

CAPÍTULO 1

BASES PARA EL ESTUDIO

ÍNDICE DEL CAPÍTULO 1

BASES PARA EL ESTUDIO

1.1. EL EDIFICIO Y SU FUNCIÓN DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO.	3
1.1.1. El comportamiento térmico de los edificios desde el punto de vista global.	3
1.1.2. La arquitectura en su enfoque medio-ambiental.	5
1.1.3. Análisis de captación y transformación de energía en edificios.	9
1.2. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS.	13
1.2.1. Algunas definiciones sobre sistemas físicos.	13
1.2.2. Función de transferencia de sistemas dinámicos.	16
Transformada de Fourier y espectros de frecuencia.	16
Espectro de energía.	18
Obtención de la función de transferencia.	18
Obtención de la función de transferencia experimental.	21
1.2.3. Modelización de edificios como sistemas dinámicos.	22
Red eléctrica equivalente.	26
Ecuaciones diferenciales.	28
Análisis modal.	29
Modelos ARMA.	30
Análisis de Fourier (para relacionar coeficientes y parámetros físicos).	31
1.2.4. Principios de control de sistemas dinámicos.	32
1.3. CONTROL DE SISTEMAS DINÁMICOS EN ARQUITECTURA.	38
1.3.1. Finalidad del control en arquitectura.	38
1.3.2. Tipos de sistemas a controlar.	38
1.3.3. Control en sistemas de climatización.	39
Tipo de medios de control.	40
Tipo de diagrama de control.	41
1.3.4. Control global en arquitectura.	43
1.4. REFERENCIAS.	45

CAPÍTULO 1

BASES PARA EL ESTUDIO

1.1. EL EDIFICIO Y SU FUNCIÓN DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO.

1.1.1. El comportamiento térmico de los edificios desde el punto de vista global.

La necesidad primaria que deben cubrir los edificios es la de protección del ambiente exterior y la de albergar a las actividades humanas. Las viviendas y otros edificios en general brindan refugio y protegen del medio-ambiente exterior, de modo que las actividades tanto domésticas como públicas puedan desarrollarse con seguridad y confort térmico, acústico y visual.

Tanto la envolvente como los elementos interiores del edificio influyen sobre las diferencias entre el clima que se genera en el interior y el clima exterior. Entre ambos se producen numerosos fenómenos de intercambio de flujos energéticos que definen el comportamiento térmico, y ambiental en general, del mismo. Cada uno de los elementos arquitectónicos causa un filtrado del clima exterior hacia el interior de los edificios, que se traduce en una respuesta térmica global de todo el edificio a esas causas, determinando efectos sobre un clima interior distinto.

Esta conversión climática que efectúa el edificio depende de parámetros tanto del clima como del propio edificio. El clima de un lugar está provocado por una serie de factores naturales. Son determinantes los factores geográficos como la latitud y altitud, pero también influyen seriamente los que condicionan el microclima, como la topografía, que determina la incidencia de los vientos, la cercanía al mar, los fenómenos climáticos urbanos y la vegetación. Todos estos con-

dicionantes se reflejan en una serie de parámetros meteorológicos, fuertemente ligados entre sí, entre los cuales los más relevantes son: la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad y el viento. La acción combinada y simultánea de todas las variables climáticas, y no de cada una por separado, es la que causa una determinada respuesta térmica en el edificio.

Es muy importante conocer la envoltura y la estructura de un edificio inmerso en un clima dado, para poder determinar su respuesta térmica. Numerosos factores arquitectónicos, desde la forma, orientación, inclinación de los muros y tamaño y ubicación de aperturas, hasta las superficies y materiales constituyentes de su piel y estructura, con sus combinaciones posibles, condicionan su comportamiento, que es el de actuar como intermediario con el clima exterior. Incluso sus ocupantes lo pueden modificar sensiblemente: tanto por su actividad metabólica como por la puesta en marcha de aparatos que produzcan calor, variación de la humedad o movimiento del aire, y la modificación de elementos propios del edificio como extendido de toldos, apertura de ventanas y/o puertas, etc.

El siguiente dibujo (Fig.1.1.) grafica de una forma esquemática la ubicación de las cargas térmicas que influyen sobre el balance térmico global de un edificio. Las cargas térmicas generadas por las condiciones climáticas, actúan sobre la envolvente a través de fenómenos tales como conducción del calor, intercambios de radiación por las superficies y ventilación. En el interior, la radiación solar directa sobre las superficies interiores se convierte en calor que se almacena y se emite posteriormente. La presencia de los ocupantes, el uso de electrodomésticos y equipo en general que genere calor y/o humedad, la iluminación, los efectos de la infiltración y ventilación, y eventualmente instalaciones de calefacción y aire acondicionado, son factores interiores que inciden sobre el balance térmico global.

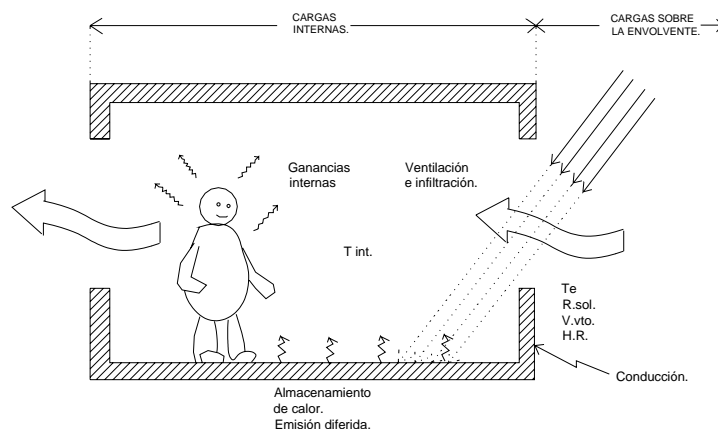


Fig. 1.1: Balance térmico en los edificios.

Como efecto combinado y simultáneo de estas numerosas variables tanto naturales como arquitectónicas, se producen flujos energéticos que en todo instante están saliendo y entrando del edificio, estableciéndose también a cada instante un balance térmico global entre la energía o calor que entra, el que sale y el almacenamiento. Los diversos parámetros intervinientes en esta combinación espacial y temporal de causas térmicas aportan continuamente ganancias y pérdidas tanto directas como diferidas, y es precisamente el juego constante entre ambas a lo largo del tiempo, y más específicamente, el modo de dosificar adecuadamente estas ganancias, la base conceptual de la climatización natural en edificios.

1.1.2. La arquitectura en su enfoque medio-ambiental.

A pesar de que los edificios se diseñan para cubrir, entre otras necesidades, la de confort térmico, la complejidad de los procesos que involucran el confort humano hace que sea difícil alcanzar el confort térmico para todos los ocupantes de un mismo ambiente interior.

Sin embargo, intentando cuantificar la sensación de bienestar térmico de la mayoría de las personas situadas dentro de un edificio, realizando la misma actividad y con un tipo de vestimenta similar, diferentes autores han definido una "zona de confort" como el área en el ábaco psicrométrico que contiene los rangos en que pueden fluctuar los parámetros ambientales, para que en determinado ambiente la mayoría de estos ocupantes mantengan el confort térmico. Los principales parámetros ambientales, que interactúan para crear la sensación de confort, han sido combinados formando un diagrama bioclimático, inicialmente propuesto por Victor Olgyay¹, y posteriormente combinado con el ábaco psicrométrico por diferentes

autores, como Baruch Givoni, Yaglou-Drinker, Königsberger, C.E. Brooks, E. González, y la normativa ASHRAE, entre otros. Al entrar al ábaco con varios de estos elementos “meteorológicos”, es posible determinar si una solución arquitectónica global es adecuada o no en relación al clima del lugar, y qué precauciones deberán tomarse para devolver las condiciones de confort, según el caso.

Las investigaciones sobre el confort humano se basaron en datos estadísticos de grupos de personas, con el fin de determinar cuántas de ellas estaban satisfechas en un ambiente determinado por un conjunto de condiciones ambientales definidas. Es decir, que la zona de confort representa un área donde las combinaciones de parámetros ambientales son aceptables para la mayoría de las personas en estudio. P.O. Fanger (1970)² creó un índice para cuantificar el grado de disconfort para un conjunto de condiciones ambientales dadas, llamado voto medio previsto (PMV). El PMV es una función que involucra actividad, vestimenta, temperatura ambiente, humedad relativa, temperatura radiante media y velocidad del aire. Cabe destacar, sin embargo, que existen además de estos, otros factores que pueden condicionar estos valores estadísticos³, como por ejemplo: edad, sexo, salud, factores culturales y sociales, efectos psicológicos, aclimatación a las condiciones térmicas, y el efecto de la “variabilidad temporal”.

Respecto a este último factor, investigaciones llevadas a cabo por Rohles et al., en 1980⁴ sobre los efectos de las fluctuaciones cíclicas de la temperatura sobre el confort térmico, los resultados indican que el ambiente térmico se mantendrá en condiciones aceptables, siempre que la velocidad de cambio no exceda de los 3.3°C/h y la amplitud entre un extremo y otro de la curva de temperatura sea menor o igual a 3.3°C. Una conclusión adicional es que si se desciende desde una temperatura determinada, la sensación no es la misma que ascendiendo hacia la misma temperatura. Es decir, el confort ambiental no depende sólo de las condiciones ambientales (y de los ocupantes), sino también de la velocidad de cambio de las mismas, y de la “historia” o evolución de la temperatura durante el período precedente (condiciones estacionales).

Continuando con la incidencia de la arquitectura sobre el confort, entre otros autores, Baruch Givoni⁵ ha desarrollado ábacos psicrométricos con zonas de confort y la posible corrección arquitectónica, que permiten conocer la influencia de diversas intervenciones sobre la arquitectura, y también sobre ciertos dispositivos. Estos diagramas indican sobre todo el tipo de solución a adoptar, sin precisarlas cuantitativamente. Un resumen adaptado por R. Serra se recoge en la Fig. 1.2.

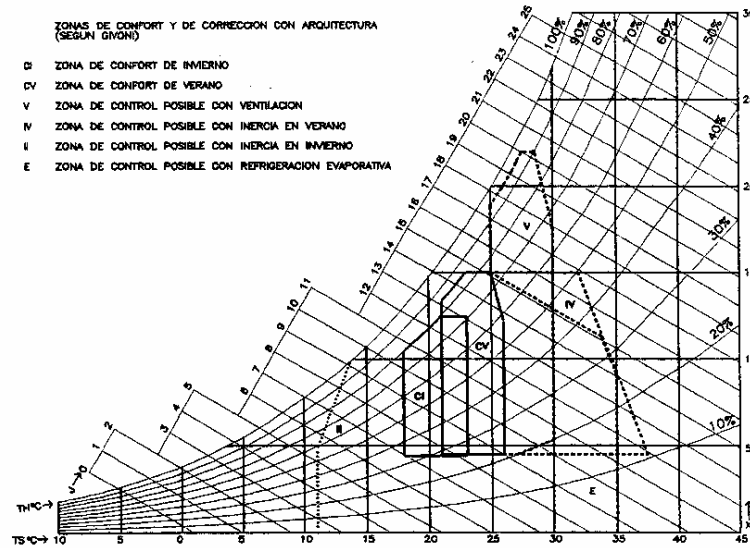


Fig. 1.2: Ábaco psicrométrico con zona de confort y zonas de corrección arquitectónica.

(Fuente: R. Serra y H. Coch, 1995).

Estando fuera de la zona de confort, para poder cambiar uno o más valores y mover así esta combinación nuevamente dentro de la zona, es necesario emplear energía, implementada a través de medios naturales o artificiales de climatización. Ambos tienen la función principal de mejorar el comportamiento térmico del edificio. Mientras los naturales consisten en componentes arquitectónicos que actúan sobre los fenómenos radiantes, térmicos y de movimiento del aire que se producen naturalmente en la arquitectura, los artificiales en cambio requieren de fuentes de energía auxiliar para su funcionamiento. Cabe aclarar que no sólo es importante la cantidad de energía consumida y suministrada por cada sistema, sino además su potencia, es decir, la cantidad de energía por unidad de tiempo.

Los sistemas de climatización natural son llamados también sistemas pasivos, ya que, una vez puestos en obra, no requieren de un aporte continuo de potencia para su funcionamiento. El presente estudio se ocupará preferentemente de los sistemas de climatización natural.

Los edificios utilizan energía en tres etapas de su existencia (B. D. Hunn, 1996):

- 1) para su construcción, en forma de materiales (cuyo costo de fabricación incluye materia prima, mano de obra, elaboración, etc.), transporte, puesta en obra y edificación, incluyendo diseño del proyecto y mano de obra para la construcción (costo inicial),

2) durante su vida útil, en dos tipos de consumos:

2.1) para su mantenimiento y conservación, invirtiendo en materiales y mano de obra durante períodos cíclicos en que se requieran reparaciones y/o renovaciones, y

2.2) para su operación, en climatización, iluminación, fuerza motriz, agua caliente, uso de aparatos eléctricos, comunicación, etc., en general para soporte de las actividades humanas, cuya inversión de recursos es continua, mientras el edificio se encuentre habitado.

3) para su eliminación y reciclaje.

La premisa de utilizar el mínimo posible de energía, debido a la acotación en la disponibilidad energética mundial, se ha convertido en las últimas décadas en una de las pautas que el diseño arquitectónico debe tener muy en cuenta. Por otro lado, también es necesario evitar los sobre-costos en la inversión inicial para la construcción.

La utilización de sistemas de climatización natural puede ser un aporte al ahorro de energía para la climatización, siempre que los edificios se diseñen evaluando adecuadamente el movimiento de flujos energéticos y actuando en consecuencia, regulando y distribuyendo los mismos por medio de la arquitectura. Conociendo el modo de captación y transformación de energía del edificio, es decir, su respuesta térmica en función del clima, se pueden elegir las opciones generales y particulares arquitectónicas óptimas para crear un hábitat interior confortable, con un mínimo aporte de energía auxiliar y evitando el dimensionamiento inapropiado.

Los conceptos que posibilitan la climatización natural de edificios, que aportan mejoras a la calidad del ambiente construido utilizando recursos naturales, son una herramienta más que contribuye al desarrollo urbano sostenible. La optimización en el uso de los recursos naturales, además de mejorar la calidad de las condiciones de confort en el interior de las edificaciones, disminuye el consumo de combustibles tradicionales y reduce el impacto ambiental de las áreas construidas, que se manifiesta principalmente en un exceso de emisiones de gases nocivos (CO_2 , entre otros), efecto de isla de calor, etc., así como el impacto ambiental en la naturaleza en general, por la sobreexplotación de recursos naturales, el cambio del clima en el planeta y la modificación del paisaje.

Los esfuerzos que se desarrollen en los diferentes campos tecnológicos tendentes a la aplicación de conceptos "bioclimáticos" para construir y administrar energéticamente nuestro hábitat son una etapa necesaria para promover la creación de un modelo integral de desarrollo sostenible.

1.1.3. Análisis de captación y transformación de energía en edificios.

En el momento de proyectar los edificios, es necesario conocer las posibilidades que ofrecen ciertos elementos arquitectónicos tradicionales en cuanto a la gestión térmica del edificio en su conjunto. Estos elementos, generalmente pertenecientes a la piel del edificio, donde se manifiestan los intercambios térmicos exterior-interior, tienen una importante función que cumplir, una función "activa", que es la de administrar la energía térmica del ambiente exterior. Básicamente, existen tres funciones desde el punto de vista térmico que estos elementos pueden cubrir: 1) captar energía, 2) almacenar energía y 3) ceder y distribuir energía.

El análisis de estas funciones, se basará en el punto de vista de autores como Jean-Louis Izard⁶, que clasificó estos elementos arquitectónicos según su función térmica, y Rafael Serra, que amplió esta clasificación con numerosos ejemplos y agregó los elementos de protección (control), como una función diferenciada. Es necesario mencionar que otros autores han clasificado estos elementos según otros criterios, como por ejemplo, según el fenómeno de transferencia de calor que éstos involucran. Véase por ejemplo el trabajo de B. Givoni (1969), entre otros. Otra opción es según el tipo de parámetro climático que son capaces de modificar, como está expuesto por Elke Hinz y otros⁷. Otros autores, como Edward Mazria⁸, efectúan una clasificación según el modo de transformación de la energía que se lleva a cabo en cada elemento.

A efectos de una introducción teórica adecuada, se expondrá una clasificación de los elementos arquitectónicos según su función térmica (R. Serra y H. Coch, 1995), ya que se ajusta más al tema conceptual que se desarrollará más adelante, y para comprender mejor la importancia de los elementos controladores.

Según su función térmica, los elementos arquitectónicos componen sistemas de los siguientes tipos:

- 1.- Sistemas captadores.
- 2.- Sistemas de inercia.
- 3.- Sistemas de ventilación y tratamiento de aire.
- 4.- Sistemas "protectores", controladores de los parámetros ambientales, que pueden asociarse a los sistemas anteriores.

1.- Sistemas captadores.

Son aquellos componentes arquitectónicos de un edificio cuya función térmica es captar energía proveniente de la radiación solar y transferirla al interior en forma de calor. Elementos traslúcidos de la envolvente como ventanas, lucernarios, invernaderos, etc., así como

elementos de obra macizos o grandes volúmenes de agua, son ejemplos de sistemas que de uno u otro modo ayudan a captar y distribuir el calor exterior.

2.- Sistemas de inercia.

Son elementos de masa térmica importante comparada con el resto de la masa del edificio, que actúan estabilizando la temperatura interior frente a las oscilaciones de las condiciones exteriores. Elementos de este tipo pueden ser masas térmicas estratégicamente ubicadas, ya sea en el suelo, paredes interiores, cubiertas, o bien grandes masas de tierra o roca rodeando el edificio, que ayuden a que parte del calor y la radiación solar incidente se acumulen en forma de calor. Estos sistemas posibilitan la disminución de las oscilaciones causadas por los fenómenos mencionados, y permiten la emisión de calor diferido, durante las horas en que disminuye la temperatura exterior.

3.- Sistemas de ventilación y tratamiento de aire.

Son componentes o conjuntos de componentes de un edificio que tienen como misión, por un lado, favorecer el paso del aire por su interior (renovación de aire), y por otro, mejorar las condiciones de temperatura y humedad a través de la ventilación y su distribución (refrigeración o distribución de la calefacción).

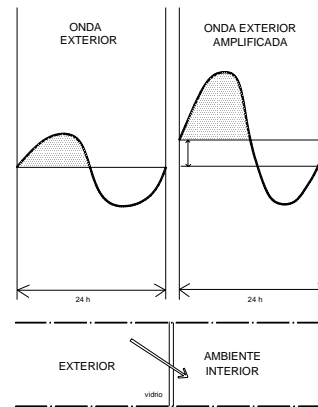
Los cálculos de la eficiencia energética de estos sistemas se basan generalmente en un balance térmico, cuyos datos son las variables exteriores (radiación solar, temperatura) y las características geométricas y físicas de los materiales intervinientes en el sistema. En la mayoría de los casos, las estimaciones se efectúan en régimen estacionario. Los parámetros a estimar son generalmente ganancias y, en algunos casos, desfase térmico diario.

4.- Sistemas de protección y control.

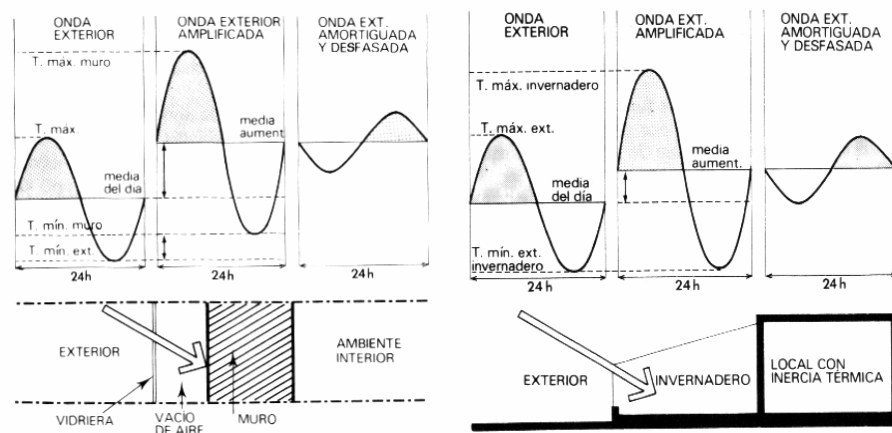
Debe añadirse a los anteriores, clásicamente citados, los sistemas de protección o controladores. Dependiendo del parámetro climático que se necesite regular, podrá tratarse de elementos tales como: aleros, voladizos, umbráculos, persianas, toldos (protección a la radiación solar); compuertas de regulación de aberturas (protección a la ventilación), vegetación (protección al viento y a la radiación solar), etc.

Cada tipo de sistema presenta un comportamiento diferente, frente a las condiciones térmicas exteriores, que se manifiesta en el clima interior. La oscilación térmica exterior puede verse aumentada o disminuida, dependiendo de la configuración y materiales del sistema térmico. Varía asimismo la velocidad de respuesta del edificio en unos casos o en otros, ya que la dosificación de las energías exterior-

res se efectúa en forma diferente, presentándose distintos desfases en la oscilación térmica respecto al exterior (Fig. 1.3.).



a) Ventana.



b) Muro acumulador.

c) Invernadero.

Fig. 1.3: Esquemas de respuestas de la oscilación térmica de diferentes elementos arquitectónicos. (Fuente b) y c): Izard, Jean Louis, 1979 y 1983)

Así, dependiendo del tipo de clima en el que se encuentre el edificio a proyectar, es posible aprovechar las propiedades de cada tipo de elemento arquitectónico y, más aún, de la asociación entre varios, que brinden resultados satisfactorios de confort térmico durante la mayor parte del día y la noche, y una distribución de calor adecuada en toda la vivienda. Debe tenerse en cuenta que los distintos comportamientos térmicos pueden variar no sólo en el ciclo día-noche sino también en ciclos secuenciales, como una serie de días nublados y luego soleados, ciclos estacionales e incluso anuales. En la mayoría de los casos se hace casi imprescindible asociar elementos con inercia térmica y con ganancias instantáneas, que permitan una

regulación adecuada de la energía. Es decir que el problema de dosificación entre capacidad térmica total y superficie total de captación está directamente relacionado con las características del clima. Como se deduce de la descripción de estos efectos, son los aspectos dinámicos del comportamiento térmico de estos elementos, los que resultan de primordial importancia para el control de los flujos energéticos entrantes y salientes, que varían constantemente a lo largo del tiempo.

1.2. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS.

En esta parte del capítulo se describirá, por un lado, una serie de características y propiedades de sistemas dinámicos, así como de su caracterización y modelización, y por otro, se darán unas nociones sobre el control de estos sistemas.

1.2.1. Algunas definiciones sobre sistemas físicos.

Un sistema es un objeto físico en el cual diferente tipo de variables interactúan entre sí y producen señales observables. Las señales o resultados que son de nuestro interés se denominan variables de salida (outputs). El sistema está afectado además de estímulos o excitaciones externos. Los estímulos que pueden ser controlados por el observador son las variables de entrada (inputs), los demás se denominan interferencias o ruido. Entre estas últimas, las hay que se pueden medir directamente y las que se detectan a través de las variables de salida (Fig.1.4.).

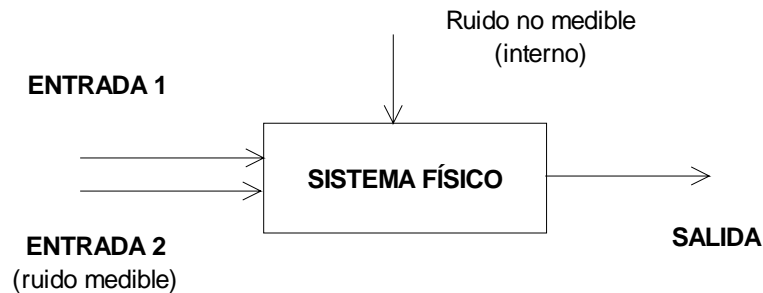


Fig. 1.4: Sistema físico y magnitudes de entrada y salida.

Sistema dinámico.

En un sistema dinámico⁹, el valor instantáneo de la variable de salida no depende sólo de las variables de entrada al sistema, sino también de los valores anteriores de la misma variable de salida. A las variables de salida de los sistemas dinámicos se las denomina frecuentemente series de tiempo.

Sistema lineal.

Si se supone que la respuesta de un sistema a la excitación $e(t)$ es la función $s(t)$, y si la respuesta de ese sistema a la excitación

$$e(t) = a_1 e_1(t) + a_2 e_2(t)$$

$$\text{es: } s(t) = a_1 s_1(t) + a_2 s_2(t) \quad [1.1]$$

se dice que es un sistema lineal (Fig.1.5.).

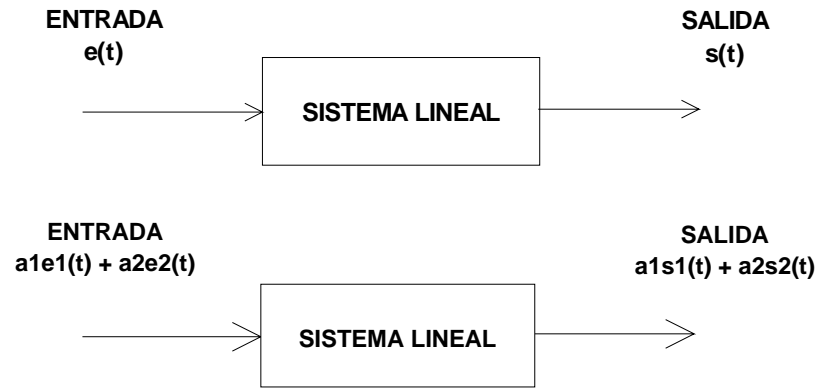


Fig. 1.5: Excitación y respuesta de un sistema lineal.

Para poder interactuar con el sistema, se necesita algún concepto que describa cómo se relacionan sus variables entre sí. Este concepto entre señales observables se denomina **modelo** del sistema.

Un sistema dinámico lineal puede quedar definido unívocamente por su variable de entrada y por su respuesta, o función de frecuencias. Su salida o respuesta a una combinación lineal de estímulos es la misma combinación lineal de respuestas individuales, según las expresiones [1.1]. Los sistemas cuya relación entre entrada y salida sigue una expresión matemática en ecuaciones diferenciales, tienen un modelo analítico. Dentro de este último tipo se diferencian distintos tipos de sistemas, según el tipo de ecuación diferencial que los gobierna, como continuos en el tiempo o discretos, determinísticos o estocásticos, etc. La mayor parte de los fenómenos físicos y que se presentan en el campo de la ingeniería responden a leyes no lineales, aunque a veces se aproximan de forma lineal.

Otra definición de sistema lineal es la que la función excitación y la función respuesta del sistema, están relacionadas por una ecuación diferencial lineal, es decir:

$$\begin{aligned}
 a_n \, d^n s(t) / dt^n + a_{n-1} \, d^{n-1} s(t) / dt^{n-1} + \dots + a_1 \, ds(t) / dt + a_0 s(t) = \\
 = b_m \, d^m e(t) / dt^m + b_{m-1} \, d^{m-1} e(t) / dt^{m-1} + \dots + b_1 \, de(t) / dt + b_0 e(t)
 \end{aligned}
 \quad [1.2]$$

Sistema causal.

Si la respuesta de un sistema a la excitación $e(t)$ es la función $s(t)$, y si la respuesta de ese sistema a la excitación $e(t-t_0)$ es la función $s(t-t_0)$, se dice que es un sistema invariante en el tiempo (o un

sistema de parámetros constantes).

Un sistema físico puede tener la propiedad de que si la excitación $e(t)$ para $t < t_0$ sea 0, la respuesta también sea cero para $t < t_0$:

$$\begin{array}{ll} \text{Si} & e(t) = 0 \quad \text{para } t < t_0 \\ \text{entonces} & s(t) = 0 \quad \text{para } t < t_0 \end{array}$$

Un sistema que satisface lo anterior, es un sistema causal. En un sistema causal la respuesta en un cierto instante de tiempo depende de la variable de entrada sólo hasta ese instante. En general, los sistemas físicos son causales.

Modelización.

Los modelos matemáticos se pueden construir mediante dos caminos. Uno, consiste en dividir al sistema en subsistemas, cuyo comportamiento físico y propiedades puedan quedar entendidos claramente. Estos subsistemas se relacionan luego matemáticamente entre sí y se obtiene un modelo de todo el sistema. La reconstrucción del sistema por medio de un ordenador, a través de estos bloques que consisten de elementos simples, conduce más a un modelo de programa que a un modelo matemático.

El modelo que se usa para la simulación de un sistema por ordenador es un programa. Éste no puede expresarse analíticamente como un modelo matemático estricto, sino que consta de una serie de procesos o subrutinas interconectadas que provocan resultados análogos a los del sistema real, a partir de los mismos datos.

El otro camino para obtener un modelo se basa directamente en la experimentación. Se miden las variables de entrada y salida del sistema y se graban. Estos datos se someten a un análisis para poder inferir luego un modelo. Este proceso se denomina **identificación de sistemas**.

Un edificio, en una primera aproximación, se puede representar por un sistema lineal, invariante en el tiempo y causal. Si se sigue la última opción como método para la obtención de un modelo, es necesario efectuar mediciones de variables que se consideren significativas para la descripción aproximada del efecto físico que se quiera modelizar, por ejemplo: su comportamiento térmico, es decir, la respuesta térmica de un edificio frente a un clima dado. Los datos de las mediciones, por la misma naturaleza del proceso de medición, son series de tiempo discretas.

1.2.2. Función de transferencia de sistemas dinámicos.

Para los sistemas lineales, resulta útil considerar que las funciones temporales discretas que representan los datos climáticos exteriores (datos de entrada), como son: temperatura ambiente o radiación solar, pueden ser modelizadas con un seno, coseno o una función exponencial, como base, por ejemplo, de la descomposición en serie de Fourier de los datos reales. Las funciones de entrada exponenciales en el tiempo son de especial importancia en el análisis de los sistemas lineales. Se puede demostrar que la respuesta de un sistema lineal e invariante a una función exponencial es también una función exponencial y proporcional a la entrada. Si la función de entrada es $e(t) = e^{j\omega t}$ y la función respuesta o salida es $s(t)$:

$$\begin{aligned} e(t) &= e^{j\omega t} \\ s(t) &= T.F.(j\omega) e^{j\omega t} \end{aligned} \quad [1.3]$$

entonces $s(t)$ será también exponencial.¹⁰

El factor de proporcionalidad $T.F.(j\omega)$ es una función característica y propia del sistema y se denomina **función de transferencia del sistema**. Conociendo la función de entrada $e(t)$ y la función que relaciona entrada y salida $T.F.$, se puede obtener la respuesta $s(t)$ (Fig.1.6.). La función de transferencia $T.F.$ caracteriza completamente al sistema.



Fig. 1.6.: Función de transferencia de un sistema lineal temporal.

Transformada de Fourier y espectros de frecuencia.

Las funciones climáticas antes mencionadas, de entrada al sistema lineal "edificio", son funciones en general periódicas o cuasi-periódicas, es decir:

$f(t) = f(t+T)$ donde t es la variable tiempo y T es el período, que según los propósitos que se sigan, puede ser de 1 ó más días (períodos secuenciales, estacionales, anuales).

Si la función de entrada $e(t) = f_e(t)$ se puede aproximar a una función continua periódica e integrable, como ocurre en el límite, con

muchos parámetros físicos, es aplicable la operación:

$$F_e(\omega) = F[f_e(t)] = 1/T \int_{-\infty}^{\infty} f_e(t) e^{j\omega t} dt$$

A $F_e(\omega)$ se la denomina integral de Fourier o transformada de Fourier de la función $f_e(t)$, y la función resultante tiene como variable la frecuencia ω .

Debido al intervalo entre una medición y otra, la función es en realidad discreta, entonces la transformada discreta de Fourier se expresaría como una sumatoria:

$$F_e(\omega) = 1/T \sum_{n=0}^N f_e(t) [\cos n\omega_0 t + j \sin n\omega_0 t]$$

donde N es el número total de mediciones en el período T y $\omega_0 = 2\pi/T$, es la frecuencia fundamental.

La función en frecuencia $F_e(\omega)$ es compleja, es decir que puede tener una parte real $\text{Re}(\omega)$ y una parte imaginaria $\text{Im}(\omega)$. Entonces se puede expresar como:

$$F_e(\omega) = \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega)$$

El módulo de la función $F_e(\omega)$ se obtiene:

$$|F_e(\omega)| = \sqrt{(\text{Re}(\omega))^2 + (\text{Im}(\omega))^2}$$

y se denomina también amplitud.

Mientras que la fase es:

$$\text{fase}(\omega) = \arctg [\text{Im}(\omega)/\text{Re}(\omega)]$$

La gráfica de $|F_e(\omega)|_n$ en función de ω es el espectro de amplitud de la función $f_e(t)$ y la de la fase(ω) en función de ω es su espectro de fase.

Una función entrada $f_e(t)$ se puede expresar entonces de dos modos: uno, en el dominio del tiempo $f_e(t)$ y otro, en el dominio de la frecuencia $F_e(\omega)$. La herramienta que permite el pasaje de un espacio a otro es la transformada de Fourier. Para regresar nuevamente al espacio temporal se usa la transformada inversa de Fourier:

$$f_e(t) = F^{-1}[F_e(\omega)] = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} F_e(\omega) e^{-j\omega t} d\omega$$

Espectro de energía.

Una propiedad interesante es la identidad de Parseval, que afirma que si:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt$$

entonces:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega = E$$

A $|F(\omega)|^2$ se denomina a veces espectro de energía o función de densidad de energía espectral de $f(t)$.

Obtención de la función de transferencia.

Un sistema lineal sometido a una función de entrada (o función de excitación), en que aparece una función salida (o función respuesta), quedará totalmente caracterizado si se conoce la naturaleza de la dependencia de la salida sobre la entrada, según [1.3]:

$$s(t) = T.F.(j\omega) e^{j\omega t}$$

$$s(t) = T.F.(j\omega) e(t)$$

$$f_s(t) = T.F.(j\omega) f_e(t) \quad \text{donde } f_e(t) = e(t) \text{ y } f_s(t) = s(t).$$

La ecuación [1.2] se puede escribir más sintéticamente utilizando un operador $p = d f(t) / dt$, tal que:

$$p f(t) = d f(t) / dt$$

$$p^n f(t) = d^n f(t) / dt^n$$

Entonces [1.2] quedaría:

$$\sum_{n=0}^N a_n p^n f_s(t) = \sum_{m=0}^M b_m p^m f_e(t)$$

$A(p) f_s(t) = B(p) f_e(t)$ donde $A(p)$ y $B(p)$ son los polinomios de grado N y M respectivamente expresados en [1.2].

En un sistema lineal los coeficientes a_n y b_m son independientes de la función respuesta. En un sistema invariante en el tiempo (o de parámetros constantes) los coeficientes a_n y b_m son constantes.

De la última expresión:

$$f_s(t) = B(p) / A(p) \quad f_e(t) = T.F.(p) \quad f_e(t) \quad [1.4]$$

donde T.F. (p) es la función de transferencia del sistema, expresada como cociente entre polinomios de grado M en el numerador y grado N en el denominador.

$$T.F.(p) = B(p) / A(p)$$

Tomando el caso particular de que la excitación aplicada sea un impulso unitario $\delta(t)$ o de Dirac (Fig.1.7.):

$$\delta(t) : \quad \begin{array}{ll} \delta(t) = 0 & \text{para } t < 0 \text{ y } t > 0 \\ \text{"}\delta(t) = \infty \text{"} & \text{para } t = 0 \end{array}$$

y :

$$f_e(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

Resulta :

$$F_e(t) = \int e^{pt} f_e(t) dt = \int e^{pt} 1 dt = 1 \quad \text{donde: } p = j\omega$$

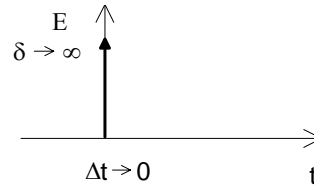


Fig. 1.7: Excitación como impulso unitario.

La expresión [1.4] se convierte en:

$$f_s(t) = T.F.(p) \cdot 1 = T.F._{\delta} \quad [1.5]$$

es decir que la respuesta del sistema a un impulso de Dirac unitario es directamente su función de transferencia.

En un sistema lineal e invariante, se cumple el teorema de convolución:

$$f_s(t) = \int_{\tau=0}^{\tau=\infty} f_e(\tau) T.F._{\delta}(t-\tau) d\tau = f_e(t) * T.F._{\delta}$$

Es decir que la respuesta $f_s(t)$ a una entrada arbitraria $f_e(t)$, se puede expresar como la convolución de la entrada $f_e(t)$ y de la respuesta del sistema al impulso unitario $T.F._{\delta}$.

Para otro caso particular, en que la excitación a un sistema lineal es un escalón unitario $u(t)$ o función de Heaviside y T.F. $_{.u}(t)$ es la respuesta a esa excitación, la respuesta $f_s(t)$ para cualquier entrada $f_e(t)$ estaría dada por:

$$\begin{aligned} u(t) &= 0 && \text{para } t < 0 \\ u(t) &= 1 && \text{para } t > 0 \end{aligned}$$

$$f_s(t) = f_e(0+) \text{ T.F.}_{.u}(t) + \int_{\tau=0+}^{\tau=t} f_e'(\tau) \text{ T.F.}_{.u}(t-\tau) d\tau \quad [1.6]$$

donde $f_e'(\tau) = df_e(\tau) / d\tau$

Además, la respuesta a un escalón unitario T.F. $_{.u}(t)$ (Fig.1.8.) está relacionada con la respuesta a un impulso unitario por:

$$\text{T.F.}_{.u}(t) = \int_{\tau=0}^{\tau=t} \text{T.F.}_{.\delta}(t-\tau) d\tau$$

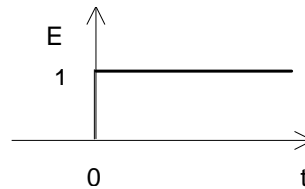


Fig. 1.8: Excitación como escalón unitario.

El espectro de frecuencias de la respuesta $F_s(j\omega)$ está relacionado con el espectro de frecuencias de la entrada $F_e(j\omega)$, por medio de la función de transferencia del sistema T.F. $_{.}(j\omega)$ (Fig.1.9.), según:

$$F_s(j\omega) = \text{T.F.}_{.}(j\omega) F_e(j\omega) \quad [1.7]$$

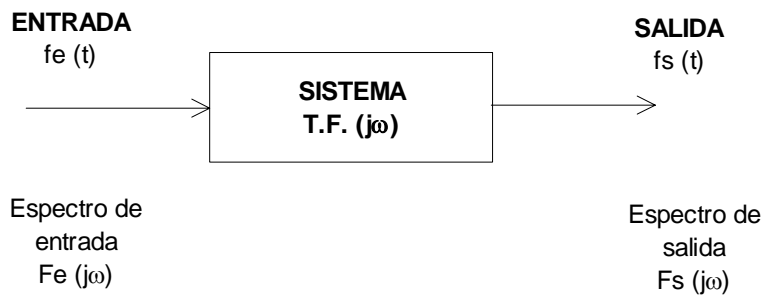


Fig. 1.9: Relación entre el espectro de la entrada y el de la salida.

A través de [1.7], si se tienen todas las frecuencias de la T.F. y la función entrada $F_e(j\omega)$, es posible reconstruir la función de respuesta $F_s(j\omega)$, en el dominio de las frecuencias, y antitransformarla luego al dominio temporal.

T.F. $_{.}(j\omega)$ actúa como una función ponderadora de las componentes de diferente frecuencia de entrada.

Obtención de la función de transferencia experimental.

Siempre que se asuma que el sistema experimental es lineal, se podrá aplicar las fórmulas anteriores sobre T.F. ([1.4] a [1.7]), utilizando datos medidos de señales de entrada y salida del sistema. Como estos datos, en el caso de señales climáticas aplicadas a edificios, son señales muestreadas, es decir, funciones discretas, las transformadas de Fourier de la entrada y de la salida serán también discretas.

Se podría obtener experimentalmente la T.F. aplicando como excitación un impulso de Dirac o un escalón unitario, de modo de medir la respuesta y relacionarla directamente con la T.F. experimental, por medio de [1.5] ó [1.6]. Sin embargo, para el caso de condiciones meteorológicas que actúan sobre un edificio, sería muy difícil y costoso crear un dispositivo que aplique una temperatura o radiación solar dada sobre todo un edificio real "de prueba", convenientemente aislado, para obtener un impulso o escalón unitario. Por lo tanto, es necesario trabajar con mediciones reales y espontáneas tanto de entrada como de salida, y después de calcular sus transformadas de Fourier, se obtiene la T.F. como cociente entre ambas.

La T.F.(p) se obtendrá como el cociente punto a punto de la serie del numerador (transformada de Fourier de la salida) y del denominador (transformada de Fourier de la entrada). Tanto el módulo como la fase de la T.F. experimental se calculan del mismo modo que la T.F. teórica.

La "bondad" de la T.F. experimental dependerá, por tanto, de la presencia de una entrada suficientemente "rica" en señal, y de la capacidad de medida y cuantificación de señales de que se disponga.

La T.F.(p) se puede expresar igualmente como cociente entre polinomios de diferente grado, en el espacio de Fourier. Cada serie o polinomio se pueden expresar también como producto de binomios de polos τ_i (el denominador) y ceros τ_i^* (el numerador).

El factor añadido con el que es necesario contar en condiciones reales es el ruido. Existe siempre ruido tanto implícito en las mediciones, como ruido derivado de otros factores no medidos o de los instrumentos de medida, que interfiere con el modelo planteado.

El ruido blanco se manifiesta a lo largo de todas las frecuencias de la T.F. Este tipo de ruido influye especialmente sobre las frecuencias altas, hasta el punto que después de un cierto límite en el dominio de las frecuencias, la T.F. ya carece de sentido, es decir, la función ya no se distingue del ruido (dado que las señales reales disminuyen su amplitud a frecuencias suficientemente altas).

Se detalla más extensamente sobre el ruido en las mediciones y en los cálculos, en el Anexo A.

1.2.3. Modelización de edificios como sistemas dinámicos.

En general se puede decir que podrían plantearse dos tipos de hipótesis para la elaboración de un modelo que permita conocer el comportamiento térmico de un edificio, con diferentes grados de simplificación. La más simple es en la que se basan los métodos estáticos, y supone que el régimen de las condiciones climáticas exteriores es constante, lo que implica que la temperatura interior también será constante. La segunda hipótesis es más cercana a la realidad y parte del conocimiento del carácter dinámico de los fenómenos térmicos en los edificios. A continuación se comentarán diversos métodos para la obtención de modelos térmicos dinámicos.

Existen muchos y diferentes métodos y modelos para el análisis térmico dinámico de edificios. Ninguno se puede decir que es el mejor, sino que la elección de uno en particular en una determinada situación depende de qué es lo que se quiere calcular y qué datos hay disponibles.

La primera diferenciación básica entre los objetivos de los diferentes modelos sería en cuanto a si se trata del planteamiento del problema directo o de diseño, o bien del problema inverso o de diagnóstico. El primero atañe al diseñador de un edificio, ya que tiene la descripción del mismo (o, por lo menos, una buena aproximación) y quiere calcular la temperatura interior a lo largo del día, las cargas térmicas, consumos de energía auxiliar, picos de demanda, etc. Estaríamos en presencia de un problema de proyecto^{11,12}.

En cambio, una vez que el edificio se encuentra en uso, y la demanda o exceso de energía térmica es conocida o al menos medible, pueden surgir una serie de incógnitas que tienen que ver con el problema inverso, que es de diagnóstico, como por ejemplo:

- Variables exteriores (clima) que intervienen preferentemente en el clima interior dado.
- Variables interiores y del edificio (diseño arquitectónico, materiales, ocupación, ventilación, etc.) que intervienen en el clima interior dado.
- Cómo y en qué medida la modificación de algunas de las variables interiores permitirá obtener los parámetros de clima interior deseados, optimizando su control.

El de diagnóstico es un problema clásico que surge no sólo en cuanto a comportamiento térmico de edificios, sino además en muchos campos de la ingeniería, y se lo puede denominar problema de predicción o de identificación del sistema. Por otra parte, se lo puede utilizar como instrumento que permita obtener la información necesaria para abordar luego el proyecto térmico. Esta información consiste

en una serie de parámetros que identifican o caracterizan al sistema. En el caso de un edificio, la mayoría de los autores coinciden en que queda caracterizado si se conocen los siguientes parámetros térmicos: coeficiente de pérdidas global, ganancias, apertura solar y las principales constantes de tiempo^{13, 14}.

Al planteamiento directo o de proyecto, por la naturaleza de los datos requeridos, se lo denomina también modelo de "caja blanca", ya que son muchos los datos conocidos y las incógnitas que se pueden plantear son calculables directamente.

El problema de diagnóstico, en que se observa el comportamiento y se infiere la descripción del edificio a través de un modelo, es llamado también modelo de "caja negra", ya que lo único conocido son las causas y efectos pero no lo que hay en medio.

Existe la posibilidad de utilizar un modelo híbrido o de "caja gris", es decir, una caja negra en que se dan por conocidos más datos del edificio, aparte de su comportamiento, para que esto ayude a inferir un modelo con más certeza¹⁵ (Fig. 1.10. a),b) y c)).

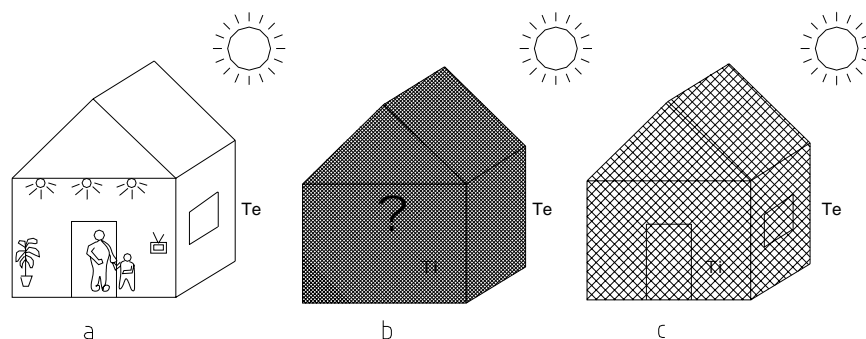


Fig. 1.10: a) Caja blanca. b) Caja negra. c) Caja gris.

Se sintetizan en la siguiente tabla algunos de los métodos de análisis térmico dinámico de edificios más usados, tanto para el problema directo como para el inverso.

MÉTODOS DINÁMICOS PARA EL ANÁLISIS TÉRMICO DE EDIFICIOS.

MÉTODO.	PROYTO.	DIAGTGO.	COMENTARIOS.
Red eléctrica equivalente (Sonderregger, 1977, Nordford et al., 1984 ; Wilson et al., 1985)	*	*	Para el problema de proyecto, no hay límites en la complejidad de los circuitos. Para el diagnóstico, deben ser simples. Parámetros térmicos equivalentes.
Métodos de factores de respuesta. (Stephenson & Mitalas, 1967; Kusuda, 1969)	*		Resultados tabulados para cada componente del edificio, para calcular picos de demanda (ASHRAE 1985).
Ecuaciones diferenciales.		*	Ecuaciones diferenciales de primer orden. Los coeficientes se ajustan con los datos medidos introd. en las ecuaciones. No hay relación directa entre los coef. de las ecuac. y los parámetros fisi-
Análisis modal. (Bacot et al., 1984)	*	*	Desacopla las ecuaciones diferenciales del edificio. Para el diagnóstico deben ser pocos nodos y no es muy exacto.
Modelos ARMA (Subbarao, 1985).		*	Resolución relativamente simple. No hay relación directa entre los coeficientes de las ecuaciones y los parámetros físicos, pero se pueden calcular admitancias y ctes. de tiempo.
Análisis de Fourier (relac. coefic. y parámetros físicos) (Shurcliff, 1984).	*	*	Calcula la respuesta a una entrada sinusoidal, en el dominio de frecuencias. Relaciona los coeficientes de las ecuaciones diferenciales con los parámetros físicos.
BEVA (Subbarao, 1985).	*	*	Combinación de ARMA con análisis de Fourier. Calcula cargas en el dominio temporal.
Programas de simulación por ordenador (paquetes tipo TRNSYS, DOE-2, BLAST, etc.).	*	*	Muy detallados y bastante exactos. Incluyen equipo de aire acondicionado, controladores y celdas fotovoltaicas, con flexibilidad para incorporar otros programas. Muy laborioso introducir los datos.

Nota: Existen otras metodologías similares que combinan varias de estas técnicas, como por ejemplo el desarrollo presentado por Servando Álvarez (1986)¹⁶, que aplica un método similar al de factores de respuesta, utilizando también métodos numéricos, y podría considerarse además, en la forma de proceder, un método similar al análisis de Fourier. S. Álvarez ha

efectuado otros estudios y desarrollos sobre modelos térmicos en edificios y espacios exteriores, durante los años sucesivos.

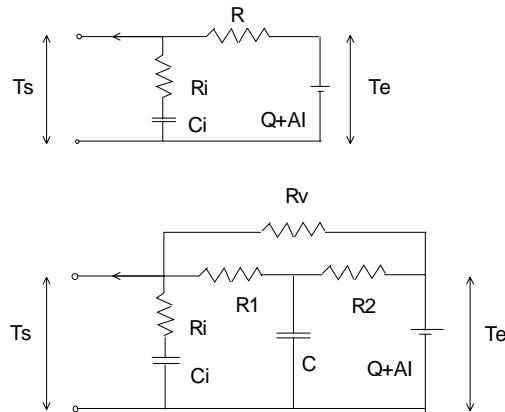
Dentro de las posibilidades para el planteamiento de modelos en sistemas térmicos dinámicos, lineales y de parámetros constantes, existen, desde el punto de vista de la metodología, una infinidad de métodos. Éstos parten en general de una base físico-matemática pero tienen diferente grado de aproximación a la realidad, y ofrecen diferentes ventajas y desventajas, según la situación planteada. Algunos de los más usados que se detallarán a continuación son:

- Red eléctrica equivalente (thermal networks).
- Ecuaciones diferenciales.
- Análisis modal.
- Modelos ARMA (AutoRegressive Moving Average).
- Análisis de Fourier.

Red eléctrica equivalente.

Aborda probablemente el planteamiento conceptual más simple. Utiliza la analogía entre un circuito eléctrico y la transferencia de calor a través de elementos multi-capas, donde se representan las regiones de igual temperatura mediante nodos. Estos nodos están conectados por resistencias y capacitores, planteándose para cada uno de estos nodos una ecuación. Se forma así un sistema de ecuaciones de balance energético, a través de cuya resolución se obtienen los parámetros térmicos equivalentes. Este método brinda una interpretación física directa del fenómeno de intercambio de flujos calóricos entre el exterior y el interior de un edificio.

Se puede plantear un circuito eléctrico constituido por resistencias y capacitores, tanto considerando los diferentes muros, techo, piso de un edificio, y teniendo en cuenta dónde podrían estar los nodos, como en forma global para todo el edificio. En el primero de los casos el circuito dependerá totalmente de la geometría y los materiales de la envoltura del edificio, mientras que en el segundo caso, existe una infinidad de diseños de circuitos, dependiendo del comportamiento de cada edificio en particular. Los siguientes circuitos (Fig. 1.11.) son sólo algunas de las posibilidades de representar el comportamiento térmico global del edificio:



donde:

T_e temperatura exterior.

T_s temperatura interior.

$Q + A I$ de energía auxiliar y aporte solar equivalente.

R resistencia de la envolvente del edificio.

R_i resistencia de la masa interna del edificio.

R_v resistencia de pérdidas por ventilación.

C capacidad calorífica de la envolvente del edificio.

C_i capacidad calorífica de la masa interna del edificio.

Fig. 1.11: Redes eléctricas equivalentes.

Para el caso más simple, de un circuito con una resistencia y un capacitor, la ecuación diferencial (de primer orden) que describe el balance de energía del nodo es:

$$Q = (T_s - T_e) / R + C dT_s / dt$$

donde Q es el único aporte de calor en el interior del edificio.

La principal ventaja de este modelo reside en que se logra entender de una manera intuitiva el fenómeno de intercambio térmico en un edificio, además de ser resoluble de forma analítica de un modo sencillo.

La desventaja es que, al aumentar la complejidad del circuito planteado, aumenta también el número de ecuaciones e incógnitas, por lo que son más difícilmente resolubles mediante tratamiento analítico. La solución por medio de alguna de las diversas técnicas de métodos numéricos hace entonces que se pierda la visión conceptual del comportamiento.

Por otro lado, puede resultar bastante tedioso, según el grado de complejidad, el proceso que lleve a la decisión de qué tipo de circuito tomar para representar el modelo de edificio a calcular, y el posterior planteamiento de las ecuaciones diferenciales de modo que puedan introducirse los datos medidos.

Ecuaciones diferenciales.

Mediante este método, el sistema físico se ve sometido también a un proceso de discretización nodal, en donde cada nodo representa un elemento con temperatura uniforme. Se plantea para cada uno una ecuación de balance energético, que contemple intercambios de calor en diferentes formas como: conducción, convección, radiación, fuentes de calor, transferencia de masa, agregando sus correspondientes condiciones de contorno. Queda así definido un sistema de N ecuaciones en derivadas parciales de tiempo y espacio.

Debido a la complejidad del sistema de ecuaciones, normalmente no es posible su resolución analítica, sino que se recurre a su transformación a ecuaciones en diferencias finitas, que conducen a un sistema de ecuaciones algebraicas resolubles por métodos numéricos.

Todo el sistema se puede escribir en forma matricial, donde en la matriz diagonal C los coeficientes son las capacitancias de los N nodos. Resolviendo el sistema, es posible obtener los parámetros térmicos buscados.

Para hacer más exacto este método, se agrega un factor (matriz B) que representa el acoplamiento entre los diferentes nodos. Con esto, el sistema no es resoluble sino se aplica alguna de las técnicas de reducción del orden del sistema de ecuaciones (model reduction techniques). En forma matricial, el planteamiento general es el siguiente¹⁷:

$$C \dot{T} = A T + B U \quad [1.9]$$

donde:

T vector de temperaturas.

$\dot{T} = dT/dt$

C matriz de capacitancias.

A matriz de los coeficientes de intercambio térmico.

U vector de entrada (temperatura exterior, radiación solar, energía auxiliar, etc.)

B matriz con los coeficientes de acoplamiento entre los diferentes nodos.

Este procedimiento no muestra claramente la relación entre los coeficientes calculados con el sistema de ecuaciones y los parámetros del sistema físico. Es necesario valerse de formas indirectas de obtener la información para caracterizar el sistema. Sin embargo, es posible obtener en forma casi directa otra información útil del modelo como: función de transferencia, su respuesta armónica y su comportamiento a régimen permanente. En realidad el modelo tiene su mayor virtud como una herramienta para simular las temperaturas interiores en un edificio (problema directo o de proyecto), donde brinda

buenos resultados.

Introduciendo datos medidos de entrada y salida del sistema, se aborda el problema inverso o de diagnóstico, determinando sus parámetros físicos. Pero, debido a que por este camino surgen problemas de determinación y de no linealidad, este procedimiento le quita exactitud a sus resultados.

Análisis modal.

Las ecuaciones diferenciales planteadas para una red eléctrica equivalente se pueden escribir de la forma:

$$C_n T_n = \sum_{k=1}^N K_{nk} T_k + \sum_{i=1}^M D_{ni} U_i \quad [1.10]$$

donde C_n es la capacidad calorífica del nodo n -ésimo, K_{nk} es la conductancia entre los nodos n -ésimo y k -ésimo, y T_n son las temperaturas de los nodos. El último término corresponde a las condiciones exteriores aplicadas al sistema.

Esta expresión se puede interpretar como una ecuación matricial, donde los elementos de la diagonal de la matriz son las capacidades caloríficas. Como $K_{nk} = K_{kn}$, la matriz $C^{-1}K$ se puede diagonalizar, siendo los correspondientes vectores propios o "eigenvectors" los modos del sistema.

Expresando la temperatura T en función de sus eigenvectores X :

$$T = P X$$

se puede expresar [1.10] de la forma:

$$X = E X + F U \quad [1.11]$$

cuya solución es:

$$X_k(t) = \exp(-t/\tau_k) \left[X_k(t_0) + \sum_{i=1}^M \int_{t_0}^t \exp(t'/\tau_k) F_{ki} U_i(t') dt' \right] \quad [1.12]$$

De la matriz diagonal de los eigenvalores E se obtienen las constantes de tiempo del sistema τ_i . Sus elementos son:

$$E_i = -1/\tau_i$$

El análisis modal se puede usar tanto para el problema directo como el inverso. Se pueden obtener soluciones rápidas, ya que, una vez que la matriz $C^{-1}K$ ha sido diagonalizada, la solución se obtiene directamente de [1.12]. La temperatura interior se obtiene como una combinación lineal:

$$T_{int}(t) = G X(t) + H U(t)$$

El último término se agrega para tener en cuenta una relación directa entre la entrada y la salida.

El proceso de identificación del sistema se efectúa analíticamente, introduciendo al sistema de ecuaciones las condiciones iniciales y la matrices F, G y H, y así es posible obtener, mediante ajustes de los parámetros que minimicen la diferencia entre la T_{int} calculada y la efectivamente medida, los parámetros del modelo. Este proceso es no lineal debido a la ecuación [1.12], por lo que para efectuar los ajustes necesarios se usa el algoritmo de Marquardt u otros semejantes.

Este procedimiento, al igual que los demás, está basado en un sistema de ecuaciones diferenciales. La diferencia más importante entre estos métodos radica en el modo en cómo se introducen los datos medidos a las ecuaciones.

Modelos ARMA.

Este modelo (AutoRegressive Moving Average), con sus diferentes variantes (ARX, ARMAX, etc.), se basa sobre la hipótesis de operar en ambiente estocástico. No es, como los anteriores, un modelo físico-matemático, sino que es un modelo matemático-estadístico (M. G. Messina y otros, 1990).

Considerando la propiedad de causalidad del sistema, se parte de la siguiente relación matemática entre la entrada y la salida del sistema:

$$s(k) = a_1 \cdot s(k-1) + \dots + a_n \cdot s(k-n) + \\ b_0 \cdot e_1(k) + b_1 \cdot e_1(k-1) + \dots + b_m \cdot e_1(k-m) + \\ c_0 \cdot e_2(k) + c_1 \cdot e_2(k-1) + \dots + c_l \cdot e_2(k-l) + \\ \dots \dots \dots k_0 \cdot E(k) + k_1 \cdot E(k-1) + \dots + k_j \cdot E(k-j).$$

donde: s son las salidas (efectos), e las entradas (causas), k es el instante de tiempo y E el residuo o error. n, m, l, \dots, j es el orden de la regresión.

El sentido de la anterior relación matemática reside en el hecho de que se quiere representar la salida del modelo en el instante actual $s(k)$ como una combinación lineal de la misma salida en los instantes precedentes: $s(k-1), \dots, s(k-n)$, de las entradas en el instante actual y en los instantes precedentes y finalmente de un término llamado residuo, que interviene tanto en el instante actual como en los precedentes. El residuo (que se intenta sea lo más pequeño posible) representa aquella parte de la información que el modelo no contempla y actúa también sobre la salida. Son las variables contenidas en el modelo físico, pero que el modelo matemático, con información parcial, no tiene en cuenta. En este modelo es posible introducir más de una entrada.

Una de las ventajas de este procedimiento es que los coefi-

cientes son relativamente fáciles de calcular, mediante varias posibilidades en la elección del método de cálculo. Otra ventaja es que el modelo puede funcionar como "predictor" de la evolución futura de la variable de salida, sobre la base de la información acumulada, por lo que se aplica frecuentemente para control térmico en los edificios.

La desventaja, al ser un modelo matemático-estadístico, es que se pierde de vista la conexión directa entre los coeficientes matemáticos y los parámetros físicos, que se obtienen a través de relaciones entre los coeficientes.

Análisis de Fourier (para relacionar coeficientes y parámetros físicos).

Para lograr una interpretación física directa entre los coeficientes de los sistemas de ecuaciones diferenciales y los parámetros físicos tales como admitancias, capacidad calorífica y constantes de tiempo, se analizan una serie de variables en el dominio de las frecuencias. Por ejemplo, en las ecuaciones del modelo ARMA, los coeficientes $a(k)$, $b(k)$,...,etc. contienen toda la información del modelo. Para hallar la interpretación física de los mismos, se considera la respuesta debido a una entrada sinusoidal de frecuencia ω . La respuesta en estado no transitorio para un sistema lineal debe ser también sinusoidal, con la misma frecuencia (Carslaw & Jaeger, 1959):

$$T_{\text{ext}}(n) = T_{\text{ext},\omega}(n) \exp(i \omega n \Delta t)$$

donde:

$$T_{\text{ext},\omega} = |T_{\text{ext},\omega}| \exp(i \phi_{\text{ext},\omega})$$

Análogamente, para la energía auxiliar, la radiación solar y la temperatura interior:

$$Q_{\text{aux}}(n) = Q_{\text{aux},\omega}(n) \exp(i \omega n \Delta t)$$

$$Q_{\text{aux},\omega} = |Q_{\text{aux},\omega}| \exp(i \phi_{\text{aux},\omega})$$

$$Q_{\text{sol}}(n) = Q_{\text{sol},\omega}(n) \exp(i \omega n \Delta t)$$

$$Q_{\text{sol},\omega} = |Q_{\text{sol},\omega}| \exp(i \phi_{\text{sol},\omega})$$

$$T_{\text{int}}(n) = T_{\text{int},\omega}(n) \exp(i \omega n \Delta t)$$

$$T_{\text{int},\omega} = |T_{\text{int},\omega}| \exp(i \phi_{\text{int},\omega})$$

Las últimas expresiones corresponden a la T_{int} en régimen no transitorio.

Introduciendo todas estas ecuaciones dentro de un sistema de ecuaciones, se obtienen soluciones del tipo:

$$T_{\text{int},\omega} A_{\text{int},\omega} = T_{\text{ext},\omega} A_{\text{ext},\omega} + Q_{\text{aux},\omega} A_{\text{aux},\omega} + Q_{\text{sol},\omega} A_{\text{sol},\omega}$$

donde A son las admitancias complejas.

El coeficiente global de pérdidas y la apertura solar se obtienen como una relación entre las amplitudes de las admitancias para $\omega = 0$ (estado estacionario).

Las constantes de tiempo, en cambio, caracterizan al régimen transitorio. La solución de las series, anulando las fuentes de energía exterior e interior, toma la forma exponencial:

$$T_{\text{int}}(n) = \exp(-n \Delta t / \tau)$$

La primera constante de tiempo τ_1 se puede obtener también como relación entre los coeficientes $a(k)$ para $N=1$. Las siguientes constantes de tiempo se obtienen también a través de relaciones matemáticas entre los $a(k)$, en este caso más complejas.

Análogamente, existen expresiones que relacionan los coeficientes $a(k)$, el coeficiente global de pérdidas y las constantes de tiempo, para obtener la capacidad calorífica C global, considerada a régimen permanente.

1.2.4. Principios de control de sistemas dinámicos.

Representación de los modelos de procesos de control.

La acción física ejecutada por un sistema de control, que actúa sobre un sistema físico dinámico, se puede representar mediante un modelo, cuya idealización gráfica es un "bucle", que da la información sobre la relación entre la entrada $e(t)$ (excitación) y la salida $s(t)$ (respuesta) del sistema (Fig.1.12.). La respuesta a controlar es función de la entrada $e(t)$ y generalmente también de una perturbación $z(t)$.

El modelo del sistema es el que permite saber el valor de $s(t)$, para diferentes valores de $e(t)$, suponiendo las perturbaciones $z(t)$. La optimización de un sistema de control se basa en determinar cuál será la excitación $e(t)$ necesaria para lograr valores de $s(t)$ dentro de los límites deseados.

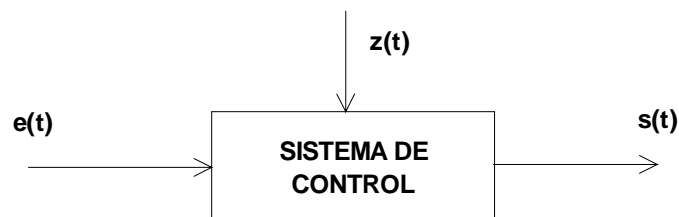


Fig.1.12: Variables que intervienen en el modelo de un sistema de control dinámico.

Los bucles de control pueden ser abiertos o cerrados (Fig.1.13.), lo que diferencia su comportamiento. En un bucle de con-

trol abierto, la variable de entrada $e(t)$ es independiente de la variable de salida $s(t)$, aunque no es así en sentido inverso. Es decir, que la variable de entrada no se ve modificada por su respuesta.

En un bucle de control cerrado, la variable de salida actúa sobre la misma variable de entrada, modificando nuevamente los valores de la salida. Es decir que existe una realimentación del sistema o "feed-back", que lo puede autocontrolar.

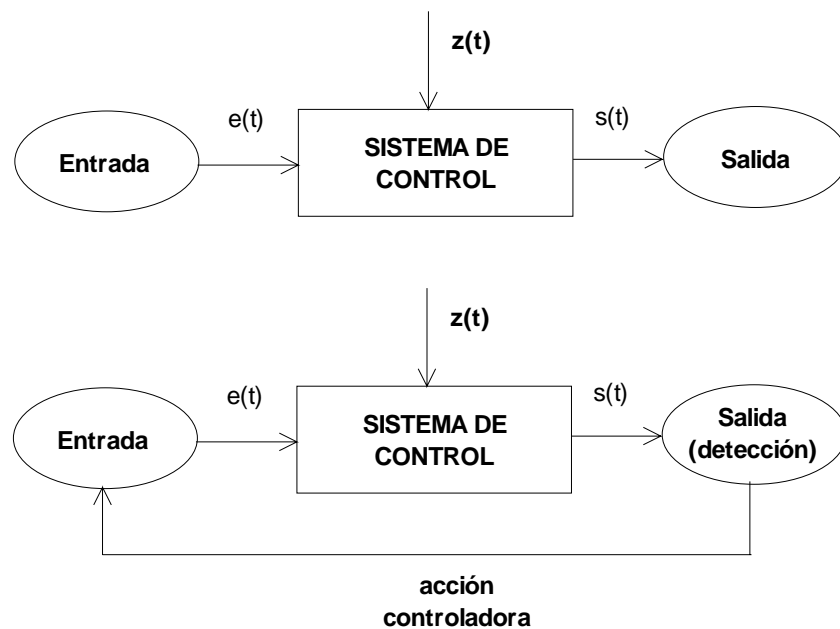


Fig. 1.13: Modelos de sistemas de control a bucle abierto y cerrado.

Sensibilidad de un sistema de control.

La sensibilidad de un sistema es la relación porcentual de la respuesta sobre el efecto que causó esa respuesta. La sensibilidad de un sistema de control dependerá de los diferentes elementos que constituyen el bucle de control.

Tanto la exactitud en la obtención de la respuesta, que depende del grado de discretización de la detección de la señal y la sensibilidad de los componentes del sistema de control, como la capacidad de la señal de entrada para modificar el sistema, condicionan en conjunto la sensibilidad global del sistema.

La respuesta de un sistema dinámico, temporal, puede analizarse en dos situaciones (régimenes) que contemplan dos tipos de comportamiento: la respuesta a régimen transitorio $s_t(t)$ y a régimen permanente $s_p(t)$. La primera se manifiesta como consecuencia de una acción en un momento determinado, cuya influencia sobre la respuesta no continúa en el tiempo, mientras que la segunda arroja valo-

res estables de la respuesta durante un tiempo muy largo, que se puede considerar infinito.

En general, se puede expresar la respuesta temporal como combinación lineal de ambas:

$$s(t) = s_t(t) + s_p(t)$$

Considerando la respuesta permanente como la propia del sistema, se deberá analizar la respuesta temporal, para comprobar si varía dentro de los márgenes preestablecidos por el diseñador del sistema de control, debido tanto a las perturbaciones como a los cambios de excitación $e(t)$.

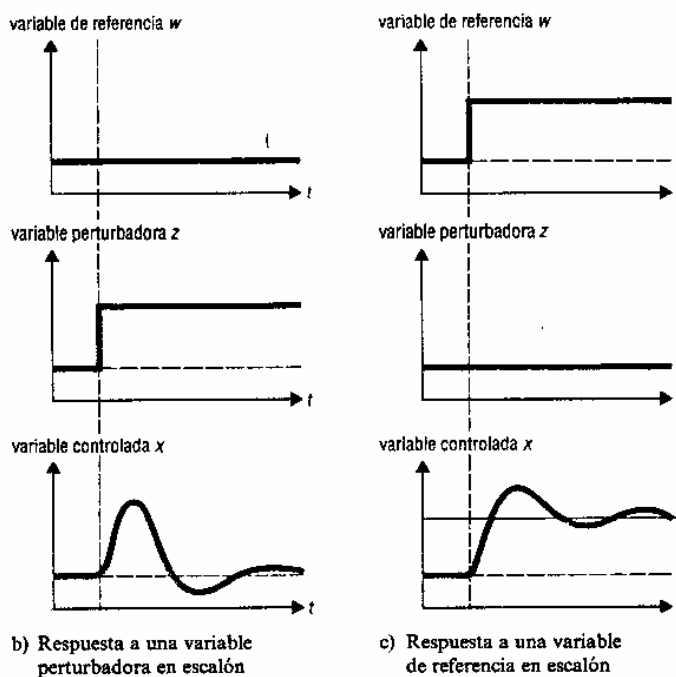


Fig.1.14.: Algunos tipos de respuestas transitorias de una variable controlada. (Fuente: Fröhr, F.; Orttenburger, F. 1986)¹⁸.

En general, será necesario optimizar las respuestas transitorias (Fig.1.14.), de modo de regresar al régimen permanente en el tiempo más corto posible, para evitar efectos no deseados, como respuestas inestables que pudieran amplificarse y provocar un descontrol en el sistema o situaciones de falta de confort en un edificio (Fig.1.15.).

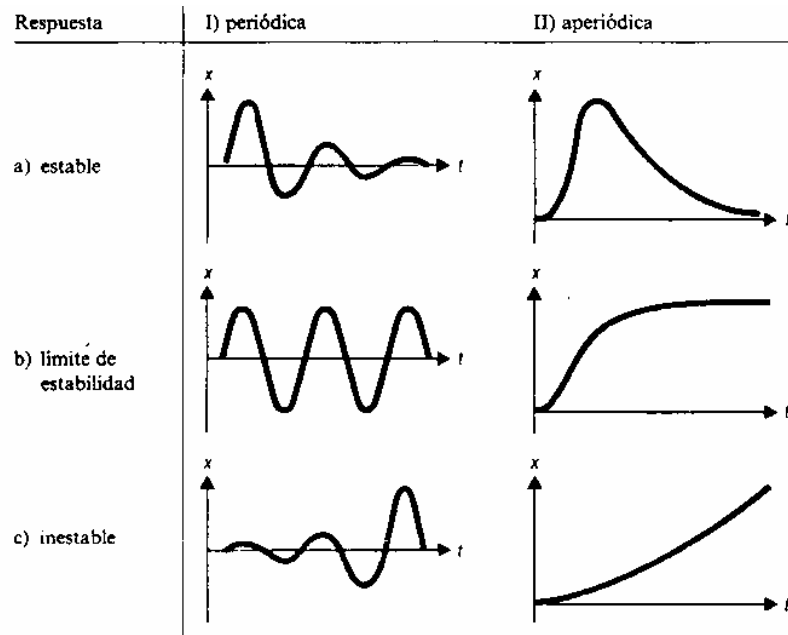


Fig.1.15.:Estabilidad en las respuestas transitorias de una variable controlada.(Fuente: Fröhr, F.; Orttenburger, F. 1986).

Principio de estabilidad.

En un sistema de control de bucle cerrado, los parámetros básicos que es necesario optimizar para su buen funcionamiento, son los que relacionan la acción sobre las causas con la detección de la variable de salida. Básicamente, estos parámetros son la amplitud y la fase de la salida.

La amplitud de la respuesta tiene que ver con la magnitud del efecto que se produjo debido a la acción de la excitación, que deberá mantenerse dentro de ciertos límites.

La fase de la respuesta es crítica para el buen funcionamiento del sistema de control, ya que es el parámetro de salida que condiciona las posibilidades de estabilización rápida. Un retardo excesivo podría ocasionar que la salida tuviera un desfase de 180° respecto de la esperada, lo que daría un efecto en el sentido contrario del deseado.

Estructura de los sistemas de control.

R. Serra (1996) ¹⁹ ha efectuado una buena síntesis sobre este tema, y es sobre la que se basará este apartado.

Como estructura de un sistema de control se entiende la relación entre sus componentes, que puede ser relativamente sencilla en un sistema con una variable a detectar, pero puede ser más comple-

ja, en el caso de sistemas con componentes que actúan en serie o en paralelo, conectados con múltiples causas y efectos a controlar.

La fiabilidad de un sistema f se expresa a través del porcentaje de acciones correctas (proyectadas) respecto del total de acciones que se han llevado a cabo. Sus valores varían de 0 a 1.

La relación entra la fiabilidad y el riesgo de una acción incorrecta es:

$$r = 1 / |f - 1|$$

y su valor puede variar desde 1 hasta un valor muy grande (sistemas de baja fiabilidad).

La fiabilidad de un sistema respecto a la de sus componentes se puede expresar en dos leyes, según la disposición de estos componentes en el sistema:

Primera ley de la cadena:

En un sistema de control cuyos n componentes están conectados en serie, la fiabilidad total no puede ser superior a la del componente de fiabilidad más baja.

$$f_T = f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_n < f_x$$

donde: f_T = fiabilidad total del sistema.

f_x = fiabilidad de cualquier componente del sistema.

$f_1, f_2, \dots, f_x, \dots, f_n$ fiabilidad de los componentes de la cadena del sistema.

Segunda ley de la cadena:

En un sistema de control con n componentes conectados en paralelo, el riesgo total de una acción incorrecta r_T se expresa:

$$r_T = r_t / e(n,i)$$

donde: $1/r_t = 1/r_1 + 1/r_1 + \dots + 1/r_n$

r_1, r_2, \dots, r_n son los riesgos de los componentes.

$e(n,i)$ es un factor de exceso de confianza de los usuarios, cuyo valor va de 0 a 1.

Clasificación de sistemas de control.

Una primera clasificación podría ser en función del número de variables a regular. En el caso de sistemas multi-dimensionales, esto aumentaría la complejidad del sistema, ya que las diferentes variables de salida pueden tener relación entre sí.

Según el tipo de efecto que se desee conseguir, los sistemas pueden ser:

- Estabilizadores, cuya misión es lograr regular el valor de salida $s(t)$ para que sea lo más similar posible a $e(t)$.
- De persecución, que intenta que la salida siga las mismas variaciones que la entrada.
- De regulación límite, que pretenden mantener la salida dentro de límites máximo y mínimo. Esto implica definir también valores máximos y mínimos de la entrada.

Según el tipo de función que representa la entrada y la salida, los sistemas pueden ser lineales o no lineales, continuos o discretos, determinísticos o estocásticos, etc. (ver en este capítulo: 1.2.1.).

1.3. CONTROL DE SISTEMAS DINÁMICOS EN ARQUITECTURA.

1.3.1. Finalidad del control en arquitectura.

El ambiente interior en la arquitectura, que se pretende sea un espacio estable y protegido, frecuentemente se debe diseñar, calcular y controlar. Los edificios se ven expuestos a muchos fenómenos cambiantes en el tiempo que actúan como excitaciones al sistema "edificio", y que producen una respuesta que se debe analizar y controlar, a fin de mantener el ambiente interior deseado.

Las variables de entrada son muchas y su combinación puede ser incontrolable, y sería imposible diseñar un espacio que sea apropiado para cada una de ellas. Por eso, es necesario diseñar espacios, de modo tal que sean capaces de adaptarse a la variabilidad de los fenómenos energéticos exteriores, autocontrolando sus efectos.

Este control ambiental se puede efectuar mediante mecanismos de control y regulación, que pueden ser parte integrante del edificio o una instalación auxiliar. Tanto unos como otros intentan realizar diferente tipo de funciones que sustituyan las acciones humanas.

1.3.2. Tipos de sistemas a controlar.

Existen diversos sistemas en la arquitectura que comprenden grupos de variables a controlar (según R. Serra, 1996):

- Control de sistemas ambientales (temperatura, humedad, luz, sonido, ventilación, asoleamiento, etc.):

El control se efectúa regulando la energía entrante y saliente del edificio, con el fin de mantener el confort ambiental interior. Son en general procesos que siguen una función suave, con variaciones relativamente lentas y que permiten, en general, una respuesta cómoda del sistema de control.

Cabe tener en cuenta que, al tratarse de condiciones de confort que experimentan los usuarios y de sus condiciones particulares y fisiológicas, por más controladas que se mantengan las condiciones interiores, no es posible lograr el confort del 100% de los ocupantes (P.O.Fanger, 1970).

- Control de sistemas de seguridad (incendio, intrusismo, fugas de fluidos, etc.):

Son sistemas de control permanente, cuya puesta en funcio-

namiento es poco frecuente. Sin embargo, es muy importante que tengan una buena fiabilidad. Requieren de una respuesta muy rápida.

- Control de sistemas de información y comunicación (redes de teléfono, informática, audio, vídeo, etc.):

Estos sistemas normalmente están informatizados y pueden ser programados según las necesidades del usuario, permitiendo la electrónica moderna satisfacer las necesidades en forma relativamente satisfactoria. Son servicios de funcionamiento permanente y respuesta rápida.

- Gestión de servicios (electrodomésticos, riego, etc.):

Permiten no sólo suplir la acción humana, sino también economizar recursos energéticos y materiales.

Los diseños actuales se basan en transductores electrónicos y sistemas de información y comunicación.

1.3.3. Control en sistemas de climatización.

Dentro de los sistemas ambientales, se detallarán particularmente los sistemas de control de climatización.

Las diferentes cargas térmicas, procedentes de las diferentes fuentes exteriores e interiores al edificio presentan una evolución temporal diferente, no sólo en cuanto al intervalo del ciclo diario en que se presentan, sino que además la velocidad en que se manifiestan estos procesos varía según el tipo de fenómeno físico que involucran. Así, los fenómenos que implican ganancias térmicas por radiación solar directa son de respuesta rápida, al igual que los que tienen que ver con el movimiento del aire. Las cargas térmicas cuya temporalidad está relacionada con las propiedades de los materiales, como la conductividad de los muros o la capacidad calorífica de los materiales del interior, implican procesos más lentos, y la respuesta térmica del edificio debido a éstos puede presentar un desfase respecto al exterior que puede ir desde varias horas a un período estacional.

Esto implica que las estrategias de control se deben plantear simultáneamente a varias escalas de tiempo, aún para un mismo edificio. Los elementos arquitectónicos con inercia estacional y en general de períodos relativamente largos, serán más fácilmente controlables debido a la lentitud de su respuesta térmica. Los que provocan ganancias o pérdidas instantáneas, en cambio, requieren de un control más preciso y más veloz que la misma respuesta del conjunto del edificio, para poder contrarrestar sus efectos no deseados.

En la práctica, la forma más sencilla de control térmico se lleva

a cabo por los mismos ocupantes de las viviendas. La apertura o cierre de ventanas para ventilación, el extendido de toldos para evitar el ingreso de la radiación solar o el mojar el piso de los patios interiores para provocar enfriamiento evaporativo, son estrategias espontáneas que los ocupantes utilizan para contrarrestar un alejamiento de las condiciones óptimas de confort. Esta función "activa" de los usuarios representa un control cualitativo de los parámetros térmicos, ya que la acción de las personas es puramente intuitiva, sin tomar, en general, realmente conciencia de en qué medida se está modificando los parámetros térmicos.

En los edificios en que se emplean sistemas artificiales de climatización, es posible realizar un control más cuantitativo. Una de las maneras sería programar temporalmente el sistema, según mecanismos que lo enciendan o apaguen a determinadas horas del día, coincidiendo con un pronóstico de las variaciones del ciclo diario de las condiciones climáticas exteriores. Otra opción sería programarlo teniendo en cuenta las mismas condiciones interiores, es decir, de acuerdo a necesidades concretas registradas in situ.

En este último caso, el sistema de control está constituido por sensores que miden en todo momento la temperatura del aire interior y, al alejarse de los límites ya preestablecidos por el diseñador, se pone en marcha la climatización artificial, hasta alcanzar nuevamente el nivel de confort.

En el caso del sistema de climatización con programación temporal, se trataría de un control automático. En cambio, si entran en juego dos o más variables de entrada, que condicionen el comportamiento del sistema, como por ejemplo un control de temperaturas interiores manejado a través de un termostato, y además una programación temporal, se trataría de un control más sofisticado, un sistema cibernético.

Tipo de medios de control.

Desde el punto de vista del tipo de medios que se utilizan para ejecutar el control, con el fin de restablecer las condiciones deseadas, los sistemas se dividen en pasivos y activos. En los primeros el control se ejerce sin intervención de mecanismos ni energía auxiliar, y en los activos, el control está a cargo de sistemas artificiales de climatización. Esta es una clasificación convencional, sin embargo, en ambos casos el control es activo, ya que a pesar de que no existen medios mecánicos, en los sistemas pasivos existe en la mayoría de los casos una intervención activa de los ocupantes.

- Control pasivo:

El control pasivo, estrictamente hablando, es el debido a me-

canismos ingeniosos tales como: aberturas de ventilación que regulan el caudal de aire, en base a su presión, o los "skylids", que son dispositivos generalmente adosados a las persianas de lucernarios o ventanas inaccesibles. Se basan en el calentamiento y gasificación del freón contenido en dos recipientes comunicados, uno por vez y alternativamente, que provoca el cierre de la persiana por exceso de radiación solar (Mazria, 1979 y 1983).

Pero el concepto de sistemas pasivos se aplica también a sistemas o componentes cuyo control es ejercido por los ocupantes de los edificios, ya sea sobre persianas, toldos, etc., como sobre instalaciones de calefacción, iluminación, fontanería, etc.

- Control activo:

Es el control en que tanto la detección y medición de los efectos, como la decisión y acción ejercida, recaen en un sistema artificial.

A pesar de que los sistemas de control pasivo deben estar pre-programados, es decir responden en base a una estimación de comportamiento, la capacidad de respuesta de un sistema activo puede ser muy superior a uno pasivo, y puede superar ampliamente su rendimiento.

Tipo de diagrama de control.

Desde el punto de vista del tipo del diagrama de control, tanto en el sistema de control por sensores como en el control activo y manual de las personas (climatización natural), los bucles de control pueden ser abiertos o cerrados. En el caso de que la acción ejercida para modificar las condiciones interiores, dependa de los valores alcanzados por las mismas condiciones interiores (bucle cerrado), existiría un feed-back o realimentación, que modifica los propios valores del sistema, que se autocontrola. En el caso contrario, el bucle es abierto.

Desde el punto de vista de los distintos tipos de bucles de control con que funcionan los diferentes sistemas de climatización, se ejemplificará con cuatro casos básicos (Fig.1.16.), con diferente grado de control: (ver también en este capítulo 1.2.4.)

1.- Control artificial con programación temporal, estimando variaciones de las condiciones exteriores (automático).

2.- Control manual ejercido por los ocupantes sobre partes de la arquitectura.

3.- Control artificial, con sensores que miden temperaturas, y termostato que actúa encendiendo o apagando la calefacción de

acuerdo a límites preestablecidos (automático).

4.- Control artificial con sensores y programación temporal, es decir, con dos variables de entrada (cibernético).

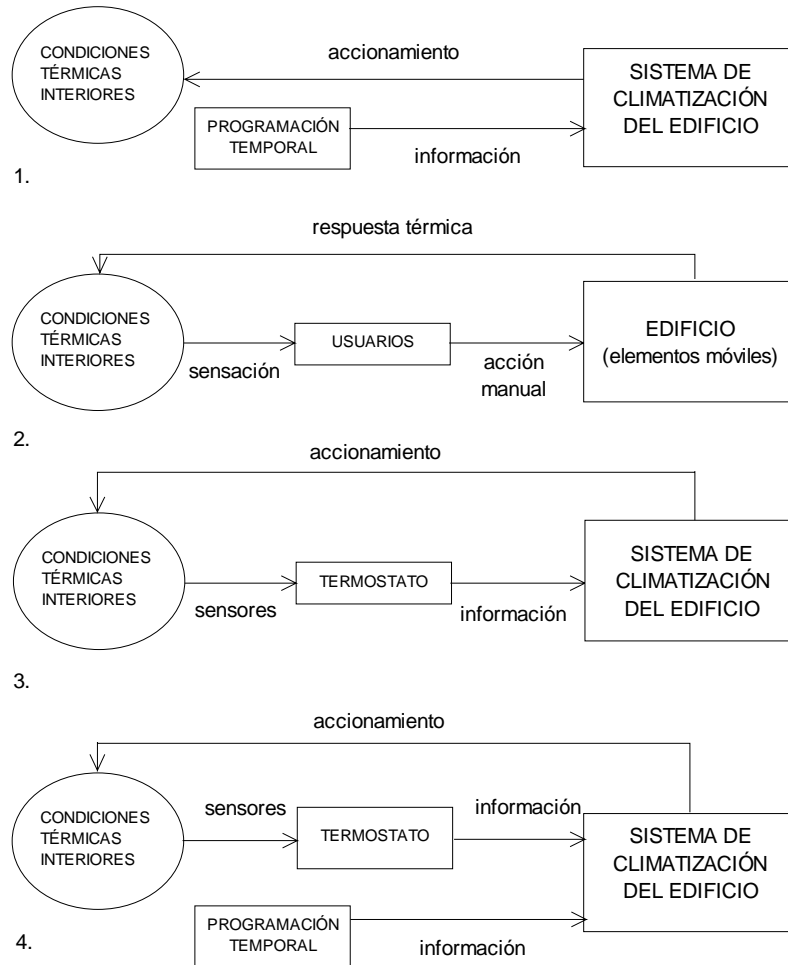


Fig. 1.16.: Tipos de sistemas de control para climatización.

En el primer caso, se trata de un sistema de control con bucle abierto, ya que la variable de salida (condiciones climáticas interiores) no tiene incidencia sobre los valores posteriores de la misma variable, no se modifica en función del valor que tome ella misma. Es decir, que no se trata de un sistema autocontrolado.

En los tres últimos casos, con un grado creciente de condiciones de control y sofisticación del sistema, se trata de sistemas de climatización autocontrolados. Hay una realimentación del sistema en base a los valores que toman las condiciones térmicas interiores, que hacen que se accionen mecanismos para modificar estas variables, si no están dentro de los límites establecidos.

Dentro de estos sistemas existen claras diferencias de consumo energético. Mientras el control automático y el cibernético requieren de consumo de energía auxiliar, tanto para la climatización como para el control, los sistemas de climatización natural requieren sólo de la presencia y atención de los ocupantes. Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones no es posible contar con la presencia de los usuarios para controlar estos sistemas. Debe recurrirse, entonces, a las opciones de diseño que ofrece la arquitectura para controlar los fenómenos térmicos, ya sea a través de la geometría y forma del edificio, y/o por las propiedades de los materiales utilizados. Comprendiendo el modo en que se transporta la energía a través del edificio, es posible aprovecharla y manejarla de modo de lograr las condiciones interiores más favorables.

La condición ideal sería la de diseñar la arquitectura de modo que pudiera lograr el autocontrol del ambiente interior por medios pasivos, sin intervención, o con una intervención mínima o estacional, de los ocupantes del edificio. Las estrategias de control serían tales como la utilización de la forma y partes constructivas de edificio, como ventanas, aleros, etc. y la utilización de materiales con las propiedades y distribución convenientes para los fines de diseño térmico proyectados.

1.3.4. Control global en arquitectura.

Un sistema de control global en la arquitectura consta de un sistema único que gobierna simultáneamente y de forma centralizada, todos los componentes y sistemas del edificio, susceptibles de ser detectados, medidos y comandados y/o comunicados.

La agrupación de equipos automatizados de los edificios bajo un controlador central es la base de un sistema global de gestión. Así, se pueden controlar diferentes ámbitos como: gestión técnica (ambiente, servicio, seguridad, etc.), gestión administrativa (comunicaciones, finanzas, sanidad, etc.) y gestión cultural y de ocio (educación asistida, juegos, bases de datos de información, etc.).

La aplicación a la arquitectura de este tipo de sistemas de control global, no sólo aumenta la comodidad y seguridad de los usuarios, sino que además racionaliza los consumos de energía y facilita la difusión de la información en general.

Sin embargo, un sistema de climatización artificial y su sistema de control, consumen más energía que un sistema pasivo e inducen a la creación de un ambiente artificial, menos propicio para la vida humana.

Por otro lado, existe una evaluación subjetiva por parte de los usuarios : no se exige el mismo nivel de confort térmico si se utiliza

climatización artificial o natural. Generalmente se pretende más eficiencia en la climatización artificial y en su sistema de control, y se es más tolerante con la regulación térmica debida al diseño pasivo.

En las últimas décadas se ha difundido las denominaciones de "edificios inteligentes", "edificios domóticos" o "smart buildings", para los edificios con un sistema centralizado de control de sus diferentes servicios. Se ha tratado de aprovechar las técnicas informáticas de control para regular el funcionamiento de instalaciones y equipos de acuerdo a un programa global (R. Serra, 1996).

Lamentablemente, en el modo como está planteado actualmente el diseño arquitectónico y térmico en particular, especialmente en los edificios más avanzados técnicamente, se trata la relación del ambiente interior con el entorno como una relación antagónica y de oposición. Esto no trae buenas consecuencias, ni desde el punto de vista del confort ni medioambiental.

La informática y la electrónica actual permiten desarrollar dispositivos y sistemas de control que manejen funciones con alto grado de complejidad. Esta ventaja tecnológica aún no se ha explotado suficientemente para aplicaciones de ahorro de energía y protección medioambiental, aprovechando las condiciones y elementos naturales.

1.4. REFERENCIAS.

- ¹ Olgyay, Victor. *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992 (Edición original: 1963).
- ² Fanger, P. O. *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill, 1970.
- ³ Serra Florensa, Rafael y Coch Roura, Helena. *Arquitectura y Energía Natural*. Barcelona: Ediciones U.P.C., 1995.
- ⁴ Hunn, Bruce D., editor. *Fundamentals of Building Energy Dynamics*. Massachusetts: MIT press, 1996.
- ⁵ Givoni, Baruch. *Man, Climate and Architecture*. Amsterdam: Elsevier Pub. Comp., 1969.
- ⁶ Izard, Jean Louis. *Arquitectura Bioclimática*. México, D.F.: Ediciones G.Gili, S.A., 1983. (Traducido de *Archi Bio*, 1979).
- ⁷ Hinz, Elke; González, Eduardo; De Oteiza, Pilar; Quirós, Carlos. *Proyecto Clima y Arquitectura*. México: Ediciones Gustavo Gili, S.A.de C.V., 1986.
- ⁸ Mazria, Edward. *El Libro de la Energía Solar Pasiva*. México, D.F.: Ediciones Gustavo Gili, S.A., 1983. (Traducido de *The Passive Solar Energy Book*, 1979)
- ⁹ Ljung, Lennart, Söderström, Torsten. *Practice of Recursive Identification*. U.S.A.: Mit Press, 1997.
- ¹⁰ Hsu, Hwei P. *Análisis de Fourier*. Colombia: Fondo Educativo Interamericano, S.A., 1973. (Traducido de: *Fourier Analysis*).
- ¹¹ Rabl, A. *Parameter Estimation in Buildings: Methods for Dynamic Analysis of Measured Energy Use*. Transactions of the ASME, Vol. 110, february 1988, pp. 52-66.
- ¹² Messina, M.G.; Ragona, R.; Romanazzo, M. *Metodi Avanzati di Diagnosi Termica degli Edifici*. E.N.E.A., 1990.
- ¹³ Palomo, E.; Téllez, F.M. *Several Problems Related to the Main Time Constants of a Thermal Solar Component*. European Conference on Architecture, 17-21 May 1993, Florence, Italy, pp. 389-392.
- ¹⁴ Casanovas, A.; Gómez, V.; Utrillas, M.P. *Applying Black Box Identification Methods to the Thermal Monitoring of a Solar House*. European Conference on Architecture, 17-21 May 1993, Florence, Italy, pp. 600-602.
- ¹⁵ Rabl, A. *Application of Identification of Energy Balances in Buildings. An Overview*, en: Parameter Identification Techniques for Thermal Analysis of Buildings. Ispra, 9-11 de octubre de 1989.
- ¹⁶ Álvarez Domínguez, Servando. *Análisis Dinámico del Comportamiento Térmico de Edificios*. Tesis doctoral. Sevilla: febrero de 1986.
- ¹⁷ Gicquel, R. *Model Reduction Techniques*. En: Parameter Identification Techniques for Thermal Analysis of Buildings. Ispra, 9-11 de octubre de 1989.

¹⁸ Fröhr, Friedrich; Orttienburger, Fritz. Introducción al Control Electrónico. Barcelona: Marcombo, 1986. (Traducido de: Einführung in die elektronische Regelungstechnik.)

¹⁹ Serra Florensa, Rafael. *Arquitectura i Màquina. Principis d' Instal·lacions als Edificis*. Barcelona: Edicions U.P.C., 1996.