operaciones contenidas en el diagrama han de transcribirse en una secuencia de operaciones (*script*). En este sentido, la innovación inherente al diseño algorítmico-paramétrico supone aplicar un nuevo sistema de representación y un nuevo lenguaje –de programación–.

El cambio de naturaleza del objeto arquitectónico, que resulta del agenciamiento edificio-entorno, se manifiesta en la arquitectura adaptativa: una arquitectura en la que el objeto arquitectónico se comunica, interactúa y retroalimenta con el entorno para adaptarse a él. Esta arquitectura puede considerarse el paradigma de la arquitectura digital, del mismo modo que el rascacielos lo fue para la arquitectura moderna. La arquitectura adaptativa ejemplifica el cambio sistémico propiciado por la revolución informacional: su adaptación es posible por la instrumentalización de la información y la transformación del fenómeno en material de trabajo; su funcionamiento depende de la sensibilidad y reactividad del edificio, que depende de los sensores y actuadores digitales y de las técnicas de programación empleadas; su forma es menos relevante que su comportamiento, lo que a su vez refleja el énfasis hacia el diseño de procesos más que al de objetos; y, finalmente, sus cualidades espaciales y ornamentales vienen determinadas por la capacidad de comunicación del edificio con su entorno y se manifiestan a través de efectos atmosféricos que, más allá de aportar sentido, generan sensaciones y cambios funcionales que no requieren de un juicio estético.

La arquitectura adaptativa conlleva la codificación de los procesos que regulan el comportamiento del edificio en relación al entorno; una representación en lenguaje matemático que sustituye la representación figurativa de la naturaleza. La interacción entre el edificio y el entorno –natural, construido o digital– requiere asimismo de un lenguaje que facilite la comunicación entre ambos. El espacio arquitectónico resultante es un espacio dinámico que, más que estar animado por las personas que lo habitan, se caracteriza por sus cualidades ambientales como respuesta a los flujos de información que el edificio es capaz de recibir e interpretar. En este sentido, la “virtualidad” de la arquitectura digital, siguiendo a Deleuze, radica en los continuos cambios superficiales y espaciales, producidos por una configuración dinámica de fuerzas y finalidades.

5.4 De la arquitectura moderna a la arquitectura digital: continuidades y discontinuidades

Mies comprendió que “industrializar la construcción es una cuestión de materiales”¹, y que “si conseguimos llevar adelante esta industrialización las cuestiones sociales, económicas, técnicas y, también, artísticas se resolverán automáticamente”². La arquitectura que surge de las fuerzas productivas de la sociedad informacional puede considerarse también una cuestión de materiales –digitales– que facilitarán nuevas respuestas formales y espaciales a cuestiones sociales, económicas, técnicas y artísticas propias de nuestra época. En este sentido, la influencia de la materialidad digital en el desarrollo de la arquitectura actual es equiparable a la que tuvieron los materiales industriales en el desarrollo de la arquitectura moderna.

Las revoluciones industrial e informacional acarrearon una nueva materialidad que daría lugar a nuevas cualidades formales y espaciales. El esqueleto estructural, metálico o de hormigón, construido con elementos lineales y estandarizados, permitió la creación de espacios diáfanos y, junto con el cerramiento de vidrio, facilitó la continuidad visual entre los espacios interior y exterior. Por otra parte, la maleabilidad del hormigón facilitó la construcción de formas sinuosas e irregulares, pero el incremento de costes para su construcción, frente al de las formas ortogonales que podían realizarse con elementos estandarizados, limitó estas formas a ejemplos específicos. Con la materialidad digital, la libertad formal y los costes no son antagónicos, lo que permite combinar la libertad formal del hormigón con la productividad de la construcción estandarizada. La fabricación digital conjuga la personalización del producto, propia de la artesanía, con la eficiencia, precisión y economía características de la producción industrial.

La materialidad digital conlleva un proceso de “desmaterialización” que también tuvo lugar en la arquitectura moderna. Con el esqueleto estructural y el cerramiento de vidrio se “desmaterializó” el muro portante, lo que dio mayor libertad de movimiento –en el sentido físico e intelectual– al individuo a través del espacio y diluyó los límites entre interior y exterior. El espacio arquitectónico derivó en un *continuum* y en campo animado por los acontecimientos que ocurren dentro de él. En la era digital, la desmaterialización no afecta los elementos físicos constitutivos del edificio, sino que hace referencia a sus cualidades comunicativas y espaciales, presentes, aunque invisibles; la conexión entre el espacio interior y el exterior no se debe a la transparencia del vidrio, sino que se da en otros términos: como conexión entre espacio físico y ciberespacio a partir de los flujos de información que provienen de este y transforman a aquél. Por consiguiente, el hecho arquitectónico deja de radicar en el objeto en sí y pasa a situarse en el acontecimiento.

¹ MIES VAN DER ROHE. *Construcción industrial*. En NEUMEYER, F. *La palabra sin artificio*:
² Ibídem, p. 376

Las revoluciones tecnológicas fueron determinantes para establecer la relación que la arquitectura moderna y la arquitectura digital establecieron con la naturaleza. Los elementos decorativos inspirados en motivos naturales –y en el lenguaje clásico– se asociaban al trabajo artesanal que la arquitectura moderna buscaba dejar atrás mediante la industrialización. Así, la ornamentación inspirada en las formas de la naturaleza fue considerada un gasto innecesario, al mismo tiempo que la máquina se convirtió en el modelo estético en sustitución de la naturaleza.

La concepción moderna de la naturaleza cambia en la era digital, no solamente porque el diseño generativo reproduce sus procesos de creación, sino porque la sociedad ha tomado conciencia de que ya no es una reserva inagotable de recursos. El modelo mecánico ha sido remplazado por el modelo sistémico, pero la eficiencia, la economía y la funcionalidad se han mantenido como valores arquitectónicos. Así, las tecnologías digitales se emplean para instrumentalizar los procesos que la naturaleza aplica para preservar los recursos materiales y energéticos y optimizar su uso. En definitiva, para la arquitectura digital la naturaleza ha devenido un modelo operativo y funcional, más que estético y transcendental, se ha establecido una relación de carácter técnico-instrumental que se opone a la relación romántica-trascendental de la era pre-industrial.

La arquitectura digital ha retomado la naturaleza como modelo, pero se trata de una naturaleza mediada por el conocimiento tecnológico. Se instrumentalizan los procesos de auto-organización y auto-regulación propios de la naturaleza para crear edificios eficientes y eficaces, con el fin de garantizar la conservación y el bienestar en la sociedad post-industrial. Así, tecnología y ecología confluyen en la arquitectura.

El diseño evolutivo, basado en la tecnología natural que determina la formación y la conservación de los organismos, conlleva la ilusión de que las formas no se conciben sino que emergen espontáneamente –como sucede en la naturaleza– por la hibridación del intelecto humano y el cálculo computacional. Asimismo, el comportamiento de los edificios se asimila al de los organismos vivos, capaces de adaptarse a entorno en que habitan; en este sentido, se habla de edificios “inteligentes”. El diseño evolutivo evoca la estética de lo sublime, por la multiplicidad de formas impredecibles y los efectos espaciales incommensurables. Estas ilusiones y apreciaciones estéticas reflejan una noción de belleza basada en la aplicación de leyes científicas y principios técnicos con unos objetivos que comparten la arquitectura y la industria: controlar y dominar la naturaleza mediante la ciencia y la tecnología.

La arquitectura digital que aplica la tecnología natural y la tecnología digital para crear edificios concebidos como sistemas abiertos, como organismos vivos que se producen eficientemente y que se comportan eficazmente, está en la base de la “e-topia” de Mitchell, una urbe ecológica que funciona de manera inteligente. Esta e-topia actualiza la utopía del movimiento moderno cuyo fin era conseguir el bienestar social. La arquitectura moderna persiguió este objetivo desde la socialización de la vivienda, haciéndola más asequible mediante la estandarización y la producción en masa. Esta

socialización del consumo aumentó el bienestar pero, a su vez, propició la crisis ambiental a que nos enfrentamos actualmente. Si la utopía se basa en romper las relaciones del orden existente para restablecerlas en un nivel superior, la e-topia plantea restaurar los daños medioambientales provocados por la industrialización, sin renunciar al bienestar-confort alcanzado con ella.

Por otra parte, la “e-topia” actualiza la noción de la metrópoli como una segunda naturaleza creada por la técnica, como el organismo artificial que hace posible el ciclo de producción, distribución y consumo de las sociedades industrializadas. La integración de la arquitectura digital en esta segunda naturaleza obliga a tener en cuenta los efectos medioambientales derivados de la construcción y funcionamiento del edificio. También obliga a tener en cuenta la estructura física de la ciudad en la que el edificio se inserta, con el fin de crear estrategias que permitan armonizar las formas singulares que pueden crearse con ayuda del CAD/CAM con la regularidad de la trama urbana.

Una de estas estrategias consiste en limitar la complejidad formal a los elementos constructivos, más que hacerla extensiva al conjunto. Es decir, creando componentes multifuncionales que simplifiquen y abaraten la construcción. De la misma manera que la simplificación constructiva y la reducción de costes –conseguidas con la estandarización y la producción en masa– fueron determinantes para la socialización de la arquitectura moderna, hoy siguen siéndolo para la socialización de la arquitectura digital. Esta continuidad histórica obedece a la racionalidad inherente a los principios técnicos y económicos que rigen la arquitectura tras la revolución industrial, los cuales siguen vigentes en la era digital: la mínima utilización de recursos con el mínimo coste y el mínimo esfuerzo.

Las arquitecturas de la revolución industrial y de la revolución informacional presentan continuidades y discontinuidades históricas. La arquitectura digital se diferencia de la moderna en los siguientes aspectos: no se orienta al objeto sino al proceso, se basa en la diferenciación más que en la homogeneización productiva, además de la forma diseña el comportamiento, opera dentro de un espacio topológico y en uno geométrico, además de la materia física utiliza la información y el fenómeno como materias primas, instrumentaliza la naturaleza más allá de representarla, y valida su trabajo desde principios científicos más que estéticos. Sin embargo, la arquitectura digital continua siendo moderna porque sigue aplicando los principios técnicos y económicos que rigen la producción y la “estética de la economía” que resulta de aplicar dichos principios. Se puede deducir de ello que, a partir del siglo XIX, la materialidad, la producción y la cultura arquitectónica se han visto profundamente transformadas por el desarrollo tecnológico pero, tanto la arquitectura moderna como la digital, ambas resultantes de estos cambios tecnológicos, mantienen un vínculo histórico a través de la industria.

En los términos dialécticos planteados por Benjamin, la producción digital orienta la arquitectura hacia una realidad que trasciende el orden existente, mientras que la

producción industrial aparece como una técnica ya superada. Sin embargo, esto no implica una nueva realidad –la digital– que reemplaza la existente –la industrial–. Más que una sustitución, lo que se produce es un conflicto en el que afloran las contradicciones de una misma realidad en la que coexisten la producción industrial y la digital, conflicto a partir del cual emerge una nueva arquitectura. Hoy existen dos formas de producción que luchan por prevalecer: la industrial y la digital. El resultado de esta confrontación son un conjunto de transformaciones que se resuelven en una síntesis de un orden superior: la arquitectura digital. Este es el contexto en el que se inscribe la arquitectura contemporánea, dado que aún está sujeta a las contradicciones derivadas de la coexistencia de dos sistemas de producción. Por consiguiente, puede concluirse que la arquitectura contemporánea está inmersa en un período de transición.

5.5 El período de transición hacia la arquitectura digital

Este trabajo de investigación ha permitido contextualizar el período de la transición hacia la arquitectura digital, estudiando la manera en que la revolución informacional ha dado lugar a un sistema de cambios materiales, productivos y culturales que han influenciado en su producción práctica e intelectual a lo largo de las últimas cuatro décadas. De este modo se han relacionado parte de las obras y teorías más relevantes, se ha trazado la evolución de la arquitectura digital a partir de mediados de los años 1980, y se han podido reconocer algunas cuestiones clave en torno a las cuales gira la teoría y la praxis de la arquitectura digital: la materialidad digital, la complejidad plástica, la simplificación constructiva, y la nueva concepción e instrumentalización de la naturaleza bajo un modelo sistémico. Estas cuestiones se han abordado en relación con las tres fases históricas planteadas por Lux (en la primera, las formas tradicionales se repiten; en la segunda hay una conquista material y técnica, y en la tercera se producen nuevas expresiones funcionales y artísticas) y, paralelamente, con las tres etapas de convergencia entre el mundo material y físico propuestas por Lipson y Kurman (control de la forma, control de la composición, y control del comportamiento) (Figura 5.2).

El tema central en la primera fase del período de transición hacia la arquitectura digital es la nueva materialidad, la materialidad digital que surge de la convergencia entre el mundo físico y el digital. Inicialmente, esta convergencia se puso de manifiesto en edificios como la Torre de los Vientos y el Instituto Árabe que, con la aplicación de sensores y actuadores digitales, instrumentalizaron los fenómenos naturales para transformarlos en expresiones arquitectónicas. Estos edificios, sin embargo, no se han asociado a la idea de materialidad digital porque no fueron el resultado de una continuidad entre la realidad digital abstracta y el mundo físico conseguida mediante el CAD/CAM; convergencia que fue denominada por Kolarevic como “continuum digital”.

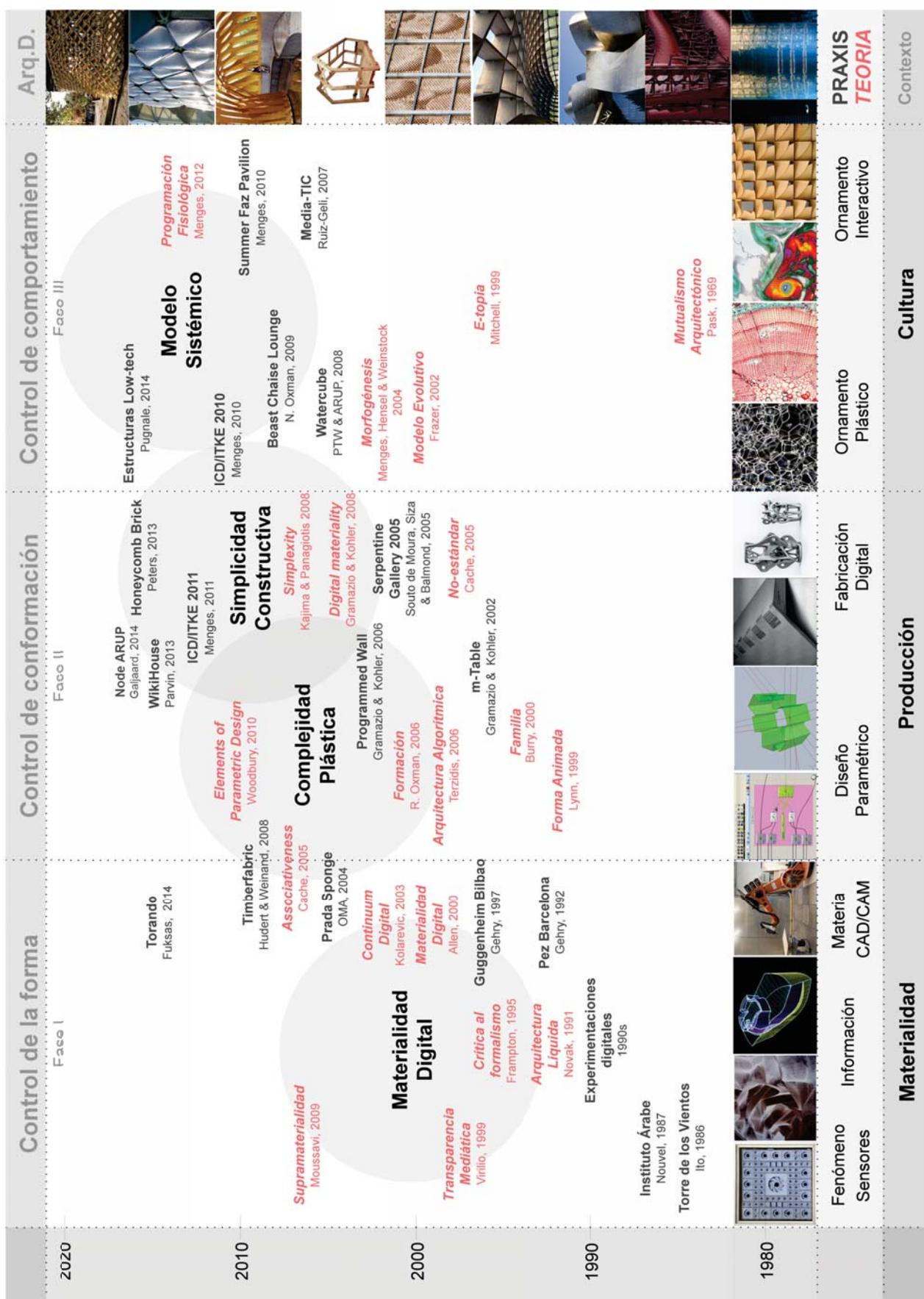


FIGURA 5.2 Sinopsis de las fases de evolución y control, en relación a los ejemplos estudiados

La libertad plástica que aportó el CAD fue explotada en las experimentaciones digitales de los años 1990, pero no llegó a aplicarse en proyectos construidos hasta el Guggenheim de Bilbao, una experiencia que demostró que era posible controlar la forma mediante las nuevas tecnologías. La nueva expresividad formal que aportó el CAD/CAM contradice sin embargo la tesis de Lux respecto a la repetición de formas tradicionales en la primera fase de los períodos de transición, ya que en la era digital lo que se repite son los modos-técnicas de producción tradicionales. Esto queda evidencia a través de casos de estudio como el Guggenheim o el Tornado, en los que el arquitecto diseña la forma de un modo intuitivo sin llegar a sacar partido de la capacidad computacional del ordenador.

La segunda fase de transición tiene como punto de partida el interés por la complejidad plástica, pero en este caso centrada en las nuevas técnicas de producción asociadas al diseño y la fabricación digital, es decir, en el diseño paramétrico. En este contexto tiene lugar una relación dialéctica entre el diseñador y el ordenador, en la medida en que la intuición del primero se complementa con el poder computacional del segundo, tal como lo expresa Terzidis con el término “arquitectura algorítmica”. Por otra parte, para Woodbury el diseño paramétrico supone la transición desde una representación figurativa hacia una diagramática, siendo la estructuración, codificación y cómputo de diagramas –algoritmos gráficos– lo que permite tratar con múltiples parámetros de diseño simultáneamente. En este sentido, la complejidad no es aparente sino intrínseca en tanto que se orienta a un proceso de formación, más que a su resultado, es decir, la forma.

Posteriormente, en esta segunda fase, la noción de “complejidad” adquiere un nuevo significado: se pasa de la complejidad plástica hacia una complejidad de los sistemas constructivos que, en última instancia, simplifican el proceso mismo de construcción. En este sentido, se pueden considerar como ejemplos el Serpentine Gallery 2005, los ICD/ITKE Research Pavilions construidos en 2010 y 2011, el diseño computacional de estructuras “low-tech”, y el proyecto de viviendas WikiHouse. Esta evolución, desde la complejidad plástica hacia la simplicidad constructiva, podría entenderse como una transición desde el concepto de “formación” planteado por Oxman, hacia el concepto de “conformación” que según Lipson y Kurman caracteriza la segunda etapa de la convergencia entre el mundo virtual y el físico. Pero en este caso no se trata del control de la conformación de los materiales, como lo plantean Lipson y Kurman, sino del control de la conformación del edificio desde el diseño de elementos constructivos complejos; un hecho que, en términos de Lux, implicaría la “conquista material y técnica” que caracteriza la segunda fase de los períodos de transición.

El control del comportamiento que caracteriza la tercera fase de la transición, tal como la plantean Lipson y Kurman, se ve reflejado inicialmente en proyectos experimentales en los que las características de la materia se convierten en inputs del proceso de generación formal, como sucede en el ICD/ITKE Research Pavilion de 2010. Si en este

ejemplo se recurre al CAD/CAM para controlar el comportamiento interno del objeto arquitectónico, en el Media-TIC se transforma el exterior a partir de la interacción con el entorno mediante las tecnologías digitales. Pero mientras este edificio requiere de un sistema complejo de sensores, actuadores y ordenadores para percibir y reaccionar ante los estímulos del entorno, el Faz Summer Pavilion tiene la capacidad de interactuar y responder a los estímulos del entorno mediante técnicas de programación fisiológica con las que se puede diseñar el comportamiento de los materiales constructivos. Por consiguiente, este pabellón puede considerarse como una de las principales expresiones artísticas y funcionales que, según Lux, conforman la tercera fase de los períodos de transición.

Al repasar la evolución de la arquitectura digital puede concluirse que la primera fase ya ha sido superada, mientras que para llegar a la tercera se requerirá aún de más tiempo hasta que esta arquitectura esté plenamente integrada en el contexto productivo, económico y cultural. Por consiguiente, nos encontramos ahora en la segunda etapa, en la que la complejidad plástica sigue siendo un vector de desarrollo, y las técnicas de producción digital permitan alcanzar esa complejidad simplificando el proceso de construcción. A lo largo de este proceso de convergencia, la socialización del CAD/CAM en el conjunto de la producción arquitectónica actual continuará su evolución.

Listado de ilustraciones

Introducción

- Figura 1** Templo Masónico, de Burnham y Root; Guaranty Building, de Sullivan y Alder; Proyectos de rascacielos de Mies
Fuentes: BENÉVOLO, L. *Historia de la arquitectura moderna* (Séptima ed.). Barcelona: Gustavo Gili, 1996; TAFURI, M., & DAL CO, F. *Archittettura Contemporanea*. Milano: Electa, 2000; ZIMMERMAN, C. (Ed.). *Mies van der Rohe*. Kölن: Taschen, 2006.
- Figura 2** Períodos de transición y desfase entre el desarrollo tecnológico y el arquitectónico
Fuente: diagrama de realización propia.
- Figura 3** Componentes de las fuerzas productivas aplicados al análisis arquitectónico
Fuente: diagrama de realización propia.
- Figura 4** Esquema conceptual para un análisis de la arquitectura digital a partir del materialismo histórico
Fuente: diagrama de realización propia.
- Figura 5** Relación dialéctica entre la arquitectura moderna y la arquitectura digital, en torno a las categorías de análisis establecidas a partir del materialismo histórico
Fuente: diagrama de realización propia.
- Figura 6** Multiplicidad de cambios acarreados por las revoluciones tecnológicas, organizados según las categorías de análisis establecidas a partir del materialismo histórico
Fuente: tabla de realización propia.
- Figura 7** Estructura de la investigación organizada en capítulos
Fuente: diagrama de realización propia.

Capítulo 1

- Figura 1.1** Relación dialéctica entre la producción y el pensamiento
Fuente: Diagrama de elaboración propia.
- Figura 1.2** Problemas: simples, de complejidad desorganizada y de complejidad organizada
Fuente: LIMA, M. *Visual Complexity. Mapping Patterns of Information*. New York: Princeton Architectural Press, 2011.
- Figura 1.3** Contexto de análisis de la arquitectura moderna y de la arquitectura digital, según la concepción histórico materialista de la historia
Fuente: Diagrama de elaboración propia.

Capítulo 2

- Figura 2.1** Biblioteca Nacional; Palacio de Cristal; Mercado central de París
Fuentes: GYMPEL, J. *The Story of Architecture: from Antiquity to the Present*. Kölن: Könemann, 1996; GÖSSEL, P., & LEUTHÄUSER, G. *Arquitectura del siglo XX*. Taschen, 1997.
- Figura 2.2** Compañía Nacional de Radiadores; Goetheanum; Edificio Johnson Wax
Fuentes: http://www.columbia.edu/cu/gsapp/BT/BSI/SHELL_MS/shell_ms.html (Recuperado el 16 de 05 de 2017); FORTY, A. *Concrete and Culture: a Material History*. Londres: Reaktion, 2013; GIEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009.
- Figura 2.3** Puente de Tavanasa; Hangares Aeronáuticos
Fuentes: LYALL, S. *Maestros de la estructura: La ingeniería en las edificaciones innovadoras*. Barcelona: Blume, 2002; GÖSSEL, P., & LEUTHÄUSER, G. *Arquitectura del siglo XX*. Taschen, 1997.
- Figura 2.4** Sistema Dom-ino
Fuente: GIEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009.

- Figura 2.5** Casa de la Palmera; Palacio de las Máquinas
Fuente: GÖSSEL, P., & LEUTHÄUSER, G. *Arquitectura del siglo XX*. Taschen, 1997
- Figura 2.6** Montaje de estructura metálica
Fuente: BIRD, A. *Paxton's Palace*. Londres: Cassell, 1975.
- Figura 2.7** Paxton Gutter
Fuente: BIRD, A. *Paxton's Palace*. Londres: Cassell, 1975.
- Figura 2.8** Máquina para producir carpinterías y máquina para instalar cristales
Fuente: BIRD, A. *Paxton's Palace*. Londres: Cassell, 1975.
- Figura 2.9** Noción de “materialidad digital” de acuerdo a los emparejamientos de Deleuze
Fuente: digrama de elaboración propia.
- Figura 2.10** Torre de los Vientos de Yokohama
Fuente: ITO, T. Torre de los vientos. *El Croquis: Toyo Ito 1986-1995*, 50-55, 1994.
- Figura 2.11** Instituto Árabe de París
Fuentes: Foto de elaboración propia; ASENSIO, P. (Ed.). *Jean Nouvel*. Barcelona: LOFT, 2002; <http://www.jeannouvel.com/en/desktop/home/#/en/desktop/projet/paris-france-arab-world-institut1> (Recuperado el 16 de 05 de 2017).
- Figura 2.12** Maquetas físicas; modelos digitales realizados con CATIA
Fuentes: AMÁNN, J. A., PÉREZ, F., y CAICOYA, C. El proyecto Guggenheim de Bilbao. *Revista de Edificación*, 22, 25-33, 1996; LINDSEY, B. *Digital Gehry: Material Resistance Digital Construction*. Basilea: Birkhäuser, 2001.
- Figura 2.13** Modelo general; descomposición por volúmenes; contorno con ejes estructurales
Fuentes: AMÁNN, J. A., PÉREZ, F., y CAICOYA, C. El proyecto Guggenheim de Bilbao. *Revista de Edificación*, 22, 25-33, 1996; GALINDEZ, J. E. Desarrollo del Proyecto y Ejecución de las Fachadas del Museo Guggenheim Bilbao. *En Informes de la Construcción*, 49 (451), 19-31, 1997; LINDSEY, B. *Digital Gehry: Material Resistance Digital Construction*. Basilea: Birkhäuser, 2001.
- Figura 2.14** Estructura primaria, “ladder”, “exterior geometric” y chapa de titanio
Fuentes: CAICOYA, C. Algunos aspectos del proceso de construcción del Museo Guggenheim de Bilbao. *Informes de la Construcción*, 49 (451), 5-11, 1997; GALINDEZ, J. E. Desarrollo del Proyecto y Ejecución de las Fachadas del Museo Guggenheim Bilbao. *En Informes de la Construcción*, 49 (451), 19-31, 1997.
- Figura 2.15** Triangulación de fachada de cristal y muros curvos de piedra
Fuente: https://www.guggenheim-bilbao.eus/el-edificio/?_ga=2.14555571.549894758.1495034230-2018313634.1490186487 (Recuperado el 15 de 04 de 2017).
- Figura 2.16** Paracube
Fuente: MIGAYROU, F., & BRAYER, M.A. *ArchiLab: RAdical Experiments in Global Architecture*. London: Thames & Hudson, 2003.
- Figura 2.17** Rise-Rise Skyscraper, Embajada Portuguesa de Berlin, Virtual Guggenheim, Beachness, X Phylum
Fuente: MIGAYROU, F., & BRAYER, M.A. *ArchiLab: RAdical Experiments in Global Architecture*. London: Thames & Hudson, 2003.
- Figura 2.18** Maqueta y modelo CATIA de Pez para Villa Olímpica
Fuente: SHELDEN, D. *PhD Thesis: Digital Surface Representation and the Constructibility of Gehry's Architecture*. Cambridge, Mass.: MIT, 2002.
- Figura 2.19** Estudio geométrico
Fuentes: <http://oma.eu/projects/prada-sponge> (Recuperado el 20 de 04 de 2017); VAN DUIJN, C. Investigacion sobre materiale en OMA. En *VERB: Matters* (pp. 80-91). Barcelona: Actar, 2004.
- Figura 2.20** Maquetas en diversos materiales
Fuentes: <http://oma.eu/projects/prada-sponge> (Recuperado el 20 de 04 de 2017); VAN DUIJN, C. Investigacion sobre materiale en OMA. En *VERB: Matters* (pp. 80-91). Barcelona: Actar, 2004.
- Figura 2.21** Paneles cara-dorso; acabado final
Fuentes: <http://oma.eu/projects/prada-sponge> (Recuperado el 20 de 04 de 2017); VAN DUIJN, C. Investigacion sobre materiale en OMA. En *VERB: Matters* (pp. 80-91). Barcelona: Actar, 2004.

Figura 2.22 Módulo y tejido estructural Timberfabric

Fuente: WEINEND, Y., & HUDERT, M. Timberfacric: Applying Textile Principles on a Building Scale. (R. Oxman, & R. Oxman, Edits.) *Architectural Design*, 80 (4), 102-107, 2010.

Figura 2.23 Programmed Wall

Fuente: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/81.html> (Recuperado el 08 de 04 de 2016).

Figura 2.24 Simulación digital de caída de uvas

Fuente: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/52.html> (Recuperado el 08 de 04 de 2016).

Figura 2.25 Fachada lagar Gantenbein

Fuente: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/52.html> (Recuperado el 08 de 04 de 2016).

Figura 2.26 Prefabricación digital y montaje “manual” de la fachada

Fuentes: <https://www.youtube.com/watch?v=kDW6XCB7HPE&t=145s> (Recuperado el 22 de 04 de 2017); <https://vimeo.com/69252842> (Recuperado el 25 de 05 de 2017).

Figura 2.27 Organización material aplicando algoritmos y tesela de superficie

Fuente: OXMAN, N. Variable Property Rapid Prototyping. En *Virtual and Physical Prototyping* (pp. 3-31). Taylor & Francis, 2011.

Figura 2.28 Distribución gradual de materiales según necesidades estructurales y de confort

Fuente: Oxman, N. (2011). OXMAN, N. Variable Property Rapid Prototyping. En *Virtual and Physical Prototyping* (pp. 3-31). Taylor & Francis, 2011.

Figura 2.29 Silla Gemini

Fuente: <http://www.materialecology.com/projects/details/gemini> (Recuperado el 22 de 08 de 2017).

Figura 2.30 Bory Mall; exterior del Tornado; espacio interior del Tornado

Fuente: <http://www.fuksas.com/en/Projects/Bory-Mall-Shopping-Center> (Recuperado el 16 de 05 de 2017).

Figura 2.31 Feria de Milán; Oficina Central De Cecco; edificio en Plaza 18 de Septiembre

Fuente: <http://www.fuksas.com/en/Projects/Grid> (Recuperado el 16 de 05 de 2017).

Figura 2.32 Curvas para generar la geometría de la superficie

Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 2.33 Malla estructural derivada de la racionalización de la superficie

Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 2.34 Modelado de malla estructural

Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 2.35 Estudio de iluminación de la zona de comidas

Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 2.36 Proceso de modelación del nudo

Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 2.37 Corte de oxígeno de planchas de acero y perfil de nudos

Fuente: imagen cedida por Metal Yapi.

Figura 2.38 Nudos fresados con máquina CNC de 3 ejes

Fuente: imagen cedida por Metal Yapi.

Figura 2.39 Fresadora CNC de 5 ejes y nudos acabados

Fuente: imagen cedida por Metal Yapi

Figura 2.40 Fabricación de perfil con máquina CNC

Fuente: imagen cedida por Metal Yapi.

Figura 2.41 Ajuste de parámetros de fabricación en software CAM

Fuente: imagen cedida por Metal Yapi.

Figura 2.42 Modelo del nudo mecanizado

Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 2.43 Detalle de nudos estructurales: Feria de Milán; Edificio Unión Militar; Centro comercial MyZeil; Edificio en Plaza 18 de Septiembre
Fuente: <http://www.fuksas.com/en/Projects/Grid> (Recuperado el 16 de 05 de 2017).

Figura 2.44 Continuidad entre nudos y montantes del Tornado
Fuente: imágenes cedidas por Emiliano Scotti.

Figura 2.45 Expansión de noción de “materialidad”
Fuente: diagrama de elaboración propia.

Capítulo 3

Figura 3.1 Método de composición elemental sobre retícula ortogonal
Fuente: DURAND, J. N. *Compendio de lecciones de arquitectura*. Madrid: Pronaos, 1981.

Figura 3.2 Algoritmo definido por una serie de operaciones finitas, consistentes y racionales (para encontrar números enteros divisibles por 4, 7 y 13)
Fuente: PASK, G., & CURRAN, S. *Micro Man: Living and growing with computers*. London: Century, 1982.

Figura 3.3 Diagramas de Casa Moebius
Fuente: VAN BERKEL, B., & BOS, C. *Move* (Vol. Techniques). Amsterdam: UN Studio & Goose Press, 1999.

Figura 3.4 Diagrama de nodos y enlaces
Fuente: WOODBURY, R. *Elements of Parametric Design*. Londres; Nueva York: Routledge, 2010.

Figura 3.5 Componentes de un modelo paramétrico: modelo geométrico y estructura abstracta
Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 3.6 Constantes y variables que definen el proceso formativo de un cubo
Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 3.7 Definición de “puntos” del cubo especificando los valores (X,Y,Z) de las coordenadas
Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 3.8 Modificación de valores de las coordenadas para generar una familia de formas relacionadas topológicamente
Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 3.9 Mesas mTable definidas por relaciones topológicas
Fuentes: <http://www.gramaziokohler.com/web/e/installationen/17.html> (Recuperado el 20 de 04 de 2017); <http://www.mshape.com> (Recuperado el 20 de 04 de 2017).

Figura 3.10 Membrana y ejes estructurales que definen cada nudo; diagrama topológico de constantes (recuadro rojo) y variables (recuadro azul) del modelo paramétrico de nudos del Tornado
Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 3.11 Ejes estructurales (verde) y relación topológica de los “puntos” que definen un eje
Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 3.12 Parametrización de curvas del perfil y de la altura del nudo
Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 3.13 Familia de nudos paramétricos
Fuente: modelo de elaboración propia.

Figura 3.14 Deformación de malla; conexión de caja y espiga
Fuentes: SIZA, A., SOUTO DE MOURA, E., & BALMOND, C. Reciprocity, Hierarchy and Discreteness: Serpentine Gallery Pavilion 2005. In T. SAKAMOTO, & A. FERRÉ (Edits.), *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture* (pp. 44-49). Barcelona: Actar, 2008; <http://www.balmondstudio.com/work/serpentine-pavilion-2005.php> (Recuperado el 15 de 04 de 2017)

- Figura 3.15** Definición de elementos estructurales; malla estructural y cerramiento
Fuentes: SIZA, A., SOUTO DE MOURA, E., & BALMOND, C. Reciprocity, Hierarchy and Discreteness: Serpentine Gallery Pavilion 2005. In T. SAKAMOTO, & A. FERRÉ (Edits.), *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture* (pp. 44-49). Barcelona: Actar, 2008; <http://www.balmondstudio.com/work/serpentine-pavilion-2005.php> (Recuperado el 15 de 04 de 2017)
- Figura 3.16** Adaptación de tesela y del modo de unión de placas del dólar de arena a la unión de láminas de madera y al sistema de conexión finger joint
Fuentes: KRIEG, O., DIERICH, K., REICHERT, S., SCHWINN, T., & MENGES, A. Performative Architectural Morphology: Robotically manufactured biomimetic finger-joined plate structures. En T. Zupancic, M. Juvancic, S. Verovsek, & A. Jutraz (Ed.), *eCADDe 2011: Respecting Fragile Places* (pp. 573-580). Ljubljana: eCADDe, 2011; MENGES, A., & SCHWINN, T. Manufacturing Reciprocities. (A. Menges, Ed.) *Architectural Design: Material Computation*, 118-125, March-April 2012.
- Figura 3.17** Geometría y fabricación del ICD/ITKE Research Pavillion, 2011
Fuentes: KRIEG, O., DIERICH, K., REICHERT, S., SCHWINN, T., & MENGES, A. Performative Architectural Morphology: Robotically manufactured biomimetic finger-joined plate structures. En T. Zupancic, M. Juvancic, S. Verovsek, & A. Jutraz (Ed.), *eCADDe 2011: Respecting Fragile Places* (pp. 573-580). Ljubljana: eCADDe, 2011; MENGES, A., & SCHWINN, T. Manufacturing Reciprocities. (A. Menges, Ed.) *Architectural Design: Material Computation*, 118-125, March-April 2012.
- Figura 3.18** Landesgartenschau Exhibition Hall
Fuente: <http://www.achimmenges.net/?p=5731> (Recuperado el 19 de 02 de 2016).
- Figura 3.19** Pliegue y costura de láminas de madera contrachapada
Fuente: <http://www.achimmenges.net/?p=5822> (Recuperado el 03 de 04 de 2017).
- Figura 3.20** ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16
Fuente: <http://www.achimmenges.net/?p=5822> (Recuperado el 03 de 04 de 2017).
- Figura 3.21** 3D Print Urban Cabin y fachada del edificio temporal para Comisión Europea
Fuentes: <http://houseofdus.com/#project-urban-cabin> (Recuperado el 12 de 04 de 2017); <http://houseofdus.com/#project-europe-building> (Recuperado el 14 de 04 de 2017).
- Figura 3.22** Contour Crafting
Fuente: <http://www.contourcrafting.org> (Recuperado el 12 de 04 de 2017).
- Figura 3.23** Moldes realizados con impresión 3D
Fuente: PORTELL-TORRES, J., LLOVERAS-CORBALAN, M., & MALÉ-ALEMANY, M. 3D-printed Hybrids Exploring Single Thread Printing for Complex and Multifunctional Concrete Framework. En M. Voyatzaki (Ed.), *What's the Matter: Materiality and Materialism at the Age of Computation* (pp. 457-468). ENHESA, 2014.
- Figura 3.24** Honeycomb Brick e Interlocking Brick
Fuente: <http://buildingbytes.info/interlocking-brick/> (Recuperado el 06 de 11 de 2016).
- Figura 3.25** Nudo Arup
Fuente: <https://www.architecturalrecord.com/articles/11652--d-printing> (Recuperado el 06 de 11 de 2016).
- Figura 3.26** AMIE SOM
Fuente: <http://www.som.com/projects/amie> (Recuperado el 20 de 01 de 2017).
- Figura 3.27** Capacidad de acceso a servicios arquitectónicos a nivel mundial
Fuente:
https://www.ted.com/talks/alastair_parvin_architecture_for_the_people_by_the_people?language=es (Recuperado el 15 de 06 de 2015).
- Figura 3.28** Proceso de construcción de prototipo de vivienda WikiHouse
Fuente: adaptación de <http://www.wikihouse.cc> (Recuperado el 04 de 06 de 2015).
- Figura 3.29** Proceso de fabricación y montaje del prototipo WikiHouse/NZ
Fuente: adaptación de
<https://drive.google.com/file/d/0B5MhEpLjCLKeSUQwdFlDOG11X2c/viewhttps://drive.google.com/file/d/0B5MhEpLjCLKeSUQwdFlDOG11X2c/view> (Recuperado el 06 de 07 de 2015).

- Figura 3.30** Interfaces de plataforma Google Drive para acceder a los archivos de diseño de WikiHouse V3.3
 Fuente: imagen de elaboración propia.
- Figura 3.31** Modelo en Rhino del prototipo WikiHouse/NZ generado por Space Craft Systems
 Fuente: imagen de elaboración propia a partir del modelo de Space Craft Systems.
- Figura 3.32** Detalle de nudo: prototipo WikiHouse realizado por Green FabLab en Construmat 2015
 Fuente: imagen de elaboración propia.
- Figura 3.33** Script para parametrizar el grosor de los elementos constructivos y el tamaño de las perforaciones
 Fuente: modelo de elaboración propia con ayuda de Francesc Bandera.
- Figura 3.34** Selección de elemento constructivo a parametrizar
 Fuente: modelo de elaboración propia con ayuda de Francesc Bandera
- Figura 3.35** Parametrización del grosor de un elemento constructivo (15-30mm)
 Fuente: modelo de elaboración propia con ayuda de Francesc Bandera.
- Figura 3.36** Parametrización de la perforación (15-30mm)
 Fuente: modelo de elaboración propia con ayuda de Francesc Bandera.
- Figura 3.37** Estructura explosionada y reagrupada por los elementos que conforman las diferentes capas del modelo 3D
 Fuente: imagen de elaboración propia a partir del modelo de Space Craft Systems.
- Figura 3.38** Numeración de elementos y diferenciación de capas en plantilla que establece secuencia de fresado
 Fuente: imagen de elaboración propia a partir del modelo de Green FabLab.
- Figura 3.39** Indicación de parámetros de fabricación y simulación de mecanizado con RhinoCAM
 Fuente: imagen de elaboración propia a partir del modelo de Green FabLab.
- Figura 3.40** Montaje del prototipo WikiHouse/NZ en Construmat 2015
 Fuente: imagen de elaboración propia.

Capítulo 4

- Figura 4.1** Proceso de abstracción neoplástico: Tarantella
 Fuente: HOEK, E. *Theo van Doesburg : oeuvre catalogus*. Utrecht: Centraal Museum, 2000.
- Figura 4.2** Casa de Campo en Ladrillo; Maison Particulière
 Fuentes: FERRATER, B., y ABONDANO, D. Fuentes Ideográficas. En FERRATER, C. *Sincronizar la geometría*. Barcelona: Actar, 2006; http://etsavega.net/dibex/Doesburg_2.htm (Recuperado el 11 de 04 de 2013).
- Figura 4.3** Patrones decorativos; Hôtel Tassel; Guaranty Building
 Fuentes: BENÉVOLO, L. *Historia de la arquitectura moderna* (Séptima ed.). Barcelona: Gustavo Gili; Giedion, S. (2009). *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 1996; <https://www.bluffton.edu/homepages/facstaff/sullivanm/newyork/buffalo/sullivan/guaranty2.html> (Recuperado el 15 de 05).
- Figura 4.4** Bolsa de Ámsterdam
 Fuente: GÖSSEL, P., & LEUTHÄUSER, G. *Arquitectura del siglo XX*. Taschen, 1997.
- Figura 4.5** La naturaleza como modelo arquitectónico
 Fuente: Diagrama de elaboración propia.
- Figura 4.6** Organización anisótropa de tallo secundario de *gimnosperma* y de tallo secundario de *dicotiledónea sambuco*
 Fuente: https://mmejias.webs.uvigo.es/2-organos-v/guiada_o_v_tsecundario.php (Recuperado el 14 de 05 de 2017).
- Figura 4.7** Representación figurativa y abstracta del pensamiento humano
 Fuente: <https://www.technologyreview.com/s/409107/a-working-brain-model/> (Recuperado el 14 de 05 de 2017).

- Figura 4.8** Espacio de búsqueda y espacio de soluciones
Fuente: BENTLEY, P. *Evolutionary Design by Computers*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999.
- Figura 4.9** Entrecruzamiento y mutación de genotipos
Fuente: BENTLEY, P. *Evolutionary Design by Computers*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999.
- Figura 4.10** Nueva Galería Nacional; Centre Pompidou-Metz
Fuentes: MIES VAN DER ROHE, L. *Mies van der Rohe*. (ZIMMERMAN, C. Ed.) Köln: Taschen, 2006; <http://rolandhalbe.eu/portfolio/centre-pompidou-metz-by-bande-gastines/> (Recuperado el 15 de 05 de 2015).
- Figura 4.11** Edificio de apartamentos en Génova de Hennebique; Edificio de aparcamientos en París de Perret; Apartamentos Lake Shore Drive de Mies
Fuentes: FORTY, A. *Concrete and Culture: a Material History*. Londres: Reaktion, 2013; MIES VAN DER ROHE, L. *Mies van der Rohe*. (ZIMMERMAN, C. Ed.) Köln: Taschen, 2006.
- Figura 4.12** Proyectos de Centro de Frankfurt y de la Universidad Libre de Berlín
Fuente: GÖSSEL, P., & LEUTHÄUSER, G. *Arquitectura del siglo XX*. Taschen, 1997: Imagen de elaboración propia.
- Figura 4.13** Ciudad de la agricultura, de Kurokawa; Orfanato Amstelveenseweg, de Van Eyck; Plug-in City, de Archigram
Fuente: FERRATER, B., Y ABONDANO, D. Fuentes Ideográficas. En Ferrater, C. *Sincronizar la geometría*. Barcelona: Actar, 2006.
- Figura 4.14** Espuma de jabón; módulo Weaire-Phelan; detalle de fachada
Fuentes: PTW, A., ARUP, & CSCEC. Watercube. En ACTAR, *VERB:Natures* (pp. 66-87). Barcelona: ACTAR, 2006; Fotografía de realización propia.
- Figura 4.15** Rotación y sección del modelo 3D de la malla estructural
Fuentes: PTW, A., ARUP, & CSCEC. Watercube. En ACTAR, *VERB:Natures* (pp. 66-87). Barcelona: ACTAR, 2006.
- Figura 4.16** Detalle de esquina superior; estructura perimetral; estructura interna
Fuente: PTW ARCHITECTS. Calado de espuma. Centro Nacional de Natación. *Arquitectura Viva* (118-119), 102-117, 2008.
- Figura 4.17** Watercube
Fuente: fotografía de realización propia.
- Figura 4.18** Ensayos físicos y esquemas geométricos de polilíneas y nodos
Fuente: <http://www.achimmenges.net/?p=4443> (Recuperado el 03 de 04 de 2017).
- Figura 4.19** Análisis estructural
Fuente: <http://www.achimmenges.net/?p=4443> (Recuperado el 03 de 04 de 2017).
- Figura 4.20** Detalle de ensamblaje; fabricación de láminas; fontaje manual
Fuente: <http://www.achimmenges.net/?p=4443> (Recuperado el 03 de 04 de 2017).
- Figura 4.21** Cittá Nuova
Fuente: SANT'ELIA, A. *Antonio Sant'Elia*. (P. ASENCIO, Ed.) Barcelona: LOFT, 2003.
- Figura 4.22** Torre Einstein
Fuente: fotografías de realización propia.
- Figura 4.23** Kunsthaus Graz, de Cook; Torre Agbar, de Nouvel; Edificio Greenpix, de Giostra & Partners; Galería Centricty, de UN; Centro Comercial Iluma, de WOHA & Interactive Architects.
Fuentes: <http://www.crab-studio.com/kunsthaus.html>; <http://sgp-a.com/#/single/xicui-entertainment-center-and-media-wall/>; <http://www.unstudio.com/projects/galleria-cheonan>; http://www.realities-united.de/#PROJECT_138,2,I813_5 (Recuperado el 10 de 05 de 2017).
- Figura 4.24** Media-TIC: fachada suroeste
Fuente: <http://www.ruiz-geli.com/projects/built/media-tic> (Recuperado el 22 de 04 de 2013)
- Figura 4.25** Media-TIC: fachada sureste
Fuente: fotografías de realización propia.
- Figura 4.26** Comportamiento higroscópico de plantas coníferas
Fuente: MENGES, A. Material Capacity: Embedded Responsiveness. *Architectural Design*, 52-59, 2012.

- Figura 4.27** Programación fisiológica de láminas de madera
Fuente: MENGES, A. Material Capacity: Embedded Responsiveness. *Architectural Design*, 52-59, 2012.
- Figura 4.28** Superficie sensible a cambios climáticos; módulo hexagonal; Faz Summer Pavilion
Fuente: MENGES, A. Material Capacity: Embedded Responsiveness. *Architectural Design*, 52-59, 2012.
- Figura 4.29** Seagram Building, de Mies; Estadio Olímpico, de Pekín de Herzog & De Meuron
Fuente: fotografías de realización propia.
- Figura 4.30** Elementos estructurales fabricados con listones de madera estandarizados y herramientas simples
Fuente: <http://www.albertopugnale.com/portfolio/issues-in-technology/> (Recuperado el 05 de 05 de 2017).
- Figura 4.31** Despliegue de 5 módulos ensamblados
Fuente: <http://www.albertopugnale.com/portfolio/issues-in-technology/> (Recuperado el 05 de 05 de 2017).
- Figura 4.32** Levantamiento de la membrana con mástiles y poleas
Fuente: <http://www.albertopugnale.com/portfolio/issues-in-technology/> (Recuperado el 05 de 05 de 2017).
- Figura 4.33** Diseño y construcción de malla de refuerzo diagonal
Fuente: <http://www.albertopugnale.com/portfolio/issues-in-technology/> (Recuperado el 05 de 05 de 2017).
- Figura 4.33** La red como la nueva morfología de la naturaleza adoptada por la arquitectura
Fuente: <http://www.albertopugnale.com/portfolio/issues-in-technology/> (Recuperado el 05 de 05 de 2017).

Capítulo 5

- Figura 5.1** Aplicación y resultados de metodología de análisis diseñada para el estudio de la arquitectura moderna y la arquitectura digital
Fuente: Diagrama de elaboración propia
- Figura 5.2** Sinopsis de las fases de evolución y control, en relación a los ejemplos estudiados
Fuentes: Diagrama de elaboración propia

Esta Tesis Doctoral ha sido defendida el día ____ d _____ de 201____

En el Centro _____
de la Universidad Ramon Llull, ante el Tribunal formado por los Doctores y Doctoras
abajo firmantes, habiendo obtenido la calificación:

Presidente/a

Vocal

Vocal *

Vocal *

Secretario/a

Doctorando/a

(*): Sólo en el caso de tener un tribunal de 5 miembros