**Capitulo 4 Una Metodología General**

*Este capitulo*[[1]](#footnote-1) *presenta un framework conceptual que habla acerca de los sistema auto-organizados. El objetivo es proveer una metodología útil para diseñar y controlar sistemas desarrollados para resolver problemas complejos. Un original framework es presentado comenzando con un agente metafórico. Esto provee una manera formal de hablar de la “satisfacción” de elementos y sistemas. La premisa principal de la metodología indica que reduciendo la “fricción” de interacción entre elementos de un sistema se tendrá una alta “satisfacción” del sistema, es decir mejor desempeño- Las diferentes maneras en que puede ser logrado esto serán discutidas.*

**4.1 Introducción**

*Esperando lo inesperado*

Durante el último medio siglo, muchos investigadores de diferentes áreas han empleado sistemas auto-organizados para resolver problemas complejos, por ejemplo Ashby (1956); Beer (1966); Bonabeau et al. (1999); Di Marzo Serugendo et al. (2004); Zambonelli and Rana (2005). Recientemente, metodologías particulares que usan los conceptos de auto-organización se han propuesto en diferentes áreas, tales como la ingeniería de software (Wooldridge et al., 2000; Zambonelli et al., 2003), ingeniería eléctrica (Ramamoorthy et al., 1993), y soporte colaborativo (Jones et al., 1994). Sin embargo aun no hay un framework general para construir sistemas auto-organizados. Distintos vocabularios han sido usados en distintas áreas, y con diferentes metas. En este capitulo, desarrollo una metodología general útil para diseñas y control de sistemas complejos (Bar-Yam, 1997). La metodología propuesta, como cualquier metodología, no provee confección de soluciones para problemas. Más bien provee un conceptual framework, un lenguaje, para asistir la solución de problemas. También muchas soluciones a problema actuales pueden describirse con la propuesta. No sugiero nuevas soluciones, sino una manera alternativa de pensar en ellas.

Como ejemplo, muchos esfuerzos de estandarización han avanzado en los recientes años, tales como las ontologías que se requieren para la web semántica (Berners-Lee et al., 2001), o estándares FIPA. No estoy insinuando que los estándares no sean necesarios. Sin ellos la ingeniería sería un caos. Pero como son ahora, no pueden predecir los requerimientos futuros. Son desarrollados con un marco estático en la mente. No son adaptables. Lo que este trabajo sugiere en una manera de introducir la expectativa de cambio en los procesos desarrollados. La intención de esto es ser capaz de hacer frente por adelantado a la incertidumbre, en el dominio del problema que sea deseado.

En la siguiente sección, son presentaos los conceptos necesarios para implementar la metodología. La metodología se presenta en la sección 4.3, seguida de la discusión y conclusiones.

**4.2 El framework conceptual**

*“Nada es libre de sus propios límites”*

Por framework conceptual entiendo que debe ser útil para describir sistemas auto-organizados. La utilidad de los conceptos presentada en esta sección es mostrada en un caso de estudio presentado en los siguientes capítulos, pero ciertamente no implica que la metodología será usada en forma universal.

Elementos de sistemas complejos interactúan con otros. Las acciones de un elemento más aún los efectos de otro elemento, directa o indirectamente. Por ejemplo, un animal puede matar a otro animal directa o indirectamente causando su inanición por consumo de sus recursos. Estas interacciones pueden tener efectos negativos, neutrales o positivos sobre el sistema (Heylighen and Campbell,1995). Ahora intuitivamente pensamos como se pueden suavizar la interacciones locales , es decir: la minimización de interferencias o fricción que lograra la mejora local (Helbing and Vicsek, 1999). ¿Pero es esto siempre el caso? Para resolver esta pregunta la terminología de sistemas multi-agente (Maes, 1994; Wooldridge and Jennings, 1995; Wooldridge, 2002; Schweitzer, 2003) puede ser utilizada. Podemos decir que:

*Noción 4.2.1 Un agente es una descripción de una entidad que actúa en su ambiente.*

Ejemplos de esto pueden ser clientes actuando en un mercado, un banco de peces actuando en un arrecife de coral, o computadoras actuando en una red. Más aun todo los elementos y todos los sistemas, pueden ser vistos como agentes con metas y comportamiento dedicado a alcanzar esas metas. El comortamiento de los agentes puede afectar (positiva negativa o neutralmente) la realización de las metas de otros agentes, de este modo establecen una relación. La satisfacción del cumplimiento de la meta de un agente puede ser representada usando la variable . Relativo a esto para el nivel más alto, la satisfacción del sistema puede ser recursivamente representada como una función de la satisfacción de el elemento n que lo constituye:

(4.1)

Donde es una tendencia y los otros pesos determinan la importancia dada para cada .Si el sistema es homogéneo y los elementos tienen interacciones lineales, entonces f tendrá la suma de los pesos de Note que es muy similar a la función de activación usada en muchas de las redes neuronales artificiales (Rojas, 1996). Para sistemas heterogéneos, f puede ser una función no lineal. No obstante, los pesos son determinados tautológicamente (repetición de distintas maneras de un mismo elemento) por la importancia de de cada elemento para la satisfacción del sistema .Si muchos elementos decrementan mientras incrementan su no los consideraremos como parte del sistema. Esto es importante para notar lo que es independiente del potencial no-lineal de f. Un ejemplo se puede ver con los sistemas inmunes. Que categorizan moléculas y microrganismos como emparentados o extraños (Vaz and Varela, 1978). Si son considerados como extraños, serán atacados. Las enfermedades autoinmunes surgen cuando esta categorización es equivocada, y los sistemas inmunes atacan elementos vitales del organismo. Por otro lado, si los agentes patógenos son considerados como parte del cuerpo, entonces no serán atacados. Otro ejemplo es el cáncer. Las celular cancerígenas pueden ser vistas como “rebeldes”, y no como parte del cuerpo, debido a que sus metas difieren de las metas del organismo. Pero cuando ellas se vuelven cancerígenas, pueden describirse mejor como parásitos. La tautología es también útil porque da una representación matemática general para la satisfacción del sistema, la cual es independiente de un sistema particular.

Un enfoque reduccionista puede asumir que maximizando la satisfacción de los elementos del sistema podemos también maximizar la satisfacción del sistema. Sin embargo, esto no siempre es cierto, ya que algunos elementos pueden “tomar ventaja” de otros elementos por ejemplo en el dilema de los prisioneros (Axelrod, 1984). Más aún debemos concentrarnos también en las interacciones de los elementos.

Si el modelos de un sistema considera más de dos niveles, entonces σ para los niveles más altos será recursivamente determinada por la σ’s de loa niveles más bajos. Sin embargo, la f’s muy probablemente será diferente en cada nivel.

Una importante pregunta nos resta: ¿Cómo hacer para determinar la función f y los pesos *ωi*’s? Para esta cuestión no hay una respuesta completa. Una opción podría ser aproximar f numéricamente (De Wolf et al., 2005). Una f explicita puede ser difícil de encontrar, pero una aproximación puede ser muy útil. Otro método consiste en lesionar el sistema[[2]](#footnote-2): removiendo o alterando elementos del sistema, y observando el efecto sobre sobre . A través de analizar los efectos sobre diferentes lesiones, la función f puede ser reconstruida y los pesos ωi’s obtenidos. Si un pequeño cambio , en algún produce un cambio , se puede decir que el sistema es frágil.

Entonces ¿qué podríamos hacer para maximizar ? ¿Cómo podemos relacionar los ’s y evitar conflictos entre los elementos? Esta no es una tarea obvia, por que implica limitar el comportamiento de los agentes que reduce otros , mientras se preserva su funcionalidad. No solo evitar la interferencia o fricción entre los elementos debe ser minimizada, además la sinergia (Haken, 1981; Corning, 2003) o “interferencia positiva” debe ser promovida. Tratando sistemas complejos no es factible decir a cada elemento lo que debe hacer o como debe hacerlo, sin embargo sus comportamientos deben ser restringidos o modificados para que sus metas puedan ser alcanzadas, bloqueando lo menos posible las metas de los otros elementos. Estos restrictores pueden ser llamados *mediadores* (Michod, 2003; Heylighen, 2003a). Pueden ser impuestos de arriba hacia abajo, desarrollados de abajo hacía arriba, ser parte del ambiente, o embebidos en un aspecto (Ten Haaf et al., 2002, Ch.3) del sistema. Los mediadores son determinados por un *observador*, y pueden ser internos o externos al sistema (dependiendo en donde el observador ponga los límites del sistema). Un ejemplo se puede encontrar en el tráfico de un ciudad: los semáforos, señales y reglas median entre conductores, tratan de resolver sus conflictos, como resultado de su competencia por los recursos limitados (espacio para moverse). La precisión de las reglas puede cambiar de país a país, por ejemplo el lado de la calle por el cual manejar, o el comportamiento de los cruceros. Sin embargo tiene éxito en tanto todos las sigan. Otro ejemplo puede darse con las dinámicas de las multitudes cerca de las salidas de zona con personas, las columnas pueden ayudar a mediar entre las personas y facilitar su salida, lo que reduce la probabilidad de accidentes causados por multitudes en pánico. (Escobar and De La Rosa, 2003). La noción de mediador puede verse como una generalización de “limitaciones esclavistas” (Haken, 1988).

*Noción 4.2.2* Un mediador arbitra entre los elementos del sistema para minimizar los conflictos, interferencias y fricciones; y maximiza la cooperación y la sinergia.

Por lo tanto la eficiencia del mediador puede ser medida directamente usando . Individualmente podemos medir la “fricción” que un agente *i* causa en el resto del sistema, relativo al cambio en la satisfacción del elemento *i* y el cambio en la satisfacción del sistema .

(4.2)

La fricción ocurre cuando el incremento en la satisfacción de un elemento, causa un decremento en la satisfacción de uno de los otros elementos que es mayor que el incremento. El decremento en la fricción mantendrá un alto , esto se define en la ecuación 4.2, esto es, como la diferencia en el cambio de satisfacción de un elemento es proporcional al cambio en la satisfacción del sistema. Si , esto es porque hubo un notable decremento en , o un desproporcionado decremento en . Si , entonces lo mas probable es que es debido a un incremento en , o al menos un noble incremento en con un costo despreciable en el sistema. Note que no implica un abstinencia de conflictos, ya que un agente puede “obtener” la satisfacción proporcional a la pérdida de otro(s) agente(s). La fricción negativa implicaría sinergia, por ejemplo cuando mientras otros elementos también incrementan su σ. El rol del mediador puede ser maximizar el minimizando . Con este enfoque la fricción puede ser vista como un tipo de interacción entre elementos.[[3]](#footnote-3)

En consecuencia, el problema se pude plantear de diferente manera: ¿cómo podemos encontrar/desarrollar/ evolucionar mediadores eficientes para un sistema dado? Una respuesta esta pregunta es esta metodología. La repuesta no será completa, ya que en la práctica no podemos tener un comportamiento preciso de f para una larga evolución del sistema complejo. Esto es por que la evolución del sistema puede cambiar su propia f (Kauffman, 2000), y kas relaciones entre diferentes . Por lo tanto la predicción no puede ser completada. Sin embargo la metodología propuesta para los siguientes pasos incrementa el entendimiento (y potencialmente el control) del sistema y las relaciones entre sus elementos. La meta identificar los conflictos y disminuirlos sin crear nuevos. Esto incrementará las y por lo tanto . La precisión de f no es demasiado relevante si esto es alcanzado.

Cabe señalar que la escala de tiempo elegida para medir es muy importante, ya que en pequeñas escalas de tiempo la satisfacción puede decrecer, mientras en escalas de tiempo largas puede incrementarse. En otras palabras, debe haber a corto plazo “sacrificio” para cosechar a largo plazo “recompensa”. Si la escala de tiempo es demasiado pequeña, el sistema puede atascarse en un “óptimo local”, por que todas las posibles acciones pueden decrementar su satisfacción a corto plazo. Pero a largo plazo los beneficios pueden ser considerados para maximización. Esto también dependerá de la escala de tiempo en la cual en que el problema a resolver evoluciona, es decir que tan rápido cambia el dominio de problema. Una manera de medir pequeños cambios de puede ser con una integral sobre cierto intervalo de Δt:

(4.3)

Otra manera de tratar con un optimo local es usar cambios neutrales para explorar soluciones alternativas (Kimura, 1983). Los cambios neutrales son aquellos que no afectan el desarrollo (o “fitness”) de un sistema (), pero permiten la exploración de soluciones alternativas evitación de óptimos locales.

Antes de entrar en mas detalles, vale l apena señalar que esto no es un enfoque reduccionista. Suavizar las interacciones locales no proporcionará pistas directas como lo que ocurre en el nivel más alto. Sin embargo, el sistema permite observar ambos niveles: construir cambios locales y globales, observando comportamientos locales y globales, y analizar como unos afectan a otros.

Concurrentemente, la *dependencia* de un elemento del sistema puede ser medida calculando la diferencia de la satisfacción cuando el elemento en el sistema y su satisfacción cuando el elemento esta aislado.

(4.4)

De esta forma, toda la dependencia es dada cuando la satisfacción del elemento en el sistema es máxima y si satisfacción es mínima cuando el elemento es aislado. Una negativa implica que un elemento estará mas satisfecho por su propia cuenta y en realidad es “esclavo” del sistema. Ahora nosotros podemos usar las dependencias de los elementos del sistema para medir la integración de un sistema, que también puede ser vista como una medida gradual de una transición meta-sistema (MST) (Turchin, 1977).

(4.5)

Una MST es un proceso gradual, pero será completada cuando los elementos no son capaces de lograr sus objetivos por su propia cuenta, es decir . Los ejemplos incluyen organismos unicelulares en multicelulares y mitocondrias en eucariontes.

En el proceso de evolución, la selección natural (multinivel (Michod, 1997; Lenaerts, 2003)) tienden a incrementar τ porque esto implica una alta satisfacción para ambos para el sistema y sus elementos (un sistema con una τ negativa no es viable). Las relaciones y mediadores que contribuyen en este proceso serán seleccionados, dado que las implican más oportunidades de sobrevivir y reproducirse. Los diseñadores humanos e ingenieros también seleccionan relaciones y mediadores que incrementan las de los elementos y sistemas.

Por lo que podemos ver que la evolución tenderá, a largo plazo, a las relaciones sinérgicas (Corning, 2003), incluso si los recursos son escasos. O alternativamente, regresaremos a la tautología mencionada anteriormente, caracterizan los observadores de los sistemas que han evolucionado a una alta τ. Aun, podemos ver que esta tautología será útil para describir sistemas artificiales que puedan cumplir con nuestras expectativas como diseñadores para tener una alta τ.

En la siguiente sección, se presentan los pasos sugeridos para desarrollar un sistema auto-organizado, usando los conceptos descritos en esta sección.

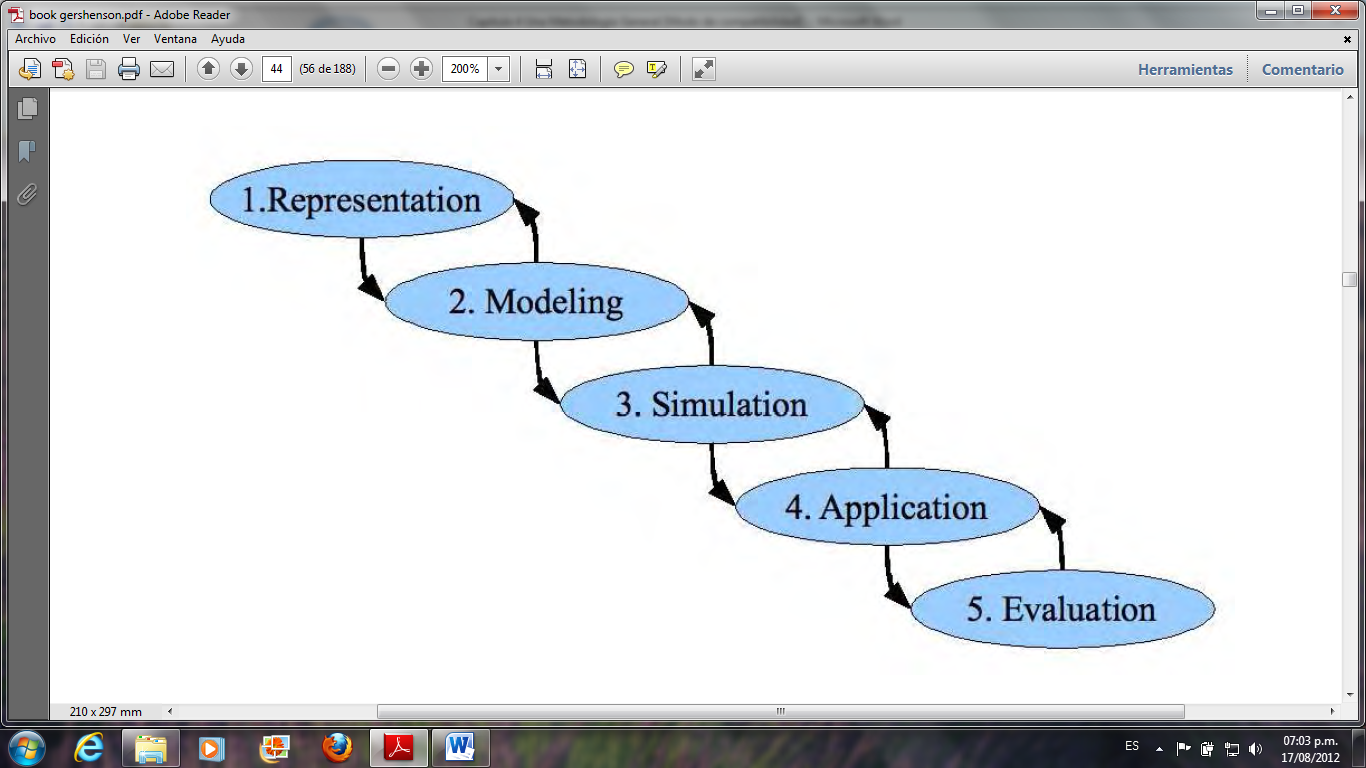


Figura 4.1 Diagrama relativo a las diferentes etapas de la metodología

**4.3 La Metodología**

La metodología propuesta recibe los requerimientos de un sistema, es decir lo que el sistema debe hacer, y habilita el diseño para producir un sistema que alcance los requerimientos. La metodología incluye los siguientes pasos: Representación, Modelado, Simulación, Aplicación, y Evaluación, que serán explicados en secciones subsecuentes. La figura 4.1 presenta estos pasos. Los cuales no necesariamente se siguen uno detrás de otro, pues las etapas se pueden unir. También hay marcha atrás cuando los diseñadores necesitan regresar a la anterior etapa para reconsiderar antes de terminar un ciclo o iteración.

Esta metodología no debe ser vista como una receta que provee una solución ya hecha, sino como una guía para direccionar la búsqueda de la solución. Las etapas propuestas no son nuevas y son similares a las propuestas en metodologías de desarrollo incremental e iterativo. Sin embargo, debe notarse una activa retroalimentación entre las etapas en cada iteración, lo que puede ayudar en el diseño de sistemas listos para enfrentar incertidumbres en el dominio de problemas complejos. La novedad de esta metodología se encuentra en el vocabulario utilizado para describir sistemas auto-organizados.

**4.3.1 Representación**

La meta de este paso es desarrollar la especificación (la cual debe ser tentativa) de los componentes del sistema.

Los diseñadores siempre deben tener en cuenta la distinción entre modelo y modelado. Un modelo es una abstracción/descripción de un sistema “real”. Sin embargo puede haber varias descripciones del mismo sistema (Gershenson, 2002b; Gershenson and Heylighen, 2005), y no podemos decir que una es mejor que otra independientemente de un contexto.

Hay muchas representaciones posibles de un sistema. De acuerdo a las limitaciones y requerimientos, que pueden ser incompletos, el diseñador debe elegir un vocabulario adecuado (metáforas para hablar acerca del sistema), niveles de abstracción, granularidad, variables e intersecciones que requieren tomarse en cuenta. Ciertamente esto también dependerá de la experiencia del diseñador. La elección de diferentes enfoques puede depender más de la experiencia del diseñador que de los beneficios de los enfoques.

Incluso cuando existe una amplia diversidad de sistemas posibles, un enfoque general para desarrollar una Representación puede ser abstraído. El diseñador debe tratar de dividir el sistema en elementos para identificar módulos semi-independientes, con metas internas y dinámica, y con pocas interacciones con su ambiente. Ya que las interacciones en un modelo incrementarán su complejidad, debemos agrupar “clusters” de variables que interactúan en elementos, y luego estudiar un número mínimo de interacciones entre elementos. La primera limitación que nos ayuda es el espacio y tiempo. Esto es útil para un grupo de variables que están cerradas entre sí (es decir, interactúan constantemente) y considerarlos como elementos que se relacionan con otros elementos en interacciones ocasionales. El análisis multi-escala (Bar-Yam, 2005) es un método prometedor para identificar niveles y variables útiles en una representación. Ya que la metodología propuesta considera elementos como agentes, otro criterio útil para delimitarlo es la identificación de metas. El modelado debe ser útil para medir la satisfacción σ de los elementos. Podemos ver a los genes como ejemplo: grupos de nucleótidos co-ocurren e interactúan con otros grupos y sus proteínas. Los genes son identificados por la observación de los nucleótidos que se mantienen juntos y actúan juntos para realizar una función. El cumplimiento de esta función puede verse como la meta del gen. Dividiendo el sistema en módulos también se divide el problema que se desea resolver, ahora una tarea compleja estará lista para ser procesada en paralelo por distintos módulos. Ciertamente, la integración de la “solución” dada por cada modulo surge como un nuevo problema. Sin embargo la modularidad en el sistema también incrementa su robustez y adaptabilidad (Simon, 1996; Watson, 2002; Fern´andez and Sol´e, 2004).

La representación debe ser considerada en los últimos dos niveles de abstracción, pero si hay muchas más variables e interacciones en el sistema, pueden ser contemplados más niveles. Dado que los elementos y los sistemas pueden ser vistos como agentes, nos podemos referir a ellos como x-agentes, donde x denota el nivel abstracción relativo al elemento más simple. Por ejemplo, en una abstracción de tres capas podemos contemplar elementos (0-agentes) formando sistemas que son elementos (subsistemas, 1-agentes), de un sistema mas amplio (súper sistema, 2-agentes). Si queremos modelar un instituto de investigación. Los investigadores pueden tener 0-agentes, los grupos de investigación 1-agentes, y el instituto de investigación tendrá 2-agentes. Una universidad tiene importantes institutos de investigación, tendrá 3-agentes. Cada uno de ellos tiene metas y satisfacción (σx) que pueden ser descritos e interrelacionados. Para ingeniería se propone, la satisfacción de alto nivel, es decir la satisfacción del sistema es al comienzo del diseño, será determinada por las tareas esperadas de él. Si se ha cumplido estas, entonces se puede decir que el sistema está satisfecho. Más aún, el diseñador debe concentrarse en la ingeniería de los elementos que estribará en alcanzar esta satisfacción.

Si hay pocos elementos o interacción en la Representación, lo más probable es que el sistema sea predecible y comprensible, es decir su espacio de estados puede ser exhaustivamente analizado y será de baja complejidad. El sistema podría ser mejor descrito que usando enfoques tradicionales, dado que esta metodología puede proveer redundancia. Una gran variedad de elementos y/o interacciones podrían implicar una complejidad muy alta para ser administrada. Si este es el caso, la representación debe ser revisada antes de entrara a la etapa de modelaje.

1. Basado en Gershenson (2006a). [↑](#footnote-ref-1)
2. Este método ha sido usado frecuentemente para detectar funciones en sistemas complejos tales como redes de regulación genética y sistemas nerviosos, por ejemplo Beer (1900). [↑](#footnote-ref-2)
3. Usando la terminología de teoría de juegos, las interacciones pueden ser como juegos, las satisfacciones como recompensas, las fricciones como cantidades negativas, y la sinergia como cantidades positivas. [↑](#footnote-ref-3)