

Guía técnica

Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios

Guía técnica

Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios

Estos textos no están en el original entregado.
Se colocan aquí de publicaciones anteriores
únicamente como referencia visual.

TÍTULO

Guía técnica de procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios

CONTENIDO

La presente guía ha sido redactada por la Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR) para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), con el objetivo de promocionar la eficiencia en el uso final de la energía en los edificios.

.....
Esta publicación está incluida en el fondo editorial del IDAE, en la serie
“Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización”.

Cualquier reproducción, total o parcial, de la presente publicación debe
contar con la aprobación del IDAE.

Depósito Legal: M-00000-2008

ISBN: 000-00-00000-00-0

IDAE

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

c/ Madera, 8

E - 28004 - Madrid

comunicacion@idae.es

www.idae.es

Madrid, xxxx 2008

ÍNDICE

1	Introducción	7
1.1	Conceptos básicos	8
1.2	Generación de CO ₂	27
2	Tecnologías de la información TI aplicadas a la simulación.....	29
2.1	Introducción	29
2.2	Historia y estado del arte en cuanto a programas de simulación energética de edificios.....	29
2.3	El problema de la información y los actores que la generan	30
3	Modelo matemático para la simulación térmica	31
3.1	Conceptos	31
3.2	Formación de modelos-D de edificios. Geometría	32
3.3	Formación de modelos-D de edificios. Física	36
4	RTS: Radiant Time Series, o método de las series temporales radiantes	57
5	Sistemas	63
5.1	Conceptos	63
5.2	Modelo de definición de sistemas en Energy+	68
5.3	Descripción de la creación del modelo-D (definición) de los sistemas en los programas de simulación españoles oficiales para la certificación energética de edificios.....	75
6	Ejemplos de simulación	87
6.1	Ejemplos de modelos de edificios.	87
7	Herramientas informáticas de simulación	103
7.1	Breve comentario sobre diversos programas de simulación	103
7.2	Requerimientos mínimos de los programas de simulación	106
	Anexo 1: Transferencia de calor por radiación	135

Anexo 2: Temperatura sol-aire	149
Anexo 3: Transferencia de calor unidimensional multicapa	151
Anexo 4: Obtención de los factores de respuesta de muros a una excitación diaria (24 h)	177
Anexo 5: Respuesta por el método de la transición de estados	181
Anexo 6: Apéndice. Factores de respuesta de una zona	187
Referencias	195
Documentos y libros	195
En Internet, Software de simulación energética de edificios	195

CONTENIDO

La actual normativa española (CTE –Código Técnico de la Edificación), como consecuencia de la directiva europea SAVE para limitar la emisión de gases de efecto invernadero en lo que respecta a los edificios y así mitigar el calentamiento global, ofrece dos posibilidades para su cumplimiento:

Opción 1: simplificada.

Opción 2: herramientas informáticas.

LIDER: Limitación de la Demanda Energética.

CALENER: Calificación Energética.

Otros alternativos reconocidos oficialmente.

La **Opción 1** representa una ampliación de la normativa que existía en España hasta la fecha (llamada popularmente la ficha del KG).

Sin embargo, la **Opción 2** implica algo nuevo, el uso de la simulación del comportamiento térmico/energético de los edificios con computadores personales PCs. Esto es consecuencia del desarrollo tecnológico actual, que hace factible su uso generalizado y a que, en principio, es mucho más económico hacer una estimación por ordenador que una medición real de lo que consume cada edificio durante varios años. Incluso permite tomar decisiones antes de construir el edificio que permiten ahorros difíciles de conseguir a posteriori.

El objetivo último de la normativa es poder estimar el valor esperado de energía primaria consumida (gas, gasóleo, electricidad, solar, etc.) y su traducción en kilogramos de CO₂ no renovables (o fósiles) emitidos (programas oficiales CALENER).

Aparecen, o se deben usar, conceptos y siglas que hasta ahora no se utilizaban en la práctica del día a día de la arquitectura y de la ingeniería. Conceptos como:

Simulación.

Demanda de energía.

Consumo de energía.

Sistema.

Eficiencia energética de las instalaciones.

Emisiones de CO₂.

Certificación Energética.

Etc.



Esta guía tiene por objetivo aclarar y definir todos estos conceptos y otros muchos, siguiendo en lo posible la nomenclatura de los estándares españoles y europeos CEN, así como dar una visión aplicada y de lo que implica la simulación.

La guía revisará el estado del arte sobre la simulación de edificios. Se hará especial énfasis en el DOE2 (programa de simulación del departamento de energía de EE.UU. ya que es en el que se basan los programas LIDER y CALENER).

Esta guía está dirigida a proporcionar al técnico una ayuda para desarrollar su actividad en el futuro de acuerdo con los nuevos requisitos que la normativa y el planeta nos imponen. Se ha tratado de exponer los conceptos y su base matemática de una forma amena e intentando remarcar el sentido físico y práctico. Los anexos recogen las partes más puramente matemáticas.

Finalmente indicar que esta área es incipiente y que es muy previsible que evolucione rápida y fuertemente en un futuro cercano. El entorno es muy cambiante.

El avance de las tecnologías de la información (IT) probablemente trate de integrar el trabajo de muchos de los profesionales que participan en el diseño, acondicionamiento térmico y mantenimiento de un edificio, así como las necesidades normativas de la administración, en un único marco de trabajo.

El objeto de esta guía es exponer las claves acerca de la simulación térmica de los edificios, mostrando los conceptos fundamentales que intervienen en la misma. Se pretende generar conocimiento en torno al estado del arte de la evaluación del comportamiento del edificio desde la parte térmica.

Antes de entrar en los detalles de la simulación térmica cabría hacerse muchas preguntas: ¿Dónde entra la simulación en el contexto del diseño y construcción de un edificio? ¿Qué profesionales se ven afectados y cómo? ¿Cuánto cuesta hacer la simulación, qué esfuerzo hay que poner y qué se va a obtener a cambio? ¿Por qué es necesaria? ¿Cómo funciona el mercado del aire acondicionado, la ventilación, la calefacción y el A.C.S.?, etc.

Antes que nada hay que decir que la energía térmica en la edificación es un problema muy complejo, en el que hay involucrados muchos “actores”: la arquitectura, la ingeniería, la reglamentación, los instaladores, el promotor, el cliente, las políticas energéticas locales, nacionales y supranacionales, etc...

Hasta la fecha los técnicos sólo se preocupaban –y no siempre– de encontrar los límites superior (calefacción) e inferior (refrigeración) de la potencia o capacidad ($kW=kJ/s$) necesaria para mantener cierto local/es o recinto/s en el entorno de ciertas condiciones –casi siempre referidas a la temperatura y humedad de dicho recinto–. Para este fin aparecieron en el mercado los llamados “programas de cálculo de cargas térmicas por computadora”.

La dinámica del mercado focaliza así su interés tan sólo en el diseño de la instalación en condiciones límite (capitalización) y se presta muy poco interés a su operación (explotación y mantenimiento). Dicho de otro modo: se responde a ¿cómo de grande es la instalación?, pero no a ¿cómo va a funcionar a carga parcial y en el tiempo de vida útil?

La primera cuestión afecta al funcionamiento de tan sólo el 1% del tiempo, mientras que la otra afecta al 99% restante de la vida de la instalación.

A esto hay que añadir el hecho económico. Si yo, como cliente, tan solo veo el coste inicial (el precio de las máquinas y de su instalación) pero no veo el coste durante su vida útil, mi proceso de optimización (ahorro), me lleva a conseguir la instalación más económica posible. Esto establece una cadena viciosa en un solo sentido: promotor, ingeniería, instalador, cliente, en la que cada eslabón genera su deseo de ahorro correspondiente y desaparece de la escena. Esta dinámica del mercado deja fuera la operación del sistema. La pregunta

¿sería mejor, en la construcción, utilizar una válvula más cara o un cierto equipo más caro con mejores prestaciones, o gastar más en un mejor diseño, porque sabemos que a la larga da mejor resultado y nos ahorra problemas de mantenimiento y consumo?

no cabe en el esquema anterior de mercado por dos razones fundamentalmente.

- La primera razón es la estructura misma del mercado actual. Las empresas diseñan e instalan pero no se responsabilizan de la operación –al menos desde un punto de vista energético.
- Posteriormente, la instalación queda casi siempre a cargo del propietario, y éste tiene otros menesteres que atender. Tan sólo cuando la instalación deja de funcionar apreciablemente es cuando el cliente toma una acción correctora. Por ejemplo, estudios realizados en Holanda para aumentar el ahorro energético en edificios, han indicado que el 58% de las instalaciones tenía un problema básico de diseño, el 30% tenía un problema

de mala regulación de caudales y puntos de consigna y el resto tenía que ver con problemas diversos.

- La segunda es: ¿cómo se puede conocer la relación entre el coste de un mejor diseño de la instalación o del edificio, un mejor equipo y el ahorro efectivo que se produce durante la vida útil? Por cierto, ¿cuánto cuesta saber esto? Habría dos posibilidades:
 - Monitorizar las instalaciones –lo cual resulta caro y actualmente muy pocas empresas lo hacen– con el objetivo de adquirir experiencia.
 - O bien calcular –simular– la repercusión esperada anual de una cierta acción.

La directiva europea EPBD (Energy Performance in Buildings Directive) 2002/91/EC y otras que han surgido después, pretenden cambiar el esquema del mercado anterior, ya que se ha mostrado ineficiente y está contribuyendo al cambio acelerado del clima del planeta. En [buildings platform] el lector puede encontrar información relativa a esta directiva. En lo que afecta a esta guía, la directiva, en sus artículos 1, 3, 4 y 7 indica que los edificios deben cumplir unos requisitos mínimos, debe existir un método de cálculo o de estimación de la demanda y el consumo de los edificios, y que en base a ellos se expedirá una etiqueta que certificará la calidad energética del edificio. Básicamente pretende limitar la emisión de CO₂ fósil a la atmósfera.

La administración española, en cumplimiento de dicha normativa, ha previsto el nuevo Código Técnico de la Edificación, CTE. Dentro de este código se han desarrollado los siguientes programas de ordenador:

- LIDER: Limitación de la DEManda eneRGética.
- CALENER: Cálculo de la Eficiencia eneRGética.
 - VyP: Vivienda y Pequeño terciario.
 - GT: Gran Terciario.

Básicamente estos son programas de simulación con dos objetivos. El LIDER intenta limitar la demanda de energía (popularmente se conoce como la nueva KG, en referencia a la antigua normativa de la NBE-79) mientras que el CALENER cuantifica el consumo de energía final anual y cuánta de esa energía proviene de combustible fósil y de qué calidad, para así poder emitir la etiqueta del certificado energético del edificio o la vivienda.

La normativa no se limita a estos dos programas ya que admite la posibilidad de homologar otros, igualmente válidos, para realizar la limitación de la demanda y la certificación energética.

La intención de esta guía es ofrecer una visión que intente mostrar aquellos aspectos comunes a cualquier programa de simulación energética de edificios, al menos como se concibe la simulación energética de edificios, hasta el día de hoy en base a la tecnología disponible.

1.1 CONCEPTOS BÁSICOS

1.1.1 Simulación térmica

La simulación de una instalación térmica consiste en estimar con cierta frecuencia temporal –normalmente cada hora– la potencia para proporcionar ciertos servicios:

- Potencia térmica suministrada en ese intervalo, adicionada para proporcionar calefacción o extraída para proporcionar refrigeración en sus diversas formas: convectiva, radiante, latente (humedad del aire) y la energía consumida por los sistemas para conseguirlo.

Objetivo de la simulación térmica

El objetivo es conocer durante un periodo de tiempo dado una determinada característica energética o de regulación del sistema.

Normalmente el objetivo suele ser la optimización de algún resultado que finalmente redunde en limitar las emisiones de CO₂.

Sin embargo, debe tenerse presente que la optimización tiene ciertas restricciones que influyen en el objetivo. Está claro que si el edificio no tiene calefacción/refrigeración no emitirá CO₂, pero sus ocupantes se mostrarán disconformes con las condiciones interiores. Así, dado que las restricciones influyen sobre el objetivo, éstas son fijadas por la administración en la mayor parte de los casos: usos de los ocupantes, temperaturas de consigna, ventilación nocturna, etc.

Antes de pasar a aspectos más detallados de la simulación es importante aclarar otros.

El concepto de energía es algo que resulta familiar porque aparece en anuncios de televisión y en la factura

doméstica de electricidad. Sin embargo, si se le pregunta a alguien que defina el concepto parece que no está tan claro.

Por no corresponder aquí una exposición detallada, decir tan sólo que se podría pensar en la energía como en los “euros”. La energía pasa de un lugar a otro como éstos últimos, pero su cantidad siempre se mantiene. En el sistema internacional SI se mide en Julios (J) y el ritmo al cual entra o sale se denomina potencia o capacidad y en SI se llama Watios (J/s=W).

No obstante, existe una diferencia fundamental en el símil de “energía $\equiv$ euros”. Cuando disponemos de euros da lo mismo en qué “formato” los tengamos, su capacidad de compra es siempre la misma. Da lo mismo que tengamos 100 euros en dos billetes de 50 ó 100 monedas de euro, se puede comprar lo mismo. Con la energía no ocurre esto y en cierta literatura se refieren a ello como la calidad de la energía o –más técnicamente– con la palabra exergía (en la literatura anglosajona como disponibilidad). La energía puede venir dada en varios “formatos” y por ello la llamamos eléctrica, cinética (movimiento), energía interna (asociada a estructura química y estado), energía térmica (asociada a cambios de temperatura y estado), etc. La conversión en general de un cierto formato a otro, al contrario que el dinero, no se puede hacer al 100%. Dicho de otra manera: no toda la energía interna de, por ejemplo, un combustible, puede ser transformada en electricidad, pero sí toda la energía eléctrica puede ser transformada en energía interna de un conductor eléctrico por efecto Joule (o del rozamiento de los electrones con el conductor).

Es a este efecto al que popularmente se le conoce como ahorro energético o eficiencia energética. Gastar la energía no significa hacer que desaparezca, sino degradar la posibilidad de hacer cosas con ella.

¿Existe alguna medida que nos muestre este efecto? Aunque estamos acostumbrados al concepto de energía no lo estamos tanto al concepto de entropía, y este es muy importante para los aspectos térmicos de la energía.

Todas las cosas (el fluido refrigerante que circula dentro de la nevera de casa o de la bomba de calor que nos da aire caliente o frío, nuestra piel, todo) posee entropía, y es función del estado de la materia. Una diferencia importante con la energía es que la entropía global de todo el universo, la de todas las cosas sumadas, va creciendo con el tiempo, aparece de la nada, gratis. Pero esto no es bueno cuando sucede de forma incontrolada. Lo que pretende el ser humano es que la energía con poca entropía, en su degradación inevi-

table hacia estados con más entropía, haga la mayor cantidad posible de cosas útiles para nosotros. Grosso modo, se puede decir que la entropía mide el número de estados que posee la sustancia en ciertas condiciones y, por lo tanto, la entropía depende de la cantidad de sustancia que tengamos.

El aumento o disminución de entropía de una sustancia se puede medir por la cantidad de energía en forma de calor que toma o cede, dividido por la temperatura (en grados Kelvin) de la cual la tomó o cedió.

$$S = Q/T$$

Se mide pues en (J/K).

Así, los mismos 5 Julios tomados a 250 °K no producen el mismo aumento de entropía que si la sustancia hubiera estado a 350 °K. Se produce un aumento menor en el caso en que la sustancia esté más caliente, mientras que el aumento es mayor cuando la sustancia está más fría.

En un intercambio de calor la entropía generada se calcularía como:

$$Q/T_{\text{fría}} - Q/T_{\text{caliente}} = \text{generación de entropía}$$

¿Qué sucede con máquinas cíclicas, esto es, enfriadoras, bombas de calor, recuperadoras de calor, etc.?

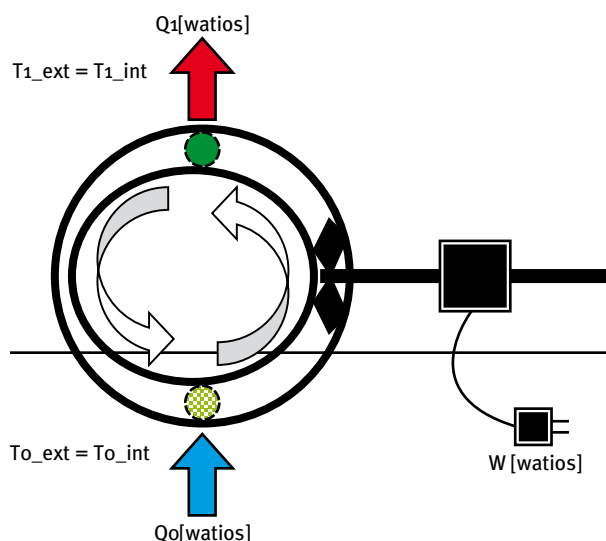
El ejemplo típico de un proceso cíclico en que estos conceptos de energía y entropía se aplican es un ciclo de Carnot que opera entre dos temperaturas, una inferior T_0 y otra superior T_1 . Es un ciclo muy idealizado y que permite olvidarse de detalles técnicos como compresores o intercambiadores. Los intercambios de calor se producen con saltos de temperatura ínfimos.

Sin entrar en detalles, un fluido circularía –como en la nevera de casa– sufriendo cambios de fase al pasar de líquido a vapor y viceversa, siendo comprimido, pero en cualquier caso volviendo su estado, tras cierto tiempo –el tiempo del ciclo– al mismo estado inicial.

Si se supone que la única fuente de generación de entropía es el intercambio de energía en forma de calor al ser un proceso cíclico, toda la entropía ganada en algún momento es perdida en otro, durante el ciclo, y el refrigerante vuelve a su estado inicial. Así, las dos ecuaciones fundamentales que se podrían escribir serían:

$$Q_0 + Q_1 = W$$

$$Q_0/T_0 + Q_1/T_1 = 0$$



Si nuestra máquina nos da un servicio de calefacción deseamos maximizar Q_1 respecto al consumo eléctrico W —que es energía en forma de trabajo de compresión—La relación entre ambos es Q_1/W .

Manipulando las ecuaciones anteriores se puede ver que la relación Q_1/W llamado COP (Coefficient of Performance en inglés) tiene por expresión:

$$COP = |Q_1/W| = T_1/(T_1 - T_o)$$

Mientras que si deseamos un servicio de refrigeración nuestro interés se centra en Q_o . El cociente Q_o/W se conoce como EER (Eficiencia del Efecto de Refrigeración)

$$EER = |Q_o/W| = |Q_1/W| - 1 = COP - 1 = T_o/(T_1 - T_o)$$

Estas ecuaciones representan un límite físico a la conversión de un tipo de energía en otro. Como se puede apreciar, la capacidad eléctrica empleada para conseguir 1 kW de calor depende de las condiciones de temperatura de la sustancia en el ciclo. Cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas, menor es la relación COP y debemos aumentar la capacidad eléctrica. Por otro lado, limitar la temperatura más caliente ayuda a mantener una relación elevada.

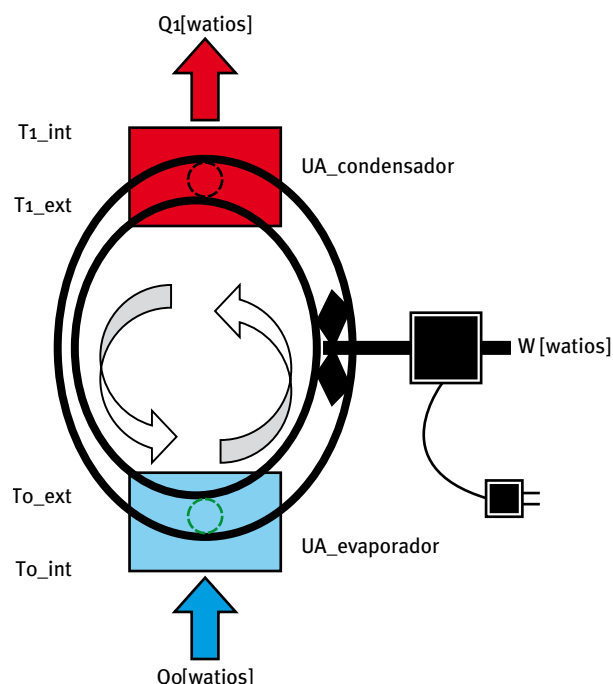
Algo similar ocurre con la refrigeración, aunque el EER máximo es, como muestra la ecuación anterior, una unidad menor que el COP. En este caso, subir la temperatura inferior del ciclo mejora el EER.

¿Qué influye sobre estas temperaturas?

- Parece claro que las temperaturas vienen fijadas por las condiciones de uso de la energía. La temperatura de consigna de calefacción y refrigeración

y de las temperaturas exteriores en invierno y verano. Además, estas últimas fluctúan durante el año, es más, incluso durante el día y la noche. Así, la simulación ayuda a saber cuánta calefacción y/o refrigeración se puede obtener; cómo gobernar la máquina y a qué coste, en función de las condiciones interiores fijadas y del clima del lugar.

- Sin embargo, y esto no suele ser tan evidente, también depende de la capacidad de intercambio (llamado también UA (kW/m²K)) con el ambiente exterior y con el interior. La capacidad de intercambio depende proporcionalmente de este UA y de una cierta diferencia de temperaturas. Si el UA es pequeño se fuerza a que, para una capacidad de intercambio dada, el salto de temperaturas deba ser mayor, obligando al ciclo a trabajar aumentando la diferencia entre T_1 y T_o . Un fabricante podría argumentar que su máquina tiene potencia suficiente para ciertas condiciones a un precio más económico. Si la economía la ha conseguido en base a una capacidad UA instalada en la máquina menor, la eficiencia será inferior a la de otras más caras y lo conseguirá sobre la base de utilizar una potencia eléctrica superior en el compresor. Además, si el ajuste de la capacidad de la máquina se hace en base a procesos que desperdician la energía (generan entropía rápidamente) como estrangulamientos innecesarios en la corriente de refrigerante, la eficiencia caerá. Así, los fabricantes deberían suministrar información sobre los rendimientos de sus equipos bajo ciertas condiciones reguladas para poder hacer la simulación.



- Los modernos sistemas de climatización, como los techos fríos, y los no tan modernos, como los suelos radiantes, buscan en realidad el aumento del UA a través de un aumento del A (área de intercambio). Sin embargo, este UA está implicado a menudo en la arquitectura directamente. Se debe prever su instalación durante el proyecto arquitectónico, ya que posteriormente es tarde. Esto hace que a veces no sea sólo el rendimiento de un equipo el determinante de la eficiencia de una instalación. Aquí arquitectura e ingeniería se ven entrelazadas.

1.1.2 Simulación térmica de edificios

Se trata de estimar el comportamiento térmico de las diferentes zonas que conforman el edificio y las prestaciones que están dando las máquinas en las condiciones de trabajo puntuales en cada instante de tiempo, con el fin de integrarlas durante el periodo de tiempo simulado.

En principio los objetivos perseguidos pueden ser varios, el más evidente es quizás estimar los consumos de energía y la producción asociada de CO₂ que conlleva, pero pueden abarcar otros muy diferentes, como analizar diferentes estrategias de control, analizar diferentes comportamientos de máquinas o sistemas de climatización, observar la evolución de temperaturas o humedades relativas en las diferentes zonas que conforman el edificio, etc.

1.1.3 Simulación térmica de edificios para certificación energética

El objetivo planteado es estimar el consumo energético anual del edificio, o su equivalente producción de CO₂, y compararlo con una determinada referencia para establecer una cierta “calidad energética del edificio más sus instalaciones”.

Por lo tanto, la simulación debe realizarse sobre un periodo anual (en general con pasos de tiempo horarios, aunque esto depende de la modelización realizada) y para todo tipo de instalaciones que consuman energía como calefacción, refrigeración, ACS e iluminación.

$$\text{Consumo} = \int_{\text{anual}} \frac{\text{Demanda}_{\text{calefacción}}}{\eta_{\text{sistema calefacción}}} + \int_{\text{anual}} \frac{\text{Demanda}_{\text{refrigeración}}}{\eta_{\text{sistema calefacción}}} + \int_{\text{anual}} \frac{\text{Demanda}_{\text{ACS}}}{\eta_{\text{sistema calefacción}}} + \int_{\text{anual}} \frac{\text{Demanda}_{\text{iluminación}}}{\eta_{\text{sistema calefacción}}}$$

En el caso de querer obtener la producción de CO₂ equivalente se trata de asignar un coeficiente de paso para cada tipo de energía consumida, es decir kg CO₂/kWh. (Ver tabla en capítulo siguiente).

1.1.4 Necesidad de procedimientos de simulación

La demanda de cada una de las contribuciones es muy variable con el tiempo, y depende de las condiciones ambientales o zona climática, del tipo de edificio y sus características térmicas, y del uso y control que se establezca. Además hay que añadir el concepto de inercia térmica; es decir, la velocidad con la que cualquier variación de las condiciones ambientales, uso o control produce sobre las condiciones térmicas interiores de la zona y por tanto sobre su demanda. Esta inercia no es nunca despreciable y ello conlleva la necesidad de la simulación térmica para acercarnos de forma fiable a la demanda real; es decir, no es posible el uso de procedimientos estacionarios para establecer con rigor la demanda energética del edificio (sobre todo en el caso de refrigeración o cuando las condiciones ambientales oscilan sobre la temperatura de consigna de la instalación, como es el caso).

Los equipos varían sus prestaciones (rendimiento, EER, COP, potencia útil,...) con las condiciones ambientales y con la proporción de carga que compensan en un cierto instante sobre sus prestaciones nominales (carga parcial), por lo tanto, igualmente un procedimiento estacionario (en base a rendimientos estacionales) sólo produce una aproximación al valor del consumo real.

Estos motivos han llevado a la legislación española a especificar unos procedimientos de simulación energética de edificios e instalaciones para establecer la certificación energética y, además, a aumentar el interés de conocer en profundidad en qué se basan las simulaciones térmicas.

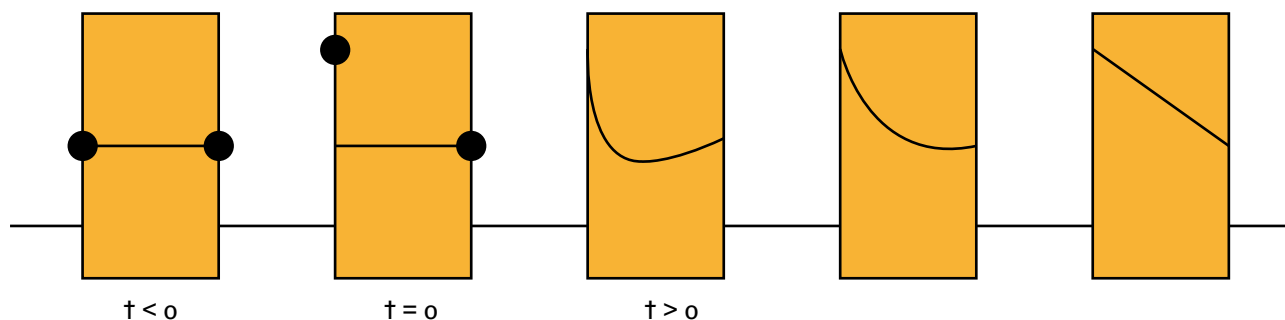
Conceptos básicos sobre la respuesta térmica de los edificios

A continuación se hace una discusión sobre ciertas ideas básicas que hay que tener presente cuando se realiza una simulación térmica de un edificio. La idea de esta sección es orientar al usuario de estos programas para que se haga una idea cualitativa de los resultados esperables.

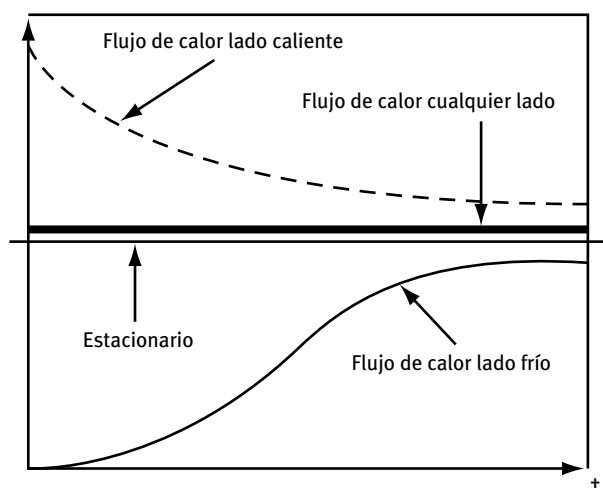
Discusión cualitativa del comportamiento térmico de muros

Lo que sigue intenta dar una explicación cualitativa del proceso de calentamiento o enfriamiento de las partes opacas de un edificio, aquello que la literatura llama masa térmica (thermal mass). Para los detalles matemáticos el lector es referido al apéndice y a las referencias.

Imagine el lector que tiene un muro de un material a una misma temperatura T_2 y que repentinamente es capaz de subir la temperatura de uno de sus lados (el exterior, por ejemplo) hasta T_1 . La figura representa la evolución de las temperaturas internas del muro.



Las temperaturas subirán progresivamente hasta adoptar un perfil lineal mantenido en el tiempo con una transferencia constante desde la parte caliente a la fría de calor. Este estado se llama estado estacionario (nota: permanente en el tiempo no quiere decir determinado). ¿Cuáles son los flujos de calor a cada lado del muro? La figura muestra la distribución en el tiempo de flujos de calor en el lado caliente, en el frío y en el caso de suponer que el estado estacionario se obtiene instantáneamente (lo cual indicaría que el muro no tarda nada en calentarse, por lo tanto, no tiene masa térmica o capacidad de almacenar energía).



El muro inicialmente estaba a T_2 y al final su temperatura media es $(T_1+T_2)/2$; por lo tanto, la energía que ha hecho falta acumular en el muro es:

$$Q = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_2 \right) = \rho \cdot c_p \cdot A \cdot L \cdot \left(\frac{T_1 - T_2}{2} \right)$$

ρ : densidad (kg/m^3)

c_p : capacidad calorífica (J/kgK)

V : volumen (m^3)

A : área del muro (m^2)

L : espesor del muro (m)

Q : energía (J)

$$\frac{Q}{A} = \rho \cdot c_p \cdot L \cdot \left(\frac{T_1 - T_2}{2} \right) = C \cdot \left(\frac{T_1 - T_2}{2} \right)$$

C : capacidad de almacenamiento de energía por unidad de superficie de muro ($\text{J/m}^2\text{K}$)

La resistencia al paso de calor del muro en condiciones estacionarias es:

$$R = \frac{L}{k} = \frac{1}{U}$$

k: conductividad térmica (W/mK)

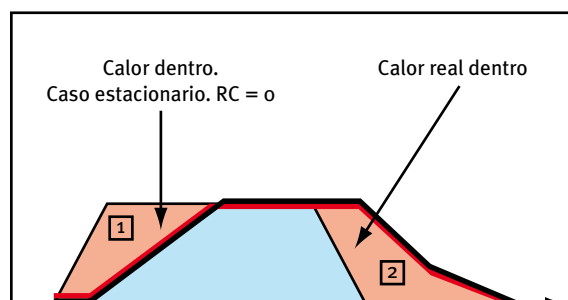
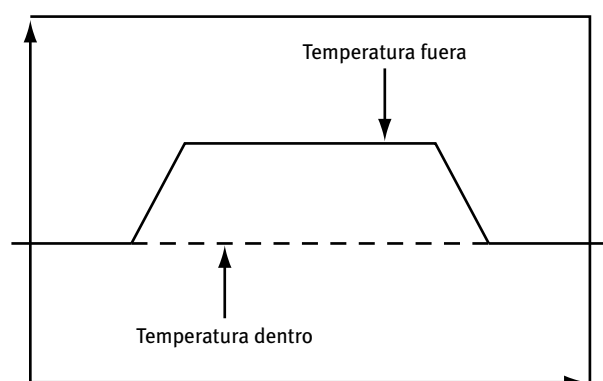
La razón entre la capacidad de almacenar a la capacidad de conducir o transmitir el calor se escribe:

$$\frac{1}{U} C = RC = \frac{L}{k} \cdot \rho \cdot c_p \cdot L = \frac{L^2}{k/\rho \cdot c_p} = \frac{L^2}{\alpha} \text{ [s]}$$

α : difusividad térmica (m²/s)

Estas dos variables, R y RC, juegan un papel determinante en el comportamiento del muro respecto a la acumulación y transmisión de energía. De hecho, la inversa de RC representa un tiempo característico para el muro. RC equivaldría aproximadamente al tiempo que tarda el centro de un muro en saber que hubo un cambio de temperatura fuera. A mayor RC, mayor tiempo de respuesta.

Imagine el lector que ahora la temperatura fuera sigue una evolución en forma de trapecio como el de la figura. El flujo de calor en el interior toma las formas que se muestran según se tenga en cuenta o no la capacidad de almacenamiento del muro RC.

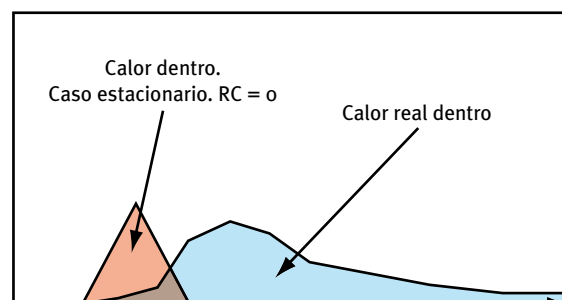
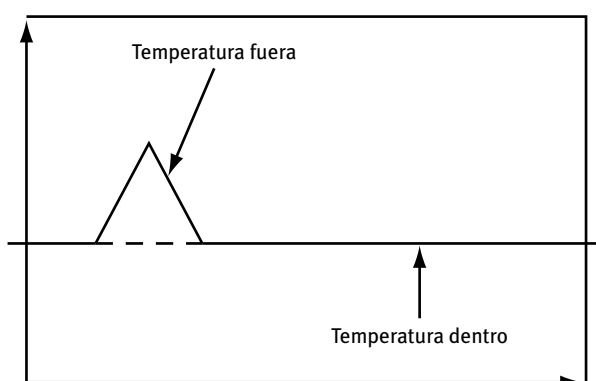


Lo interesante es que el área de la zona marcada como 1 es igual al área marcada como 2. Así, en el caso de suponer que el muro no acumula energía, ésta entra y termina de entrar también antes. En el caso real la energía llega al interior retrasada en el tiempo (que pueden ser horas o incluso días, sirva de ejemplo un muro de iglesia), aunque en ambos casos la cantidad que entró es la misma.

Por lo tanto, el cálculo estacionario que usa sólo la resistencia térmica R del muro es capaz de predecir la cantidad de energía que entra pero no cuándo. Además, la masa del muro RC no afectó a la cantidad que consiguió entrar pero sí a su distribución en el tiempo.

Si la parte plana del perfil de temperaturas se hace más corta de modo que no de tiempo al muro a alcanzar el estado estacionario los perfiles son los que muestra la figura. Aquí, adicionalmente se ve que el pico de potencia (ritmo de entrada de energía [J/s]) se reduce en la realidad respecto de la suposición de condiciones estacionarias. Sin embargo, el área debajo del triángulo es la misma que el área debajo de la curva. La energía total que entró es idéntica. Se puede demostrar (ver apéndice) que el retraso en el flujo máximo de calor y la reducción de ese máximo de potencia dependen de $RC^{1/2}$.

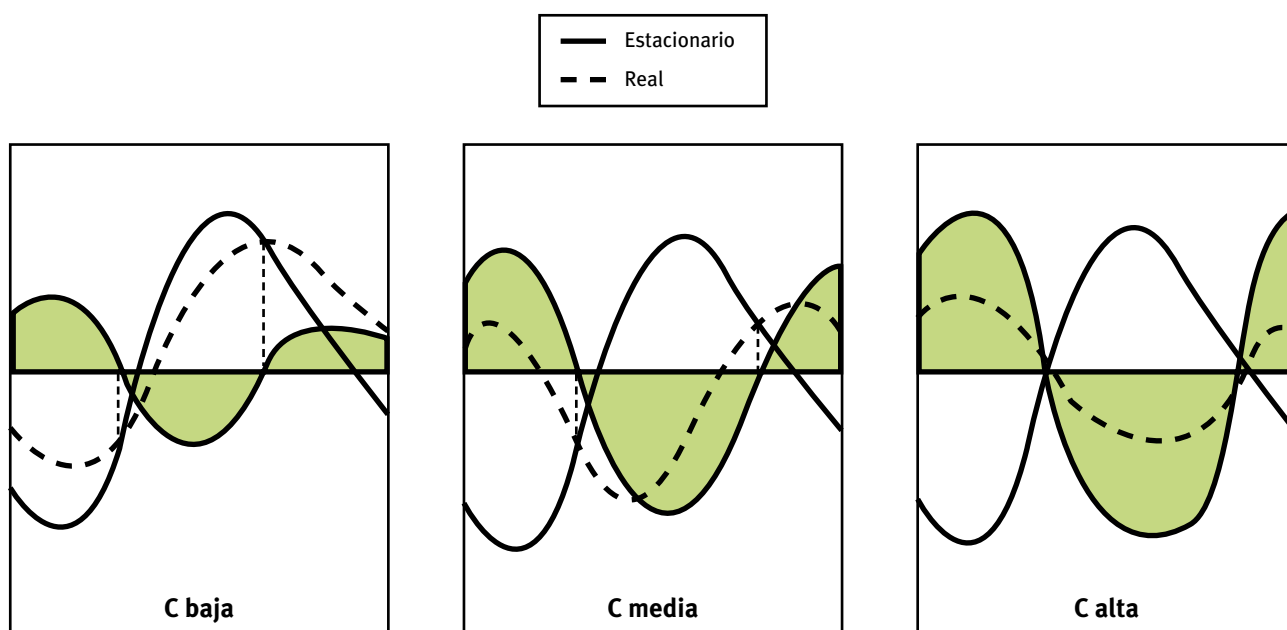
La relación entre la potencia con un muro de espesor real y aquella en el interior suponiendo estado estacionario se reduce con el valor de $RC^{1/2}$. Sin embargo, RC es el producto de dos parámetros: la resistencia térmica R y la capacidad de almacenamiento de energía C. Cualquier incremento en ellos hace que el pico de potencia se re-



duzca. No obstante, R también afecta a la cantidad total de energía que entra mientras que C no afecta; por lo tanto, es R (o U , su inversa, la conductancia térmica del muro) la que tiene una mayor influencia en la reducción del pico de potencia.

El otro efecto que tiene C (a través del producto RC) es el de desplazar el momento del máximo flujo de calor. Esto puede tener implicaciones sobre el consumo de energía en el edificio.

Las siguientes figuras muestran la respuesta en flujo de calor dentro de un muro cuando fuera la excitación es una señal periódica de temperatura (un día, por ejemplo). Los tres casos muestran un muro con C baja, otro con C media y otro con C alta.



Respuesta de flujo de calor interior debido a excitación exterior senoidal de temperatura

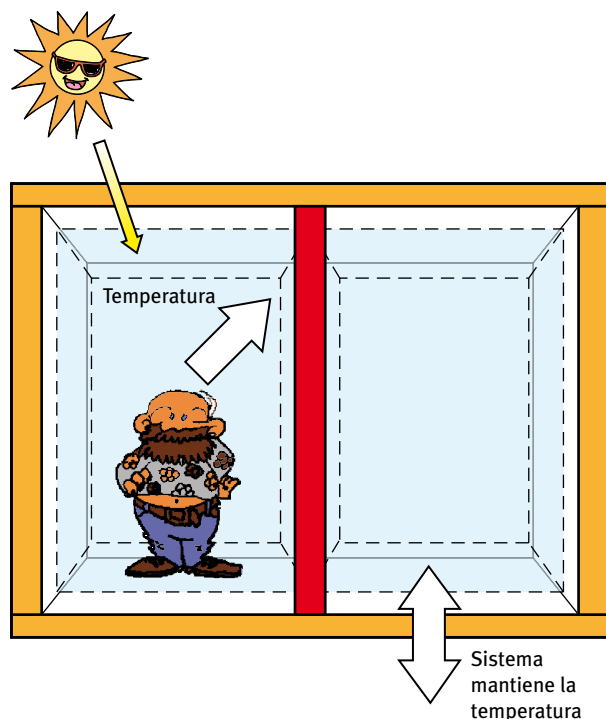
Las partes coloreadas indican la discrepancia entre el flujo de calor suponiendo estado estacionario (en fase con los cambios de temperatura externos) y el caso real (con el valor de RC que tiene el muro). La máxima discrepancia se produce cuando C produce un desfase de 12 horas (figura de la derecha). En el caso estacionario estaría entrando calor (valor positivo) pero en la realidad está saliendo calor.

Por último, ¿qué sucede si tenemos una señal de temperatura periódica cualquiera en el exterior? Cualquier señal periódica se puede descomponer en serie de Fourier como una suma de un valor constante (el valor medio de la señal) más una suma de señales oscilantes (senos y cosenos) alrededor del valor medio cero. Nota: la señal periódica podría ser incluso una señal anual, esto es, un año completo que se repitiera una y otra vez. Los muros se comportan como elementos lineales, por lo tanto, la respuesta a una señal de temperatura doble de la original produce una respuesta en flujo de calor idéntica en forma pero doble en magnitud. Por otro lado, la respuesta a una suma de señales de temperatu-

ra es la suma de los flujos de calor debidos a cada una. Así, en el caso de una serie de Fourier el flujo de calor interior es la suma del calor que entra (sale) debido a la media de temperaturas más otras cantidades debidas a las partes oscilantes de la temperatura. Al ser el valor promedio de temperatura exterior un valor fijo, –y suponiendo las condiciones interiores de temperatura fijas también– el flujo de calor para la parte constante es el caso estacionario. Sin embargo, las partes no producen oscilantes, en media, una entrada o salida neta de energía del recinto a través del muro. Así, la entrada o salida neta de energía a través de un muro depende sólo de las condiciones medias a ambos lados del muro (las producidas por la meteorología y aquellas conseguidas por el usuario en el interior del recinto), por lo tanto del estado estacionario y, en consecuencia, del valor de la conductancia o resistencia térmica del muro. La masa del muro no tiene nada que ver con ese valor neto de energía que logró pasar al otro lado a lo largo de un período (un día, una semana, un mes o un año). Sin embargo, la potencia pico y el retraso en el tiempo de esa potencia respecto al caso estacionario, (o dicho

de otro modo, la distribución temporal de la entrada o salida de energía) dependen ambos de R y de C a través del parámetro $RC^{1/2}$.

¿Cómo influye la masa del edificio en su exterior y en su interior en el uso de energía del mismo?



En el dibujo se muestra un esquema de edificio muy simplificado. Se va a observar aquellos aportes de energía que intentan modificar la temperatura del aire en el interior, por lo tanto son aportes convectivos. Nos vamos a fijar sobre todo en los aportes a través de muros y su acumulación. Entradas adicionales pueden venir del sol, de los ocupantes (sus máquinas, luces, ellos mismos, etc.). Suponemos que existe un sistema o un equipo que el defecto o exceso de energía que llega al aire lo compensa. Es lo que en simulación llaman demanda. No vamos a analizar cómo lo consigue hacer el equipo y cuánta energía consume para conseguirlo (es lo que se llama consumo); sin embargo, queda claro que cada vez que actúa el equipo tenemos un coste y que no tiene porqué ser el mismo si el equipo aporta energía (calienta) o quita energía (refrigera).

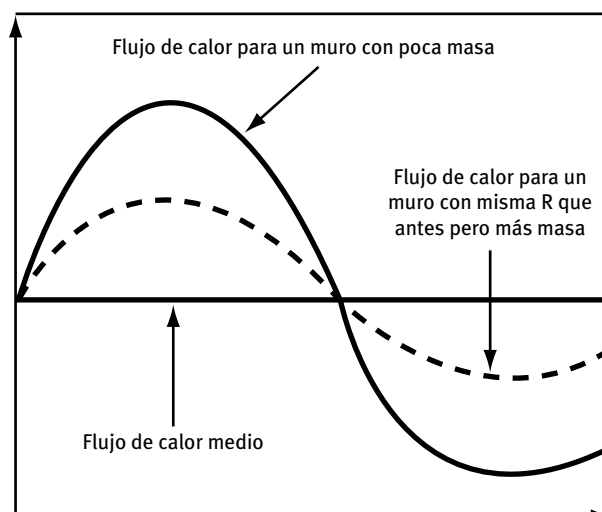
La masa externa del edificio también se puede considerar interna, siempre y cuando no se haya ubicado el aislamiento en la cara interna.

Si al equipo no se le permite funcionar el aire de la habitación subirá o bajará de temperatura. Se dice entonces que se deja flotar al edificio (la temperatura del edificio, como la boya del mar, sube o baja según entra o sale

energía –agua del mar– respectivamente). Habitualmente, en los programas de simulación se deja flotar al edificio entre ciertas temperaturas donde al equipo no se le permite actuar.

Cuando el edificio flota, la masa interna del edificio tiene influencia sobre las variaciones internas de temperatura ya que cuando el aire pierde energía la masa interna se la cede. De alguna manera amortigua los cambios internos de temperatura. Un edificio muy ligero poseerá una temperatura interna fluctuante con un valor medio por encima del valor medio del exterior debido a las ganancias de energía del sol y de la actividad interior. Por la noche pierde los aportes y su temperatura caerá incluso por debajo de la exterior. Así, su comportamiento está en fase con el uso y la meteorología. Sin embargo, si la masa aumenta las oscilaciones de temperatura entre el día y la noche (por ejemplo) disminuirán. Durante el día la energía se va acumulando en la masa interna y durante la noche devuelve la que acumuló al aire. Este efecto estaría en la base de los sistemas pasivos de acondicionamiento, que intentarían mantener unas condiciones internas lo más estables posibles, guardando la energía y devolviéndola más tarde cuando sea necesaria.

Si ponemos el equipo en marcha de forma que la temperatura interna no cambie, en el caso de un edificio con muros externos con poca masa la respuesta del flujo de calor es instantánea, como muestra la figura. El valor medio de la temperatura y la resistencia térmica de los muros exteriores fijan, como se comentó, la cantidad de energía que entra o sale por los muros (aquí la masa no hace nada). Sin embargo, si le damos masa a los muros exteriores (manteniendo la misma R o U) sabemos que obtenemos un amortiguamiento adicional de la potencia pico (ver figura).

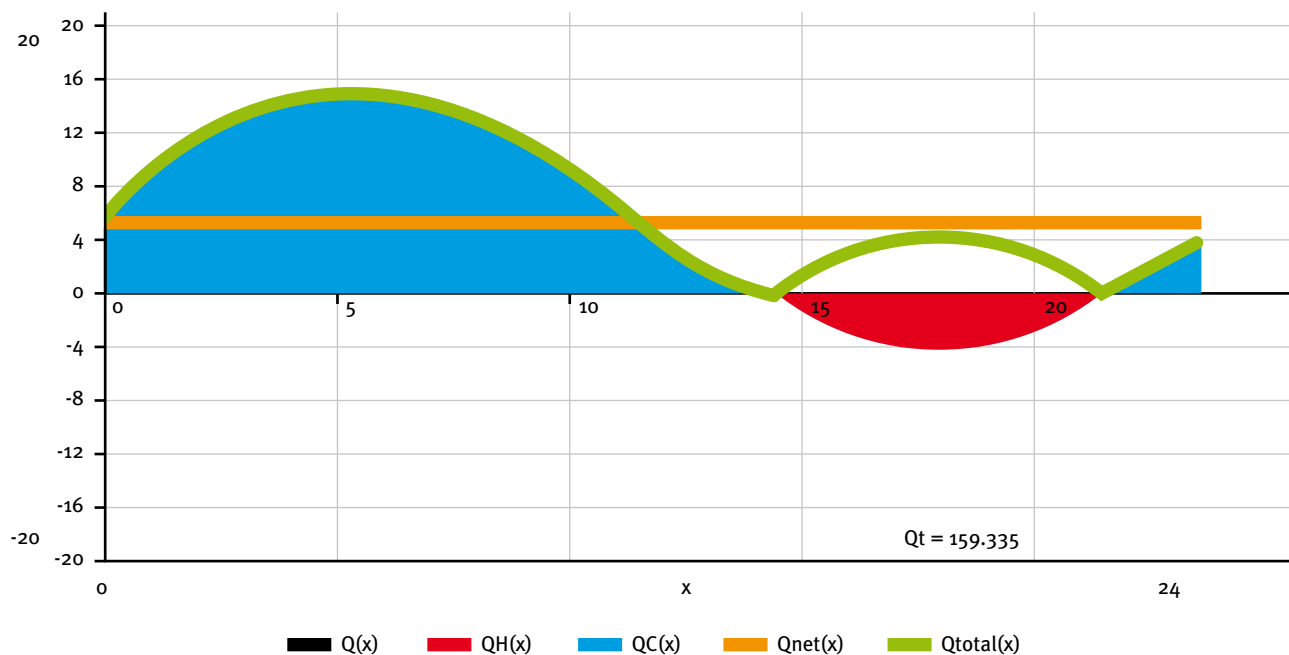


Veamos qué significa esto en términos de requerimientos por parte del equipo.

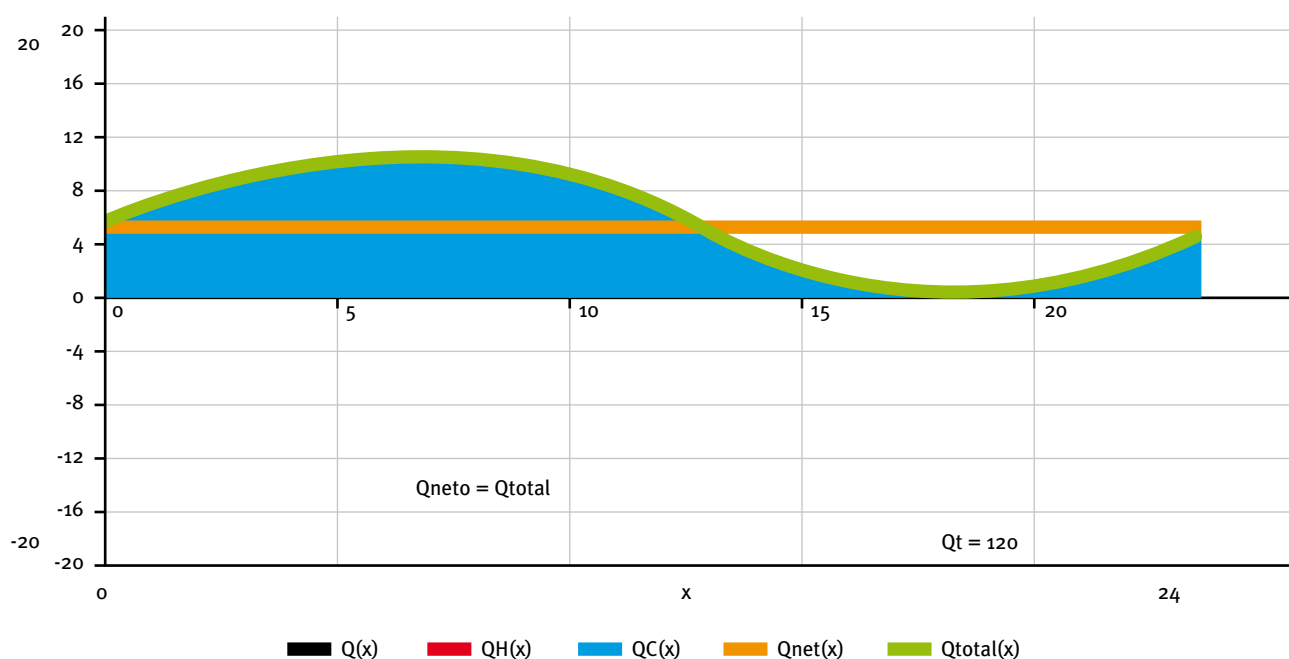
Imagine el lector un cierto edificio en una cierta localidad. Por simplificar, veamos para un cierto día (24 h) que se repite una y otra vez de forma idéntica la carga térmica

a través de un muro. En las siguientes gráficas se muestra la entrada de calor. Si el valor es positivo implica que el equipo debe proporcionar refrigeración (aire acondicionado); si el valor es negativo indica que se perdería calor por el muro y haría falta calefacción. Se muestran 4 casos que a continuación se pasa a comentar.

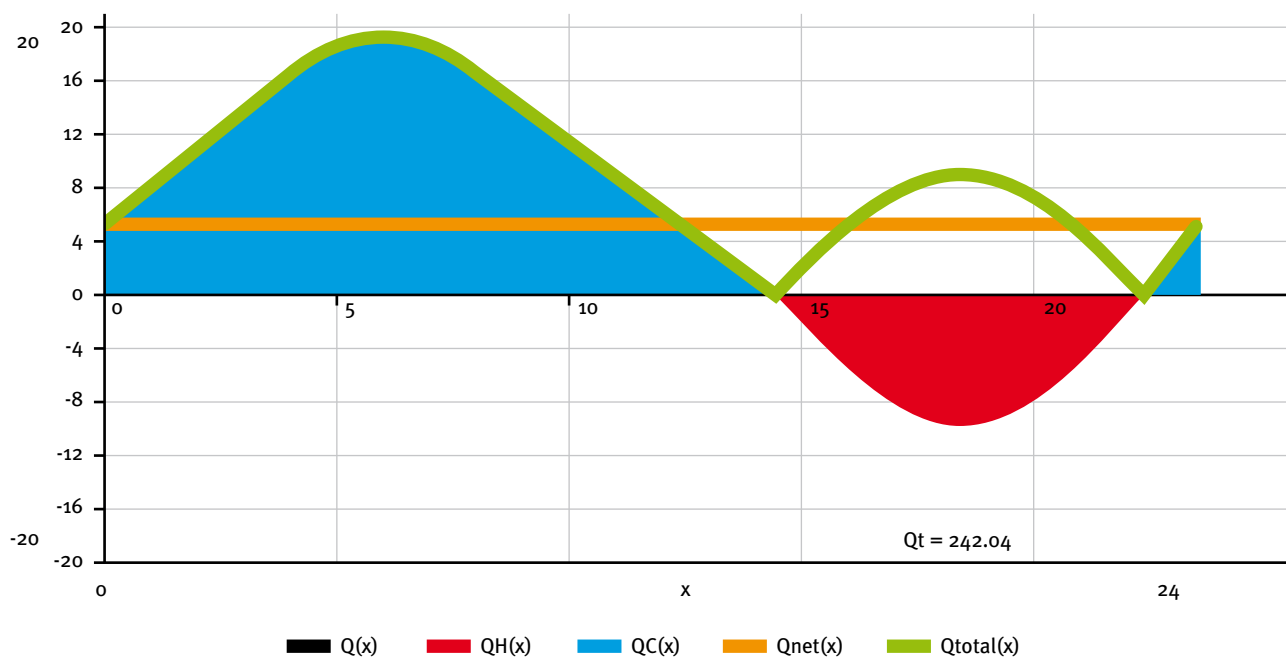
1. En promedio necesita frío



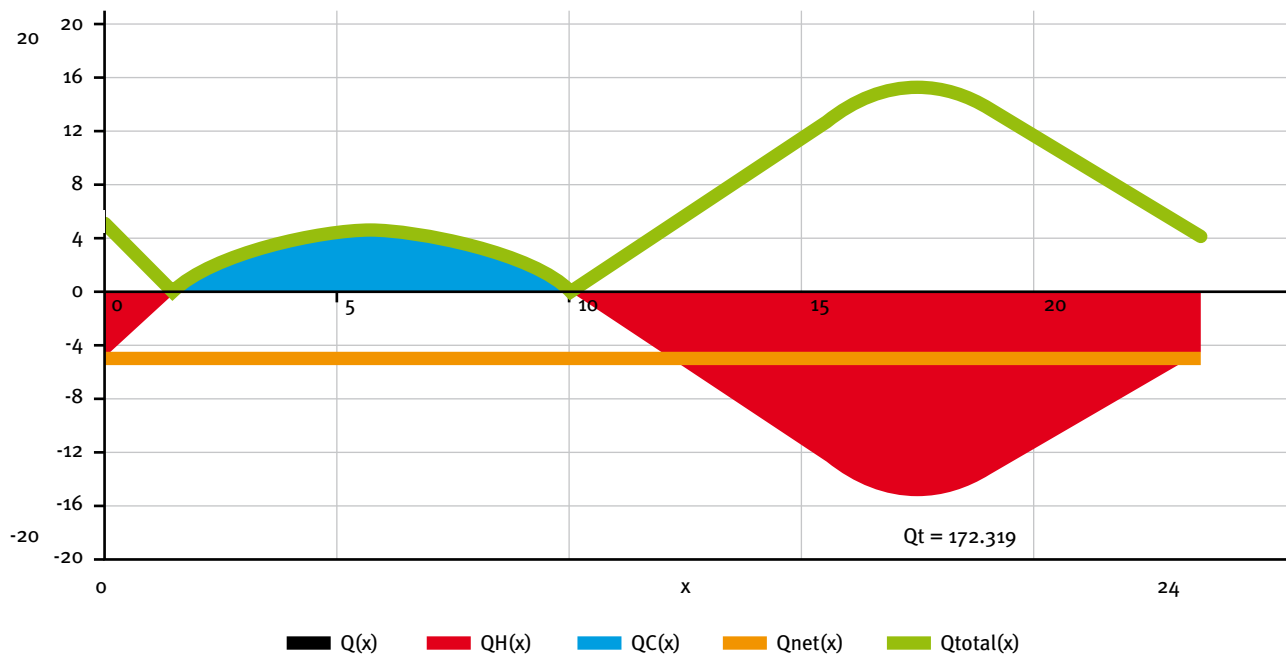
2. En promedio necesita frío



3. En promedio necesita frío



4. En promedio necesita calor



Los casos 1 y 2 son las curvas de carga térmica diaria, sobre el aire en el mismo edificio con dos tipos de muro exterior distintos. Los dos edificios poseen la misma R y por lo tanto sus necesidades netas (Q_{net}) son las mismas: necesitan en promedio sacar la

misma cantidad de energía del aire (refrigeración). Sin embargo, el edificio del caso 2 tiene una C mayor en sus muros exteriores (mayor masa térmica), que hace que su fluctuación alrededor de la media se reduzca. Curiosamente, para este edificio no se alcanzan las

necesidades de calefacción que sí son requeridas en el caso 1. Por lo tanto, la cantidad de energía total ($Q_{total}=Q_t$) que se debe “mover”; esto es, sacar y volver a meter en el aire para mantener sus condiciones interiores constantes, es diferente para ambos (ver la línea verde, el área debajo de esta línea representa las necesidades sobre el equipo). En el primer caso el calor total es 160 (las unidades no importan) mientras que en el segundo es 120. Adicionalmente, en el segundo caso el calor neto que hay que sacar coincide con la energía que el equipo debe “mover”.

El caso 3 se trata del mismo edificio con un muro exterior con la misma R pero con una masa muy pequeña y, por lo tanto, la discrepancia entre el calor neto necesario para mantener las condiciones interiores y la energía “movida” o procesada por el equipo llega a ser de 82.

Por último, el caso 4 muestra un caso en que el edificio se sitúa en una localidad más fría de manera que necesita en media calefacción. Sin embargo, durante el día puede llegar a necesitar refrigeración.

Esto es sólo una muestra cualitativa de cómo afectan los parámetros R y RC dentro y fuera del edificio a sus necesidades. No se ha comentado nada sobre otros efectos sobre los arranques y paradas de los equipos y su pérdida de eficiencia, los niveles de confort para los ocupantes, etc.

Por último, el parámetro RC en el caso de muros multicapa no es tan sencillo de definir debido a que el orden de las capas afecta a la capacidad del muro de almacenar (no así su resistencia térmica R). Por ejemplo, no es lo mismo aislar por dentro o por fuera un muro exterior. En el primer caso los aportes de energía internos pasan rápidamente al aire, mientras que en el segundo la energía pasa a los muros. Un caso típico es la casa de los fines de semana del pueblo, con muros pesados y no aislados por dentro. Cuando llegamos el viernes o sábado ponemos la calefacción y sólo notamos que el ambiente interno empieza a estar confortable cuando llega el domingo por la tarde. El resto del tiempo estuvimos calentando la estructura de la casa a través del aire.

Para el caso de un muro unicapa y en general usando valores medios de densidad, capacidad calorífica, espesor del muro y conductividad del muro se puede obtener un índice γ que indica la inercia térmica de un muro, (es un índice grosero, pero puede ser útil en circunstancias prácticas).

$$\gamma = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}}$$

$$R = 1/U$$

$$C = \rho \cdot c_p \cdot L \text{ del muro}$$

$$C = 2\pi / (24 \cdot 3.600) \text{ pulsación de la frecuencia diaria}$$

Si $\gamma < 1$ se puede despreciar la masa del muro. Si $\gamma > 1$ entonces el muro tiene una masa a considerar. Esta podría ser una definición aproximada de inercia térmica.

Relación entre el coste energético anual y la forma de aislar el ambiente interior del edificio de la meteorología

Como se ha visto, el aislamiento del exterior se consigue fundamentalmente con dos parámetros, R y RC , siendo R el más sensible y el que determina realmente las necesidades medias. Sin embargo, como se intentó mostrar en el apartado anterior, aunque C , en teoría, no afecta a esas necesidades, puede llegar a hacerlo debido al “movimiento activo” de energía requerido al sistema de climatización para mantener las condiciones interiores.

Existen pues dos opciones:

- Por resistencia térmica (conductividad térmica).
- Por “inercia térmica” (acumulación de energía en la estructura).

Las siguientes figuras son bastante ilustrativas y se han reproducido del libro “*Energy conservation through building design*” (ver referencias).

Figura pág. 17:

No se distinguen los detalles con la suficiente claridad para dibujarla.

Esta figura muestra la repercusión, para un determinado edificio situado en cierto lugar, de variar la conductividad térmica de sus muros exteriores y de variar su inercia térmica sobre el coste de “mover” la energía para refrigerar durante un año. Lo interesante es que las líneas de isocoste son aquellas en las que es equivalente aumentar la conductividad del edificio y simultáneamente darle mayor inercia térmica a los muros. Otra tendencia interesante a observar es que para una determinada conductancia del muro, darle inercia térmica al muro (independientemente de su conductancia) ayuda a reducir las necesidades.

Relación entre el coste energético anual, la forma de aislamiento del exterior y la carga interna

Esta otra figura muestra la repercusión sobre la energía total (la que el equipo debe “mover”) anual en función de la conductividad del muro exterior y de su masa térmica. El edificio tiene diferente generación interna de energía. Desde una baja carga interna (izquierda) hasta una alta carga interna (derecha). Se aprecia que cuando la carga interna es baja se debe aislar muy bien para reducir las necesidades, algo menos al aumentar la carga interna y poco si la carga interna es elevada. Lo interesante es que a cualquier carga interna y para cualquier nivel de aislamiento el aumento de la inercia térmica ayuda a reducir las necesidades, aunque como se vio, su efecto es mucho menos acusado que el del aislamiento (la R).

Figura pág. 18:

No se distinguen los detalles con la suficiente claridad para dibujarla.

Relación entre el coste energético anual, la forma de aislamiento y el clima exterior

De forma similar al caso anterior el clima afecta al diseño de los edificios. La gráfica muestra un clima frío (a la izquierda), uno moderado (en medio) y otro caluroso (a la derecha). El nivel de aislamiento óptimo, que produce la menor necesidad, debe ajustarse obviamente al clima. Lo interesante es que parece indicar que en cualquier caso la masa térmica ayuda a reducir las necesidades.

Figura pág. 19:

No se distinguen los detalles con la suficiente claridad para dibujarla.

Nota: Todos estos puntos son generales y cada caso debería analizarse por separado. El objetivo es dar al lector una idea de los resultados que se pueden esperar al realizar una simulación. En general, la experiencia de los arquitectos ayuda de forma intuitiva a diseñar de forma eficiente los edificios en muchos casos.

Relación entre los datos meteorológicos medios de un año tipo meteorológico y la importancia de la simulación dinámica o estática de la transferencia de energía en los edificios

(T_m –temperatura media anual, DT – oscilación media diaria de temperaturas, DTA –Oscilación media anual de temperaturas, T_{setf} – Temperatura de consigna interior en refrigeración, T_{setC} –Temperatura de consigna interior en calefacción).

Antes de emprender el trabajo de simulación de un edificio el profesional debería tener presente algunas ideas básicas importantes sobre una de las fuentes principales de “excitación o sollicitación” sobre las instalaciones del edificio: la climatología.

Los programas de simulación usan años meteorológicos tipo TMY (*Time Mean Year*). Estos pueden ser bien sin-

téticos (generados por un ordenador con datos medios mensuales) o reales, generados de una forma particular. No se trata un año muy frío o muy cálido, sino un año medio. En caso de usar datos reales se toman los últimos 30 años, se fijan ciertos índices (temperatura, radiación, etc.) y se elige cada uno de los meses del año de entre los 30 que mejor represente la media conforme a los índices fijados.

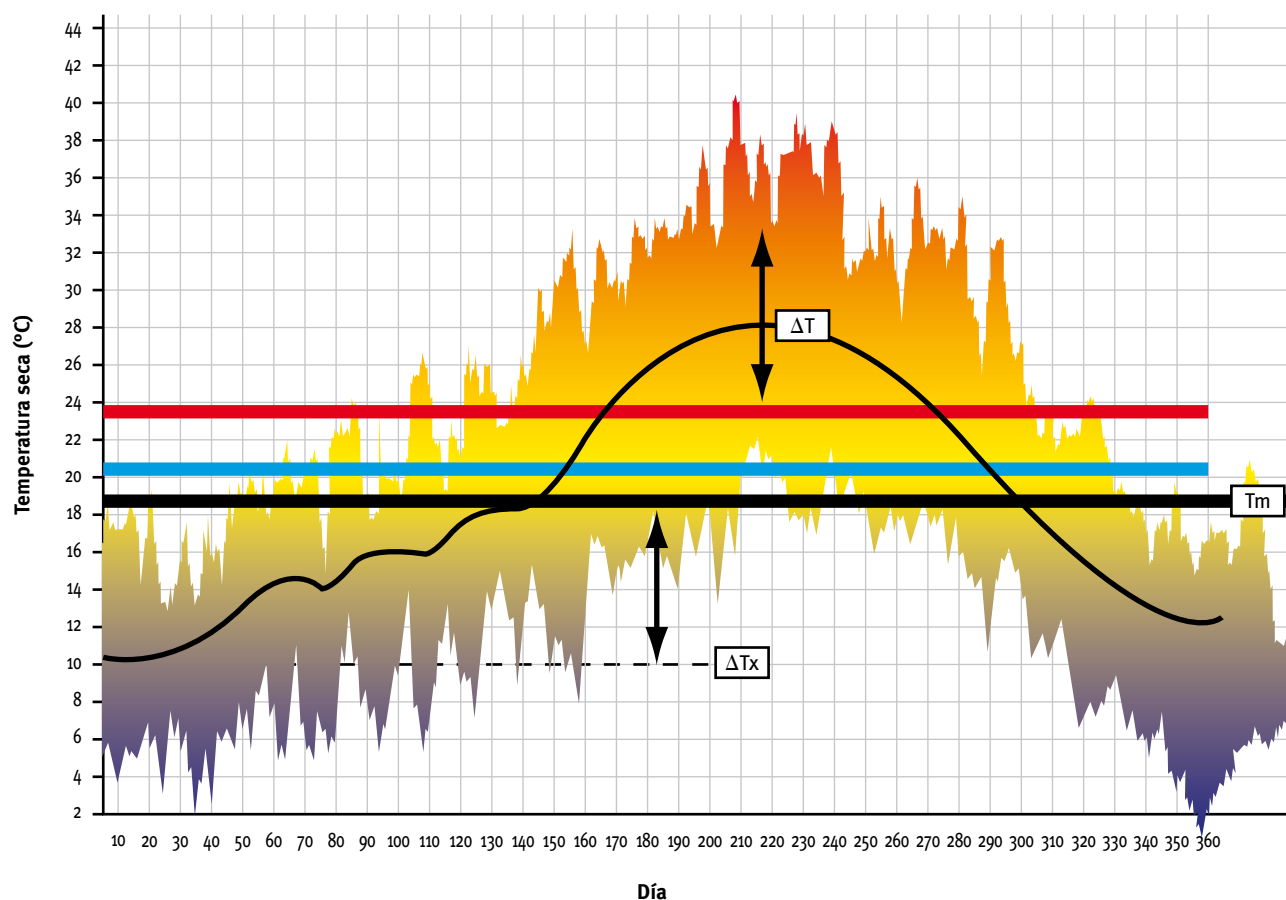
Estos años contienen datos horarios (esto es, un año juliano, con 8.760 horas), su almacenamiento suele tener formato binario (por ocupar menos espacio y ser más rápida su lectura) y, por lo tanto, suelen tener extensión “.bin”.

El libro recomienda obtener ciertas estadísticas del año tipo para predecir si la consideración de la acumulación de energía de la masa del edificio (que genera su dinámica) va a ser importante, no importante o crítica. En caso de no ser importante un cálculo suponiendo que los muros siempre están en estado estacionario prácticamente daría un resultado similar. El cálculo en estacionario se puede llevar a cabo con facilidad con una hoja de cálculo o en el caso de invierno el uso de los grados día no daría una buena aproximación a la demanda de energía del edificio, como norma general. Veamos cuándo ocurre esto.

Condiciones ambientales de Sevilla, desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre

Máximo: 41,1 °C a las 14 horas del 21/7

Mínimo: 2,2 °C a las 6 horas del 7/12



La gráfica ilustra los 8.760 valores de temperatura horaria. Sobre estos valores se ha marcado en rojo la temperatura de consigna interior del edificio en verano (24 °C), y en azul su valor de invierno (22 °C). El clima oscila a su alrededor fuera. Necesitamos ciertos valores estadísticos de este año medio:

T_m : temperatura media del año

ΔT_x : oscilación anual de la temperatura media diaria

ΔT : media anual de la oscilación diaria de temperatura

Establezcamos con estos índices los límites de las zonas crítica, importante y no importante.

Invierno

Los efectos dinámicos (acumulación de energía) **no son importantes** si:

$T_{\text{consigna calefacción}} > T_m + \Delta T$.

Esto es, el interior del edificio prácticamente siempre debe estar por encima de la temperatura exterior. Siempre hace frío.

Los efectos dinámicos son **críticos** si:

$T_{\text{consigna calefacción}} < T_m - \Delta T_x$.

Esto significa que el clima en invierno se mueve a menudo por encima de la temperatura fijada dentro de edificio.

Verano

Los efectos dinámicos **no son importantes** si:

$T_{\text{consigna refrigeración}} < T_m - \Delta T$.

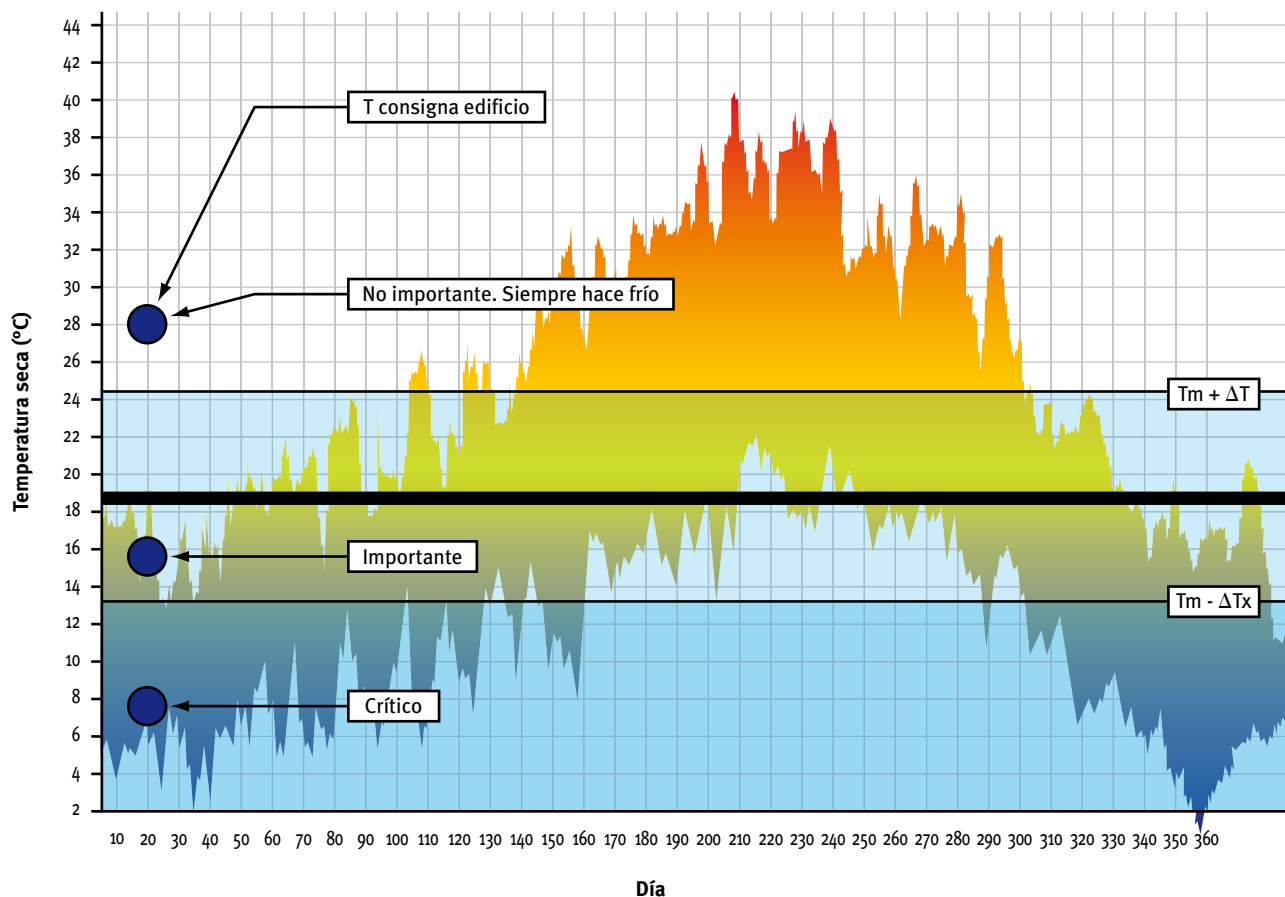
Esto significa que en verano el clima oscila casi siempre por encima de las condiciones del edificio y hay poca oportunidad de aprovechar las temperaturas frescas y el enfriamiento de la masa del edificio para ayudar a mantener las condiciones interiores.

Los efectos dinámicos son **críticos** si:

$$T_{\text{consigna refrigeración}} > T_m + \Delta T_x.$$

Esto significa que el clima está con mucha frecuencia por debajo de la temperatura del edificio y eventualmente sube por encima.

Representación de la importancia de la dinámica de la masa del edificio en función del clima y de la consigna del edificio. Invierno

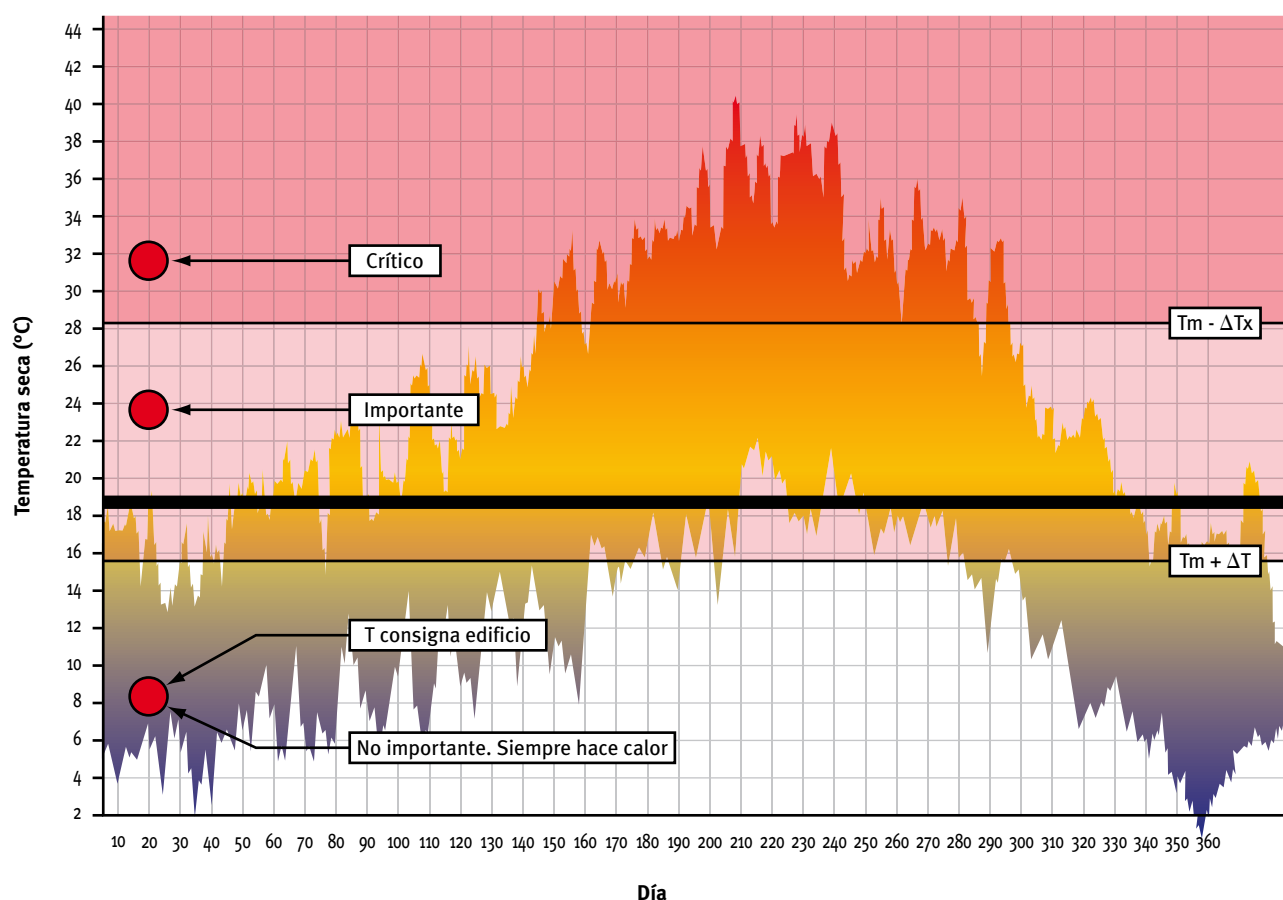


Cuando denominamos el caso como crítico, esto es, el caso en el que se hace indispensable un cálculo dinámico del edificio, nos referimos a que los errores en los cálculos, si se hubiera supuesto condiciones estacionarias, pueden llegar a ser del 200% respecto de la hipótesis de flujo de calor estacionario para los muros. Sin embargo, aunque esto puede alarmar, se debe tener presente que estos errores aparecen cuando el clima oscila (en invierno y/o verano) cerca de las condiciones interiores del edificio y por lo tanto las necesidades energéticas absolutas no son elevadas. Por ello, un error del 200% sobre una cantidad pequeña no es dramático. Dicho de otro modo, en valor absoluto no el cálculo no considerando la masa no es crítico.

La zona donde los efectos son importantes (pues el error en valor relativo es del orden de 20-25% si no se considera la masa) es, sin embargo, la zona donde el valor absoluto del error puede ser grande. Por lo tanto, en esta zona sería indispensable hacer un cálculo teniendo en cuenta la acumulación o pérdida de energía de la masa del edificio.

En la zona no importante no existe demasiado riesgo, y ambos errores, el relativo y el absoluto, se reducen. La hipótesis de flujo de calor estacionario para los muros da resultados similares al tener en cuenta la masa del edificio.

Representación de la importancia de la dinámica de la masa del edificio en función del clima y de la consigna del edificio. Verano



Hay que tener presente que un clima puede tener unas características (no importante, importante, crítico) en un periodo (verano o invierno) y otras en otro periodo.

Veamos un ejemplo numérico de aplicación de todo lo anterior.

Los datos obtenidos para un cierto año medio tipo son:

$T_m = 16,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_x = 6,6\text{ }^{\circ}\text{C}$

T_m : temperatura media del año

ΔT_x : oscilación anual de la temperatura media diaria

ΔT : media anual de la oscilación diaria de temperatura

Invierno

$T_m + \Delta T = 26,6\text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ Frontera No importante–Importante

$T_{\text{consigna_invierno}} = 20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_m - \Delta T_x = 10,0\text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ Frontera Importante–Crítico

Conclusión:

Si la temperatura de consigna del edificio en invierno hubiera estado por encima de $26,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, la consideración de la masa del edificio en la simulación sería poco relevante. La hipótesis de flujo de calor estacionario en los muros daría resultados similares.

Si la temperatura está entre $26,6$ y $10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, como es el caso de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, la masa del edificio es importante en la simulación. Los errores relativos no son muy grandes, pero al haber muchas horas en que se puede acumular un calor considerable en la masa del edificio, el error absoluto al despreciar la masa puede llegar a ser grande.

Si la temperatura de consigna fuera menor que $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, los errores relativos pueden llegar a ser grandes pero de forma efectiva se acumula poco. El error absoluto no es, por lo tanto, tan grande al depreciar la acumulación.

Verano

$T_{\text{consigna_verano}} = 25,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_m - \Delta T_x = 23,20 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ Frontera Importante–Crítico

$T_m + \Delta T = 6,6 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ Frontera No importante–Importante

Conclusión:

Si la temperatura de consigna del edificio en verano hubiera estado por encima de $23,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, como es el caso $25,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, los errores relativos son elevados, pero no lo absolutos (zona crítica). La hipótesis de flujo de calor estacionario en los muros daría resultados erróneos pero en valor absoluto pequeños.

Si la temperatura de consigna estuviera entre $23,2$ y $6,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ la consideración de la masa del edificio sería importante. Los errores relativos no serían grandes, pero al haber muchas horas en que se puede enfriar la masa del edificio el error absoluto al despreciar la masa puede llegar a ser grande.

Finalmente, si la temperatura de consigna fuera menor que $6,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ –lo cual en este caso no es muy lógico– el clima fuera siempre está por encima del interior del edificio y, por lo tanto, el cálculo bajo la hipótesis de flujo estacionario (despreciando la masa) daría resultados parecidos a cálculo más preciso considerando la masa.

En definitiva, para el clima y las temperaturas de consigna escogidas más arriba la consideración de la masa del edificio es: importante en invierno y crítico en verano. A efectos prácticos es imprescindible hacer la simulación teniendo en cuenta la dinámica del muro en invierno y en verano; si no se hace, se sabe que habrá un error relativo alto.

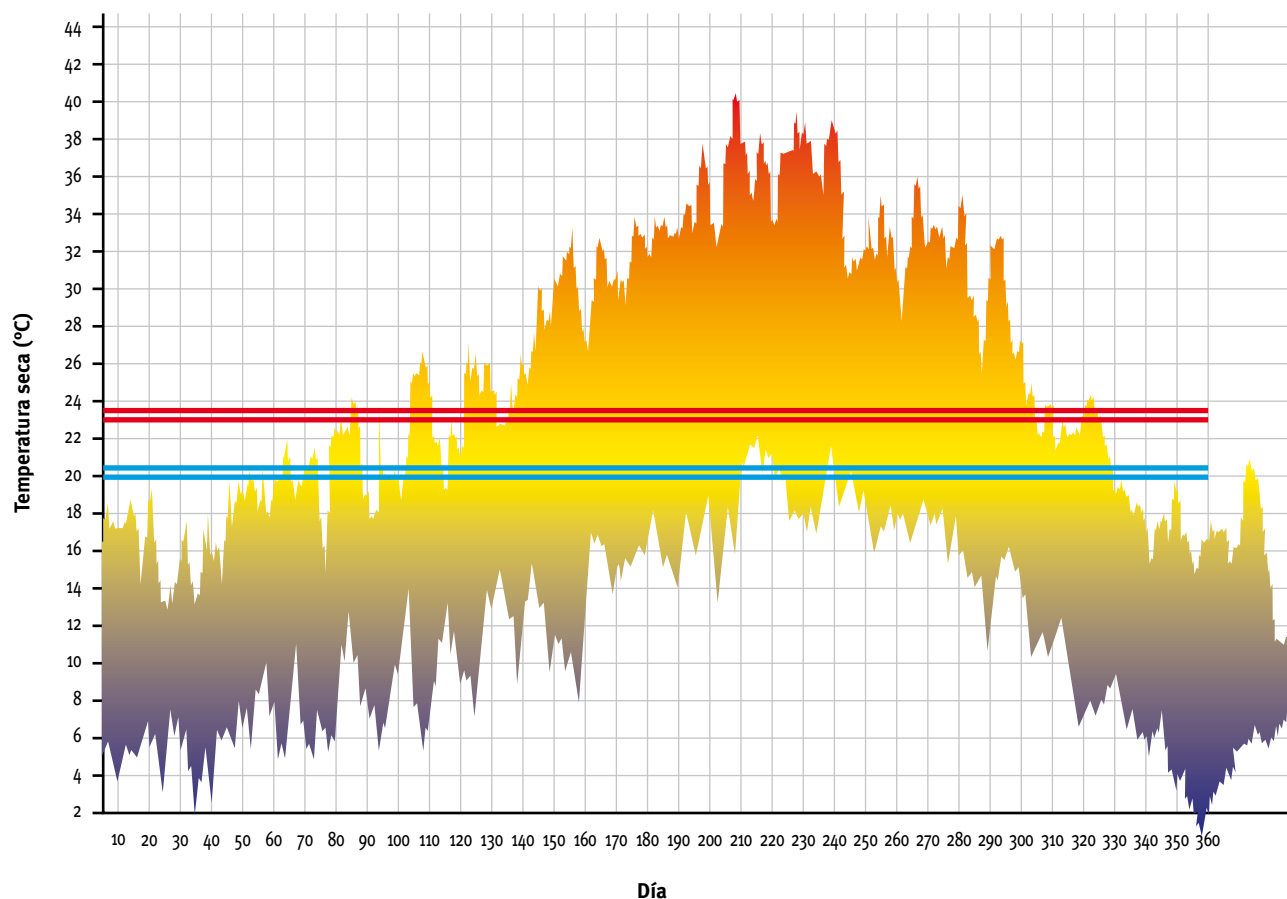
Las figuras muestran las temperaturas de consigna ($24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en verano; $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en invierno) representadas sobre el año tipo medio de Sevilla y el de Burgos, usados por los programas LIDER y CALENER. Se han elegido obviamente estos porque muestran la clara diferencia en la posición del clima respecto al edificio.

Se representan las temperaturas de consigna en dos climas diferentes.

Condiciones ambientales de Sevilla, desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre

Máximo: $41,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 14 horas del 21/7

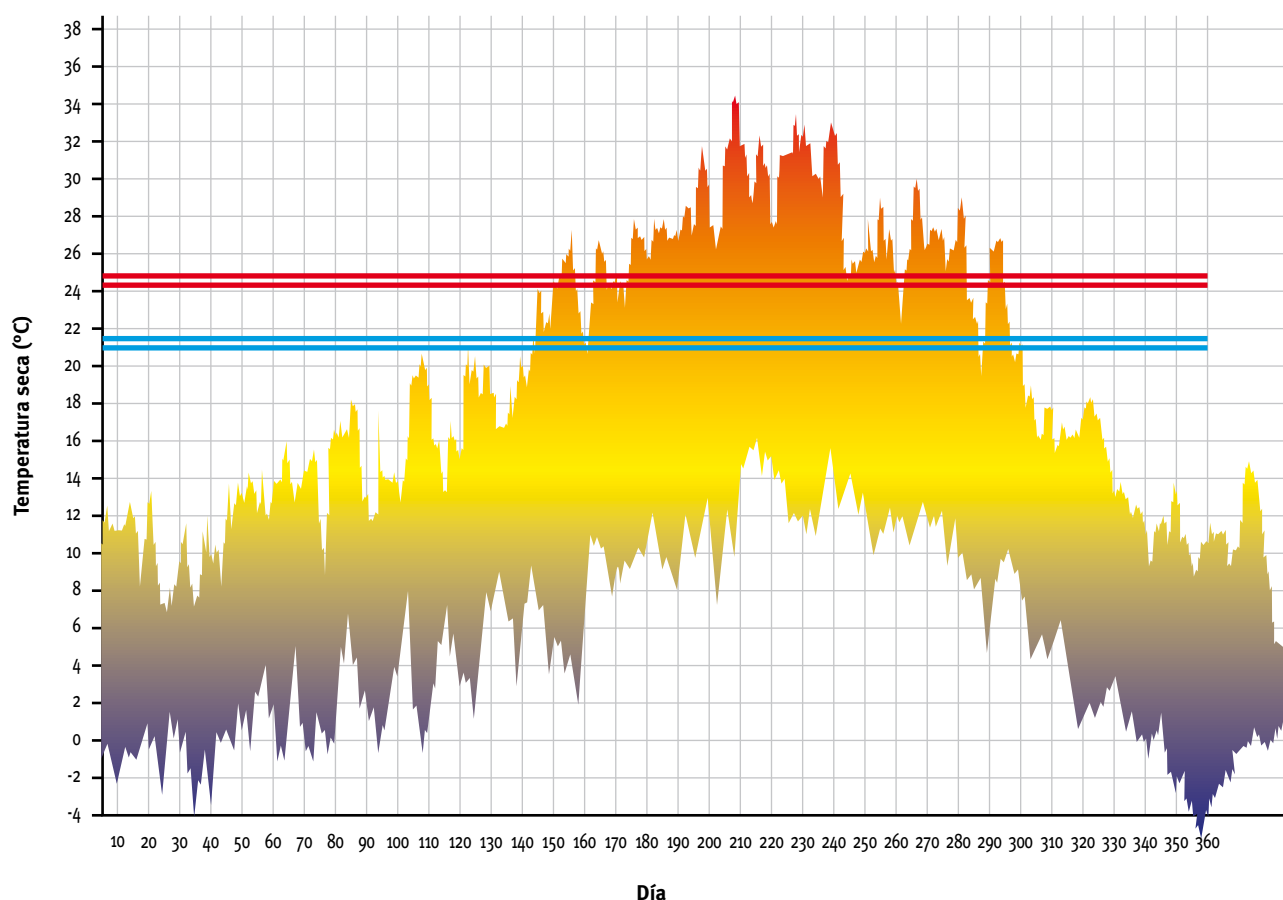
Mínimo: $2,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 6 horas del 7/12



Condiciones ambientales de Sevilla, desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre

Máximo: 41,1 °C a las 14 horas del 21/7

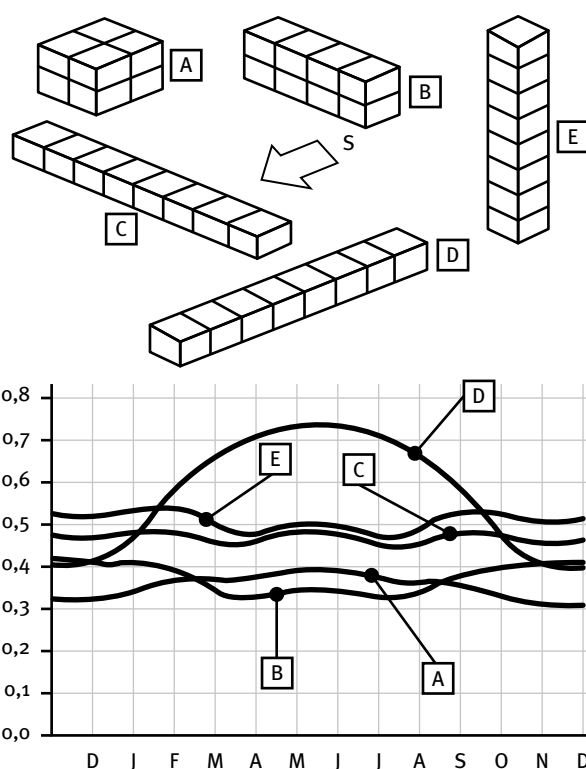
Mínimo: 2,2 °C a las 6 horas del 7/12



Análisis de la insolación

¿Cómo afecta la forma y la orientación a la cantidad total de energía recibida del sol por el edificio por mes?

La figura (reproducida de OJO) muestra para el hemisferio norte cómo influye la forma y orientación del edificio respecto del sur sobre la cantidad de energía que recibe el edificio desde el sol. Esta magnitud sería la suma (integración) de la cantidad de radiación que recibe el edificio a lo largo de los días de cada mes. Dicha cantidad depende de la latitud y de la orientación de cada superficie exterior del edificio. Una superficie que siguiera el movimiento del sol de modo que sus rayos incidieran perpendicularmente a ella sería la que más energía captaría. Ese no es el caso de las superficies del edificio. Así, si para la superficie del edificio se supusiera que toda ella fuera una superficie que siguiera al sol, se calculara la energía captada y se hiciera lo mismo con la superficie real y se calculara su cociente para cada mes, se obtendría la gráfica de la figura.



El centro del eje x (M, J, J, A) representa el verano, y los laterales representan el invierno. Es interesante observar que un edificio como el D, por ejemplo, capta poca energía en invierno y sin embargo en verano tiene un “pico” en la energía captada. Este tipo de edificios es, por lo tanto, extremadamente sensible a su orientación. Pequeños giros afectan mucho a su demanda en verano. Cuando se gira hasta

Al alcanzar su posición C se observa un aumento de la captación solar en invierno y una reducción drástica en verano. Curiosamente si el edificio C se pone vertical representa una mejor captación de energía solar durante todo el año que el C.

Edificios planos como el B poseen compacidades bajas (relación entre el volumen y la superficie exterior V/A), por lo tanto tienen tendencia a intercambiar mucho con el exterior: su “contacto térmico” con el exterior es grande (UA [W/k]) en comparación con su capacidad interna de acumular energía. Así, si su orientación es sur, recibirán calor del sol en invierno (aunque tampoco demasiado) y poco en verano (el menor de los de la figura). La conjugación de ambos hechos debería tenerse presente al simular y al diseñar el edificio según su localización y uso.

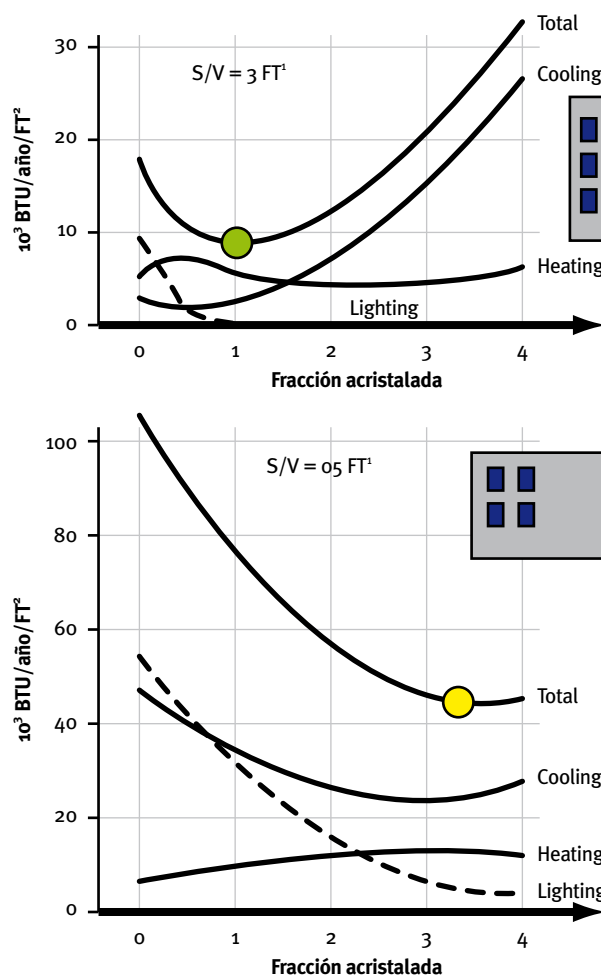
Por último, el edificio A es el de mayor compacidad de todos. Se trata del edificio que menos energía capta en invierno del sol aunque en verano capta más que el edificio plano B.

Efecto cruzado de la compacidad del edificio y la iluminación natural y artificial

Sobre todo en el sector terciario; oficinas, hoteles, hospitales, colegios, etc., el consumo de energía debido a la iluminación artificial puede ser importante. Por ello se les suele proveer con grandes cristalerías, pero esto tiene su contrapartida en la climatización. Veamos esto con un poco más de detalle.

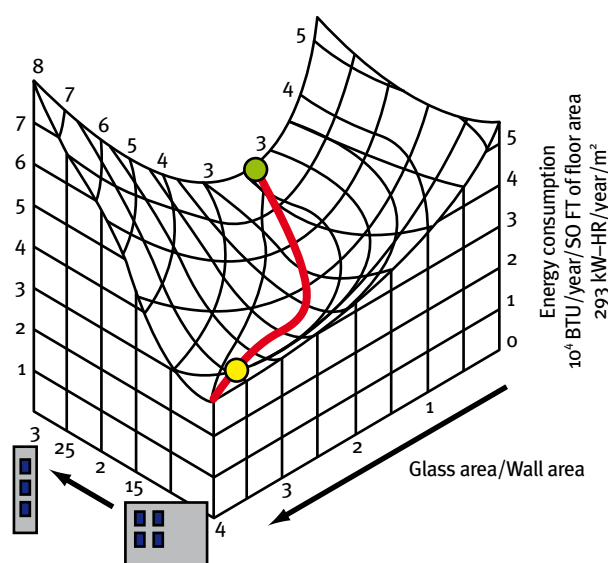
Existe un índice que controla en gran medida las necesidades del edificio: la compacidad. Un edificio poco compacto es un edificio con mucha superficie y poco volumen. La figura (OJO) muestra cómo afecta el porcentaje de superficie exterior que es acristalada en función de la compacidad del edificio. Cuando el edificio es poco compacto la superficie acristalada hace bajar rápidamente el uso de luz artificial (que alcanza con facilidad el interior del edificio) pero por el contra-

rio hace subir la demanda de calor al principio aunque más tarde ayuda a calentar el edificio. Sin embargo, la refrigeración se dispara. En conclusión, el edificio debería tener un porcentaje de acristalamiento óptimo relativamente pequeño.



Cuando el edificio es compacto el aumento de la superficie acristalada afecta menos a la iluminación artificial ya que muchas partes del edificio quedan ocultas al sol. Su tendencia con respecto a la calefacción y refrigeración son similares al edificio poco compacto aunque menos sensible que éste. Como resultado, el porcentaje de acristalamiento óptimo en edificios más compactos es superior.

La siguiente gráfica (OJO) muestra lo expuesto anteriormente, pero en 3D. Los ejes representan la compacidad, porcentaje acristalado y el eje z representa la demanda total de energía por los tres servicios: iluminación, calefacción y refrigeración.



Efecto del uso del edificio por parte de los ocupantes

Las simulaciones son modelos de cálculo “deterministas” (si se repite el mismo proceso el resultado es siempre el mismo y predecible). Sin embargo, la naturaleza no es determinista y claramente el ser humano no lo es aunque siga patrones que puedan así indicarlo. Lo que habitualmente se llama domótica o gestión automatizada de las necesidades del edificio (léase servicios de iluminación, ventilación, calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria, etc.) se aplica sólo en grandes edificios modernos, pero existe un inmenso parque de antiguos edificios y de viviendas en las que no existe esa gestión.

Así, muchos estudios sobre edificios sondados para la medida de su consumo de energía han demostrado que el uso que sus ocupantes hacen de él puede producir desviaciones del consumo de hasta el 100%. Estudios en Holanda, previos al proceso de certificación energética iniciado en toda Europa, demostraron que una promoción de viviendas idénticas tenía consumos de energía realmente distintos en función del uso que hacían las familias.

Es muy importante tener presente este punto en cualquier estudio basado en simulaciones (cálculos) anuales de necesidades de energía en la edificación.

1.2 GENERACIÓN DE CO₂

La generación de CO₂ fósil (aquel que proviene de combustibles fósiles como carbón o petróleo) debe ser

limitado debido al conocido como calentamiento global del planeta. La cantidad de CO₂ fósil producida por un edificio en un año medio (climatológicamente) sólo puede ser descubierta a través de una simulación. Los cálculos tradicionales de potencias máximas (cálculos de cargas) no sirven. Hay que conocer la trayectoria en el tiempo sobre el uso y el funcionamiento del edificio. Los programas oficiales de certificación energética de edificios buscan clasificar los edificios –bajo ciertas restricciones– en función de su generación de CO₂.

¿Basta con saber la cantidad de CO₂ fósil global? Queda claro que ese es el objetivo final; sin embargo, sería interesante, como principio general, desglosar las emisiones en función de quién las provocó, para poder corregirlas. Ese quién puede concretarse en varios niveles. Desde en qué servicio fueron causados (ACS, calefacción, refrigeración, iluminación, transporte de fluidos, etc.), hasta incluso poder llegar a asignar a un determinado elemento arquitectónico (una ventana o un muro con cierta orientación) qué repercusión tiene su demanda de servicio –de frío o calor– en emisiones de CO₂ originados por el sistema que cubre esa demanda. Un desglose así es muy útil para el diseño arquitectónico.

Hay pocos programas de simulación que hagan un análisis de emisiones de CO₂. Sin embargo esto está cambiando rápidamente debido a la solicitud por parte de la administración de estudios medioambientales en todo el mundo. Por ejemplo, EnergyPlus, en su versión 2.0, ya incluye un cálculo de emisiones contaminantes que incluye el CO₂.

DOE2 (en su versión PowerDOE) no incluye este tipo de análisis pero incluye el concepto de medidor o contador de energía (energy meter). Esos medidores pueden asignarse a cualquier equipo o sistema que pida energía de forma que se sepa quién pidió energía, cuánta y cuándo. Divide los medidores en dos grupos: de combustible (FM- fuel meters) y de electricidad (EM- Electric meters). Pueden existir 15 de cada tipo. Dentro de los FM existe una subcatalogación en función del tipo de combustible usado:

- Gas natural.
- Butano.
- Propano.
- Gasóleo.
- Etc.

Adicionalmente cada medidor puede tener asignado un régimen tarifario diferente.

Los medidores pueden colocarse a nivel de zonas, sistemas o equipos.

Este concepto de medidores es interesante ya que permite corregir los problemas de emisiones. Para ello, posteriormente al cálculo se debe traducir dicho consumo en emisiones de CO₂ fósil. Para diferentes tipos de combustibles existe una generación de CO₂ diferente por kilogramo de combustible o por metro cúbico normal del mismo. En cuanto a la electricidad, si ésta es producida externamente (no hay un sistema de cogeneración), las emisiones dependen de la estructura energética del país o de la compañía productora de electricidad (lo que se denomina energía primaria –la consumida por el productor o la compañía eléctrica– y la energía final –la electricidad entregada a los consumidores–). Estos últimos deben revisarse periódicamente.

La tabla siguiente resume los valores para conversión en CO₂ fósil para España:

Recurso energético	Emisión de CO ₂ fósil
Combustibles	
Gas natural	204 g/kWh (térmico)
Gasóleo C	287 g/kWh (térmico)
GLP	244 g/kWh (térmico)
Carbón	347 g/kWh (térmico)
Electricidad	
Peninsular	649 g/kWh (eléctrico)
Extrapeninsular	981 g/kWh (eléctrico)
Peninsular horas valle (o-8 h)	517 g/kWh (eléctrico)
Extrapeninsular horas valle (o-8 h)	981 g/kWh (eléctrico)
Paso de energía final a primaria	
Eléctrica	kWh(1ª)Productor/kWh(final) consumidor
Peninsular	2,6
Extrapeninsular	3,35
Peninsular horas valle (o-8h)	2,02
Extrapeninsular horas valle (o-8h)	3,35
Combustibles	
Gasóleo	1,08
GLP	1,08
Gas natural	1,01
Carbón	1

Fuente: IDAE



Tecnologías de la información TI aplicadas a la simulación

2.1 INTRODUCCIÓN

El bajo coste de ordenadores personales cuya potencia de cálculo y capacidad de almacenamiento era, hace tan sólo unas décadas, accesible a pocas instituciones y empresas, ha hecho que sustituya actualmente a la calculadora de sobremesa. Pero un ordenador es algo más que una calculadora, ya que sirve como medio audiovisual y de comunicación. Así, la misma máquina donde hacemos los cálculos del trabajo diario sirve de acceso a una enorme cantidad de información a través de Internet.

La facilidad para intercambiar, copiar, transportar información también está creando ciertas dificultades en el desarrollo de cierto tipo de programas de ordenador. La información carece actualmente de valor en sí misma; por el contrario, sí lo tiene el conocimiento de qué hacer con ella.

El desarrollo de programas complejos y específicos para una determinada tarea se suele hacer bajo el encargo de una empresa de software y normalmente su contenido se mantiene privado con el objetivo de incrementar la productividad y, por tanto, la competitividad de la empresa. Salvo excepciones, raramente estos programas complejos tienen fines públicos. Normalmente, los programas más sencillos se contratan con fines publicitarios y/o divulgativos de los productos de la empresa.

Con esto se pretende recalcar el entorno socio-económico donde han aparecido los programas existentes, que pretenden realizar una simulación energética de un edificio.

2.2 HISTORIA Y ESTADO DEL ARTE EN CUANTO A PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

En EE.UU.:

Programas como el DOE2 (de EE.UU.) surgieron como resultado de la inversión lenta pero constante de la administración americana desde 1970. De la misma época es el BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) que fue encargado al NIST (EE.UU.).

Muchos de ellos se empezaron a programar con lenguaje como el FORTRAN, que han evolucionado hacia un lenguaje más similar a C++ o JAVA y están orientados a objetos. Otros programas como el TRNSYS (Transient Simulation of Systems) de la Universidad de Wisconsin-Madison (EE.UU.) tuvieron y tienen un ámbito de existencia universitario y no estaban orientados inicialmente hacia la productividad o la industria por su origen universitario, aunque recientemente se han creado aplicaciones para generar los modelos-D con mayor facilidad y productividad (SimCAD).

Lo mejor de DOE2 y BLAST se unió en un nuevo programa llamado Energy-Plus.

En Europa:

(OJO)

2.3 EL PROBLEMA DE LA INFORMACIÓN Y LOS ACTORES QUE LA GENERAN

Normalmente un edificio, al contrario que un coche, se diseña cada vez. El proceso edificatorio no es, pues, un proceso de fabricación en serie. Por tanto, la materialización del edificio tanto en fase de proyecto como en fase de obra implica a muchos agentes (arquitecto, ingeniero, director de obra, proveedores, fabricantes...) que deben trabajar coordinadamente en la realización de un proyecto de edificio concreto.

Por tanto, los agentes implicados desarrollan distintas tareas en torno a un objetivo común:

- Diseño arquitectónico.
- Cálculo y diseño de instalaciones.
 - Suministro de servicios.
 - Instalación eléctrica.
 - Instalaciones de telecomunicaciones.
 - Instalaciones de climatización.
 - Etc.

- Previsión de medios materiales y humanos.
- Suministros de productos, materiales y equipos de la construcción: materiales aislantes, materiales básicos, estructurales, para fachadas y particiones, para instalaciones, aislantes e impermeabilizantes, etc.

No toda la información que cada uno de ellos genera es útil para los demás, pero sí puede serlo en una parte importante. Además, el formato de la información puede ser distinto. Sin embargo, sería muy interesante el que el formato fuera estándar, de manera que cualquier empresa de programación pudiera acceder a la información y escribir aquella que genere su programa en ese mismo formato. Además, esto haría que la información que algún actor genera en un momento dado pueda ser reutilizada por otro, sin necesidad de volver a transcribir aquella parte que le es de interés en ese momento.

Esto todavía puede parecer lejano; sin embargo, ya existen tendencias en esta dirección. Por ejemplo, algo así, pero mucho más ambicioso que el simple establecimiento de un formato, lo constituye el IFC (IAI-International Alliance for Interoperability) que ha sido convertido en estándar ISO (ISO/PAS 167).

Organigrama pág. 31:

Los enunciados están en anglosajón (?) y, además, no se pueden leer correctamente porque se cortan en sus cajas.



Modelo matemático para la simulación térmica

3.1 CONCEPTOS

Los conceptos sobre la simulación de sistemas físicos con computadoras está evolucionando rápidamente estos últimos años, debido a las limitaciones de la representación discreta de cualquier magnitud en un ordenador, así como también a que los métodos tradicionales de análisis tienen su origen en métodos matemáticos originados cuando no existían computadoras.

Someramente, una simulación consiste en predecir cronológicamente el comportamiento de un objeto físico con un ordenador. La cronología tradicionalmente se obtenía con un tiempo de muestreo fijo determinado. En la literatura anglosajona se llama “discrete time simulation”, simulación en tiempo discreto. Esta es la forma como la mayoría de los programas de simulación de edificios actuales trabajan, aunque la tendencia está cambiando hacia lo que se llama simulación por eventos discretos, o en inglés “discrete event simulations” (DEVS). Se ha demostrado que esta forma de simulación engloba a la anterior como un caso particular.

Si hacemos un símil con una orquesta, el primer método representa el caso en que todos los músicos tocan una nota simultáneamente cada cierto intervalo de tiempo (que en simulación de edificios suele ser 1 hora ya que la respuesta es más lenta), organizados por un director que lleva el ritmo. Si la nota de un cierto músico dura mucho, da lo mismo, cada intervalo de tiempo debe repetir la misma nota hasta que termine su duración y cambie a otra distinta.

En el segundo caso cada músico lleva un ritmo diferente. El músico cambia de nota cuando la duración de la anterior se acaba o –si se despista– cuando el director le envía una señal de que se está retrasando. Esto es

lo que se llama un evento. Hay eventos internos –del propio músico– o externos –del director u otro músico–. Se observa que ahora los intervalos temporales no son regulares, cada músico sufrirá un cambio en función de su partitura y esto hará que un cierto componente de la orquesta sea llamado, para que cambie de nota, sólo cuando sea necesario. Por todo lo anterior, estos métodos ofrecen una rapidez de cálculo mucho mayor con precisión similar. Además existe otra ventaja: los músicos no tienen porqué estar todos en el mismo teatro –léase ordenador–. Pueden estar distribuidos e ir enviando sus notas para componer la melodía completa. Esto aumenta mucho la capacidad de cálculo.

3.1.1 Partes habituales en que se divide el proceso de simulación

Todos los programas de simulación están organizados del modo siguiente:

Pretratamiento

- Representación del objeto que se pretende simular en un modelo-D (definición): la información se guarda codificada en cierto formato, por ejemplo BDL, CTE, DXF, IFC, FIDE, etc., y sirve para definir lo que se pretende simular. Los programas gráficos de CAD ayudan a la introducción y generación sencilla del modelo. Esta etapa suele ser costosa por su tamaño en tiempo y precisa de ciertos conocimientos previos. Algunos programas disponen de un lenguaje propio que permite crear un pequeño programa (scripts en inglés), para automatizar la creación del modelo-D (dando valores por defecto en función de ratios de superficie, etc.).

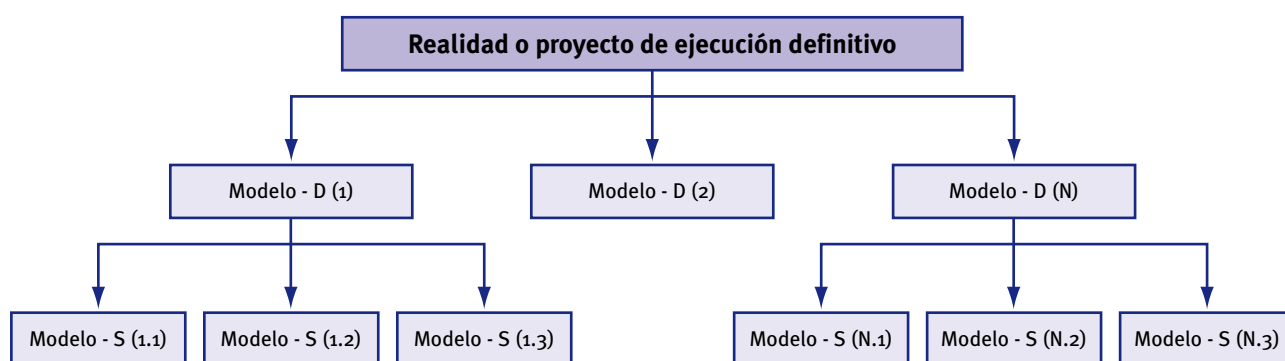
Simulación

- Generación de un modelo-S (simulación) matemático y/o informático que simula el comportamiento: contiene información específica generada a partir de aquella que posee el objeto modelo-D anterior.
- Registro de cierta información estadística con la cadencia requerida: horaria, diaria, mensual, anual.

Postratamiento

- Representación de los resultados.

Aunque el modelo real a simular sea único, cada programa de simulación puede expresar la información en un modelo-D de manera distinta. Es posible también que en función de las capacidades de la simulación el modelo-D carezca de cierta información originalmente presente en el modelo real y a su vez puede ocurrir que el modelo-S generado no use toda la información del modelo-D.



Adicionalmente cabe la pregunta: ¿es posible trasvasar información de un modelo-D a otro? La misma pregunta entre modelos-S no tiene sentido, ya que éstos se generan a partir de un modelo-D. Más aún: el modelo-D, ¿podría ser compartido por más de un agente de la construcción? (léase arquitecto, ingenieros, etc.). Parece obvio que al menos sería deseable, ya que se incrementaría la productividad.

3.2 FORMACIÓN DE MODELOS-D DE EDIFICIOS. GEOMETRÍA

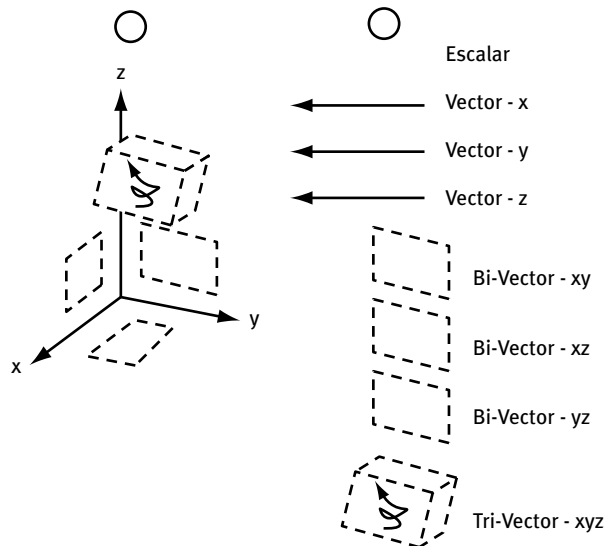
La formulación matemática de los problemas físicos ha evolucionado mucho. Actualmente se ha conseguido una unificación de muchos conceptos matemáticos que antes estaban disgregados y que anteriormente representaban distintas visiones de un mismo objeto matemático. Esto está originando que la formulación discreta de las ecuaciones físicas que se usan en el cálculo por ordenador esté sufriendo un interesante cambio.

Cada día parece más clara la estrecha relación entre la física y la geometría. Del mismo modo que estamos

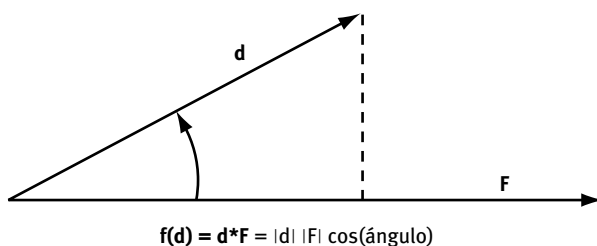
acostumbrados a hacer operaciones con números (1, 2, $2/3$, π , etc.) que sabemos sumar (+) y multiplicar (*) –dividir es multiplicar por el inverso–, se ha descubierto una generalización llamada álgebra geométrica. Los números no sólo tienen dimensión (o) –también llamados escalares–: “1” lápiz es “1” lápiz independientemente de su longitud, grosor, orientación, etc. Precisamente esta propiedad ha hecho que se utilicen los escalares para representar cosas como el dinero (100 Euros) o la energía (100 Julios), ya que son independientes de la forma que tengan (monedas o billetes) o del tipo que sea (eléctrica, química, térmica, etc.), respectivamente.

Hace tiempo se descubrió que existen otros objetos matemáticos que también se pueden sumar y multiplicar (y dividir) y que tienen dimensiones superiores; los que tienen una dimensión (1D) son vectores, los que tienen dos dimensiones (2D) son bi-vectores, los de tres (3D) tri-vectores, etc. Todos ellos, al contrario que los números “normales” (de dimensión 0), tienen un sentido interno definido (positivo o negativo) y su multiplicación no es conmutativa en general. Forman lo que se conoce como un álgebra de Clifford o álgebra geométrica. Son como las piezas de un mecano: todos, salvo los escalares, tienen una orientación (positiva o negativa). Hay puntos

(o escalares), líneas (o vectores), superficies (o bi-vectores), volúmenes (o tri-vectores), etc. Así, el número más general tiene una representación, que se llama un multi-vector, como suma formal de piezas de distinta dimensión. Estos multi-vectores se pueden sumar, multiplicar y dividir y dan como resultado otro multi-vector. Veamos todas las “piezas” necesarias para generar un álgebra en tres dimensiones (3D) ($2^3=8$):



Sin entrar en más detalle, porque no es el fin de esta guía, ¿a dónde nos lleva todo esto? En física, el hombre transforma los objetos de la realidad en escalares (como la energía) porque son más fáciles de manipular. Por ejemplo, el trabajo que hace una fuerza (que tiene unidades de energía) se define por el producto escalar del vector que representa el desplazamiento d y otro que representa la fuerza F (o energía por unidad de longitud):



En realidad, esto se puede ver como una función que toma un objeto matemático con dirección (el desplazamiento d) que es pura geometría y devuelve un valor escalar con un sentido físico (energía). Esta función f define la intensidad de la interacción (por “unidad de magnitud geométrica”) y es lineal; $f(a+b)=f(a)+f(b)$ y $f(na)=n f(a)$, donde n es un escalar. A este tipo de objeto matemático f se le llama 1-forma (también existen como

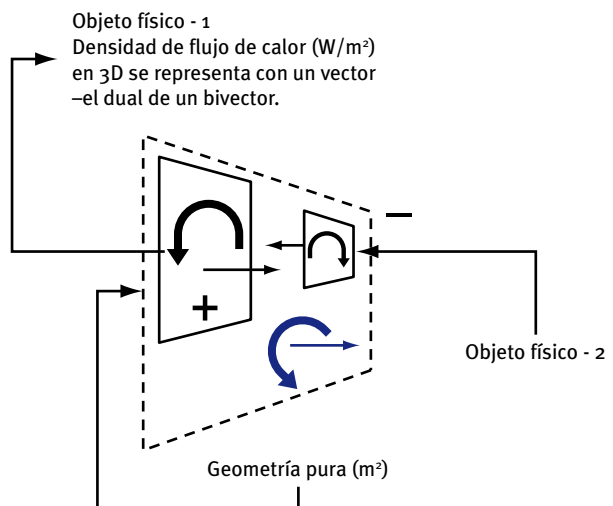
1-formas diferenciales cuando las magnitudes son muy pequeñas). Si lo que hace es tomar un bi-vector y devolver un escalar se le llama 2-forma.

Un ejemplo de una 2-forma diferencial es aquella que mide el área de una superficie dada colocada con cierta orientación o el flujo de materia o energía que atraviesa un cierto bi-vector geométrico. Aunque en 3D, por sencillez, los flujos se representan por su objeto complementario, un vector (el perpendicular al bi-vector). En 4D representar un flujo –magnitud que atraviesa una superficie– usando un vector ya carece de sentido.

La conclusión importante es que existen 2 tipos de objetos con los cuales el hombre se hace un modelo de la naturaleza, por un lado los objetos geométricos que miden cantidades de geometría de un cierto tipo y con cierta orientación y otros objetos físicos que están relacionados con magnitudes intensivas (por metro, por metro cuadrado, por metro cúbico, etc.) y que actúan sobre los primeros en un cierto lugar del espacio al cual están asignados. La fuerza, que mide la energía por unidad de desplazamiento, es una 1-forma que cuando se aplica a un cierto desplazamiento da como resultado la energía total transferida en esa dirección.

Del mismo modo, al aplicar una 2-forma diferencial que represente la cantidad de energía por metro cuadrado (intensidad de la interacción) sobre un bi-vector (un trozo de superficie concreto) obtenemos la energía total transferida: positiva si es en el sentido de la orientación del bi-vector y negativa en caso contrario.

Otro ejemplo sería una 3-forma. Al aplicar una cierta 3-forma sobre un tri-vector nos indicaría alguna propiedad asociada al elemento de volumen: cantidad de energía que contiene, agua, número de personas, etc., que será proporcional al tamaño que tenga el tri-vector.



Existen operaciones matemáticas que transforman k -formas diferenciales de un cierto grado k en otras de un grado superior $k+1$. Por esta razón se llaman productos exteriores, ya que el resultado devuelve un objeto fuera del conjunto original al que pertenecían sus operandos. Por ejemplo, las 2-formas que indican los flujos de energía a través de superficies se pueden combinar –operar– para que finalmente generen una 3-forma que indica cómo aumenta la energía contenida en el volumen encerrado por las superficies. Estas operaciones se utilizan en física para hacer balances de cualquier magnitud escalar (esto es, un número convencional): masa, energía, etc.

Los modelos matemáticos trocean la realidad en cantidades pequeñísimas hasta llevar el proceso al límite. Sin embargo los modelos de ordenador trabajan con modelos discretos. Incluso más, los cálculos se hacen con cantidades discretas (números en coma flotante de cierta precisión). Para evitar que crezcan el tiempo de cálculo y la necesidad de memoria, normalmente la unidad mínima de volumen –llamado local o espacio– se reduce al espacio definido –arquitectónicamente– por una habitación, recinto o un conjunto de ellos.

Un programa de simulación térmica de edificios trata de estimar las aportaciones de energía y masa (humedad) a un cierto volumen elemental, con el objetivo de mantener unas condiciones de confort preestablecidas en él.

Al volumen se le asocia una masa de aire húmedo como entidad física. Esta magnitud suele ser la principal en los programas de simulación actuales, dado que el control del ambiente interno de los sistemas habituales suele darse a través de las condiciones de temperatura y humedad de ese aire húmedo.

Los límites (o frontera) de dicho volumen son superficies geométricas que se deben definir. Por lo dicho anteriormente, se utiliza las superficies de los cerramientos (opacos o transparentes) de un local o conjunto de ellos. (Nota: incluso alguna de estas superficies podría ser una rejilla de difusión de aire).

Posteriormente se le debe asignar algún objeto físico (2-forma diferencial) a cada trozo de superficie que limita el volumen del espacio o local, que o bien se trata de una densidad de flujo de calor convectivo (W/m^2) o una densidad de flujo de aire (kg/sm^2) que aporta entalpía específica (kJ/kg , energía por unidad de masa) al volumen y que permite hacer los balances de energía sobre éste.

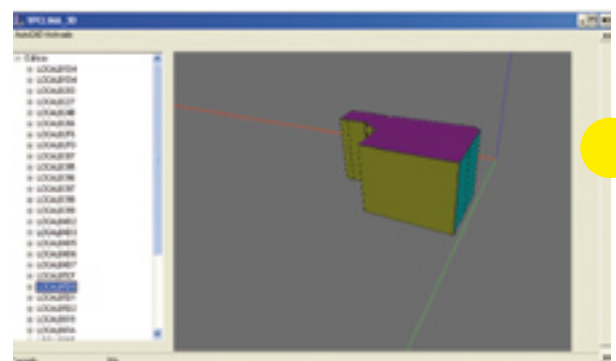
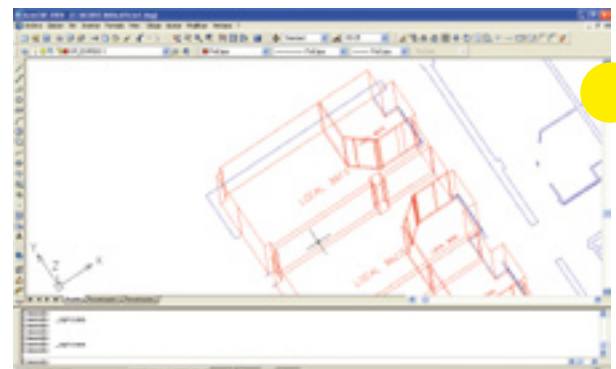
Si lo que se pretende es evaluar las condiciones de confort de las personas a través de sistemas que traten de controlar, no tan sólo las condiciones de temperatura y humedad, sino las condiciones radiantes, también sería

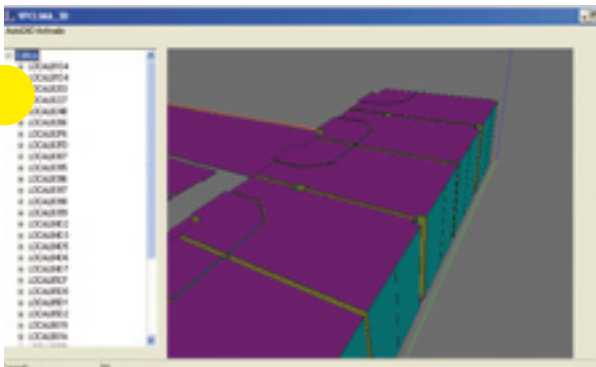
necesario disponer del valor de dicha magnitud radiante sobre las superficies.

En resumen, de alguna manera, si el edificio fuera como un queso gruyère, en una simulación estaríamos interesados en lo que afecta a las condiciones dentro de los “agujeros” del queso. Para observarlas seguiríamos la evolución de las temperaturas secas del aire en ciertos “agujeros” –o conjunto de ellos–, de su humedad relativa y/o la de alguna otra temperatura (por ejemplo suelos radiantes, etc.). Esta señal es la que condiciona, al sistema de control, a modular los sistemas actuadores: válvulas de fan coils, etc. Así es la dinámica de todas estas magnitudes de temperatura y humedad la que los programas de simulación intentan calcular.

¿Cómo se evalúa en un cierto instante, durante la evolución temporal de la simulación, el valor de dichos objetos físicos (flujos de energía, etc.)? ¿Qué relación existe entre sus valores en distintas superficies de un mismo volumen y entre volúmenes? Las respuestas a estas preguntas se verán más adelante.

Para ilustrar estos razonamientos, las figuras muestran la geometría generada por los planos de un hotel. Se puede apreciar un volumen asociado a la habitación y otro asociado a su aseo. Ambos se han tomado como locales o espacios (desde el punto de vista del modelo térmico) y coincide en este caso con los recintos (desde un punto de vista arquitectónico o funcional).

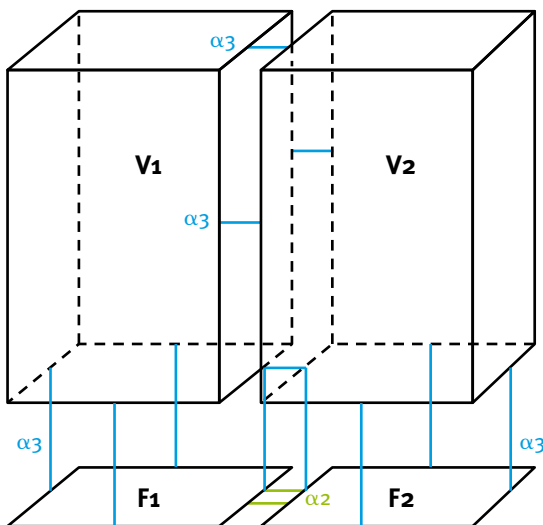




A cada elemento geométrico (superficie, volumen) se le asignan objetos físicos (flujos de calor, etc.) que se aplican sobre los geométricos para obtener cantidades absolutas –no específicas– de la magnitud física (por ejemplo, la cantidad de calor [J/s] que pasa por una superficie a un volumen).

A pesar de que este es el modelo físico-matemático común para cualquier planteamiento, diferentes programas de simulación crean un modelo-D (de definición) diferente como base para su simulación.

La universidad de Poitiers usa para la representación geométrica un modelo basado en g-maps (o mapas generalizados). Dicho modelo sigue la filosofía indicada más arriba. El edificio se genera en base a la “conexión o cosido” (matemáticamente: función de involución que llaman $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, en función de la dimensión de aquello que unen) de las piezas fundamentales del álgebra que se han visto anteriormente: puntos (0), líneas (1), superficies (2), volúmenes (3). Las figuras muestran ideas básicas del concepto y un ejemplo de una planta modelizada así. Para más detalles ver las referencias.



(a)

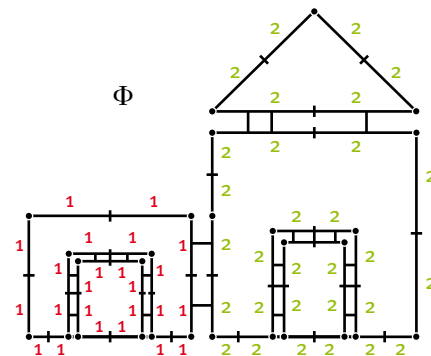
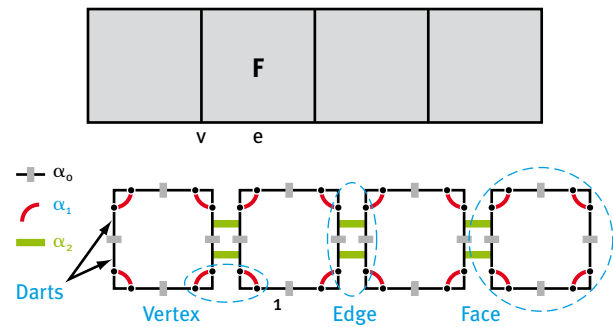


Figura pág. 39 inferior:

Enviar una imagen en mejor estado si es posible. De no serlo, habría que dibujarla.

Figura pág. 38:

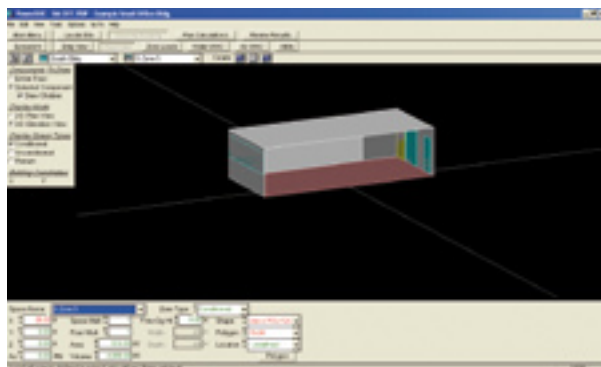
El dibujo de la derecha se ve muy mal y resulta difícil dibujarle, aunque sería mejor que se procurase enviarlo (en caso de tenerlo).

(b)

El programa ENERGYPLUS, cuando asigna objetos físicos a las superficies, utiliza un concepto también similar que se acerca a los conceptos físico-matemáticos. Así, cada muro real está representado por las dos superficies geométricas donde el objeto físico (densidad de flujo de calor) debe ser evaluado, aunque no comprueba que las superficies encierren un volumen.

Sin embargo, DOE2, un programa con más tradición, no usa la definición matemática anterior, usando la idea de formas diferenciales, sino que la superficie es única y representa una simplificación del objeto real. Dicho de otra forma, un muro real se simplifica e identifica como una superficie sin espesor, mientras que su definición físico-matemática requeriría, como se ha visto, de 2 superficies (una a cada lado del muro, con una orientación coherente con aquella del elemento de volumen que contornean y que sirven para calcular los flujos de alguna magnitud a través de ellos y hacia el volumen que delimitan). El programa DOE2 (que es el motor de cálculo del programa de certificación español CALENER-GT). LIDER o CALENERVyp también se basan en esta definición del modelo-D. El concepto de espacio (o local o volumen) es pura geometría. La simplificación de los objetos reales son asignados a estos espacios, pero sin ninguna comprobación de que su geometría forme el contorno de un volumen cerrado (en contraposición, el modelo-D de la universidad de Poitiers, si lo hace, aunque es de manejo algo más sofisticado).

Esta confusión habitual entre objeto geométrico, objeto físico y objeto real crea ciertas dificultades de construcción del modelo-D. Por ejemplo, el CTE indica que la definición de las superficies debe hacerse por el lado interior de las habitaciones, pero eso no es posible, existe una contradicción. Esto es debido a su representación como una única superficie de espesor nulo. La representación del muro, o va por un lado o el otro lado del muro real. Además al ser tratado como un “símbolo” que representa a un objeto real aparece sólo una vez en la base de datos de los programas y se asigna a algún volumen o espacio.



Por lo tanto, en su representación del modelo-D lo que se codifica son las relaciones de pertenencia –asignación– y de vecindad de cada objeto real con respecto a cada elemento de volumen o espacio geométrico. Un muro “pertenece” a un cierto espacio y “toca o es vecino” de otro espacio. La figura muestra una imagen del programa POWERDOE (aplicación gráfica para generar el modelo-D de DOE2 que es guardado en un formato cuyo fichero tiene extensión BDL- “building description language”). Como se puede apreciar se podría pensar que a este espacio o local le falta una superficie por definir, ya que el volumen no está encerrado. No obstante no es así, ya que el local adyacente posee ese muro y en el modelo-D se especifica que ese muro debe conocer adicionalmente su local vecino.

De alguna manera el modelo-D, en este aspecto, se aleja del modelo físico subyacente y mezcla los dos conceptos.

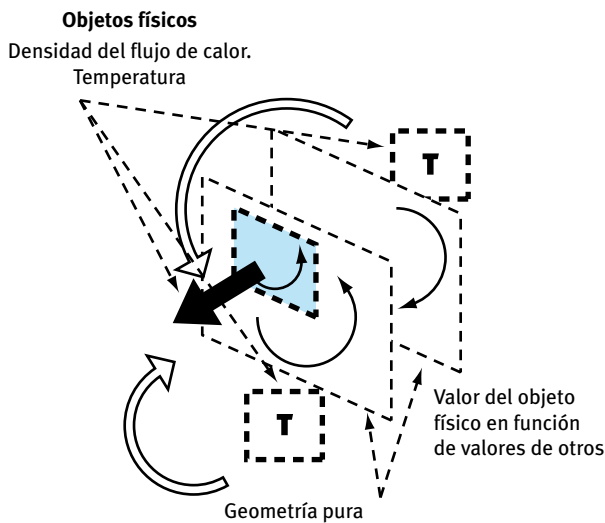
Sin embargo, en lo que respecta a cantidades asociadas al volumen del espacio sí suelen codificarse como se indica anteriormente. La energía liberada por ocupantes, equipos internos, etc., va asociada a cada volumen.

3.3 FORMACIÓN DE MODELOS-D DE EDIFICIOS. FÍSICA

Llegamos al punto de intentar responder cómo se evalúan los objetos físicos que actúan sobre los objetos geométricos y qué relación existe entre ellos. Estos objetos físicos varían en el espacio y en el tiempo.

Para poder llegar a este punto se suelen tomar ciertas hipótesis. Las ecuaciones físicas se resuelven por algún medio y se evalúan en el modelo-S generado sobre los elementos geométricos discretos del modelo-D.

Por ejemplo, en el caso de la transmisión de calor a través de muros, se supone que la conducción es 1D (unidimensional) y perpendicular a la pared. Se resuelve la ecuación infinitesimal que representa este fenómeno (bien por diferencias finitas, bien utilizando la transformada de Laplace u otro método) y se evalúa la relación entre la densidad del flujo de calor en una superficie (2-forma diferencial) respecto a los cambios de temperatura (escalares, o-forma) sufridos en ese mismo lado del muro o/y en el opuesto.



Para los puentes térmicos se supone que la conducción es 2D (bidimensional) y la densidad de flujo de calor se refiere al metro lineal de dicho elemento (por lo tanto actúa como una 1-forma, se trata de un caso “degenerado” ya que asigna flujos de calor a elementos lineales).

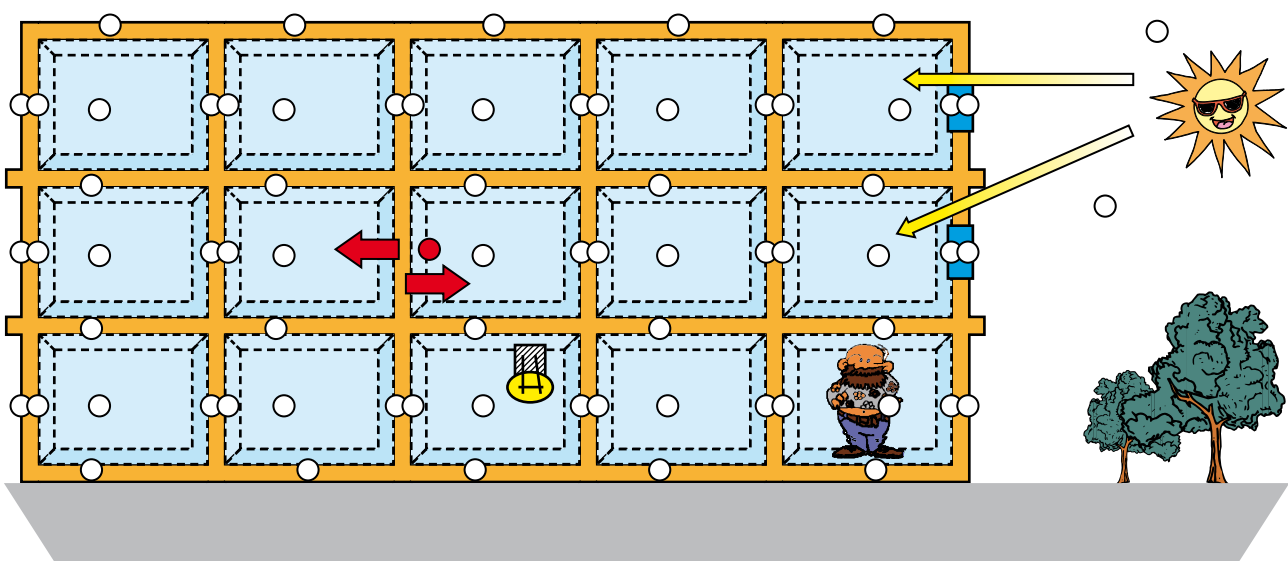
Un modelo físico se dice que es lineal, como la transmisión de calor por conducción en un muro, cuando la suma de dos soluciones es otra solución o cuando un múltiplo de una solución también es otra solución. Por ejemplo, la densidad de flujo de calor en un lado del muro se puede obtener como superposición, o suma, de la densidad de flujo debida a cambios de temperatura en ese lado más otro flujo de calor en ese mismo lado pero debido a cambios de temperatura en el otro lado.

Cada temperatura en este caso representa la excitación y cada densidad de flujo de calor la respuesta.

La relación entre la respuesta y la excitación unitaria (en concreto, aquella a una excitación, impulso o subida y bajada brusca de la excitación) en un sistema lineal se le llama función de transferencia.

El lector podría preguntarse entonces: ¿es el modelo completo de un edificio un modelo lineal donde todo se superpone? La respuesta es que en general no lo es. El intercambio de energía por radiación y otros fenómenos (por ejemplo, convección natural) hacen inherentemente no-lineal al modelo. Sin embargo, con buena aproximación, se suele substituir por un modelo lineal, porque el análisis y cálculo se hacen mucho más sencillos y rápidos.

Si se piensa en el edificio como una malla gruesa (ver esquema), la excitación de temperatura en un lado de un cierto muro provoca densidades de flujo de calor en las caras de todos los demás muros. Por lo tanto, habría que hacer una colección con todas las funciones de transferencia como parejas (excitación –habitualmente temperatura–; respuesta –habitualmente flujos de calor–) que resultaría enorme. Afortunadamente, como se puede intuir, sólo la función de transferencia de la respuesta de un lado del muro al del otro lado y al suyo propio son importantes. Las demás se desprecian, de manera que el número de funciones de transferencia, a evaluar, se reduce muchísimo. Adicionalmente existen muchas fuentes de excitación que intentan alterar la temperatura del aire dentro del edificio: personas, luces, ocupantes, el sol, etc., del mismo modo para ellas se debe contemplar su ámbito de influencia fundamental.



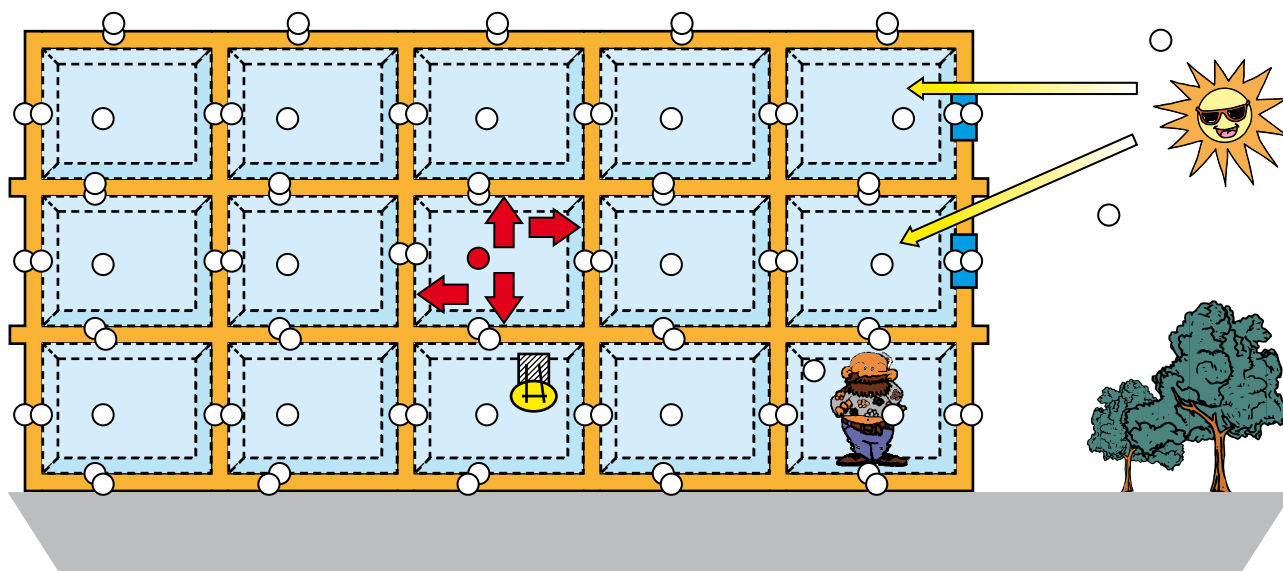
Influencia de la variación de la temperatura de la superficie de un muro sobre flujos de calor

Se puede reducir incluso más el número de funciones de transferencia a calcular si se hacen las hipótesis siguientes (ver apéndice);

- Suponer un modelo fijo para la convección en el interior de los locales y calcular la función de trans-

ferencia entre la temperatura de cada local y la de sus adyacentes.

- En este caso, un local se vería influido por los inmediatamente adyacentes o vecinos, pero se despreciaría el efecto de los locales más lejanos.



Influencia de la variación de la temperatura de una zona sobre flujos de calor

Finalmente, la relación entre los flujos de calor evaluados en distintas superficies tienen en cuenta la posible, o no, acumulación de energía. Por ejemplo, los muros y forjados o el mobiliario sí acumulan energía. Sin embargo, se suele despreciar la capacidad de almacenar energía de los acristalamientos, de manera que el flujo de calor por conducción a ambos lados de un cristal es el mismo, en cada instante (mismo objeto físico).

Veamos más detenidamente la relación entre los objetos físicos.

De hecho, ¿cuál es la relación entre los distintos objetos físicos (densidades de flujo de calor: total, convectivo, radiante –onda larga y onda corta–, conductivo) y cómo se influyen los unos a los otros dentro de un espacio y entre espacios?

Como se ha comentado más arriba, básicamente la simulación trata de hacer balances de energía.

Cualquier ley de balance establece:

“Todo lo que salió por el contorno =

Todo lo que entró por el contorno +

Todo lo que se generó dentro +

El decremento de energía interna dentro”

Los físicos dicen que se trata de una ley “topológica”. Dicho de forma más comprensible para el resto, en esta ley no hemos indicado la forma y posición exacta del contorno que delimita un volumen, tan solo se ha indicado que lo que sale por las superficies vecinas a un volumen, al que delimitan, debe ser lo que entró por otras superficies vecinas más lo que se generó dentro de él. Por lo tanto, se trata de relaciones de vecindad (cuya ciencia recibe el nombre de “topología”). Hay que remarcar que, lógicamente, esta ecuación relaciona objetos de volumen (3-vectores) con objetos de superficie (2-vectores).

Históricamente, la forma de plantear el cálculo de cargas térmicas de los edificios (por ejemplo, DPCLIMA) y algunos programas de simulación como el DOE2, se han aprovechado de esta característica no geométrica para simplificar mucho el problema a nivel de cálculo.

Estos programas usan una “topología débil”; esto es, las relaciones de vecindad son suaves. Por ejemplo, se sabe que un local o espacio tiene asociado un cierto muro con cierta orientación y cierta área, pero no se conoce su posición y forma exacta, así como si tiene otro muro lindante con él, o incluso si forman un recinto cerrado. Los acristalamientos, a su vez, pertenecen a un muro y poco más. En el DOE2 se sitúa la ventana respecto al muro, pero no así en el DPCLIMA, por ejemplo. Un edificio está formado por espacios (geometría pura) con contenido físico (muros, ventanas, etc.). En el DOE2 su situación y la adyacencia entre ellos sí está definida, mientras que en el DPCLIMA no está definida.

Las opciones vienen determinadas en función de lo que se desea conocer. El consumo de energía, que es un cálculo más exigente, esto es una simulación (por ejemplo DOE2) o un cálculo de la cota superior e inferior de potencia (cálculo de cargas térmicas, menos exigente) (por ejemplo el DPCLIMA).

El intercambio de energía –calor– por radiación es, fundamentalmente, el que hace que el problema deje de ser “topológico” para ser “geométrico”. El intercambio de energía entre dos superficies depende del tamaño, forma, posición y distancia entre ellas. En una palabra, de su geometría. Por eso aparecen conceptos como el factor de visión, también llamado factor de forma o factor de geometría. No se percibe la misma sensación de calor a un metro de un hogar de leña que a cinco metros, y no es lo mismo estar frente a él que estar a un lado.

Los distintos métodos actuales de simulación y de cálculo de cargas se han generado sobre la base del tratamiento y las simplificaciones aplicadas al intercambio de calor por radiación.

3.3.1 Detalles sobre radiación

3.3.1.1 Onda larga (OL). Infrarrojo



Las N superficies interiores de un local-recinto se clasifican de manera que se pueda asumir que la temperatura es uniforme sobre cada una de ellas. Normalmente esto coincide con cada muro, suelo o techo, cristal, o a veces cada uno se subdivide en trozos más pequeños.

Así, la ecuación que hay que escribir para cada superficie “k” que indica la cantidad de energía radiante que sale de forma neta en onda larga (infrarrojo) es (ver apéndice):

$$q_{\text{rad},k}^{\text{OL,ceramientos}} = q_{\text{emitido},k} - q_{\text{abs},k} = (\epsilon_k \sigma) \sum_{i=1}^N B_{k,i} \cdot (T_k^4 - T_i^4) \left[\text{W/m}^2 \right]$$

que tras linealizar queda:

$$q_{\text{rad},k}^{\text{OL,ceramientos}} = q_{\text{emitido},k} - q_{\text{abs},k} = (\epsilon_k \sigma) \sum_{i=1}^N B_{k,i} \cdot \alpha_{\text{rad},k-1} \cdot (T_k - T_i) \left[\text{W/m}^2 \right]$$

donde $B_{k,i}$ contiene la información sobre la disposición geométrica de las superficies y sus características radiantes (reflectividad y absorptividad) en el infrarrojo.

De modo similar pero aplicado a superficies interiores del espacio, que emiten en el infrarrojo: luces, equipos, personas, etc. la energía radiante absorbida por la superficie k es:

$$q_{\text{abs,rad},k}^{\text{OL,otras}} = \sum_{c=1}^C B_{c,k} \text{LI}_c \frac{S_c}{A_k} + \sum_{h=1}^N B_{h,k} \text{LH}_h \frac{S_h}{A_k} \left[\text{Wm}^{-2} \right]$$

Donde LI_c y LH_h son los $[\text{W/m}^2]$ (en onda larga) emitidos por luces y personas, respectivamente. De igual forma, S_c y S_h son las áreas de los cuerpos que emiten (luces y personas). Por último, como antes los $B_{c,k}$ y $B_{h,k}$ tienen en cuenta la posición de los emisores (luces-c y personas-h) respecto de los receptores de la energía (las paredes-k) y las características radiantes. Como las personas no permanecen en el mismo sitio, normalmente los programas asumen que la energía es absorbida en un 60% por las paredes (proporcionalmente a su superficie) y el 40% restante por suelo y techo (20% cada uno).

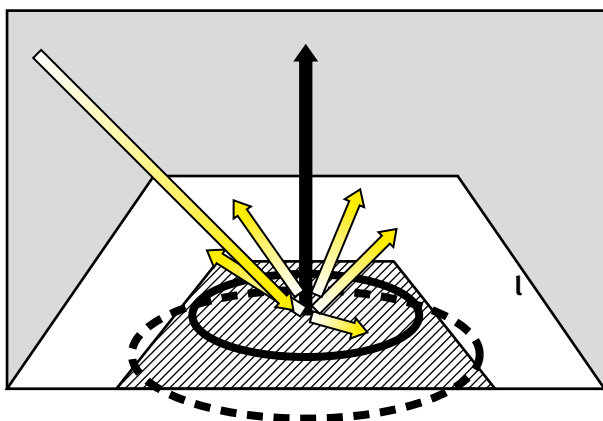
De manera que de forma neta la cantidad de radiación de onda larga emitida por la superficie k se expresa:

$$q_{\text{rad},k}^{\text{OL}} = q_{\text{rad},k}^{\text{OL,ceramientos}} - q_{\text{rad},k}^{\text{OL,otras}}$$

3.3.1.2 Onda corta directa (OC-directa)

¿Qué ocurre con la radiación solar –onda corta–? Lo anterior para onda larga es válido incluso para aquellas superficies que representen la cara interna de un cristal, ya que a esa longitud de onda el cristal es opaco y, por lo tanto, en ese canal los edificios no poseen “agujeros”. Pero es diferente para el rango visible.

Por ejemplo, en el dibujo se observa cómo entra luz por la ventana “m” e incide sobre el suelo en una superficie “l”. Más adelante se comentará cómo hacen los programas para calcular las fracciones soleadas o en sombra de las superficies (muros y ventanas) de un edificio. Pero sigamos. Con el movimiento del sol esta superficie que recibe radiación directa va cambiando. Todo esto hace que el suelo no esté, todo él, a igual temperatura. Seguir esta dinámica para un edificio es muy costoso, por lo tanto los modelos asumen que la energía que recibe “l” en forma de radiación directa de onda corta (visible) se reparte por igual sobre la superficie en la que incide (en la figura la “n”) y además su reflexión es difusa (misma intensidad en todas direcciones, ver figura).

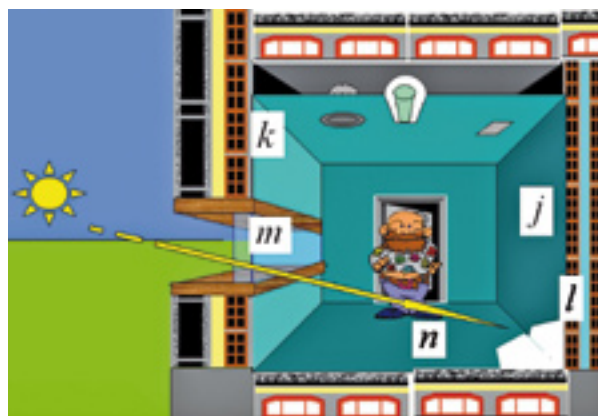


¿Cuál es la energía absorbida por una superficie “j” de aquella que atravesó un cristal “m”?

$$q_{abs,m,v} = \sum_{l=1}^{L(m)} \left[(\delta_{l,v} a_v TDN_m \cos(\theta_l) A_v + B_{l,v}^{oc} A_l \rho_l TDN_m \cos(\theta_l)) \right] \quad (W)$$

Discutamos esta expresión (ver apéndice). El sumatorio debe estar extendido a todas las “piezas” “l” iluminadas por “m” (cantidad $L(m)$). En el dibujo hay dos de esas piezas: una sobre “n” y otra sobre “j”, luego $L(m)=2$. La cantidad de energía que llega a n, debido a su zona iluminada, es:

$$Q_{llega,l(n)}^{oc} = A_l \cdot TDN_m \cdot \cos(\theta_l) \quad (W)$$



Donde:

TDN_m : (densidad de flujo de energía transmitida –tras el cristal– por el cristal en onda corta directa y normal a la radiación (W/m^2)).

A_l : superficie de la zona iluminada en ese instante (m^2).

$\cos Q_l$: es el coseno del ángulo formado por la dirección de la radiación y la normal a la superficie sobre la que se encuentra el polígono iluminado.

Si la superficie que recibe la energía es otra –no iluminada–, digamos la “v”, la cantidad que absorbe esta “v” es parte de la que se reflejó en “l”:

$$Q_{abs,m,v}^{oc} = B_{l,v}^{oc} \cdot \rho_l \cdot A_l \cdot TDN_m \cos(\theta_l) \quad (W)$$

y así habría que sumar para todos los trozos iluminados (segundo sumando).

Si la superficie que recibe la energía es la propia superficie iluminada “l” entonces la energía que absorbe es:

$$Q_{abs,m,l}^{oc} = a_l \cdot A_l \cdot TDN_m \cos(\theta_l) \quad (W)$$

donde:

a_l : es la absorptividad de la superficie l a la radiación de onda corta.

La expresión original anterior junta las expresiones anteriores haciendo uso de la delta de Dirac ($d_{i,j} = \{0 \text{ si } i \neq j, 1 \text{ si } i = j\}$). Así la energía de onda corta se absorbe, bien porque se recibe directamente o bien porque se reflejó en otro sitio.

Sin embargo, seguir la evolución de la forma y lugar de estos “parches” iluminados es muy costoso, de forma que la energía $Q_{llega,n}^{OC}$ se reparte por toda la superficie que la recibe “n”, con lo cual se obtiene una densidad de flujo de energía media de:

$$q_{llega,n}^{OC} = TDN_m \cos(\theta_l) \cdot \frac{A_{l(n)}}{A_{n(l)}} \left[W/m^2 \right]$$

$n(l)$ indica la superficie “n” que contiene el trozo iluminado “l”.

$l(n)$ indica el trozo iluminado “l” que está sobre la superficie “n”.

El reparto de energía absorbida utiliza ahora los factores B referidos a onda corta y a las superficies originales (no las correspondientes a las zonas iluminadas, lo que sería más preciso).

$$Q_{abs,m,j}^{OC} = B_{n(l),j}^{oc} \cdot \rho_{n(l)} \cdot A_{n(l)} \cdot q_{llega,n}^{OC} = B_{n(l),j}^{oc} \cdot \rho_{n(l)} \cdot A_{n(l)} \cdot \frac{A_{l(n)}}{A_{n(l)}} TDN_m \cos(\theta_l) \left[W \right]$$

de igual forma para la que llega a la misma “j”, que contiene la zona iluminada, se absorbe de forma distribuida:

$$Q_{abs,m,j}^{OC} = a_j \cdot \frac{A_{l(j)}}{A_{j(l)}} \cdot TDN_m \cos(\theta_l) \quad (W)$$

Si se utiliza esta forma de reparto de la radiación, la energía que absorbe “j” de la que atravesó “m” como:

$$q_{abs,m,j} = \sum_{l=1}^{L(m)} \left[\left(\delta_{l,j} a_j \frac{TDN_m \cos(\theta_l) A_{l(j)}}{A_{j(l)}} \cdot A_{j(l)} + B_{n(l),j}^{oc} \cdot \rho_{n(l)} \cdot A_{n(l)} \cdot \frac{A_{l(n)} TDN_m \cos(\theta_l)}{A_{n(l)}} \right) \right] \quad (W)$$

se define la fracción iluminada como:

$$\xi_{n(l)} = \frac{A_{l(n)}}{A_{n(l)}}$$

queda:

$$Q_{abs,m,j} = \sum_{l=1}^{L(m)} \left[\left(\delta_{l,j} a_j TDN_m \cos(\theta_l) \cdot \xi_{j(l)} \cdot A_{j(l)} + B_{n(l),j}^{oc} \cdot \rho_{n(l)} \cdot A_{n(l)} \cdot \xi_{n(l)} \cdot TDN_m \cos(\theta_l) \right) \right] \quad (W)$$

Si se usa una propiedad de los coeficientes B de Gebhard de absorción, se puede expresar:

$$\begin{aligned} a_{n(l)} A_{n(l)} B_{n(l),j}^{oc} &= a_j A_j B_{j,n(l)}^{oc} \\ Q_{abs,m,j} &= \sum_{l=1}^{L(m)} \left[a_j TDN_m \cos(\theta_l) \left(\delta_{l,j} \cdot \xi_{j,l} + B_{j,n(l)}^{oc} \cdot \xi_{n(l)} \cdot \frac{\rho_{n(l)}}{a_{n(l)}} \right) \right] \cdot A_j \quad (W) \\ q_{abs,m,j}^{oc-directa} &= a_j TDN_m \cdot \sum_{l=1}^{L(m)} \left[\cos(\theta_l) \cdot \xi_{n,l} \left(\delta_{l,j} + B_{j,n(l)}^{oc} \cdot \frac{\rho_{n(l)}}{a_{n(l)}} \right) \right] \quad (W/m^2) \end{aligned}$$

$q_{abs,m,j}$: es la densidad de flujo de energía en onda corta absorbida por la superficie j debido a la que atravesó la superficie acristalada m.

Observe el lector que para la superficie “j” hay tantas ecuaciones como superficies acristaladas “m” haya en el recinto. En todas ellas los factores B son los mismos ya que dependen –gracias al reparto de la energía supuesto– sólo de las superficies y de sus propiedades radiantes en onda corta. Sin embargo, se debe poder calcular el ángulo de incidencia de la radiación y la fracción iluminada de cada superficie que reciba radiación en ciertos instantes de cálculo. También debe fijarse en que estas ecuaciones sólo dan un reparto de la energía que se absorbe en cada superficie, y no dependen de la temperatura de éstas como en el caso infrarrojo. Algunos programas fijan estos porcentajes, lo cual hace más rápido el programa, pero se corre el riesgo de evaluar de forma incorrecta recintos con grandes zonas acristaladas.

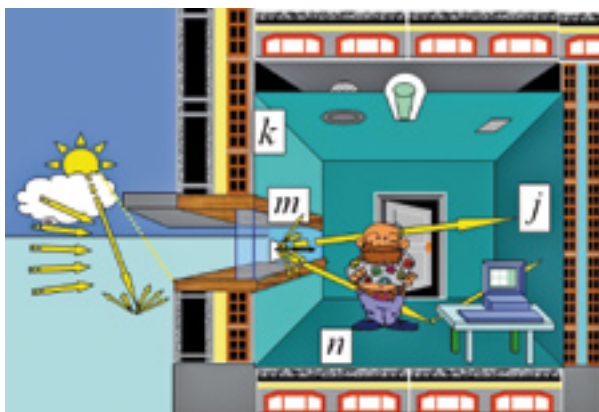
$$q_{abs,j}^{oc-directa} = \sum_{m=1}^M (q_{abs,m,j}^{oc})$$

En el caso de que la superficie “m1”, cuya absorción se pretende analizar, fuera un cristal, se debería añadir la cantidad de energía que absorbió cuando la radiación entró por primera vez en el recinto. La absorbida en las sucesivas reflexiones por la superficie “m1” debido a la radiación que las demás y ella misma dejaron pasar y reflejaron, la tiene en cuenta el método anterior. Por ello, finalmente, de forma general queda:

$$Q_{abs,m1}^{oc-directa} = \sum_{m=1}^M (\delta_{m,m1} \cdot q_{abs-transmisión} + q_{abs,m,m1}^{oc})$$

donde M son todas las superficies acristaladas de un cierto recinto.

3.3.1.3 Onda corta (OC)-(difusa)



En el caso de la radiación difusa de onda corta sucede algo parecido al caso de radiación directa, solo que ahora las superficies emisoras son directamente las M superficies acristaladas del recinto. No procede el estudio de las fracciones iluminadas.

La cantidad de radiación difusa que atravesó la superficie “m” es TSD_m (W/m^2) y de ésta, la cantidad que llega a “j” es:

$$Q_{abs,m,j}^{oc-difusa} = B_{m,j}^{oc} \cdot TSD_m \cdot A_m \quad (W)$$

$$q_{abs,m,j}^{oc-difusa} = B_{m,j}^{oc} \cdot TSD_m \cdot \frac{A_m}{A_j} \quad (W/m^2)$$

El coeficiente $B_{m,j}$ de Gebhard es el mismo que para el caso de radiación directa.

Si existen M superficies acristaladas la cantidad total es:

$$q_{abs,j}^{oc-difusa} = \sum_{m=1}^M q_{abs,m,j}^{oc-difusa} = \sum_{m=1}^M B_{m,j}^{oc} \cdot TSD_m \cdot \frac{A_m}{A_j} \quad (W/m^2)$$

Si se usa la relación de Gebhard:

$$a_m \cdot A_m \cdot B_{m,j} = a_j \cdot A_j \cdot B_{j,m} \Rightarrow \frac{A_m}{A_j} = \frac{a_j \cdot B_{j,m}}{a_m \cdot B_{m,j}}$$

$$q_{abs,j}^{oc-difusa} = \sum_{m=1}^M q_{abs,m,j}^{oc-difusa} = \sum_{m=1}^M B_{j,m}^{oc} \cdot TSD_m \cdot \frac{a_j}{a_m} \quad (W/m^2)$$

Si cuando “j” es un cristal, como en el caso de la radiación directa, añadimos la energía que absorbió la superficie acristalada “m1” la primera vez que la radiación difusa atravesó el cristal, y teniendo en cuenta que las reflexiones internas debidas a la radiación difusa de las M ventanas se tiene en cuenta con el método anterior, tenemos finalmente de forma general:

$$q_{abs,m1}^{oc-difusa} = \sum_{m=1}^M q_{abs-transmisión}^{oc-difusa} + q_{abs,m,m1}^{oc-difusa} = \sum_{m=1}^M (\delta_{m,m1} q_{abs-transmisión}^{oc-difusa} + B_{j,m}^{oc} \cdot TSD_m \cdot \frac{a_j}{a_m}) \quad (W/m^2)$$

Dentro de este grupo, se suele tomar la radiación de onda corta (visible) procedente de iluminación y otros equipos como difusa. Así su expresión queda:

$$q_{abs,j}^{oc-difusa} = \sum_{c=1}^C B_{j,c}^{oc-otros} \cdot SI_c \cdot \frac{a_j}{a_c} \quad (W/m^2)$$

SI_c es la densidad de flujo de energía (W/m^2) en longitud de onda corta emitida por la fuente que corresponda: luces, equipos, etc.

Normalmente, debido al desconocimiento sobre la posición que ocupan estos elementos, el término $B_{j,c}$ es desconocido y se suele hacer:

- Reparto prefijado (60% al suelo, resto proporcional al área de las paredes y techo).
- Aproximada (utilizando correlaciones).
- Método “backward-ray-tracing” (del inglés, que significa, “trazado hacia atrás de rayos”). Este método se utiliza en la generación de imágenes realistas por ordenador. Es rápido si se pretende “tomar una foto” de la iluminación de un local. No obstante, cuando la luz cambia de posición el método se vuelve algo lento. Consiste en lanzar rayos (segmentos) de luz desde una fuente hacia las superficies. En función de las características de reflexión, transparencia (refracción) y absorción de la superficie se generan nuevos rayos. También tiene en cuenta las intersecciones de este rayo con otras superficies (sombras) y se evalúa la cantidad de energía recibida en ciertos puntos dentro del local, que son usados como puntos de interpolación. El punto de luz puede ser, el sol (la ventana sería una fuente de luz con rayos paralelos) o unas luminarias.

3.3.1.4 Onda corta (OC)-resumen

En forma de resumen, la energía que sale (o, dándole la vuelta, lo que se absorbe pero con signo cambiado) de una superficie cualquiera (acristalada o no) en la longitud de onda corta se puede expresar como:

$$q_{rad,j}^{oc} = -(q_{abs,j}^{oc-directa} + q_{abs,j}^{oc-difusa} + q_{abs,j}^{oc-difusa-otros}) \quad (W/m^2)$$

3.3.2 Método del balance de energía

La figura ilustra dónde deben plantearse los balances de energía; en realidad son balances de las densidades de flujo de energía (esto es, aquellos objetos físicos que estamos estudiando).

Debe hacerse para todas las superficies interiores y exteriores y, finalmente, en el volumen. En este último

caso se tienen en cuenta las aportaciones por el contorno del mismo y si hay acumulación en el volumen.

¿Qué significa “balance en una superficie”? En cada superficie se toma un volumen muy pequeño y próximo a ella y se reduce hasta cero (es una forma singular o degenerada de la ecuación del balance). Este ardid hace que la energía no pueda acumularse sobre la misma superficie y, por lo tanto, obliga a la “continuidad” de los flujos de energía.



Veámoslo más detalladamente.

Se descompone un local o espacio en superficies que tienen asociado un objeto físico –densidad de flujo de cierto tipo de energía– y sobre él se hace el balance que muestra la figura siguiente:

Figura página 52 del Word.

No sirve. Habría que proporcionarla más grande y en mejor calidad.

en forma de ecuación para los flujos asociados a la superficie “j” tenemos:

$$q_{cond,j} = q_{rad,j}^{ol} + q_{rad,j}^{oc} + q_{conv,j} \quad (W/m^2)$$

Para hacer más explícito dónde aparece la dependencia con la temperatura en esta ecuación tenemos:

$$q_{\text{cond,Local-j}}(T_j^{\text{Local-v}}, T_j^{\text{Local}}) = q_{\text{rad,Local-j}}^{\text{ol}}(T_1^{\text{Local}}, T_2^{\text{Local}}, \dots, T_j^{\text{Local}}, \dots, T_N^{\text{Local}}) + q_{\text{rad,Local-j}}^{\text{oc}} + q_{\text{conv,Local-j}}(T_{\text{Local}}, T_j^{\text{Local}}) \quad (\text{W/m}^2)$$

donde:

Local: se refiere al volumen del local o espacio que se está analizando.

T_{Local} : se refiere a la temperatura seca asignada al aire asociado al volumen del espacio.

T_{Localj} : se refiere a la temperatura asignada a la superficie “j” del local.

Local-v: se refiere al local colindante o al exterior.

La evaluación de esta expresión sobre la superficie “j” implica tener en cuenta su área (aplicación del objeto físico sobre el geométrico) de forma que:

$$Q_{\text{cond,Local-j}}(T_j^{\text{Local-v}}, T_j^{\text{Local}}) = A_j \cdot q_{\text{cond,Local-j}}(T_j^{\text{Local-v}}, T_j^{\text{Local}}) = A_j \cdot q_{\text{rad,Local-j}}^{\text{ol}}(T_1^{\text{Local}}, T_2^{\text{Local}}, \dots, T_j^{\text{Local}}, \dots, T_N^{\text{Local}}) + A_j \cdot q_{\text{conv,Local-j}}(T_{\text{Local}}, T_j^{\text{Local}}) \quad (\text{W})$$

Si se expande la expresión anterior –asumiendo la aproximación lineal del intercambio radiante infrarrojo–:

$$Q_{\text{cond,Local-j}}(T_j^{\text{Local-v}}, T_j^{\text{Local}}) = A_j \cdot \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot \left(\sum_{i=1, j \neq i}^N B_{j,i} \alpha_{\text{rad,j,i}}(T_j^{\text{Local}}, T_i^{\text{Local}}) \right) + A_j \cdot q_{\text{rad,Local-j}}^{\text{oc}} + A_j \cdot h_j \cdot T_j^{\text{Local}} - T_{\text{Local}} \quad (\text{W})$$

Programas como TRNSYS, para poder manejar esta ecuación, suponen que el término que linealiza (alfa) lo pueden aproximar usando una temperatura media (en grados Kelvin) de las superficies del local, de forma que todos los $\alpha_{j,i}$ se transformen en un mismo término:

$$\alpha_{\text{rad,j,i}} = (T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j) \approx (T_{\text{media}}^2 + T_{\text{media}}^2)(T_{\text{media}} + T_{\text{media}}) = 4T_{\text{media}}^3$$

Esta es la base del método “modelo térmico red en estrella” (star thermal network). Así la expresión anterior queda:

$$Q_{\text{cond,Local-j}}(T_j^{\text{Local-v}}, T_j^{\text{Local}}) = \sum_{i=1, j \neq i}^N \frac{(T_j^{\text{Local}} - T_i^{\text{Local}})}{R_{\text{rad,j,i}}} + A_j \cdot q_{\text{rad,Local-j}}^{\text{oc}} + \frac{(T_j^{\text{Local}} - T_{\text{Local}})}{R_{\text{conv,j}}} \quad (\text{W})$$

Con,

$$R_{\text{rad,j,i}} = \frac{1}{A_j \cdot \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{\text{media}}^3 \cdot B_{j,i}}$$

$$R_{\text{conv,j}} = \frac{1}{A_j \cdot h_j}$$

Si lo que se pretende es ver la cantidad de energía que llega al aire de la habitación –del espacio– porque se intenta controlar el ambiente interior a través de su temperatura seca, los métodos de simulación intentan eliminar los términos del sumatorio que contienen la energía radiante entre superficies y en su lugar buscan una relación más directa entre las paredes y el aire. ¿Cómo?

Veamos por ejemplo el método del “modelo térmico estrella”.

Por el momento vamos a unir los flujos de energía debidos a conducción y los debidos a onda corta en un mismo término Q_j de forma que la ecuación queda:

$$Q_j = \sum_{i=1, j \neq i}^N \frac{(T_j^{\text{Local}} - T_i^{\text{Local}})}{R_{\text{rad,j,i}}} + \frac{(T_j^{\text{Local}} - T_{\text{Local}})}{R_{\text{conv,j}}} + Q_j \quad (\text{W})$$

$$Q_j = Q_{\text{rad,j}}^{\text{oc}} - Q_{\text{cond,Local-j}}$$

La cadencia a la cual llega energía (potencia) al aire del espacio es:

$$Q_{\text{conv}} = \frac{(T_1^{\text{Local}} - T_{\text{Local}})}{R_{\text{conv},1}} + \dots + \frac{(T_j^{\text{Local}} - T_{\text{Local}})}{R_{\text{conv},j}} + \dots + \frac{(T_N^{\text{Local}} - T_{\text{Local}})}{R_{\text{conv},N}} \quad (\text{W})$$

El dibujo muestra las ecuaciones anteriores de forma gráfica. La idea del método consiste en pasar del sistema de resistencias de radiación de OL original (izquierda) a otro (derecha) en el que la energía que llega al aire se expresa, sólo, en función de la temperatura de la superficie y la temperatura del aire del local a través de una temperatura nodal estrella T^* que es ficticia. Nota: la presencia de muebles no suele tenerse en cuenta en estos cálculos.

Figura página 54 del Word.

No sirve. Habría que proporcionarla más grande y en mejor calidad.

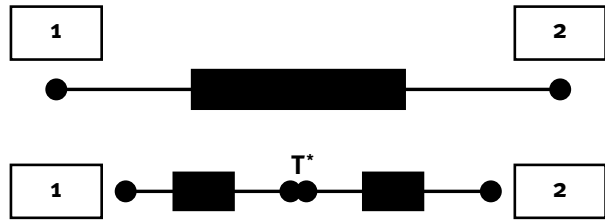
En el apéndice sobre radiación, se obtiene una expresión para la energía neta que sale radiando desde la superficie k en función de la diferencia de temperaturas con todas las demás como:

$$Q_{\text{rad},k} = \sum_{l=1}^N G_{kl} \sigma (T_k^4 - T_l^4) = \sum_{l=1}^N \frac{\sigma (T_k^4 - T_l^4)}{R_{kl}}$$

Si tuviéramos dos superficies sólo y la superficie 1 fuera envuelta por completo por la 2 y ambas fueran superficies negras, el intercambio radiante entre las dos sería:

$$Q_{\text{rad}} = A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \Rightarrow Q_{\text{rad}} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{1/A_1} \Rightarrow R_{12} = \frac{1}{A_1}$$

Esta resistencia sería mayor que la resistencia entre 1 y 2 pasando por un nodo ficticio estrella.



Por lo tanto se puede expresar la resistencia entre la superficie 1 y el nodo estrella como:

$$R_{1,*} = \frac{c_1}{A_1}, \quad c_1 = (0,1)$$

c_1 es un número entre 0 y 1. En este caso simple se podría elegir para c_1 cualquier valor, de manera que la resistencia total entre 1 y 2 fuera $1/A_1$. Si se extrapola esta idea, la resistencia entre cualquier par de superficies será la suma de las resistencias en serie: de la superficie j a la $*$ y de ésta a la k :

$$R_{j,k}^* = \frac{c_j}{A_j} + \frac{c_k}{A_k} = \frac{1}{G_{j,k}^*}, \quad c_j = (0,1), c_k = (0,1)$$

Esto es una aproximación y por lo tanto no se pueden escoger valores de c_k que se ajusten perfectamente al circuito original, excepto en el caso de 2 ó 3 superficies cualesquiera. En el caso de 3 superficies existe una transformación triángulo-estrella exacta (usada en electricidad). Existe otra excepción para un número indeterminado de superficies. Es el caso en que todas ellas forman “parches” sobre una esfera. Esto es así por la expresión particular que toman todos los factores de forma $F_{j,k}$. Pero esto no es general. Así, el método consiste en elegir los pesos c_k de forma que la respuesta del circuito estrella se parezca al original. La función que se escoge a minimizar es:

$$S_p = \sum_{j=1}^{N_{\text{sup}}} \sum_{k=j+1}^{N_{\text{sup}}} (G_{j,k} - G_{j,k}^*) \cdot (R_{j,k}^* - R_{j,k})$$

La razón para esta expresión es que dado que los $R_{j,k}$ pueden ser muy diferentes, se requiere adimensionalizar la diferencia $(R_{j,k}^* - R_{j,k})$ así $(R_{j,k}^* - R_{j,k})/R_{j,k}^*$. Se eleva al cuadrado, pero para evitar darle importancia, la resistencia frente a las conductancias se escribe $(R_{j,k}^* - R_{j,k})/R_{j,k}$ ($G_{j,k} - G_{j,k}^*$)/ $G_{j,k}$ (para que el producto sea positivo). Finalmente $G_{j,k}^* R_{j,k} = 1$.

S_p depende de los pesos c_k de cada superficie. Por lo tanto hay tantos como superficies. Sin embargo si existe simetría en la forma del recinto se puede reducir su número. Haciendo pruebas para recintos rectangulares

se observó que los pesos se aproximan a la relación de áreas: $b_j = A_j / (\text{área total superficies del recinto})$. Exactamente la relación entre este parámetro y los pesos que se encontró empíricamente como óptima fue:

$$(b_j) = 1 - b_j - 3.54 \left(b_j^2 - \frac{1}{2} b_j \right) + 5.03 \left(b_j^3 - \frac{1}{4} b_j \right)$$

Luego:

$$R_{j,k}^* = \frac{c_j(b_j)}{A_j} + \frac{c_k(b_k)}{A_k} = R_{j,*}(b_j) + R_{k,*}(b_k) = \frac{1}{G_j^*} + \frac{1}{G_k^*} = \frac{1}{G_{j,k}^*}$$

Ahora, gracias al nodo ficticio, el intercambio radiante se puede expresar:

$$Q_{rad,k} = \sum_{l=1}^N G_{kl} \sigma (T_k^4 - T_l^4) \approx G_k^* \sigma (T_k^4 - T_*^4)$$

Linealizando la expresión anterior:

$$Q_{rad,k} \approx G_k^* \sigma (T_k^4 - T_*^4) = G_k^* \sigma (T_k^2 + T_*^2)(T_k + T_*)(T_k - T_*)$$

$$Q_{rad,k} \approx G_k^* \sigma 4 T_*^3 (T_k - T_*) = G_k^* h_r^* (T_k - T_*)$$

$$Q_{rad,k} \approx \frac{(T_k - T_*)}{R_k^*}$$

Se ha supuesto que la temperatura de las superficies no dista mucho (en K) de la temperatura estrella. Para una habitación a 20 °C $h_r^* = 5.7 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. La temperatura T^* no tiene sentido físico. En algunos libros la asimilan a la

temperatura radiante media, pero existe mucha controversia sobre este punto. En general T^* se encuentra en un valor intermedio entre las temperaturas superficiales del contorno del volumen.

Volvamos donde lo dejamos. ¿Cómo se puede, con lo anterior, modificar la ecuación del balance?

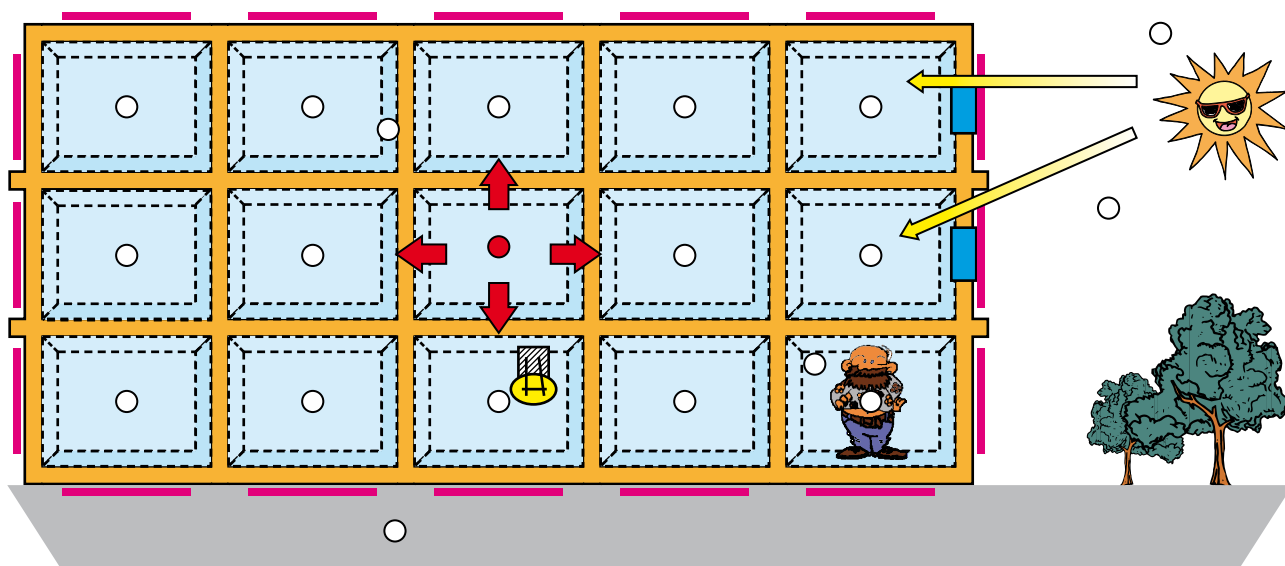
$$o = \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{(T_j^{Local} - T_i^{Local})}{R_{rad,j,i}} + \frac{(T_j^{Local} - T_{Local})}{R_{conv,j}} + Q_j$$

$$o = \frac{(T_j^{Local} - T_{Local}^*)}{R_j^*} + \frac{(T_j^{Local} - T_{Local})}{R_{conv,j}} + Q_j$$

$$o = \left[\frac{1}{R_j^*} + \frac{1}{R_{conv,j}} \right] \left[T_j^{Local} - \left(\frac{1}{R_j^*} T_{Local}^* + \frac{1}{R_{conv,j}} T_{Local} \right) \right] + Q_j$$

$$o = U_{eq,j}^* A_j (T_j^{Local} - T_{Local}^{rad-aire}) + Q_j$$

Para cada superficie se ha obtenido una conductancia equivalente que incluye el efecto del intercambio radiante en onda larga (infrarrojo) con el resto de superficies. La temperatura con la cual intercambia debe ser ahora la temperatura rad-aire. El término Q_j contiene el efecto de la radiación de onda corta (luz artificial y solar) y la energía que llega por conducción. Dicha energía se puede calcular con los métodos del apéndice. Si la conductancia $U_{eq,j}^*$ se incluye en la transmisión por conducción (ver apéndice), en la ecuación anterior quedaría eliminada la temperatura T_j^{Local} de cada superficie para cada local y sólo aparecería la temperatura rad-aire del local y la existente rad-aire en el local vecino o la sol-aire (ver apéndice) si el vecino es el exterior.



Las variables son ahora Trad-aire y Tsoil-aire para los balances sobre el contorno de cada recinto

Como muestra el dibujo, todo lo anterior se hizo buscando simplificar el problema. Como se puede apreciar el número de variables (“bolitas blancas”) se ha reducido considerablemente. La ecuación anterior se simplifica así:

$$0 = Q_{\text{cond,Local-}j}^* + Q_{\text{rad},j}^{\text{oc}}$$

$$Q_{\text{cond,Local-}j}^* = Q_{\text{rad},j}^{\text{oc}}$$

Dado que se conocen las resistencias de radiación y convección y –por la expresión anterior de Q_{cond}^* – el flujo de calor, se puede inferir la T_j de la superficie y con ella el calor que pasa por convección al aire (carga horaria).

El programa EnergyPlus, por ejemplo, en su versión de 2007, contiene un subprograma dedicado al cálculo de los factores de forma basándose en la geometría de los recintos. Con ellos calcula las resistencias de radiación. El método que se acaba de mostrar se basa en una relación geométrica débil: b_j el cociente entre el área de la superficie- j y la total del recinto. Este método funciona bien si el espacio es más o menos regular, pero puede desviarse bastante.

La ley de balance de energía hace que sobre el aire asociado a cada espacio o local que se defina en el edificio (3-vector) se pueda escribir una ecuación diferencial que rige la evolución de la magnitud que se desea controlar observando lo que sucede dentro y en el contorno. Pongamos por caso, la temperatura seca:

$$C_{\text{local},j} \frac{dT_{\text{local},j}}{dt} = \sum_{i=1}^{Ng} G_{\text{GConv},i} + \sum_{i=1}^{Ns} h_i A_i (T_{s,i} - T_{\text{local},j}) +$$

$$+ m_{\text{infiltr}} c_p (T_{\text{ext}} - T_{\text{local},j}) + \sum_{i=1}^{Nsist} Q_{\text{equipos},i,j}$$

Magnitud a controlar:

$T_{\text{local},j}$ = temperatura seca del local.

Volumen:

Acumulación:

$C_{\text{local},j}$ = capacidad térmica del aire del local.

$Q_{\text{Gconv},i}$ = carga interna sensible convectiva (normalmente se asocia al volumen).

$Q_{\text{equipos},i,j}$ = potencia que da el equipo dentro del local j correspondiente al sistema i .

Superficie:

$h_i A_i (T_{s,i} - T_{\text{local},j})$ = carga convectiva desde cada superficie al aire.

$m_{\text{infiltr}} c_p (T_{\text{ext}} - T_{\text{local},j})$ = carga sensible por infiltraciones de aire.

La capacidad de almacenamiento $C_{\text{local},j}$ hay veces que contiene implícita la capacidad de almacenar energía de muebles y muros interiores, mientras que otras veces los programas asumen las superficies de estos objetos como un contorno más del volumen.

Adicionalmente, faltaría añadir a esta ecuación el movimiento del aire entre las zonas. Por ejemplo, en un edificio calefactado es muy habitual que el aire caliente se “escape” por las pequeñas aberturas, rendijas o simplemente con la apertura de puertas, y pasa de un espacio a otro. Es frecuente que llegue hasta los huecos de escalera y suba, ocasionando que las viviendas superiores estén más calientes que las inferiores.

Existen programas sencillos como COMIS (desarrollado por la agencia internacional de la energía IEA. Anexo 23. 1986.) que calculan estos movimientos en base a modelos de grietas. Otros lo hacen con mecánica de fluidos computacional (CFD=Computational Fluid Dynamics). Este último caso, debido a su complejidad y coste de tiempo, sólo se suele usar para el estudio de la difusión del aire en ciertos espacios singulares: grandes recibidores, salones de actos, teatros, etc.

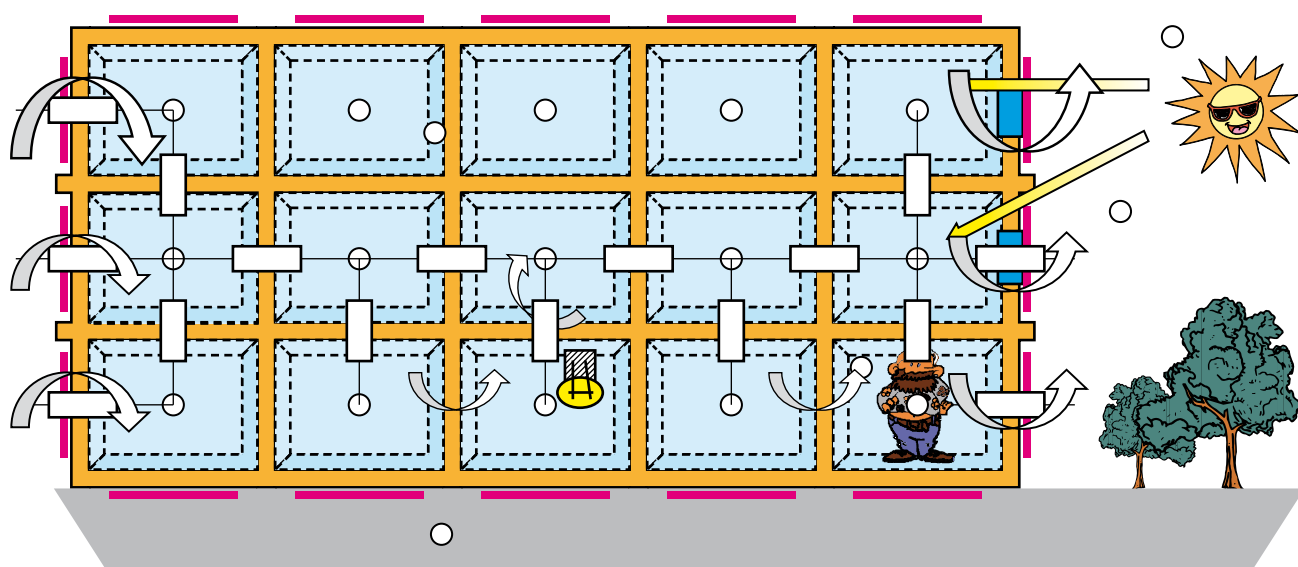
Los modelos de grietas (llamados modelos de flujo de aire multizona, multizone air flow models) asumen que todo el aire de cada zona está en las mismas condiciones de temperatura y presión. La diferencia de presión o densidad (debida a cambios de temperatura) entre zonas y los “agujeros” (huecos de puertas, etc.) entre ellas generan unas resistencias que determinan el transporte de aire de zona a zona (interzonal). También la presión del aire exterior debida a su movimiento (el viento) influye en el movimiento interior del aire al crear zonas en sobrepresión y zonas en depresión. La fachada expuesta al viento se encontrará en sobrepresión, y aquella oculta al viento estará en depresión. La altura del edificio también influye en la distribución de presiones. A mayor altura (separación del suelo) mayor velocidad del aire y por lo tanto, al detenerse contra la fachada, generará mayores presiones.

Sin embargo, el tener en cuenta el movimiento del aire añade complejidad a los modelos de los edificios y, peor aún, acopla las zonas entre sí fuertemente. ¿Qué quiere

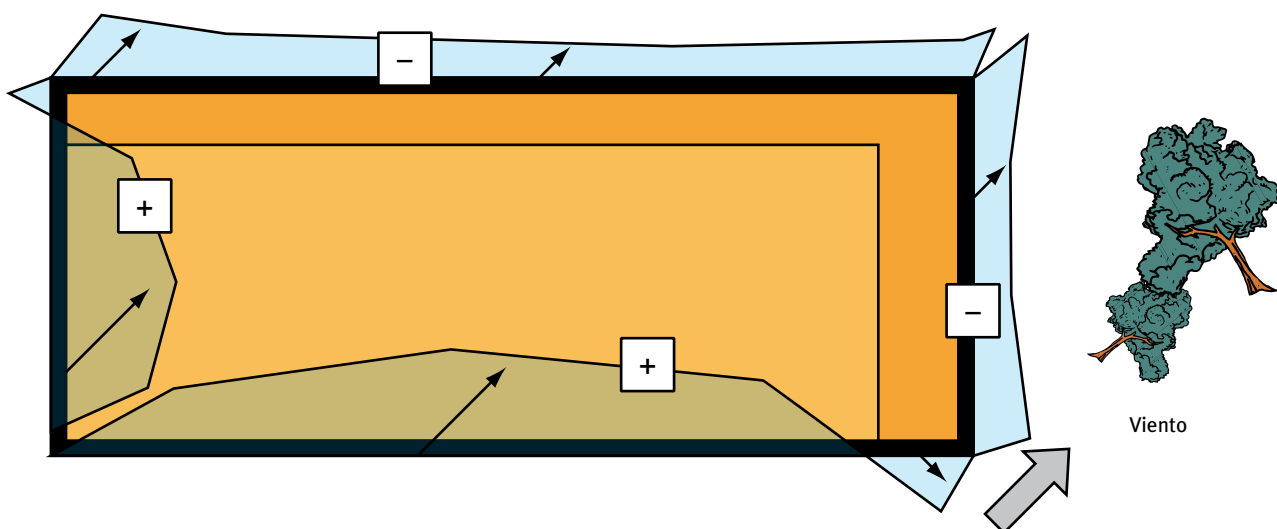
decir esto? Durante la simulación se calcula la evolución del edificio cada cierto paso de tiempo Δt . Al evaluar cuál es la evolución de una zona en un instante $j\Delta t$, podríamos basarnos en las condiciones ya conocidas de las zonas vecinas en el instante anterior $(j-1)\Delta t$, sin mayores problemas, si el movimiento del aire entre ellas no fuera grande. La influencia de los cambios de temperatura a través de los muros es lenta. Sin embargo el transporte del aire entre ellas no lo es, es rápida para la frecuencia de muestreo elegida habitualmente (paso $\Delta t=1h$). Por lo tanto, considerar el movimiento del aire interzonal obliga a resolver la evolución de las zonas de

manera implícita, planteando un sistema de ecuaciones no lineal y resolviéndolo. Claro está que existen programas que lo tienen en cuenta. Por ejemplo, CALENER y el DOE2 no lo hacen, mientras que EnergyPlus sí. Todo radica en lo que se le exija al programa en cuanto a dificultad de creación del modelo-D, en cuanto a tiempo y robustez del cálculo (que no tenga problemas de estabilidad numérica, o de convergencia), etc.

Adicionalmente requiere tener información de los vientos dominantes, dirección y velocidades. Desafortunadamente esta información difícilmente está disponible.



Influencia del movimiento del aire interno (interzonal) y externo (viento)



En definitiva, la variación de la temperatura del local en el tiempo, escrita en forma más resumida, sería:

$$T_{\text{local},j} = f_j(T_{\text{local},j}, u)$$

Donde u es un vector de entradas correspondiente a excitaciones (personas, luces, sol, aire exterior, etc.) y a equipos terminales (actuadores).

Finalmente, a este sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias habría que añadir otro sistema de ecuaciones diferenciales y/o algebraicas que indicarán cómo responde el sistema de climatización, esto es, cómo varía la capacidad del equipo en el tiempo y ciertos parámetros p :

$$Q_{\text{equipo},i,j} = g_j(T_{\text{local},j}, T_{\text{set},j}, p)$$

De igual forma con la cantidad de agua contenida en la zona se tendría un balance:

$$m_{\text{as},\text{local},j} \frac{dw_{\text{local},j}}{dt} = \sum_{i=1}^{Ng} m_{G,i} + \sum_{i=1}^{Ns} m_i + m_{\text{infiltr}} w_{\text{ext}} + m_{\text{sistema}}$$

M_{as} : kg de aire seco en el local.

$w_{\text{local},j}$: humedad absoluta del local (kg H₂O/kgas).

m_G : (kg/s) ritmo al cual se añade agua al aire debido a cargas internas.

m_i : (kg/s) ritmo al cual se añade agua al aire debido a permeabilidad de superficies (muros).

m_{infiltr} : (kgas/s) kilos de aire seco que entra por infiltraciones.

w_{ext} : humedad absoluta del exterior (kg H₂O/kgas).

m_{sistema} : (kg/s) kilos de agua que añade el sistema.

Si algún sistema de climatización actúa sobre alguna otra magnitud distinta de la temperatura seca y la humedad de cada local para el control de las condiciones de confort interiores, entonces habría que escribir la ecuación diferencial o algebraica que determine su evolución (por ejemplo, temperaturas operativas o de globo), para que el sistema tenga capacidad de ajustar su capacidad y mantener el punto de consigna de dicha magnitud.

¿Cómo se puede resolver este sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas (siglas DAE, del inglés Differential Algebraic Equations)?

Este sistema tiene una particularidad: es rígido. ¿Qué quiere decir? Que la dinámica del edificio completo está compuesta por partes con un tiempo característico de respuesta ante excitaciones muy diferente. Los muros suelen tardar horas en responder; el tiempo característico para un local sería del orden de:

$$t_{\text{local}} \approx \frac{\rho V c_p}{|Q_{\text{cargas}} + Q_{\text{equipos}}|} = \frac{C_{\text{local}}}{|Q_{\text{cargas}} + Q_{\text{equipos}}|}$$

ρ : densidad del aire.

V : volumen del local.

c_p : capacidad calorífica del aire.

Medido como el tiempo que tarda el local en cambiar un grado K o °C su temperatura seca y que suele ser menor de una hora. Por último, los sistemas y equipos suelen responder en el orden de minutos.

Para seguir correctamente la evolución del sistema con un método de tiempo discreto, el paso de tiempo debería venir determinado por aquella parte del edificio que responde más rápido (por ejemplo, los equipos y sistemas); de aquí el nombre de rígido (stiff en inglés), porque todo se supedita de forma intransigente o rígida al más rápido. Esto hace la simulación más lenta, al tener que ser calculado todo con la cadencia más alta.

Por esta razón, muchos programas de simulación, tradicionalmente, utilizan como cadencia de simulación 1 hora, y asumen que los sistemas y equipos reaccionan instantáneamente (por ejemplo el DOE2 o CALENER-GT).

¿Qué sucede en ese intervalo de 1 h con ellos? Su respuesta entre horas se estima de forma aproximada, dando valores medios de rendimiento en función de la carga parcial y condiciones atmosféricas medias. Por ejemplo si un equipo no es necesario que funcione toda la hora a plena potencia, para mantener la T seca de consigna del local, la fracción entre la potencia media que necesitó y su capacidad máxima es su carga parcial. Esta forma de proceder tiene el inconveniente de no poder apreciar defectos de diseño, que afectan al rendimiento, como es el que los equipos arranquen y paren continuamente (el valor medio puede ser correcto, pero existe una penalización por arranques y paradas que no se descubre).

En el apéndice sobre los factores de respuesta de una zona se detalla un poco más algunos de los aspectos comentados anteriormente.

3.3.3 DOE2, CALENER-GT y CALENERVp

Dado que existe un problema de rigidez, estos programas optan por no resolver el problema completo y desacoplan la respuesta del edificio y de los sistemas. ¿Cómo? Un “truco” interesante es fijar la temperatura del aire a un valor. Por ejemplo, si la consigna en invierno es 22 °C y en verano es 24 °C, se mantiene el edificio todo el año a 23 °C (CALENERVp posee una consigna más variable, como se comentará después). Así, la temperatura Trad-aire se mantiene siempre constante y muy próxima a T_{consigna} y a T^* . Adicionalmente se elimina la dinámica de la temperatura del aire de las habitaciones, lo cual hace que el balance en el aire para cada zona j se escriba:

$$0 = \sum_{i=1}^{Ng} Q_{GConv,i} + \sum_{i=1}^{Ns} h_i A_i (T_{s,i} - T_{local,j}) + m_{infiltr} c_p (T_{ext} - T_{local,j}) + \sum_{i=1}^{Nsist} Q_{equipos,i,j}$$

De esta ecuación se obtiene para cada tiempo de muestreo (cada hora) la potencia necesaria en los equipos de la zona (unidades terminales) para que el balance “cuadre” y dé cero. Es el último término de la ecuación anterior quién queda libre para cumplir el balance. Esa representa la carga horaria o la demanda horaria de cada zona. Los equipos terminales tienen durante esta etapa una potencia infinita (toda aquella que necesiten para cuadrar la ecuación hora a hora). Las gráficas que siguen muestran la demanda en dos casos. En el primero, la consigna se mantuvo fija todo el año. En el segundo, existía un horario fijo para la consigna. Incluso a veces se dejó flotar al edificio (no existía consigna). En estos casos la ecuación sí contiene la evolución de la temperatura de la zona y no tiene equipos:

$$C_{local,j} \frac{dT_{local,j}}{dt} = \sum_{i=1}^{Ng} Q_{GConv,i} + \sum_{i=1}^{Ns} h_i A_i (T_{s,i} - T_{local,j}) + m_{infiltr} c_p (T_{ext} - T_{local,j})$$

Se puede ver cómo, tras haber dejado a las temperaturas evolucionar y fijar la temperatura de consigna de nuevo, se pide un pico de potencia a los equipos (no hay problema, porque en este paso poseen capacidad infinita).

Figura página 62 del Word.

No sirve. Habría que proporcionarla más grande y en mejor calidad (se puede dibujar, pero el efecto de degradado no quedaría tan ajustado).

Figura página 63a del Word.

No sirve. Habría que proporcionarla más grande y en mejor calidad (se puede dibujar, pero el efecto de degradado no quedaría tan ajustado).

Tras esta etapa se hace otra vez el cálculo, pero esta vez se supone que existen equipos y unidades terminales en las zonas de capacidad finita. El cálculo ahora intenta ver cómo se modifica la temperatura de las zonas respecto del valor anterior (el valor T_{consigna} , si era fijo, o el que fuera si no estaba fijado –flotaba–) cuando la potencia que da el equipo es una concreta. (Nota: ahora no existe realimentación para ver la reacción del edificio; es una aproximación. Tiene la ventaja de ser muy rápido de calcular).

Figura página 63b del Word.

No sirve. Habría que proporcionarla más grande y en mejor calidad (se puede dibujar, pero el efecto de degradado no quedaría tan ajustado).

¿Cómo hacen esta alteración –o perturbación, según los matemáticos–? Al suponer que el edificio se comporta aproximadamente como un sistema lineal (donde la superposición de causas-efectos es válido y simplemente se van sumando), se usa la función de transferencia de temperatura de la zona (ver apéndice) de una forma especial. Esta función relaciona cambios en la temperatura de la zona con la extracción de energía del aire necesaria para ese cambio por parte del sistema (más concretamente de la/s unidad/es terminal/es). Se supone ahora que la excitación “nueva” que se está aplicando, es la variación de la temperatura de la zona respecto de la temperatura de consigna con la cual se realizó el primer cálculo (el cálculo de la demanda) y se relaciona con el cambio de capacidad térmica requerida respecto de aquella que se calculó previamente, cuando se supuso que el sistema se adaptaba y cuadraba cualquier demanda. Las variaciones de uno y de otro (potencia térmica y temperatura) se suman a las pre-

vias, para obtener la respuesta final. (Atención: esto no deja de ser una aproximación. EnergyPlus, por ejemplo, hace el cálculo simultáneo, pero en muchos casos la aproximación es más que suficiente para el propósito buscado). En general, el problema está en que el comportamiento, capacidad y rendimiento del sistema, de los productores y de los terminales, está condicionado por las temperaturas interiores y exteriores y éstas a su vez influyen sobre la demanda. Así, aunque aquí se ha supuesto que las curvas –o superficies– de demanda anteriores son fijas y se busca el punto de equilibrio del sistema con ellas, en realidad dicha curva se mueve y depende de lo que sea capaz de aportar el sistema.

Se reproduce aquí la ecuación del apéndice con el nuevo significado de las variables para una zona dada.

$$\Delta Q_n + p_1 \Delta Q_{n-1} + p_2 \Delta Q_{n-2} = g_0 \Delta T_{\text{local},n} + g_1 \Delta T_{\text{local},n-1} + g_2 \Delta T_{\text{local},n-2} + g_3 \Delta T_{\text{local},n-3}$$

ΔQ_n : es la variación en la capacidad de calor extraída por el sistema en la zona en el instante n.

$\Delta T_{\text{local},n}$: es la variación de temperatura de la zona en el instante n.

$$\Delta T_{\text{rad},k} = T_{\text{local},n}^{\text{consigna}} - T_{\text{local},n}$$

Nuestra incógnita es $T_{\text{local},n}$. Las discrepancias anteriores son conocidas $\{\Delta T_{\text{local},n-1}, \Delta T_{\text{local},n-2}, \Delta T_{\text{local},n-3}\}$, y las variaciones de capacidad del sistema vamos a suponer que también $\{\Delta Q_{n-1}, \Delta Q_{n-2}\}$; entonces, ¿cómo se puede conocer cómo se altera la potencia necesaria ΔQ_n en el instante de cálculo respecto a la calculada previamente sin tener que volver a calcularla otra vez? La siguiente ecuación aparece en el manual técnico del CALENER-GT (es también usada por CALENERVp y Doe2):

$$\Delta Q_n = Q_{\text{sist},n} - Q_{\text{sist},n}^{\text{demanda}} - m_{\text{infiltraciones}} cp (T_{\text{local},n}^{\text{consigna}} - T_{\text{local},n}) - (UA)_{\text{ext}} (T_{\text{local},n}^{\text{consigna}} - T_{\text{local},n}) - \sum_{k=1}^{N_{\text{vecinos}}} UA_k (\Delta T_{\text{local},n} - \Delta T_{\text{local},n}^{k\text{-vecino}})$$

$$\Delta Q_n = Q_{\text{sist},n} - Q_{\text{sist},n}^{\text{demanda}} - m_{\text{infiltraciones}} cp \Delta T_{\text{local},n} - (UA)_{\text{ext}} \Delta T_{\text{local},n} - \sum_{k=1}^{N_{\text{vecinos}}} UA_k (\Delta T_{\text{local},n} - \Delta T_{\text{local},n}^{k\text{-vecino}})$$

Esto es, se corrige con aquellos intercambios que dependen de la temperatura de la zona. Como en estacionario (ver apéndice) se sabe que el cociente de la suma de los pesos $\{g_0, g_1, g_2, g_3, p_1, p_2\}$ debe dar la conductancia total U_{total} se usan éstas como factores de corrección. Así tenemos: $Q_{\text{sist},n}^{\text{demanda}}$ es la potencia demandada (de frío o extracción) en el cálculo previo (ver gráficas), el si-

guiente término corresponde a la perturbación de las infiltraciones, el siguiente al intercambio con los cerramientos que dan al exterior, y el último al intercambio con los cerramientos que dan a zonas vecinas. El primer término $Q_{\text{sist},n}$, es la potencia que realmente da en ese momento el sistema. Si coincide con la $Q_{\text{sist},n}^{\text{demanda}}$ entonces no hay desequilibrio neto de potencia $\Delta Q_n = 0$ y por lo

tanto la $T_{\text{local},n}$ no se aleja de la $T_{\text{consigna},n}$. Si fuera mayor que la demandada, la $T_{\text{local},n}$ empezaría a bajar respecto de la $T_{\text{consigna},n}$. Observe el lector que resolver esto para todas las zonas supondría tener que resolver un sistema de ecuaciones, ya que la $T_{\text{local},n}$ del vecino todavía no es conocida. Para evitarlo, los programas suponen para los vecinos la temperatura que tenían en la hora anterior $T_{\text{local},n-1}^k$.

Si se substituye en la ecuación original la ΔQ_n y expresiones similares para ΔQ_{n-1} y ΔQ_{n-2} se obtiene una relación entre la nueva capacidad térmica del sistema en la zona y la nueva temperatura. La ecuación original sólo usaba 3 valores anteriores de ΔT_{local} . Sin embargo, CALENERVyp, por ejemplo, utiliza 24 (24 valores de g).

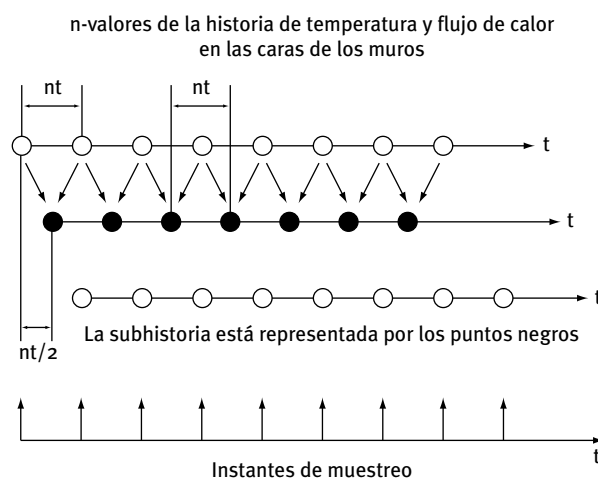
3.3.4 ENERGYPLUS

En el manual de referencia de este programa, cuando se plantea la ecuación que determina la evolución de la temperatura de la zona, se deja un parámetro que sirve para aumentar la capacidad térmica del aire de la zona. Este aumento se hace de forma “ficticia”, simplemente por dar estabilidad numérica a la simulación. El proceso de cálculo es del tipo predictor-corrector y es el que sigue:

- Con la ecuación para la zona con $dT_{\text{local},j}/dt = 0$ se calcula la Q_{sist} para mantener la temperatura de consigna de la zona fija. (Esto sería lo equivalente al cálculo de demanda). Predictor.
- Con esta demanda se calcula el sistema: terminales + transporte + plantas productoras. (Este paso es el que DOE2 y CALENER obvian).
- Después, con la Q_{sist} real calculada se corrige la T_{local} . Corrector.

Así implica al balance de energía y a la respuesta del sistema. El problema aparece con el control sobre el sistema. En realidad el control responde rápidamente a los cambios de temperatura respecto de la consigna, pero en los métodos tradicionales de simulación –que siguen el eje temporal universal muestreando cada Δt – el control sólo se aplica en esos Δt . Este inconveniente suele llevar a oscilaciones de la temperatura del local que no existen en la realidad, porque en la simulación, el control actuó tarde o pronto. Si el sistema tiene tiempos de respuesta mucho más pequeños que la zona (el aire de la zona) la oscilación puede ser divergente. Eso obliga a reducir el paso de tiempo (muestreo) para poder seguir bien el control. Un control real sólo observa la temperatura de la zona, pero no sabe la potencia que se está entregando. Sin embargo, en simulación, esa

información puede ser usada para evitar estos problemas de divergencia y corregir la T_{local} de forma adecuada. Además, como EnergyPlus acopla todas las zonas trasladando aire entre ellas, el acoplamiento puede ser fuerte. También pueden existir zonas cuya temperatura pueda estar cambiando rápidamente mientras que otras vecinas no cambian. Así, el programa implementa un sistema de paso de tiempo variable –adaptativo– a lo rápido que reacciona una zona. Consiste en “ver” cómo cambia la T_{local} al paso general Δt (debido a todo salvo el sistema) y para los sistemas+zonas se usa un tiempo diferente $\Delta t'$. Digamos que sobre la cadencia de muestreo “universal” se superpone otra que va al mismo ritmo o a un ritmo mayor. Inicialmente se intenta saltar un Δt , pero si la $\Delta T_{\text{local}} > 1^\circ\text{C}$ en ese paso (observe el lector que ahora no se mira el “eje temporal” sino el eje de la respuesta) se reduce el paso $\Delta t' = \Delta t/2$. Si vuelve a pasar lo mismo entonces $\Delta t'' = \Delta t'/2$ y así hasta que la temperatura de la zona no cambie más de 1°C . ¿Cómo se calcula la respuesta de la zona a pasos de tiempo más cortos si los factores de respuesta se han calculado con un cierto paso de tiempo? EnergyPlus plantea una solución de compromiso. El programa lleva las “cuentas” generales con el tiempo de muestreo Δt , y cuando necesita más resolución temporal interpola temperaturas y flujos de calor, pero usa los mismos factores de respuesta “decalados una fracción de Δt ” (ver dibujo). Cuando consigue que paso a paso la respuesta de la zona haya sido menor que 1°C , desecha lo calculado (puntos negros) a Δt más pequeños y prosigue, manteniendo los puntos blancos originales más el nuevo punto calculado.



3.3.5 Radiación solar. Insolación y sombreado

La energía en forma radiante que podemos detectar con los ojos, lo que llamamos “luz” puede tener origen artificial (luminarias) o natural (la que proviene del

sol). Normalmente esta radiación no se puede suponer que sea por entero difusa. Existe una porción difusa (informalmente, aquella luz que no genera sombras) y otra directa (informalmente, aquella que genera sombras).

La primera puede tener –si se supone que la reflexión es también difusa– un tratamiento como el de la radiación infrarroja.

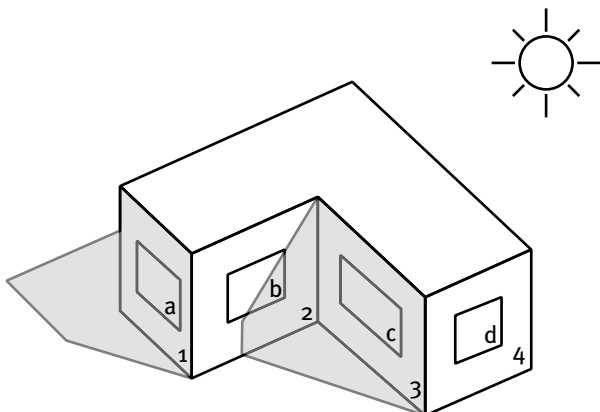
Sin embargo, la radiación directa de onda corta necesita otra solución. Tanto si incide en el exterior de un cerramiento como si lo hace en el interior, tras atravesar un acristalamiento, tiene el inconveniente de que supone un aporte de energía no uniforme espacialmente sobre las superficies.

En general el análisis de insolación y sombreamiento se puede dividir según el lugar de incidencia de la radiación en dos:

- Efecto sobre las superficies exteriores.
 - Efecto sobre las partes opacas. Muros
 - Efecto sobre las partes translúcidas. Acristalamientos.
- Efecto sobre las superficies interiores.
 - Acristalamientos interiores y penetración de la radiación en el interior del edificio.

A su vez existe una división sobre las causas del sombreamiento:

- Sombras propias del edificio. Aquellas que arroja el edificio sobre sí mismo debido a su forma. (También estarían aquí incluidos los retranqueos respecto del plano de fachada de los acristalamientos).



- Sombras propias de elementos accesorios del edificio: por ejemplo, los típicos balcones corridos de un edificio de la costa, actúan como viseras sobre el volumen del edificio. También serían sombras accesorias, las debidas a aleros colocados sobre las ventanas o en sus laterales.

Figura página 68 del Word.

No sirve. Habría que proporcionarla más grande y en mejor calidad, o con la calidad suficiente para distinguir líneas y datos y poder dibujarlo.

- Sombras externas: son las causadas por edificios, árboles u obstáculos colindantes o próximos.
- Sombras geográficas: son las debidas a la posición geográfica del edificio. Por ejemplo una casa con orientación sur, pero situada en el fondo de un valle, con montañas en los laterales no recibirá (sobre todo en invierno) la radiación solar que le correspondería estando en un llano. Este efecto puede tener una considerable repercusión sobre la demanda y consumo de energía de un edificio.

Por último, otros atributos que se les puede añadir a los elementos de sombreamiento son:

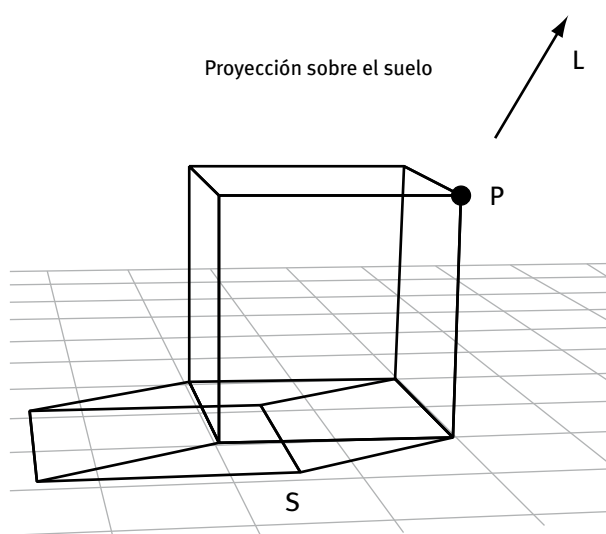
- Su transparencia u opacidad, ¿es total o no? Por ejemplo, una arboleda puede dejar pasar cierta cantidad de radiación. Ciertos elementos accesorios de los edificios no son totalmente opacos, etc.
- Dicha propiedad fundamental de un elemento de sombreamiento (su opacidad), ¿es constante en el tiempo o cambia? Por ejemplo una arboleda de hoja caduca cambia su opacidad con la estación del año. DOE2, por ejemplo, permite asignar horarios a la propiedad de transparencia de un elemento de sombreamiento.

El problema del cálculo de sombreamiento no es un problema sencillo, sino más bien todo lo contrario: es

un problema de los más complicados en la edificación. Existen programas muy sofisticados (Radiance) para hacer cálculos detallados de iluminación. Sin embargo los programas de simulación deben ser rápidos y prácticos.

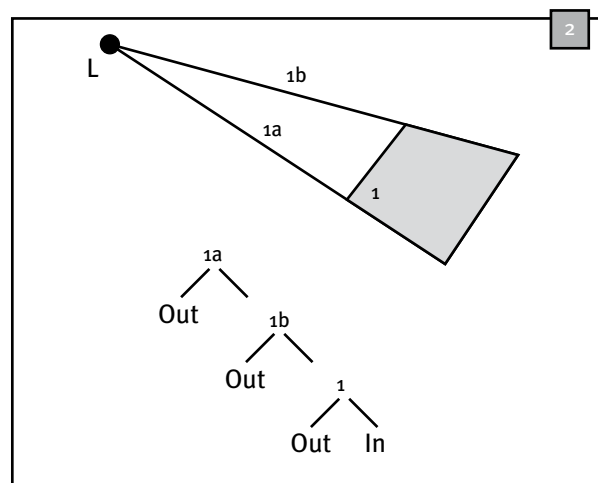
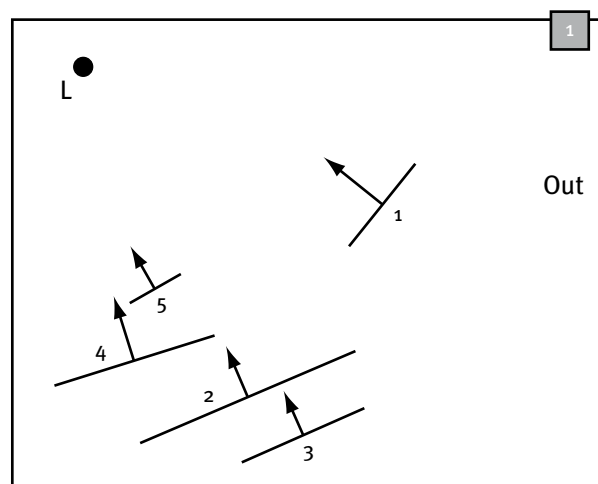
EnergyPlus calcula las sombras sobre el exterior para un día de cada mes y supone que la trayectoria del sol –y por lo tanto las sombras– se mantiene igual durante todo el mes. Calcula así unas 96 situaciones de sombra (8 posiciones diarias por 12 meses), almacena los resultados de las “piezas” o polígonos de sombra sobre cada superficie exterior, bien sea muro o cristal, en cada hora del día y comienza la simulación. Opcionalmente, se puede obligar al programa a aumentar las horas y días de cálculo, pero el tiempo de cálculo puede ser excesivo para la variación en el resultado obtenido.

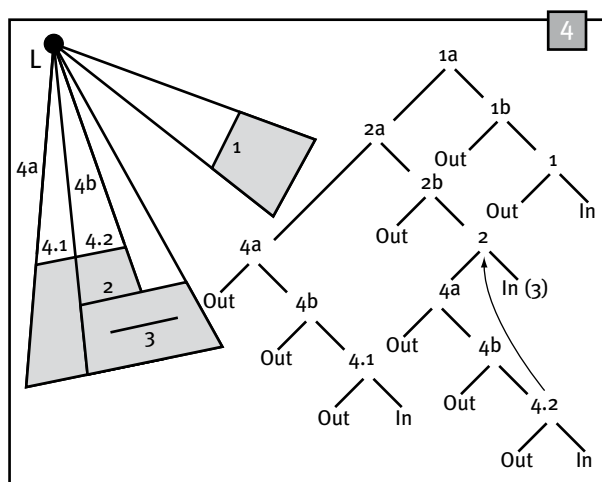
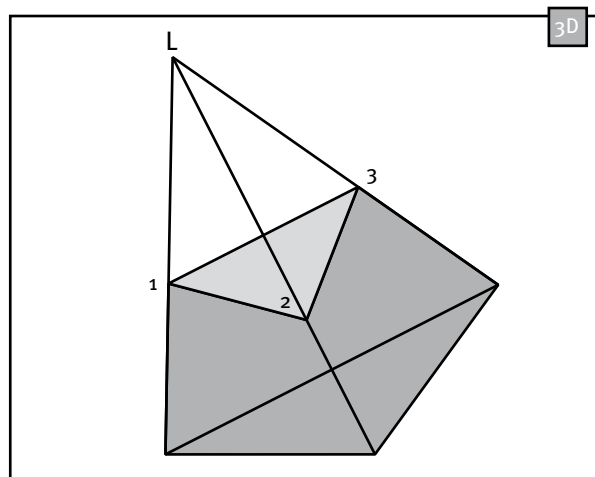
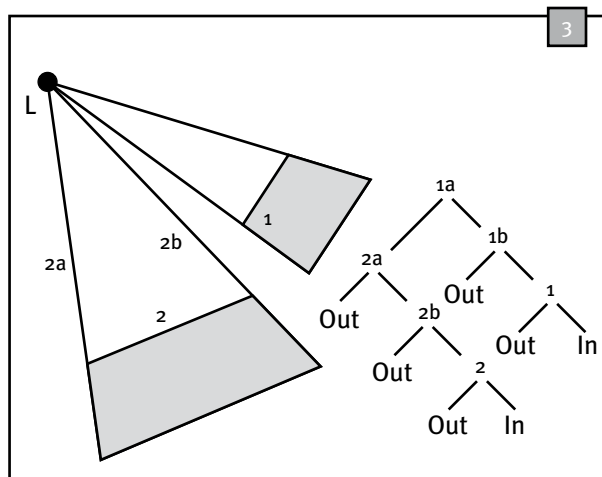
La mayoría de los programas usan para los cálculos de insolación un método desarrollado por Groth y Lokmanheikim y modificado más tarde por Walton. Se trata de tomar cada superficie (la receptora) y proyectar sobre ella el resto en la dirección de los rayos solares, intentado buscar dónde se solapan las proyecciones para generar finalmente la envolvente de la sombra sobre el receptor. Todo ello se hace en coordenadas homogéneas (espacio proyectivo en la dirección de los rayos), ya que el cálculo es más rápido y eficiente a la hora de calcular el polígono, que proyectado en la dirección de los rayos solares, forma la envolvente de la sombra sobre el polígono en cuestión analizado. Este es el método usado por TRNSYS (en concreto el módulo TRNSHD), EnergyPlus, Blast y DOE2.



Sin embargo, la industria de los videojuegos, sorprendentemente, que necesita un cálculo de sombras

rápido en las escenas de acción, proporciona muchos algoritmos muy rápidos y eficientes, que empiezan a utilizarse. Uno de ellos es por ejemplo el “Shadow volume binary space tree”, volumen de sombras con partición binaria del espacio. La idea es ordenar de más cerca a más lejos los polígonos de la escena. Se va generando un volumen de sombra entre el punto de luz y el primer polígono –el más cercano a la luz–. A partir de ahí se va calculando si el siguiente polígono está dentro del volumen de sombra –en cuyo caso se desecha–, parcialmente en sombra o totalmente expuesto y se construye con él un nuevo volumen de sombra que se añade al anterior. El resultado es el conjunto de polígonos disjuntos que forman sombra sobre cada polígono. En paralelo, se crea una estructura de árbol que permite localizar con rapidez si el vértice de un nuevo polígono procesado está dentro o fuera del volumen de sombra. Las figuras muestran la aplicación del método en 2D y un volumen de sombra en 3D generado por un triángulo.

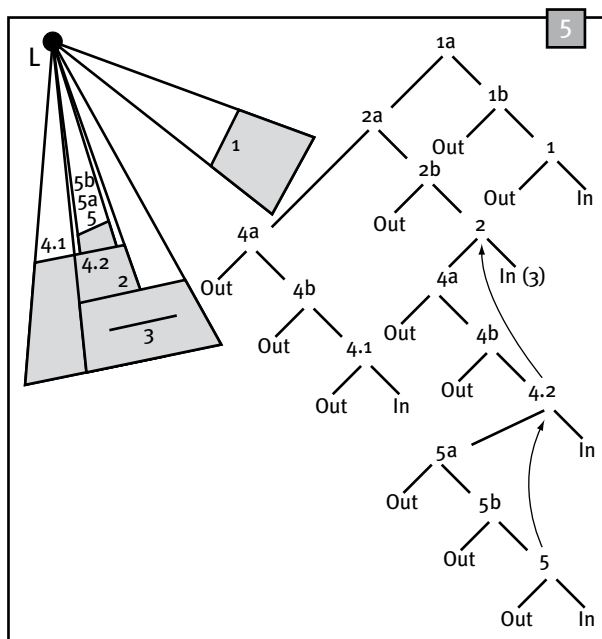




3.3.5.1 Efecto sobre las partes opacas. Muros.

En la realidad la radiación directa haría que un cerramiento se calentara más en una parte que en otra, de forma que matemáticamente se deberían asignar muchos objetos físicos (densidades de flujo de calor diferentes) y llevar las cuentas de su evolución en el tiempo. El DOE2, por ejemplo, trata este problema asignando a cada superficie un número entero que representa en cuántos trozos se divide la superficie del muro original.

En general, si el muro dispone de un aislamiento adecuado, la repercusión sobre la demanda, comparado con el efecto que tienen los acristalamientos, es baja.



3.3.5.1 Cerramientos translúcidos. Cristales

El objetivo de los acristalamientos es, entre otros, ofrecer radiación visible (coloquialmente luz natural) para que los ocupantes puedan ver dentro del edificio y así ahorrar energía de iluminación. Por el contrario suelen tener conductividades térmicas elevadas que se reducen cuando se corren las persianas. Así, el objeto físico asociado a un acristalamiento suele tener en cuenta:

- Tipo de cristal:
 - Simple, doble, triple.
 - De color, metalizado, etc.
- Tipo de marco:
 - Rotura del puente térmico.
 - Sin rotura del puente térmico.

- Presencia de elementos adicionales:

- Lamas.
- Persianas.
- Cortinas.

Son elementos cuya capacidad de acumular energía se suele despreciar en las simulaciones horarias de un edificio. Así, se calculan con la hipótesis estacionaria.

Tienen un comportamiento complejo respecto de la radiación, ya que sus propiedades ópticas cambian con la longitud de onda, con el ángulo de incidencia, con el espesor y color del cristal, y con las deposiciones de películas metálicas (llamados cristales bajo - emisivos).

Existen 2 características fundamentales que lo definen:

- La conductancia térmica de todo el acristalamiento: cristal + marco + elementos adicionales.
- El factor solar del cristal a incidencia normal.

El primero tiene en cuenta la transmisión por conducción+convección, desde la temperatura del aire exterior (más exactamente la temperatura sol-aire que tiene en cuenta la absorción de radiación por parte de la superficie del cristal) (ver apéndice) y la interior. Programas como LIDER, hacen este valor variable entre estaciones (invierno-verano), para contemplar el uso diferente de persianas y cortinas. La potencia (kW) en cada hora que pasa al aire del local, se calcula de forma instantánea, como si el cristal no acumulara calor.

El segundo afecta a la cantidad de energía radiante que un cristal deja pasar a su través (en forma radiante+convectiva). Por ejemplo, un vidrio simple (4 mm de espesor) y, claro, posee un factor solar de 0.88.

¿Qué ocurre con la radiación transmitida (entra o sale) a través de un cristal, bien sea difusa o directa? ¿Cómo suele tratarse en los programas de simulación?

Como se explicó anteriormente, los programas de simulación actuales, debido a razones históricas sobre la tecnología del aire acondicionado y la calefacción, se centran en las aportaciones de energía sensible (calor) y latente (vapor de agua) a los locales y en su control para obtener las condiciones de confort programadas. Este es el caso del software de EE.UU.

Al igual que en los cerramientos opacos se busca la relación entre la excitación, que en este caso es un pulso

de energía radiante, y la respuesta de la energía que llega al aire para un local, en cada instante posterior. Si se asume la linealidad para el intercambio radiante esto implica calcular de nuevo la función de transferencia, donde cierta energía radiante es ahora la excitación (solar, iluminación, etc.), y la respuesta es el flujo de calor al aire húmedo del local.

3.3.6 Modelo para el eje temporal

Antes de terminar es preciso volver a recordar los enfoques en cuanto al seguimiento o evolución temporal de toda la simulación.

Una vez definido el modelo-D que se quiere simular, y una vez que se establecen las ecuaciones físicas que lo representan, queda por ver cómo se analiza la evolución temporal de las magnitudes; cómo se crea el modelo-S.

Como se comentó, hay varias posibilidades, que se agrupan en:

- Paso de tiempo fijo: todo se evalúa cada cierto tiempo de muestreo (1 hora es lo habitual) universal para todos los componentes.
- Paso de tiempo variable o adaptativo: pero se aplica a TODOS los componentes, a los que evolucionan rápido y los que van lentos. El modelo-S intenta evolucionar tan rápido como le sea posible, pero si existe peligro de divergencia reduce el paso global de la simulación. (Método de EnergyPlus).

Las nuevas tendencias en simulación indican la conveniencia de hacer simulaciones controladas por eventos de sus componentes (la forma de simulación con paso de tiempo adaptativo se acerca a esta idea). En estos casos, la simulación marca el paso de tiempo preguntando a los componentes cuándo el próximo de todo el conjunto del modelo-S cruzará cierto umbral de potencia (cuánto de potencia) o respuesta prefijada y debe ser llamado el próximo a evolucionar. Esta forma de simular permite gestionar automáticamente los problemas de rigidez, y además permite hacer el modelo muy modular. Se pueden añadir componentes con tiempos de respuesta muy diferente sin que aparezcan problemas de estabilidad o convergencia con facilidad (modelos de simulación más robustos). Todo aquello que deba ser resuelto en un lapso de tiempo tan breve que se considere simultáneo, representa una singularidad (eventos coincidentes). En estos casos es preferible encapsular el problema en el componente y resolver la singularidad internamente. De otra forma, es preferible plantear las ecuaciones y resolverlas dentro del componente.

4

RTS: Radiant Time Series, o método de las series temporales radiantes

Este método se originó en el comité TC4.1 de ASHRAE para el cálculo de las potencias térmicas de diseño. Como siempre, estos métodos sólo contemplan la cantidad de energía que va al aire, ya que los sistemas tradicionales o convencionales intentan controlar el confort de los seres humanos utilizando exclusivamen-

te la temperatura seca del aire (aunque en los sistemas más complejos incluye también la humedad relativa).

Se trata de un método “simplificado” de cálculo.

Un esquema del método se reproduce a continuación:

Figura página 74 del Word.

Aparece deslavazada e inconexa, por lo que no se puede dibujar y componer con la debida exactitud ni garantías.

Se ruega enviar un pdf o un PowerPoint desde el que poder partir con un mínimo de posibilidades de acierto.

El esquema anterior debe evaluarse cada hora. Los recuadros con marco grueso indican el origen de la energía:

- El Sol, cuya energía sigue diversos caminos.
- Transmisión a través de cristales, para lo cual hay que calcular cada hora, según la posición del Sol y el ángulo de incidencia sobre el cristal, su factor de ganancia; esto es, cuánta energía del incidente deja pasar.
- Cierta cantidad es absorbida por el cristal (que se calienta) y finalmente entra.
- Habitualmente se usa un único factor de ganancia que contempla ambos “caminos”. Por ejemplo, dicho factor global para un vidrio simple claro de 4 mm de grosor está alrededor de 0.88, cuando incide el sol perpendicularmente. Dicho de otra forma: el 88% de la energía incidente logra pasar al otro lado, sin discriminación de su formato convectivo o radiante. La energía que atravesó el cristal en esa hora no se convierte toda ella en carga en esa hora. ¡No pasa toda al aire de golpe! No obstante, la parte convectiva se puede considerar que sí lo hace. Es aquella energía que absorbió el cristal y al hacerlo éste se calentó –instantáneamente– y pasó parte al aire de la habitación y parte al exterior. El resto es radiación visible e infrarroja que “golpea” el interior de la habitación, se absorbe en otros muros, el suelo, etc. y en los objetos interiores, y tras unas horas pasa finalmente al aire de la habitación y se vuelve carga para el terminal o equipo. Nota: estrictamente no tendría por qué pasar finalmente toda la energía que entró del sol al aire de esa habitación, parte podría continuar su camino hasta la habitación de al lado, por ejemplo. Sin embargo esas cantidades suelen ser pequeñas y se desprecian.
- Por último, la energía del Sol incide sobre los muros exteriores. Así, el muro recibe energía en forma de fotones en el canal visible y el infrarrojo cercano del sol, intercambia fotones en el infrarrojo lejano (radiación térmica asociada a su temperatura, la cual recibe y envía desde/hacia su entorno y el cielo) y por último recibe energía del aire exterior por convección (en el caso de que sea verano, claro). Para poder usar el modelo estándar de transmisión de energía por conducción en un muro, todos los efectos anteriores se deben resumir en un coeficiente de convección-radiación equivalente y en una temperatura equivalente llamada temperatura sol-aire (ver anexo). Así, todo lo anterior se equipara al caso de que no hubiera sol, sólo aire, con un cierto movimiento y una cierta temperatura (ob-

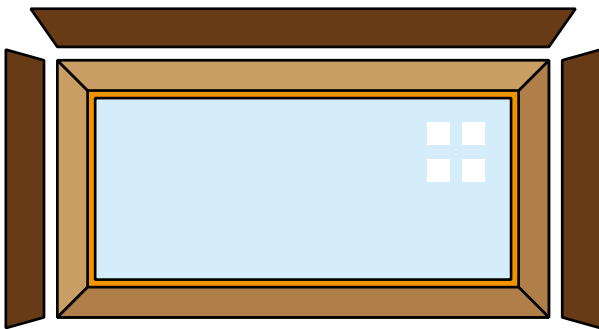
viamente si hace sol ésta será más elevada que la temperatura seca del aire, en caso contrario puede llegar a ser inferior). La energía que llega al otro lado del muro seguirá su camino de dos formas: en forma de radiación infrarroja intercambiada con el resto de los cerramientos de la habitación (muros y cristales) y con los objetos en ella contenidos (parte radiante) y parte irá al aire de la habitación (forma convectiva que es carga en esa hora).

Nota: Llamo la atención del lector de que *esta temperatura depende de la orientación*. Esto es así porque incluye el efecto de la radiación del Sol y no es lo mismo un muro que dé al norte (sólo radiación difusa del sol), que uno que dé al sur (radiación directa y difusa del sol). Por esta razón, para cada hora y para cada orientación debe calcularse la temperatura con la cual “excitar” los muros.

- La temperatura seca exterior: el acristalamiento completo (cristales + marco) ofrece una resistencia térmica debida a la convección con el aire exterior (a la temperatura seca exterior), más una resistencia de conducción que depende de si el cristal es simple, doble o triple y del espaciado y tipo de gas introducido en sus cámaras, así como de si el marco dispone de rotura del puente térmico o no. La energía que llega al otro lado del acristalamiento es intercambiada con el resto de paredes y acristalamientos de la habitación (parte radiante) y parte pasa al aire directamente (parte convectiva) en esa hora.
- La iluminación artificial: las luces interiores generan fotones visibles e infrarrojos (térmicos), se calienta su superficie y parte de la energía pasa directamente al aire. Los fotones son absorbidos por la habitación, las personas, etc. y al tiempo pasa la energía al aire. Por lo tanto no es una carga instantánea en la hora el cálculo, o será más tarde.
- Los ocupantes: la ocupación interior del volumen, en número de personas, horario de ocupación y tipo de actividad, marcan la cadencia de liberación de energía y qué formato se hace; cantidad convectiva (al aire directamente), radiante (en el infrarrojo) y latente (adición de agua al aire).
- Los equipos: este punto se refiere a televisores, ordenadores, fotocopiadoras, etc. y, en general, equipamiento que libera calor. En su mayor parte es calor sensible al aire.
- Las infiltraciones: este es el único componente que directamente, por su naturaleza –es aire–, carga al volumen y no posee componente radiante.

Del esquema se puede ver que el RTS-radiant time series (series temporales radiantes) lo que busca es conocer, para la componente radiante de cada elemento que “excita” el aire interior e intenta cambiar su temperatura, cómo la energía que entra en forma de radiación es “devuelta” al aire en el tiempo y pasa a ser carga para el equipo (esto es, el equipo debe sacarla al mismo ritmo para que la temperatura del aire no cambie).

IMPORTANTE: El lector podrá haber apreciado que aquí se está tratando cada elemento físico de forma independiente (opacos: muros, suelos, techos,... y translúcidos: ventanas, etc.) y que se ha hablado de sus orientaciones pero no de geometría o factores de forma. Tampoco se ha hablado, por lo tanto, de sombras propias del edificio (debidas a su forma o a elementos adicionales como balcones, marquesinas, etc.). Bueno, no exactamente, pues en realidad los únicos elementos de sombra que se definen, por ser importantes, son aquellos usados para el control de la entrada de radiación por ventanas (aleros y retranqueos que afectan sólo a la ventana: ver dibujo).



También, indirectamente se pueden contemplar hasta cierto punto las sombras propias debidas a la forma del edificio, al indicar si un muro, a pesar de su orientación real, está a la sombra o no (y por lo tanto recibe sólo radiación difusa o no).

Este es el potencial que tiene el método de series temporales radiantes, que requiere un modelo-D relativamente sencillo. Basta con indicar, para un determinado volumen (esto es local o espacio), qué elementos físicos tiene asignados a él y sus orientaciones. Su desventaja principal es el perder o no contener la información geométrica. Esto sin embargo no es problema, ya que como se comentó, las leyes de balances de objetos físicos son leyes topológicas no geométricas.

Tras haber asumido una cierta respuesta típica RTS de la parte radiante, se puede analizar la potencia que va al aire en cada hora.

Este método ha sido muy popular (sobre todo en EE.UU.) para la determinación de valores pico de potencia térmica (de refrigeración y de calor), para el diseño y dimensionamiento de las instalaciones. El método contempla 2 días, llamados días de diseño (peak design days en inglés) y que representan el día más frío y el día más cálido del año. El cálculo supone que ambos días se repiten una y otra vez y con ello se estiman los valores pico.

Sin embargo, este método no tiene por qué ser usado exclusivamente para hallar valores pico (potencias máximas) utilizando una secuencia de 24 h siempre igual. Puede ser usado con otros fines. Por ejemplo, si en su lugar se usaran los valores horarios de un año meteorológico tipo o medio, se podría obtener una estimación de energía demandada en un año medio.

A continuación veremos más detalladamente cómo se puede obtener la serie radiante. Para simplificar se asume que se aplica a un ciclo de 24 h (días de diseño).

Cálculo de la conducción a través de cerramientos

El flujo q_h (W) de calor que entra a través de un cerramiento para la hora h viene dado si se utilizan los factores de respuesta por (ver anexo):

$$q_h = A \sum_{j=0}^{23} Y_{pj} \cdot (T_{sol,h-j\Delta t} - T_{hab})$$

q_h [W]: flujo de calor.

A [m²]: superficie del cerramiento.

Y_{pj} [W/km²]: factor de respuesta (periódico).

$T_{sol,h-j\Delta t}$ [K o °C]: temperatura sol-aire j horas antes.

T_{hab} [K o °C]: temperatura seca del aire de la habitación.

Cálculo de la parte convectiva

El cálculo de la parte convectiva, que representa carga en esa hora para los equipos, no es sencilla. La razón es el acoplamiento con la parte radiante. Existe, como se vio en el método del balance, un intercambio radiante con otros cerramientos, muebles, etc., su cálculo se basa en las temperaturas superficiales asociadas a esos elementos y a sus emisividades espectrales (en función de la longitud de onda de los fotones). Sin embargo, como su resolución es complicada y costosa, muchos métodos recurren a una “división

radiante-convectiva” apriorística, para determinar las contribuciones de los elementos y evitar entrar en el cálculo detallado.

Precisamente esto es lo que busca el método RTS. Los factores de respuesta son, pues, la relación entre la energía que debe extraer el terminal en la zona para mantener la temperatura constante cuando un pulso de energía debido a algún motivo (sol, luces, personas, etc.) se originó en el recinto. Para ver los detalles de cómo conseguir calcular estos factores el lector es referido al anexo sobre el cálculo de los factores de

respuesta de recinto que delimita el aire de una zona, utilizando el método de los balances de energía.

Para la aplicación del método se requiere dividir las contribuciones a priori, y asignarles un ritmo al cual transformar la parte radiante en convectiva al pasar las horas, produciendo así un desfase temporal entre la entrada de la energía y su paso al aire.

La siguiente tabla recoge un ejemplo de recomendaciones para hacer la división de la ganancia de energía en una hora dada en su parte convectiva y radiante:

Tipo de ganancia	Parte radiante	Parte convectiva	Comentario
Ocupantes	0.7	0.3	Rudoy y Duran (1975) pero depende en general de la actividad
Luces			
Suspendidas fluorescentes	0.67	0.33	York y Cappiello (1981)
Encastradas fluorescentes, ventiladas por aire de retorno	0.59	0.41	
Encastradas fluorescentes, ventiladas por aire de impulsión	0.19	0.81	
Incandescentes	0.71	0.29	
Equipamiento	0.2-0.8	0.8-0.2	Según ASHRAE, se deben usar partes radiantes elevadas si las temperaturas superficiales son elevadas, sin embargo, si el equipo dispone de ventiladores es la parte convectiva
Conducción a través de cerramientos opacos. Muros	0.63	0.37	Estándar ASHRAE Se supone una emisividad de las caras interiores (en el infrarrojo) de 0.9
Conducción a través de cerramientos opacos. Techos	0.84	0.16	En los techos se supone un flujo de calor descendente
Radiación solar transmitida	1	0	
Energía solar absorbida por acristalamientos	0.63	0.37	Similar a la conducción a través de muros

Conversión de las cargas radiantes en cargas térmicas para los equipos

Las series radiantes temporales, al igual que los factores de respuesta del flujo de calor por conducción a través de cerramientos opacos, ante una excitación de temperatura, consisten en una serie de factores que representan el ritmo al cual la energía (W), en un instante dado, pasa al aire. Esta energía viene dada en función de su excitación, que en este caso es la ganancia radiante de un cierto tipo en este instante y en los anteriores.

Expresado en forma de ecuación sería así:

$$Q_h = r_0 q_h + r_1 q_{h-1} + r_2 q_{h-2} + \dots + r_{23} q_{h-23}$$

Q_h (W): flujo de energía que pasa al aire en el instante h.

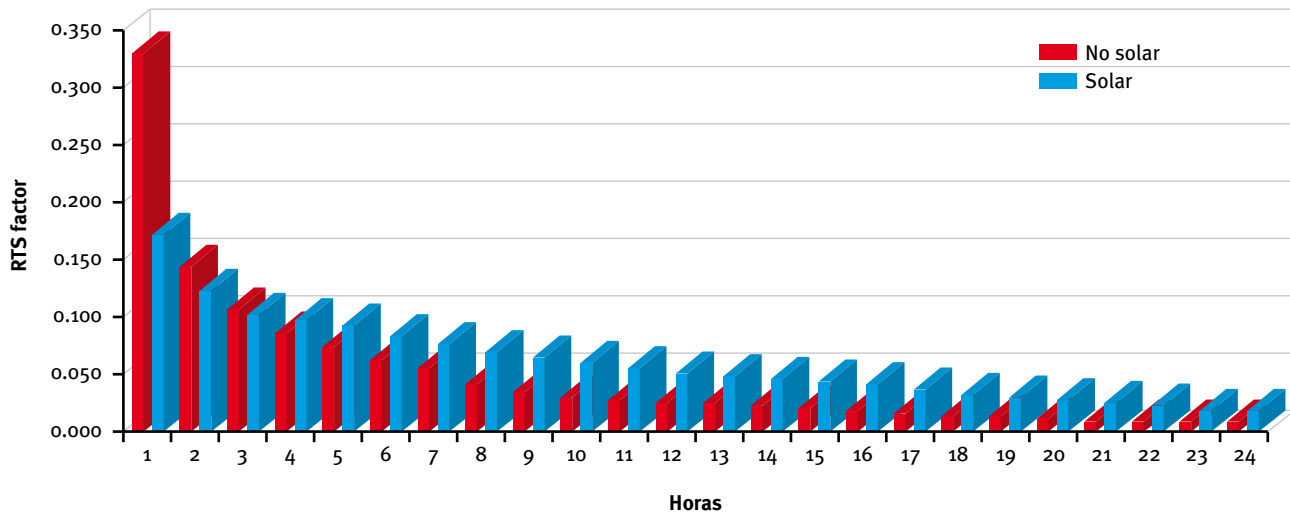
Factores radiantes temporales:

r_0 : fracción de la ganancia de energía radiante en el instante h que pasa al aire.

r_i : fracción de la ganancia de energía radiante en el instante $h-1$ que pasa al aire ahora, en h , etc.

$q_o (W)$: ganancia radiante en el instante h (ahora).

Serie temporal radiante



La gráfica muestra un ejemplo de los valores de los factores para una secuencia temporal periódica de 24 horas. El gráfico distingue entre radiación de origen solar y no solar. Esta última tiene una respuesta más rápida (en el caso que se muestra en la gráfica) que la solar.

De una forma más genérica, sería necesario utilizar el método del balance de energía visto previamente y calcular estos factores r para cada zona (como hace por ejemplo CALENERVyp) y para cada tipo de ganancia. Sin embargo eso haría perder la versatilidad al método. Así se asume lo siguiente:

- Para la energía radiante del sol transmitida a través de acristalamientos, se asume que se distribuye uniformemente por el suelo exclusivamente.
- Para los otros tipos de energía radiante, por ejemplo luces, personas, etc., se asume un reparto, bien proporcionalmente a su superficie, bien 60% al suelo y resto proporcionalmente a su superficie, etc.
- Para el intercambio radiante en longitud de onda larga entre los cerramientos interiores (muros, ventanas, etc., ya que en ese canal energético el recinto no tiene “agujeros”), se asume un coeficiente equivalente de radiación que se suma al de convección. Así se elimina la necesidad de conocer la geometría.

5.1 CONCEPTOS

Los servicios fundamentales a proporcionar en el interior de los locales, para los que se utiliza la energía térmica en los edificios son:

- ACS.
- Refrigeración.
- Calefacción.
- Ventilación.
- Control de la humedad.
- Iluminación.

Un sistema, se podría definir como un conjunto de elementos dispuestos con el objetivo de suministrar en el momento determinado y en la cantidad necesaria, un servicio de los anteriores a un local.

Cuando un sistema da servicios a otros sistemas suele decirse que el sistema está formado por subsistemas. Por ejemplo, una planta enfriadora produce agua que es enviada a un climatizador que a su vez acondiciona aire que es enviado a sus zonas a través de conductos. En general un subsistema es cualquier subconjunto de elementos creado conceptualmente por el proyectista por alguna razón.

Programas como CALENER-GT (DOE2) hablan de subsistemas primarios y secundarios, aunque esta nomenclatura puede ser confusa. Por subsistemas secundarios este programa entiende aquellos sistemas que sirven al clien-

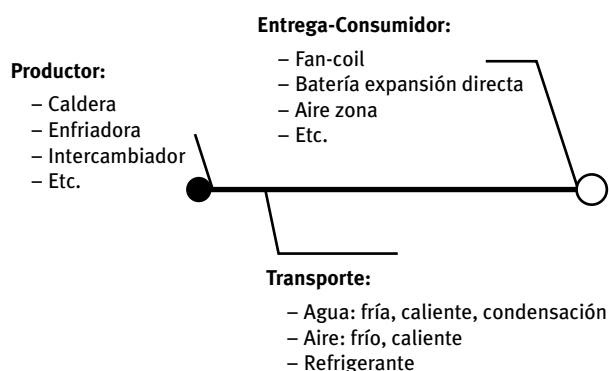
te final, que es el aire de las zonas y por extensión a los usuarios. Los subsistemas primarios pueden tener otros subsistemas, como se verá a continuación, y estos reciben también el nombre de secundarios, pero no se deben confundir con los anteriores.

El concepto de un sistema más general responde al siguiente esquema:

[Recurso 1^º] + <transporte> + <transformador o generador: recurso 2^º> + <transporte> + (entrega un servicio).

- 1 Un recurso: recurso primario como la electricidad, etc.
 - a Se llama energía primaria en Certificación energética a aquella que no ha sufrido transformación.
 - b Se llama energía final aquella que sí ha sufrido transformación y es utilizada por los usuarios para algún servicio.
- 2 Lo transporta.
- 3 Lo transforma o genera si es necesario (recurso secundario).
- 4 Lo transporta.
- 5 Lo entrega, dando un servicio a la zona o a otro sistema para el cual representa su suministro de recursos.

El concepto de sistema anterior se puede representar como muestra la figura, por una línea y dos puntos que representan el productor y el consumidor del servicio.



Servicios especiales

- El transporte en sí mismo.
- La acumulación de energía (tanques de ACS o los depósitos tampón).

1) Ejemplos de recursos energéticos primarios de que dispone una edificación son:

- Gratuito/situación: local, en el lugar.

Fuentes

- Solar.
- Agua pozo/lago.
- Temperatura seca del aire exterior.
- Sequedad del aire exterior (temperatura húmeda).
- Terreno.
- Compra/situación: externa, debe ser comprado y transportado hasta el lugar.

Fuentes

- Electricidad
- Gasóleo
- Gas
- Carbón
- Biomasa

2) Ejemplos de transformadores (generadores) de un recurso secundario:

Máquinas con ciclos Rankine (de compresión)

- Planta enfriadora
 - Transforma electricidad en agua fría (recurso secundario) y el calor lo envía al aire (intercambio sensible) o bien a una torre de refrigeración.
- Bomba de calor
 - Puede dar servicio de calefacción y refrigeración.
- Recuperadoras. Por ejemplo, sería el caso de una planta enfriadora cuya disipación de calor en el condensador no se pierde al aire de la calle sino que se aprovecha.
- Equipos de refrigerante variable
 - Transforma la electricidad en fluido refrigerante líquido a alta presión (recurso secundario) que envía a los equipos interiores en caso de necesitar refrigerar o al equipo exterior en caso de necesitar energía (calor), tomándola del aire exterior al evaporarse (recurso primario).

Otros

- Captador solar
 - Captura la radiación solar (recurso primario) y calienta agua.
- Calderas
 - Transforma la energía contenida en el combustible (recurso primario) en agua caliente (recurso secundario).

3) Sistema de transporte

Normalmente se refiere al transporte de fluidos (aire, agua, refrigerante, gasóleo, gas, etc.) y no al de sólidos (carbón o biomasa) o electricidad. Con el fluido se busca un efecto térmico, por lo que se llama red termo-hidráulica, a diferencia de una red de abastecimiento de agua que recibe se llama simplemente hidráulica.

- Redes cerradas (a la atmósfera), bucles o lazos
 - El agua fría de la enfriadora se envía a través de una red de tuberías.

- Igualmente con una red de calefacción y radiadores o suelo radiante.
- Una red de tuberías de refrigerante transporta el refrigerante.
- Una red de gas transporta un recurso primario sin transformar.

- Redes abiertas (a la atmósfera)

- Una red de conductos de aire sirve para ventilar y/o para refrigerar o calentar, utilizando aire como fluido de transporte.

Nota: en realidad, la atmósfera se considera un nodo más de la red de modo que todas las redes de conductos son cerradas desde un punto de vista hidráulico.

4) Ejemplos de entrega de energía que se puede hacer con objeto de ofrecer un servicio dentro de un local o para otro sistema.

Según el mecanismo de transmisión de calor utilizado se podrían clasificar en:

- Entrega puramente convectiva

- Intercambiador dentro de un depósito de acumulación.
- Fan-coils terminales en cada zona usados para enfriar o calentar el aire.
- Batería de frío en una UTA (Unidad de tratamiento de aire) para deshumectar (latente) o enfriar (sensible).

- Entrega mixta, convectiva+radiante (térmica –infrarrojo– +visible)

- Radiadores de agua caliente.
- Suelo radiante.
- Techo frío.
- Iluminación (radiación visible).

Comentarios sobre su implementación en los programas de simulación.

En simulación la entrega es normalmente convectiva ya que la mayoría de programas tratan de controlar las condiciones del aire (temperatura y humedad) en

los espacios ocupados. Existen intentos de simular sistemas radiantes (calor y/o frío) pero todavía queda mucho por hacer.

Un problema en simulación es el transporte. El transporte de recursos (aire, agua, refrigerante, etc.) requiere del conocimiento de la geometría de la red y sus características (diámetros, tipo de superficies –hierro, plástico–, accesorios, etc.) para saber el consumo de energía primaria asociada al transporte. Por esta razón la definición de estas redes suele reducirse a : unas pérdidas de presión para el caudal nominal, la elección entre sistema de bombeo con velocidad variable o fija y a unas pérdidas o ganancias térmicas por unidad de longitud. A menudo incluso ni se define parámetro alguno.

Este es un gran inconveniente porque el bombeo puede llegar a ser un porcentaje elevado del consumo final y las pérdidas/ganancias térmicas de las redes queda despreciada. Esto es especialmente delicado en refrigeración ya que la energía de bombeo se disipa en calor y supone una carga adicional para el sistema de producción de frío.

Otro problema, relacionado con el transporte, es la topología de la red. Esto es, si dibujamos una red de tuberías con sus elementos terminales (radiadores por ejemplo) en una hoja de papel, el esquema que resulta contiene la topología (las relaciones de vecindad de elementos y tuberías) pero no la geometría (la medida exacta de los tramos y los elementos). La topología indica cómo se hace el reparto del recurso (por ejemplo: redes con retorno invertido, etc.). El cálculo de la red se agrava cuando el esquema forma lazos o bucles, ya que no puede ser secuencial y existe realimentación de la información o, dicho de otra forma, hay que resolver un sistema de ecuaciones, lo que normalmente implica una costosa iteración. Disponer de la definición de la red capacitaría al usuario para descubrir cómo se adapta su red de emisores térmicos (frío/calor) a las diferentes demandas durante el año, tanto en lo que se refiere a dar el servicio correcto (potencia necesaria siempre para evitar salir de confort) como en lo que se refiere a energía consumida. Desafortunadamente, en la práctica, todavía está lejos una situación así.

Finalmente, quedaría por ver cómo son simulados los generadores o transformadores de un recurso. Básicamente se trata de definir su eficiencia y su capacidad en ciertas condiciones nominales de funcionamiento. Los programas alteran estos valores en función de ciertas variables que los influyen: carga parcial –esto es, cuando no están a potencia nominal–, temperatura exterior, temperatura de producción, etc. Los programas suelen utilizar

un conjunto de ecuaciones algebraicas (polinomios) que ajustan estos dos parámetros a modo de emulación, sin ninguna base física para las ecuaciones.

Existe una tendencia moderna al uso de modelos con base física. Se trata de ecuaciones de balance de energía y de entropía aplicadas a las máquinas. Estos modelos poseen ciertos parámetros que se ajustan en base a datos que aparecen en el catálogo y que el programa usa internamente para descubrir lo fuertes o importantes que son los modos en que puede perder su eficiencia y su capacidad. Dicho de otro modo, cómo genera entropía cuando las condiciones no son las nominales. En términos más comunes, imagine el lector una máquina de aire acondicionado. Para ajustar su capacidad de frío la máquina debe reducir la cantidad de líquido refrigerante que circula por ella. ¿Cómo lo hace? Originariamente se hacía simplemente cerrando la llave de paso (la válvula) de expansión y esta brusquedad significaba malgastar la energía eléctrica consumida previamente en el compresor (genera mucha entropía, irreversibilidad, o expansionan, sin más, algo que costó comprimir). Las máquinas más modernas actuales controlan la velocidad de giro del compresor (los llamados sistemas inverter, por ejemplo) y por lo tanto son más eficientes ya que ajustan su consumo a las necesidades (sin generar entropía de más).

Por no extender más esta guía, y dado que esta última forma de simular no es la más extendida actualmente, no se tratará aquí, pero se ha incluido aquí por completitud, si bien es cierto que existe un CD llamado ASHRAE ToolKit que contiene documentación y programas para hacer la identificación de parámetros de los modelos –con base física– de enfriadoras y bombas de calor. Por ejemplo, veamos cómo emula DOE2 o CALENER-GT una máquina de absorción de simple efecto y cómo lo haría un modelo con base física.

Sobre la base de balances de energía se puede demostrar que una máquina de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O se podría simular con las ecuaciones siguientes:

$$Q_{\text{evap}} = s \cdot (\Delta\Delta t_{\text{local,n}} - \Delta\Delta t_{\text{min}})$$

$$\text{EER} = \frac{\Delta\Delta t - \Delta\Delta t_{\text{min}}}{G \cdot \Delta\Delta t + \left(\frac{1}{\alpha} - G\right) \Delta\Delta t_{\text{min}}}$$

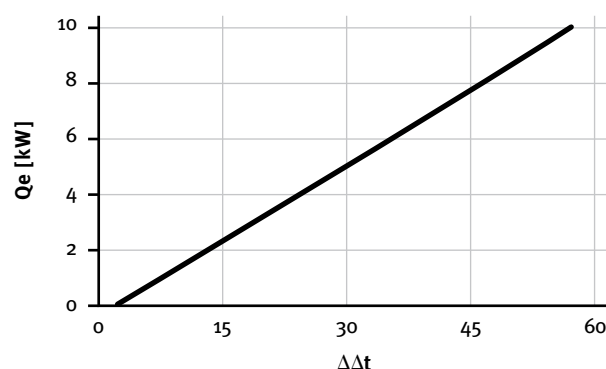
$$\Delta\Delta t = (T_{\text{gen}} - T_{\text{abs}}) - B (T_{\text{cond}} - T_{\text{evap}})$$

$$B = 1.15$$

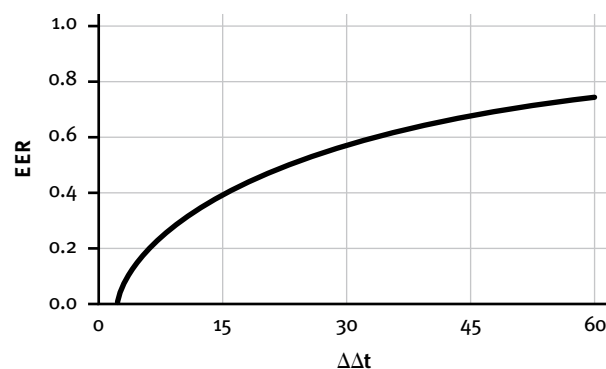
$$G = 1.04$$

Para una determinada máquina los parámetros a ajustar son $\{\Delta\Delta t_{\text{min1}}, \Delta\Delta t_{\text{min2}}, \alpha, s\}$. Para ello el modelo anterior $\{Q_{\text{evap}}, \text{EER}\}$ –potencia de frío y eficiencia– se debe aplicar en dos puntos de funcionamiento diferentes con lo cual tenemos 4 ecuaciones y 4 incógnitas. ¿Cuál es el significado físico? El parámetro s es proporcional a la conductancia total (UA) instalada en todos los elementos de la máquina (evaporador, condensador, generador y absorbedor). El parámetro α indica cómo se hizo el reparto de la capacidad de transmisión total anterior. Del total s cuánta se pudo en absorbedor y generador. Finalmente la doble diferencia de temperatura $\Delta\Delta t$ indica la “fuerza termodinámica” que hace que la máquina produzca frío. A mayor fuerza mayor capacidad y mayor rendimiento (las figuras siguientes muestran una representación de las ecuaciones anteriores). Los dos valores de $\Delta\Delta t_{\text{min}}$ indican una “fuerza” mínima necesaria o un “rozamiento” interno y este puede variar en función de la carga $\Delta\Delta t$ de la máquina. Habitualmente un fabricante fija α y los $\Delta\Delta t_{\text{min}}$ con su diseño y toda la gama de máquinas comparte estos parámetros y sólo varía s (la escala de la máquina).

Potencia máquina absorción



Rendimiento máquina absorción



Por el contrario, DOE2 usa las siguientes ecuaciones:

$$Q_{gen} = HIRN \cdot f_{HRI}(PRL) \cdot f_{HIR}(CHW, ECT) \cdot \text{Capacidad}_N \cdot f_{Capacidad}(CHW, ECT).$$

HIR: Heat Input Ratio. Potencia en el generador.

PRL: carga parcial (%).

CHW: chilled water. Temperatura del agua enfriada a la salida.

ECT: entering condensing temperature. Temperatura del agua de entrada al condensador.

N: indica valor nominal.

f: factor (0-1).

Dichos factores tienen por expresión una ecuación polinómica sin ningún sentido físico:

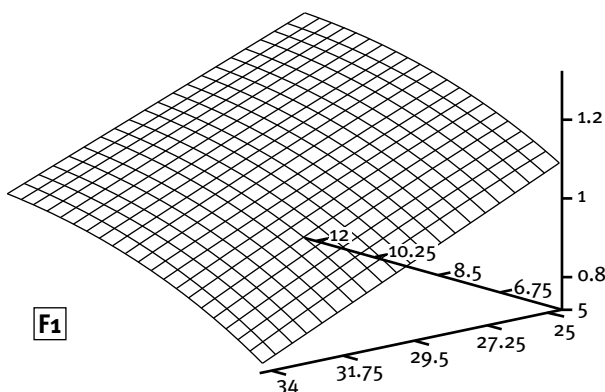
$$Z(X,Y) = a + b \cdot X + c \cdot X^2 + d \cdot Y + e \cdot Y^2 + f \cdot XY$$

Las temperaturas están en grados Fahrenheit. De modo que, por ejemplo:

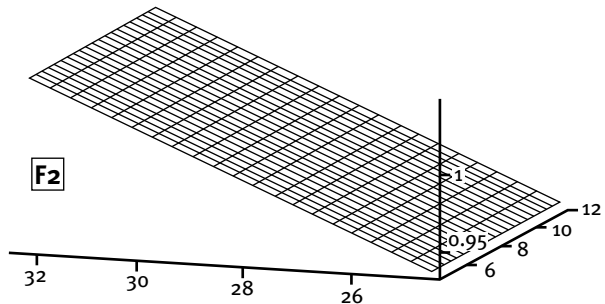
a = 0.6522729	a = 0.7234120
b = 0.0000000	b = 0.0790060
c = 0.0000000	c = -0.0008970
d = 0.0005450	d = -0.0252850
e = 0.0000550	e = -0.0000480
f = 0.0000000	f = 0.0002760

, cuya representación gráfica es:

Factor potencia máquina absorción SE



Factor rendimiento máquina absorción SE



Los modelos físicos tienen la ventaja de que adaptan su comportamiento a la tecnología vigente porque, al estar basados en conceptos físicos, se conocen los límites en cuanto a rendimientos y capacidades, y los parámetros contienen la “tecnología”.

Sin embargo, los modelos que emulan, son modelos “universales” que deberían ser ajustados por completo a cada máquina en función de su tecnología.

Quedaría por comentar qué ocurre con la dinámica de los sistemas. Cuando se arranca, se para o se cambian las condiciones de un sistema existen tiempos de retardo, partes del sistema se deben calentar o enfriar como medida previa a dar el servicio. Ese frío o calor en las sucesivas paradas y arranques se gana o se pierde y por lo tanto es un coste.

¿Qué pasa con los generadores? Cuando una caldera se arranca, por ejemplo, tarda un tiempo en alcanzar la temperatura de régimen. Cuando se detiene, toda la energía acumulada en la caldera se pierde cuando ésta se enfría y debe ser acumulada de nuevo cuando vuelve a arrancar. Del mismo modo, ¿qué sucede cuando se varía el caudal de agua de una enfriadora o cuando simplemente se pone en marcha?

¿Qué sucede con el transporte del agua fría y caliente? Parece claro que el agua tarda un tiempo en llegar a los puntos de servicio. También parece claro que el agua fría ganará calor a lo largo de su recorrido y que la caliente lo perderá, y a veces esas cantidades son apreciables. DOE2 permite definir una conductancia total UA para las tuberías, sin embargo, CALENER-GT o CALENERVyp no.

Finalmente, ¿qué pasa en la entrega? Por ejemplo, tenemos la experiencia de que un fan-coil o un sistema de expansión directa (split) con poca masa reacciona más rápido que un sistema que utilice suelo radiante, el cual debe ser arrancado (y por lo tanto detenido) con más antelación para conseguir unas condiciones interiores confortables y un uso racional de la energía. ¿Cómo

adaptan los programas de simulación los consumos de la parte de producción y transporte a las diversas condiciones de entrega? Más adelante se verán algunas soluciones adoptadas.

Los tiempos característicos en los sistemas convencionales que hacen una entrega convectiva de la energía, suelen estar del orden de 5 a 10 minutos. El tiempo característico de un sistema es el tiempo que tarda la respuesta del sistema en alcanzar el 93% de su salida estacionaria ante una excitación escalón (por ejemplo, un cambio repentino de la temperatura de consigna).

Desafortunadamente, por lo general, los programas de simulación no contemplan toda esta riqueza de dinámicas (diferentes frecuencias de respuesta) y consideran que el sistema sigue una sucesión de estados estacionarios (ecuaciones algebraicas para representar su capacidad y rendimiento). Además esto implica que se debe resolver un sistema de ecuaciones.

La consideración de esta dinámica podría ayudar por ejemplo a regular mejor los sistemas para ser más eficientes. Por lo tanto, las pérdidas de eficiencia debidas a un arranque y una parada sucesiva del sistema, que a menudo se da en la realidad (que en inglés recibe el nombre de “cycling”, de ciclos repetidos), suele estar mal contemplado en los programas.

Adicionalmente, pocos programas hacen una simulación simultánea del edificio y sus sistemas. Existen muchas dificultades que hacen esta simulación compleja. Uno fundamental es lo que se conoce en dinámica de sistemas como rigidez. La rigidez de un sistema aparece cuando una parte de él reacciona mucho más rápido que el resto. En este caso los sistemas y el edificio, respectivamente. Entonces, por culpa de los elementos que reaccionan rápido todo debe ser calculado con un paso de tiempo menor. Otra dificultad está en el uso de controles altamente no-lineales como por ejemplo el TODO-NADA tan sencillo y económico en la práctica, pero tan complejo de simular matemáticamente.

Por último, ¿cómo se gestiona el conjunto Edificio + Sistemas?

El DOE2, CALENER-GT, y CALENERVp hacen una simulación en secuencia: primero calculan la demanda de energía del aire de las zonas definidas en el edificio, y más tarde calculan qué ocurre realmente cuando el sistema actúa sobre la demanda calculada previamente para poder satisfacerla. Este método hace que el cálculo sea rápido, aunque se pierde algo de la interacción entre el sistema, el edificio y sus ocupantes.

Por el contrario, el programa EnergyPlus sí calcula todo en el mismo instante, lo cual le lleva un mayor tiempo de cálculo y a veces algunas dificultades de convergencia.

5.2 MODELO DE DEFINICIÓN DE SISTEMAS EN ENERGY+PLUS

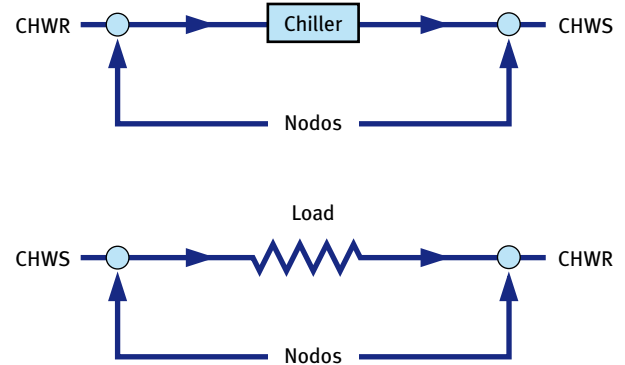
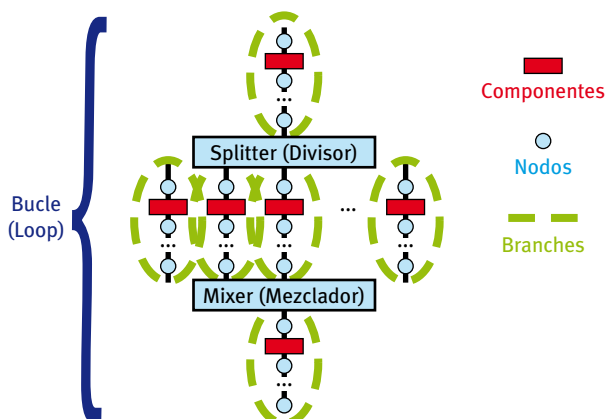
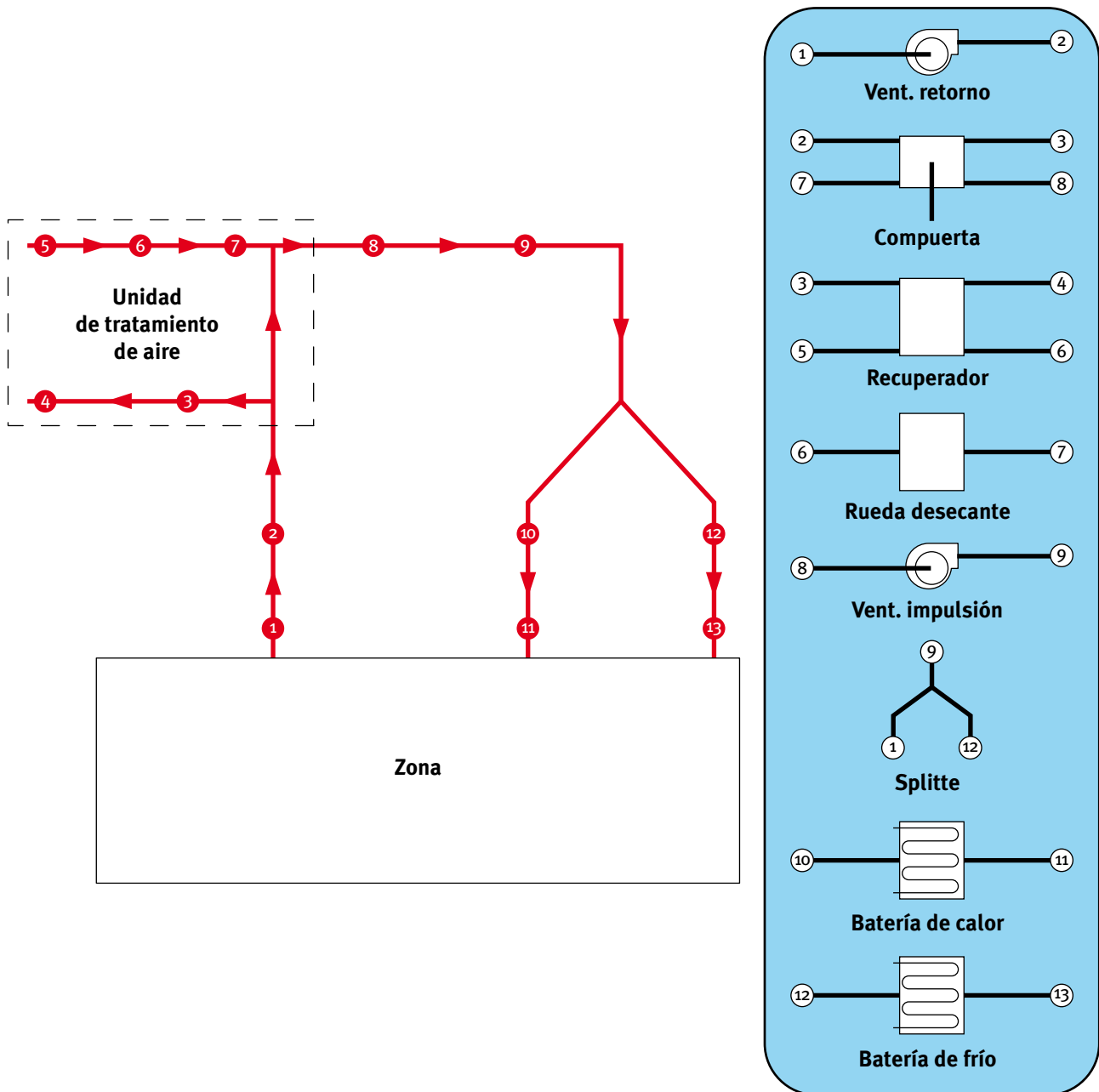
Uno de los primeros intentos de trasladar al modelo de definición de los sistemas de acondicionamiento, la realidad de la complejidad de éstos, la representa la solución presentada por EnergyPlus, que ahora se pasa a comentar someramente.

Uso de grafos para su definición de manera que el modelo de simulación siga el “esquema” marcado por el grafo. Los elementos que lo definen son:

- Branch (Rama).
- Branch List (Lista de Ramas).
- Connector list (Lista de conectores). Se trata de si las ramas están conectadas a través de los siguientes 2 elementos (splitter y mixer). Sólo pueden haber uno de cada en un bucle.
- Splitter and zone splitter (Troceador/divisor de zonas).
- Mixer and zone mixer (Mezclador de zonas).

Conjunto de elementos según jerarquía (de más complejos a más sencillos) que los elementos anteriores pueden definir:

- Loops (bucles de aire, agua fría, agua caliente, agua de condensación, refrigerante, etc.).
- Supply and demand sides (lado de suministro “productor” y lado de demanda “consumidor del servicio”).
- Topology of sides (topología de los lados; esto es forma definida por la conexión de ramas, partidores y mezcladores).
- Ramales: conjunto de componentes colocados en una misma rama.
- Components. Componentes específicos de equipos.
- Nodes. Nodos donde se guardan las condiciones de salida o entrada a los componentes. Es el elemento más bajo de la jerarquía.

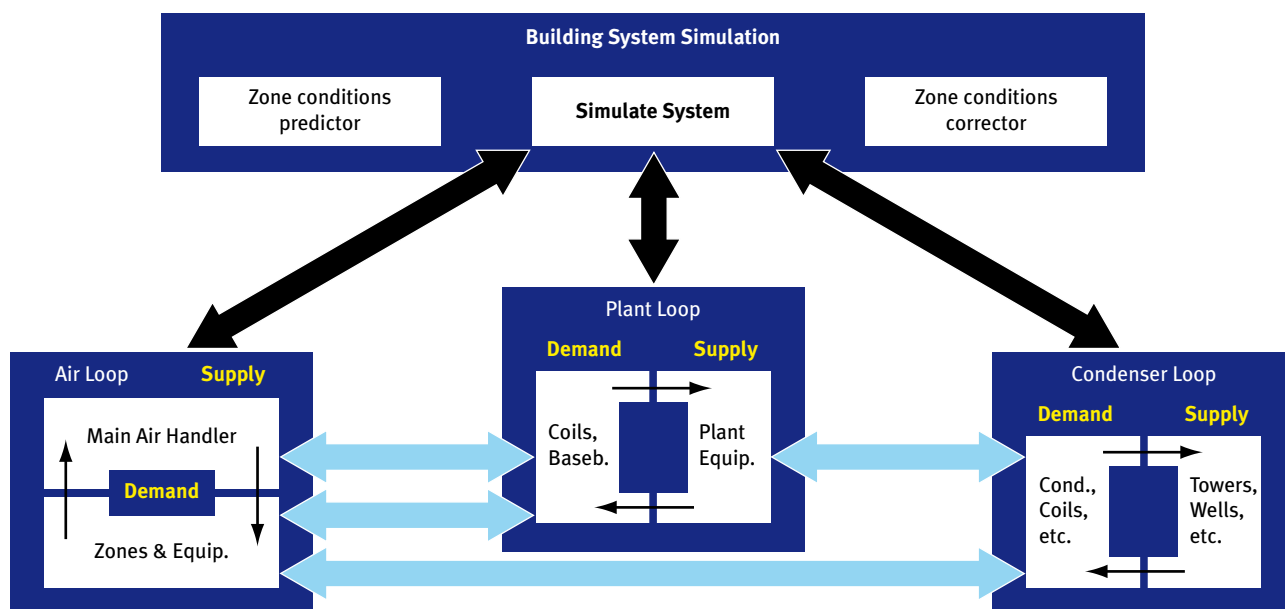


EnergyPlus se dio cuenta que en la realidad el concepto de zona es algo arbitrario. El diseñador de la instalación piensa en un grupo de locales –arquitectónicamente hablando– y los une formando una zona con la idea de entregar un servicio. Así la zona forma un consumidor (y por lo tanto tiene una demanda). Sin embargo el ingeniero no tiene por qué pensar en un único sistema que cubra todas las demandas del consumidor. Este concepto de sistema es a su vez arbitrario también. Normalmente agrupará los sistemas por el tipo de demanda que cubre; ventilación, refrigeración, calefacción, iluminación, ACS, etc. Sin embargo, también pueden haber dos sistemas que proporcionen un mismo servicio. Por ejemplo sistemas perimetrales de fan-coils que proporcionan frío y calor para compensar las variaciones meteorológicas y los sistemas sólo-frío interiores. Lo que en cualquier caso debe quedar claro, es que el sistema debe poseer un sensor (que constitu-

ye sus “ojos”) en la zona para que pueda determinar si el “cliente” tiene demanda o no. Quizá la confusión o el problema pueda aparecer en el caso de que dos sistemas compartan un sensor. Por ejemplo, habitualmente las zonas se modelizan como locales para los cuales se asume que comparten una única idéntica temperatura del aire. Dos sistemas que actúen buscando controlar esta temperatura simultáneamente interactuarán.

En cualquier caso, EnergyPlus permite que varios sistemas actúen sobre una zona.

El siguiente esquema obtenido del manual de EnergyPlus muestra cómo trata los sistemas durante el cálculo. Al contrario que el DOE2, que hace un cálculo secuencial, EnergyPlus trata de seguir las interacciones entre el edificio y sus sistemas. Esto entraña bastantes dificultades por el diferente tiempo de respuesta de uno y otro.



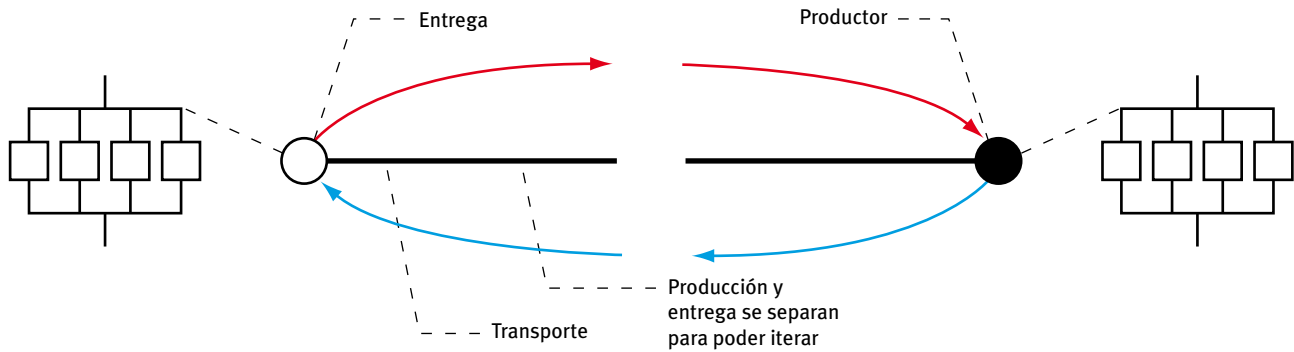
En la parte de sistemas define 3 bucles fundamentales: el de aire, el de agua (usada para calentar o enfriar el edificio) y el de agua de condensación. A su vez, divide estos bucles en la parte que sirve de entrega de servicio (demand) y el de producción (supply). La razón para ello es que su unión significaría un cálculo implícito –se debería resolver un sistema de ecuaciones– y por lo visto los diseñadores de EnergyPlus han preferido usar un método iterativo en el que se calcula cada parte por separado hasta que se obtiene convergencia en los “puntos de contacto” dentro de cada bucle. Se podría decir que han pensado en tres sistemas principales según el fluido que manejan y su propósito. Dentro de cada sistema tenemos la parte de entrega (que tam-

bién llaman secundario y que entrega al usuario final, la zona) y la parte de producción u obtención del recurso energético (a la que llaman primario, que a su vez puede tener secundarios del primario).

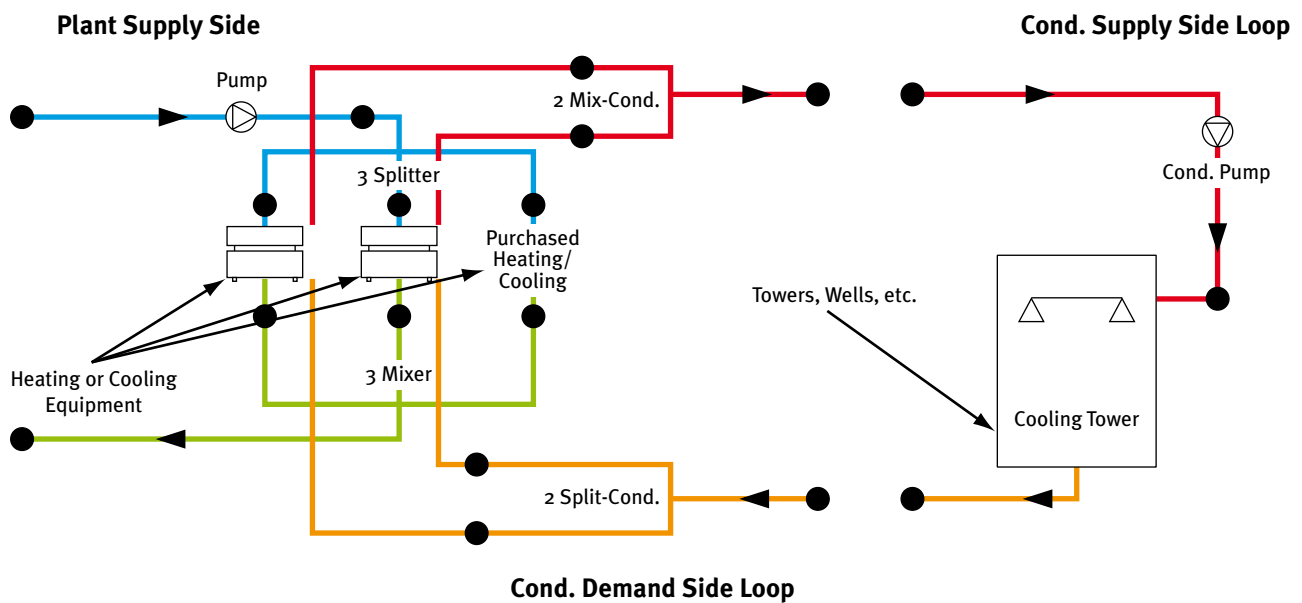
Como ejemplo de bucles se reproduce el siguiente esquema del manual que muestra la parte productora del bucle de condensación (Supply) y la parte de entrega de su servicio a las enfriadoras (parte productora del bucle de plantas). Como se puede apreciar en cada “trozo” en que se ha dividido el bucle se pone, como máximo, un separador (splitter) y un mezclador (mixer) que une o mezcla una cantidad indeterminada de ramales. La idea básica detrás

de esta estrategia es poder conectar en paralelo un conjunto de productores (calderas, enfriadoras, fan-coils, etc.) y lo mismo con la entrega (un conjunto de

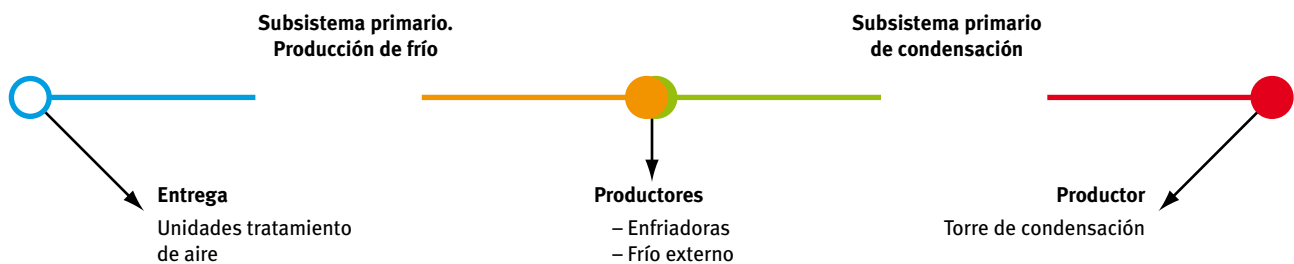
zonas, UTAS, etc.). De acuerdo con la forma esquemática propuesta en esta guía para representar los sistemas tendríamos algo así:



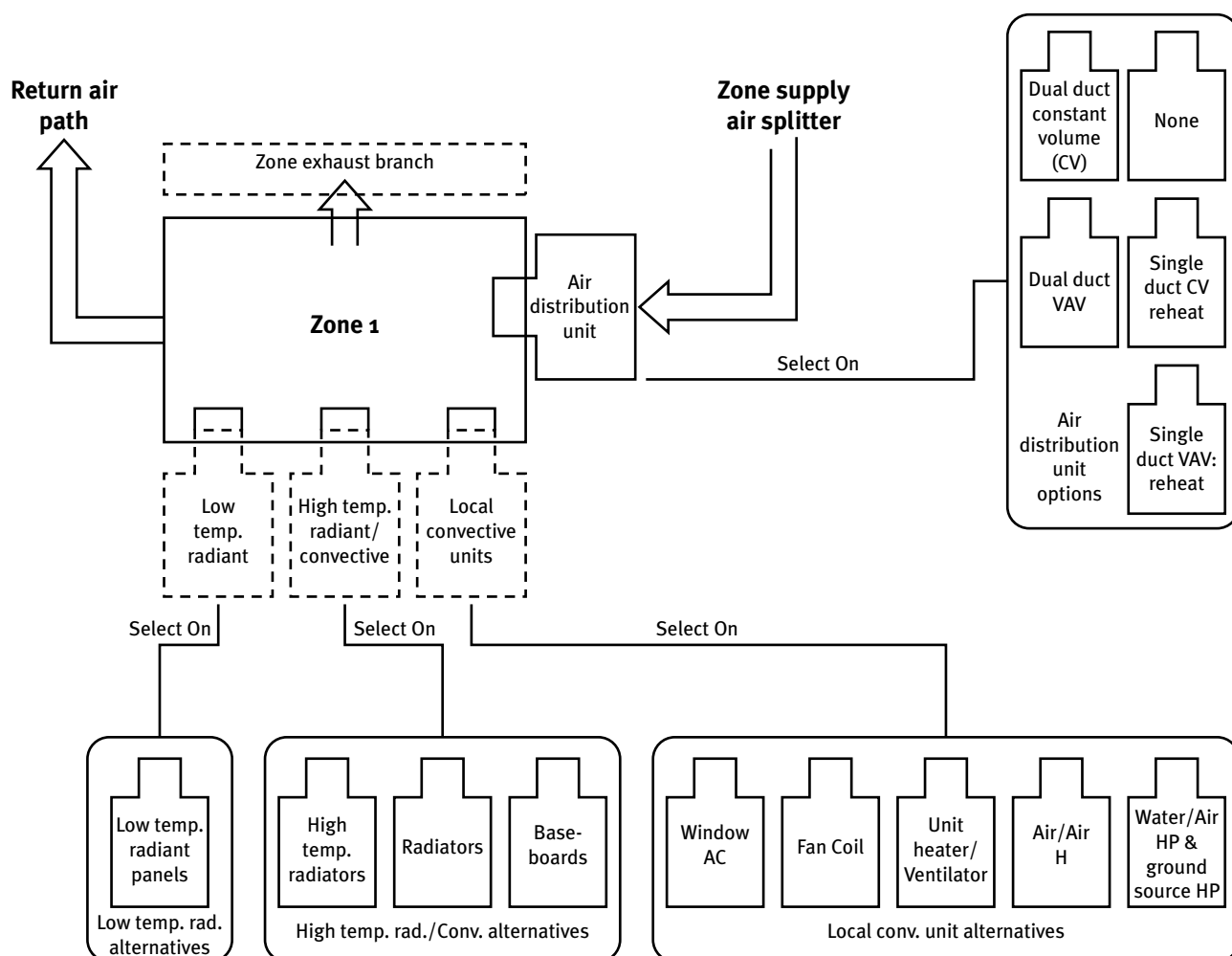
Typical Plant & Condenser Loop



Cuya representación esquemática o conceptual propuesta sería:



Del mismo modo para el bucle de aire (considerado como subsistema secundario) y que el manual de EnergyPlus representa como sigue:



Existen diferentes tipos de terminales para la entrega del servicio. Los clasifica en función de la forma de entregarlo (por orden de izquierda a derecha):

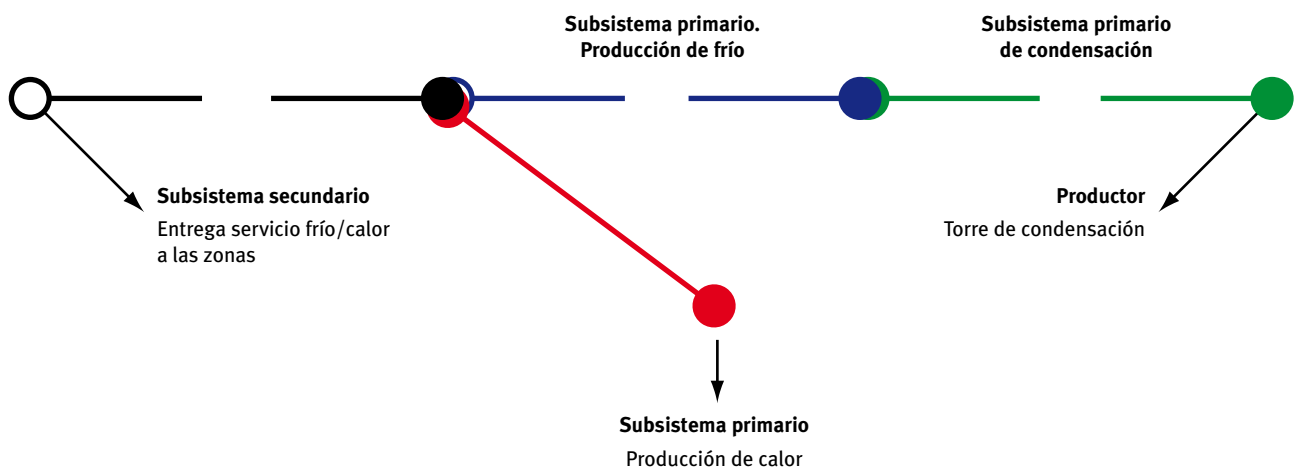
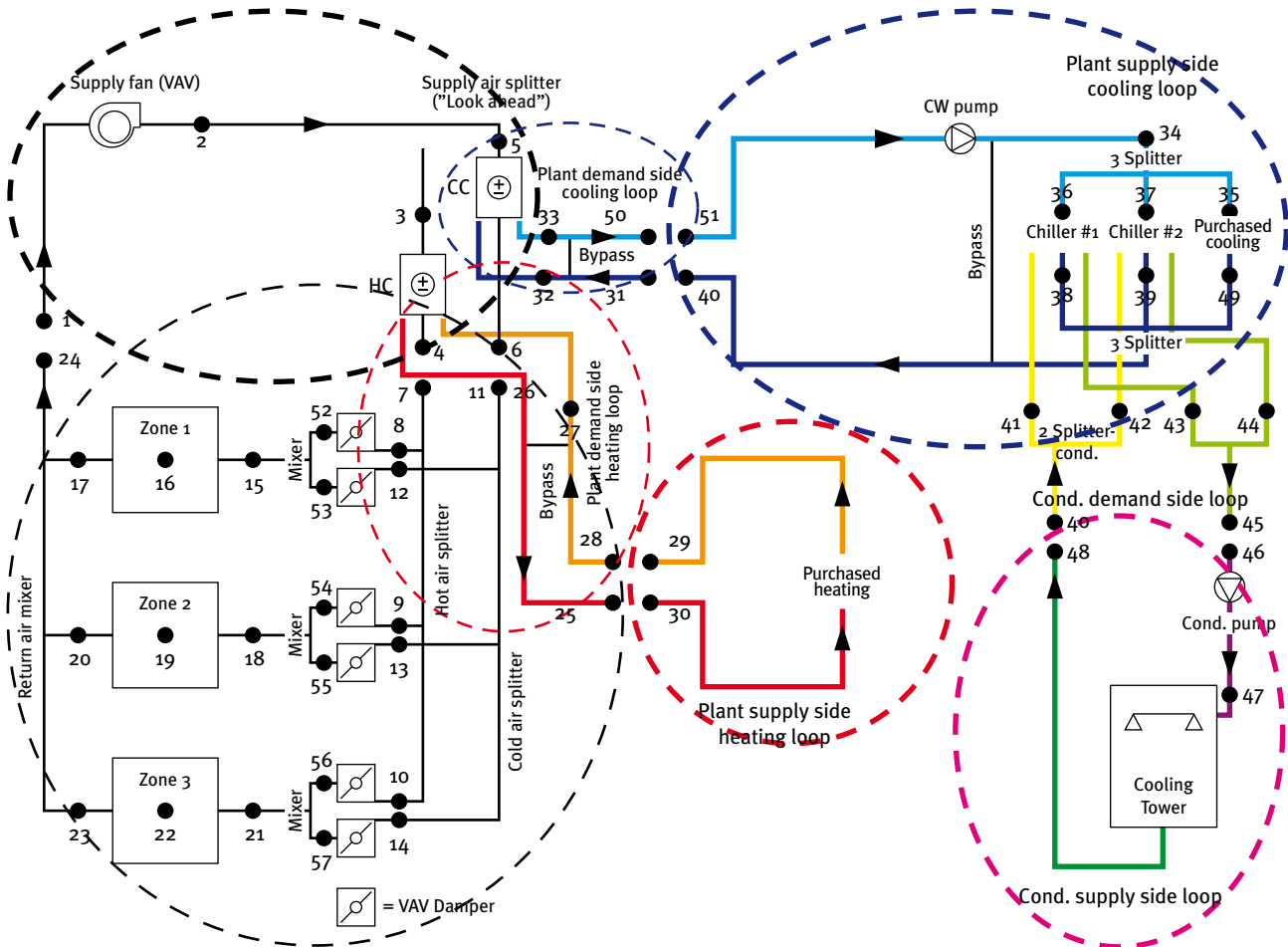
- Radiante de baja temperatura.
- Radiante/convectivo de alta temperatura.
- Convectivo en el mismo local.
- Convectivo con sistema de distribución.

La clasificación para los terminales de aire es bastante amplia: doble conducto, VAV volumen de aire variable, conducto único con recalentamiento terminal, etc.

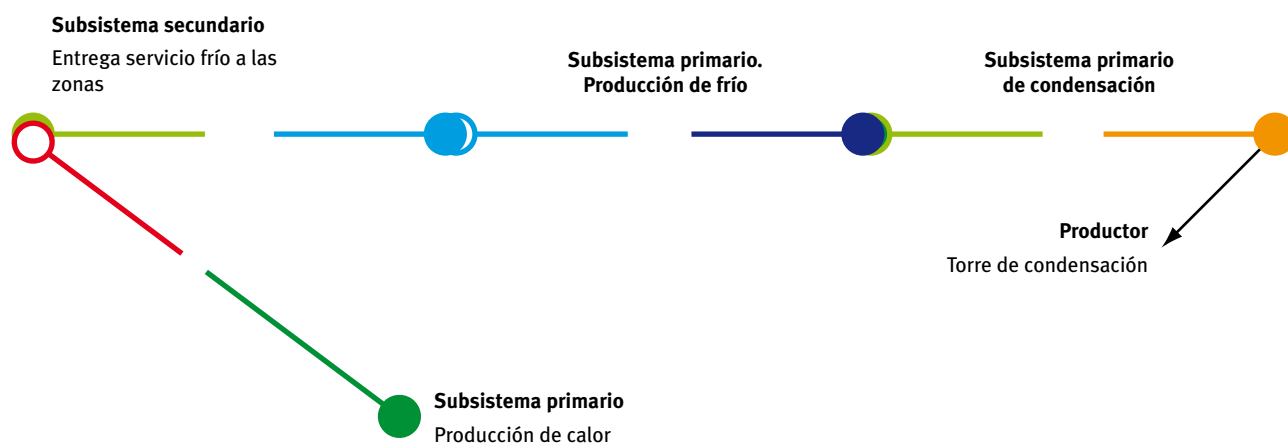
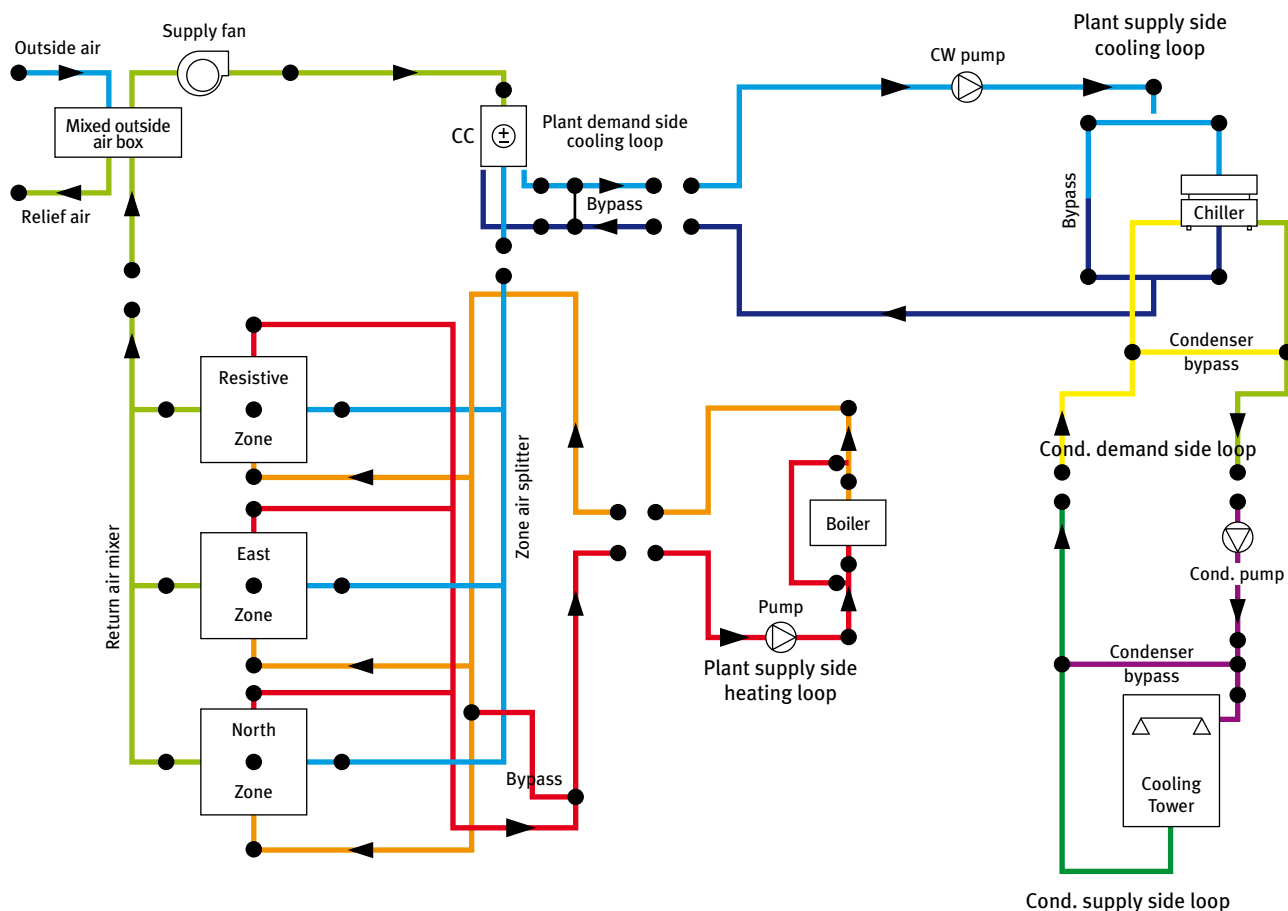
El siguiente esquema que muestra los tres bucles y su división en entrega y productor (demand and supply, respectivamente). Las líneas discontinuas más gruesas representan la parte productora de cada bucle. Como se puede apreciar, cada productor entrega su servicio, bien al consumidor final o bien a la parte productiva de otro sistema. Existe un subsistema primario de condensación que ofrece su servicio de disipación de calor de condensación a las enfriadoras. Éstas a su vez pertenecen al subsistema primario de producción de agua fría que entregan a una unidad de tratamiento de aire (UTA) que posee dos baterías una de frío y otra de calor. Existe otro subsistema primario de producción de calor. El productor de este subsistema es calor comprado a una red de vapor (por ejemplo). Finalmente existe un sub-

sistema secundario que usa aire como transporte del servicio de climatización. El productor de este subsistema son las baterías frías y calientes de la UTA y la entrega la hace directamente al aire de cada zona.

3 zone dual duct VAV system



Este otro esquema muestra una instalación de suelo radiante y un sistema convencional de refrigeración por un sistema de conductos.



El esquema anterior muestra claramente que se han definido 3 zonas: Resistive, East y North. Pero sin embargo sobre ellas entregan sus servicios 2 sistemas: el

que proporciona calefacción a través del suelo radiante y, por otra parte, el sistema de conductos que proporciona aire acondicionado.

5.3 DESCRIPCIÓN DE LA CREACIÓN DEL MODELO-D (DEFINICIÓN) DE LOS SISTEMAS EN LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ESPAÑOLES OFICIALES PARA LA CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

Este es otro ejemplo de cómo se ha organizado la definición de las instalaciones en programas de simulación usados, en este caso, para la certificación energética.

La normativa española ha proporcionado dos alternativas. Por un lado el CALENERVyp para edificios de viviendas y pequeño terciario y por otro el CALENER-GT (DOE2) para grandes edificios terciarios.

Veamos primero cómo se definen los sistemas en el CALENERVyp.

CALENERVyp

La entrada de datos tiene forma de árbol. Las carpetas asociadas al árbol están organizadas de acuerdo con ciertas categorías.

- 1 Demanda de ACS
- 2 Unidades terminales
- 3 Equipos
- 4 Sistemas
- 5 Factores de corrección

Cada espacio definido en la parte geométrica del programa tiene asociado un uso (Acondicionado, No acondicionado o No habitable) y su demanda para los servicios de calefacción y refrigeración están determinados por la “física” asociada a ellos: tipo y cantidad de muros de cierta composición, tipo y cantidad de acristalamientos, etc.; sin embargo, el servicio de ACS necesita una demanda que se define en el punto 1 del esquema del árbol. Así, en función del uso del edificio se asigna a todos los espacios acondicionados unas necesidades de litros de ACS (litros/m²día). En el caso del CALENERVyp la distribución del consumo durante el día está oculta al usuario, pero en el CALENER-GT la distribución la puede fijar él mismo.

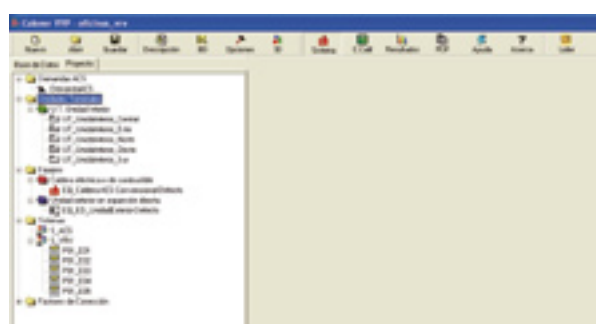
En el punto 2 se definen las unidades terminales (parte que entrega el servicio) que pueden ser de 3 tipos según el fluido usado:

- Unidad interior. Para sistemas que usan refrigerante. Un ejemplo es la típica consola blanca de los sistemas de aire acondicionado.
- Unidad agua caliente. Para sistemas que usan agua caliente. Son los sistemas de radiadores, fan-coils o suelos radiantes (este punto, como se comentó, necesita en los programas de simulación actuales, en general, un tratamiento mejor).
- Unidad de impulsión de aire. Para sistemas con UTAs (climatizadoras o unidades de tratamiento de aire).

Básicamente a las unidades terminales se les asocia una potencia o capacidad:

- Calefacción: potencia sensible (kW)
- Refrigeración: potencia total (kW) y potencia sensible (kW) (70% aproximadamente de la total; la latente es la diferencia de las anteriores).
- En el caso de sistemas de aire se debe indicar el caudal impulsado.

En calefacción la unidad intenta mantener la temperatura del aire interior, mientras que en refrigeración la unidad puede secar en cierta medida el aire, razón por la cual pide dos potencias (la total y la sensible).



El servicio de ventilación se trata de forma diferente. En el caso de ser uso residencial, la ventilación depende de las renovaciones hora asignadas a los espacios. En el caso terciario, es el sistema quien gestiona la ventilación y, por lo tanto, debe ser asignada, o a las unidades terminales (en el caso de unidades interiores de refrige-

rante), o a los equipos (sistemas de aire) y por lo tanto las renovaciones horas deben ser, o bien nulas, o bien representan infiltraciones (ventilación no controlada).

A continuación le siguen los equipos. Por equipos el programa entiende lo que en esta guía se ha llamado productores de un recurso. CALENER permite en su versión actual los siguientes:

Categoría	Subcategoría	Nombre	Comentario	Capacidad	Rendimiento
EQ_RendimientoCte	–	Rendimiento constante	Su rendimiento debe corresponder con el rendimiento medio. Está pensado para equipos no disponibles en CALENER (ESPECIAL)	–	–
EQ_Acumulador_AC	–	Acumulador de ACS	Depósito de ACS (ESPECIAL)	–	–
EQ_Calefacción Eléctrica	–	Calefacción eléctrica	Resistencia eléctrica	–	FCP
EQ_Caldera	–	–	–	T	FCP_P FCP_t
	Eléctrica		Resistencia eléctrica		
	Convencional				
	Baja Temperatura				
	Condensación				
	Biomasa				
	ACS-Eléctrica				
	ACS-Convencional				
EQ_ED_AireAgua_BDC	Bomba de calor aire-agua		Toma energía del aire y calienta agua	T	T FCP
EQ_ED_AireAire_SF	Solo frío por aire		Impulsa aire frío	tot_T tot_FCP sen_T	T FCP
EQ_ED_AireAire_BDC	Bomba de calor aire-aire		Impulsa aire frío y caliente	Reftot_T Reftot_FCP Refsen_T Cal_T	Ref_T Ref_FCP Cal_T Cal_FCP
EQ_ED_Unidad Exterior	Condensadora de un multi-split		Elemento que se pone en el exterior y que contiene el compresor y una batería de refrigerante (condensador). Es el equipo de color blanco con un ventilador que habitualmente vemos en las fachadas de los edificios	Reftot_T Reftot_FCP Refsen_T Cal_T	Ref_T Ref_FCP Cal_T Cal_FCP

La razón de establecer categorías es porque la eficiencia de cada equipo y la variación de su capacidad dependen de ciertos parámetros, que para una categoría dada son los mismos y la ecuación que los representa es la misma (aunque varían sus coeficientes de ajuste en función de la subcategoría), los parámetros son:

- El factor de carga parcial del equipo (FCP, función de la fracción de la potencia total del equipo FCP_P, o del tiempo de funcionamiento FCP_t a plena carga –efecto de arranques y paradas).
- La temperatura exterior, de impulsión, etc.(T).
- En función de si el equipo está en modo refrigeración (Ref) y dentro de éste si se trata de calor total (Tot), sensible (Sen) o modo calefacción (Cal).

Por lo tanto se trata NO de equipos concretos, sino de plantillas de equipos. Para cada uno de ellos se debe proporcionar su valor de capacidad de frío, calor (o ambos) y su rendimiento en condiciones nominales (en condiciones Eurovent). La variación de la capacidad y de su rendimiento se aplica como factores sobre estos valores nominales. Así, salvo los especiales, los equipos presentan un comportamiento que es independiente de su tamaño. Esto quiere decir que cuando el equipo es más grande, dado que el factor es el mismo, en valor absoluto se obtienen cambios en su capacidad y en el rendimiento mayores. Esto hay que tenerlo presente, pues la elección de la capacidad en equipos grandes, respecto a la potencia media que van a proporcionar, puede afectar al consumo más sensiblemente. La excepción son las calderas de condensación cuyo rendimiento sube a carga parcial.

Entre los terminales (entrega) y los productores, como se puede apreciar, no se ha incluido ninguna categoría que indique costes de transporte del recurso: potencia de ventiladores, de bombas o pérdidas de eficiencia en los equipos de expansión directa debidas a la separación y a la diferente cota entre las unidades interiores y la exterior. Tampoco tiene en cuenta las pérdidas de calor o ganancias de calor en el sistema de distribución de calor y frío respectivamente.

Este hecho facilita la definición del sistema por un lado, pero por otro debe ser tenido en cuenta si se intenta una extrapolación a la realidad. Dado que la simulación se utiliza aquí para certificar, (no para adivinar un consumo real), los certificados deben emitirse bajo unas hipótesis comunes para todos. En este caso para todos ellos se desprecia las pérdidas de eficiencia asociadas al transporte. Sobre este tema se volverá más tarde en otro capítulo.

Por último, una vez se tiene toda la colección de elementos que componen un sistema, estos deben ser agrupados y asignados a su sistema. Para el uso práctico, parece muy interesante el hecho de que los elementos colocados en las carpetas anteriores, si no han sido asignados a un sistema, no intervengan en los cálculos de simulación y por lo tanto sirvan como un almacén para futuros usos. Esto no es así, por ejemplo, en DOE2 o CALENER-GT. En estos, cualquier elemento introducido debe estar incluido en un sistema, en caso contrario produce un error ya que antes de proceder al cálculo el programa hace un estudio de la consistencia del modelo de definición del sistema.

CALENERVyp tiene una serie de sistemas definidos por defecto que deben ser usados como plantillas de sistemas. No ocurre así con otros programas como EnergyPlus. DOE2 usa las plantillas de sistemas sobre todo para los subsistemas secundarios (aquellos que se encargan de la entrega final a las zonas) y no tanto para los subsistemas primarios de agua.

Las plantillas de sistemas en este caso contienen:

- Lista de productor/es.
- Mapa o aplicación: terminales → zonas. Demanda de ACS que cubre.
- Parámetros generales del sistema.

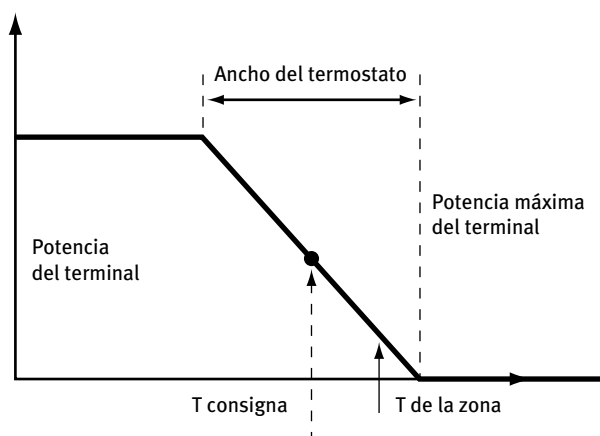
Cuando en la lista de productores hay más de un equipo (más de una caldera, enfriadora, etc.) el programa calcula cuánta potencia es demandada por los terminales y va arrancando los equipos a plena potencia (aquella disponible según las condiciones exteriores y de servicio) en el orden en que fueron definidos hasta completar la potencia demandada. Así, el último equipo es el que quedará a carga parcial en el caso en el que la potencia total en esa hora de cálculo (suma de todos los equipos productores) supere la potencia demandada. En caso contrario el defecto de potencia de los productores se reparte por igual entre los terminales.

El mapa de terminales a zonas en CALENERVyp no es biyectivo (uno a uno, un terminal en cada zona) sino que es suprayectivo (varias unidades terminales pueden ser asignadas a una misma zona). Aquí también se diferencia de CALENER-GT o DOE2 donde la aplicación sí es biyectiva (uno a uno). Este hecho facilita por un lado la aproximación a la realidad, ya que en una determinada habitación o grupo de ellas que forme una zona (“un aire cliente”) normalmente tiene muchos terminales (por ejemplo radiadores). Sin embargo desde el punto de vista de cálculo es equivalente a poner un único ter-

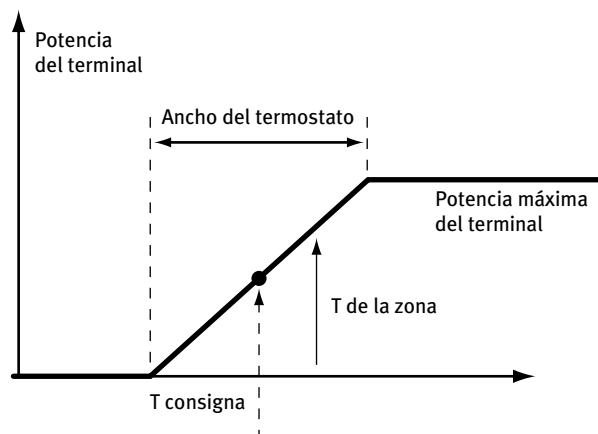
minal cuya potencia suma la de todos y su definición es más rápida.

El control del sistema en el CALENERVyp es sencillo y no se puede alterar. Se basa en la demanda asociada a los terminales que forman parte de un sistema. Dicha demanda se estima en base a la desviación de la temperatura de la zona respecto a la temperatura de consigna.

Para los terminales de agua suministran su potencia como muestra la figura:



El control de la entrega en unidades interiores (de expansión directa de refrigerante) es similar al de los radiadores y en el caso de proporcionar frío la acción es la inversa:



Para las unidades terminales de aire, la forma de actuar el control es algo más sutil y complicada de exponer. Básicamente tras el cálculo inicial, en el que se calcula la demanda de potencia horaria conforme al termostato (prefijado y oculto al usuario) el programa obtiene si existe demanda de refrigeración o calefacción. Es esta

Categoría	Nombre	Comentario	Parámetros
SIS_UNIZONA		No se debe definir terminal ya que el productor entrega directamente el servicio en la zona	Ventilación (3 ^{ario})
SIS_CAL_MULTIZONA_AGUA	Sistema radiadores, por ejemplo		Temperatura de impulsión
SIS_MULTIZONA	Sistema multi-split Sistema radiadores Etc.	Sistema multi-split Sistema radiadores Etc.	
SIS_MULTIZONA_CD	Multizona de conductos		Ventilación (3 ^{ario}) Zona de control (aquella que tiene el termostato)
SIS_ACS	Sistema de ACS		Depósito Porcentaje cubierto por energía solar Contribución solar mínima según HE Temperatura impulsión
SIS_MULTIZONA_ED2	Multi-splits para terciario	La ventilación se encuentra asociada a los terminales	¿Poseen la capacidad de recuperar calor?

(Continuación)

Categoría	Nombre	Comentario	Parámetros
SIS_MULTIZONA_CD2	Sistema de conductos para terciario	Gestiona la ventilación	Ventilación Retorno Enfriamiento gratuito Recuperación de calor (sensible o entálpico) Eficiencia del recuperador Zona de control del termostato
SIS_MIXTO		Proporciona calefacción y ACS	Depósito Porcentaje de energía solar Temperatura impulsión ACS Aporte mínimo según HE Temperatura impulsión calefacción

señal la que usa el programa ESTO2 (incluido dentro de CALENERVYP) para activar o desactivar los sistemas que impulsan aire.

Los parámetros generales del sistema dependen de qué sistema se trate. CALENERVYP posee las plantillas de sistema que se muestran en la tabla de la página anterior.

Por último, en CALENERVYP (también en EnergyPlus) puede existir más de un sistema que sirva a una zona. Por ejemplo, se puede tener un sistema para proporcionar frío y otro sistema para dar calor y ambos actúan sobre la misma zona. El primero actúa cuando la temperatura de la zona sube demasiado y el otro cuando baja estando disponible la producción de frío y calor en los periodos mensuales establecidos por la legislación.

Sin embargo esto NO es así en CALENER-GT (DOE2) donde cada zona es asignada a un ÚNICO sistema. Como se verá esto trae consigo ciertas dificultades. No obstante CALENER-GT sí permite crear horarios de disponibilidad para la producción de frío y calor.

Otra interesante alternativa tomada en el CALENERVYP es la separación en dos archivos de texto de aquella parte que corresponde a la arquitectura: archivo con extensión *.CTE (archivos de LIDER) y otro con el mismo nombre que el CTE pero con extensión *.XML, que contiene el conjunto de elementos mencionados anteriormente (la demanda de ACS, los terminales, los

equipos y los sistemas). La extensión XML (Extensible Markup Language) es simplemente un estándar de formato (OJO) que permite expresar información con cierta estructura (ver capítulo sobre tecnologías de la información). Esto permite transportar elementos de los sistemas previamente definidos en un proyecto, sin más que hacer una copia del fichero “nombre.xml” y cambiarle el nombre por el nuevo “nuevo_nombre.xml”. Lamentablemente los sistemas no se pueden exportar con tanta facilidad porque contienen el mapa o aplicación de cada unidad terminal a cada zona y éste cambia de un proyecto a otro.

CALENER-GT

El programa CALENER-GT, al tener como base de cálculo el programa DOE2, trata los sistemas y su definición de manera diferente a CALENERVYP. En realidad, CALENER-GT usa DOE2 de forma que existen muchos campos que CALENER rellena por nosotros y que en el DOE2 son accesibles.

Hace la distinción entre subsistemas primarios y subsistemas secundarios. Los primarios no entregan el servicio de calefacción y/o refrigeración a las zonas, lo entregan a los secundarios, que sí “entregan” su servicio a las zonas. Los primarios son circuitos hidráulicos.

En la parte de subsistemas primarios CALENER-GT (DOE2) posee una introducción de datos en árbol y

mantiene una representación “esquemática” gráfica del modelo de definición del sistema. Los ítems del árbol son, por este orden:

- 1 Bombas.
- 2 Circuitos hidráulicos.
- 3 Plantas enfriadoras.
- 4 Calderas.
- 5 Generadores de ACS.
- 6 Torres de refrigeración.
- 7 Equipos de cogeneración.
- 8 Alimentación de agua bruta.
- 9 Subsistemas secundarios.
- 10 Zonas.

Los dos primeros puntos afectan al transporte. Los puntos 3 a 8 son equipos productores de un recurso y por último los puntos 9 y 10 son los subsistemas que entregan el servicio a las zonas.

La secuencia en que deben crearse es la misma ya que, en cada paso, el programa pregunta por elementos del paso anterior. Ningún elemento debe quedar huérfano, todos deben ser utilizados.

El programa no comprueba la “lógica”, la geometría y la definición detallada del circuito: forma de los circuitos, diámetro de tuberías, cotas etc., tan sólo para el camino más desfavorable que es el que condiciona la presión de la bomba/s, se debe introducir dicha presión (en altura manométrica) y su caudal.

1 Bombas

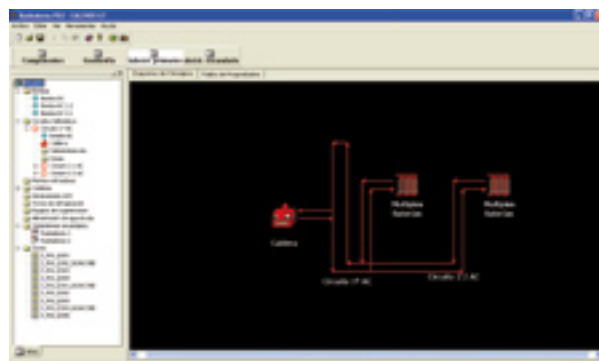
- H = altura manométrica de la bomba (m.c.a) –metros de columna de agua)
- Q = caudal bombeado [m^3/h].

Con estos datos calcula la potencia que consume la bomba:

$$Pot = \gamma \cdot H \cdot Q \cdot \frac{1}{3600}$$

$$\gamma = g \cdot \rho$$

donde Pot es la potencia (W), $\gamma(kp/m^3)$ gravedad específica.



Debido a que la potencia de bombeo crece aproximadamente con el cubo (la tercera potencia) del caudal, el modo de accionamiento de las bombas tiene mucha repercusión sobre el consumo. Así GT proporciona 3 opciones:

- Velocidad constante.
- 2 velocidades.
- Velocidad variable (con variadores de frecuencia).

2 Circuitos hidráulicos

GT ha previsto 7 circuitos hidráulicos distintos. La diferencia entre ellos está en el tipo de servicio que proporcionan, ya que todos transportan agua (ver tabla pág. siguiente).

En cuanto al control, cada circuito tiene varias posibilidades para su activación:

- Disponibilidad permanente: Siempre que algún subsistema secundario esté en marcha, el circuito se activa.
- Disponibilidad bajo demanda: Si un subsistema secundario está activo pero no existe demanda térmica, el circuito está parado. Cuando alguno de sus “clientes” secundarios tenga demanda térmica se activará.
- Cambio estacional por temperatura: en función de la temperatura exterior se activa el circuito. Por ejemplo, si la temperatura exterior es de 15 °C, el circuito de frío queda inactivo. La temperatura de cambio estacional depende de la localidad, aislamiento del edificio y de las cargas internas. Cuando las cargas internas son mayores, la temperatura de cambio estacional es más baja, ya que la generación interna de calor compensa las pérdidas.

Nombre	Descripción	Símbolo
Agua fría	Circuito que transporta agua fría. Normalmente a UTAS o ventilosconvectores	
2-Tubos	Circuito por el que puede circular agua fría o agua caliente, pero no ambas simultáneamente. Solicita una temperatura de cambio estacional. Testacional (ver texto)	
Agua Bruta	Circuito de condensación que usa agua de pozo, mar, lago, etc. Tiene los dos colores porque puede usarse tanto para condensar (rojo) como para obtener energía, evaporar (azul). Esto es habitual en zonas climáticas muy frías en las que se desee usar bombas de calor	
Agua Caliente	Suministra calefacción	
Bomba de calor circuito cerrado	Bombas de calor aire-agua enfrían o calientan el circuito (de ahí los dos colores).	
ACS (en realidad es mixto)	Este circuito puede dar agua caliente para calefacción y adicionalmente puede “extraer” agua caliente para ACS (de ahí la “Gota” en el centro)	
Condensación	Circuito usado para condensar habitualmente las enfriadoras	

- Disponibilidad en función de un horario prefijado por el usuario. EL usuario fija los arranques y paradas del circuito.

Cada circuito presta un servicio en unas condiciones que pueden ser alteradas conforme a las siguientes opciones:

- Temperatura fija. El circuito proporciona agua siempre a la misma temperatura (8o °C por ejemplo para un circuito de agua caliente).
- Ley de correspondencia con la temperatura exterior. La temperatura de suministro se puede hacer depender de la temperatura exterior. Si fuera hace cada vez más frío, se supone que los elementos terminales necesitarán un salto de temperatura mayor para comunicar el incremento de potencia de calefacción y viceversa.

- Horario de temperatura. La temperatura de consigna del circuito puede ser fijada por el usuario.

3 Plantas enfriadoras

4 Calderas

5 Generadores de ACS

6 Torres de refrigeración

7 Equipos de cogeneración

8 Alimentación de agua bruta

Los productores de que dispone el GT son:

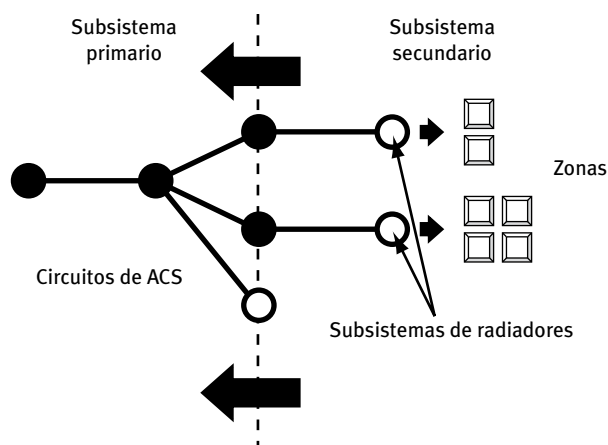
Categoría	Nombre	Comentario
Plantas enfriadoras	Compresor eléctrico	Alternativos, scroll, tornillo, etc.
	Eléctricas con recuperación de calor	
	Absorción simple efecto	
	Absorción doble efecto	
	Absorción llama directa	
	Motor explosión	
	Bomba de calor 2 tubos	Pueden dar calor o frío
	Bomba de calor 4 tubos	Pueden dar calor y frío. GT sólo contempla el caso de condensación por agua

(Continuación)

Categoría	Nombre	Comentario
Calderas	Combustible. Convencional	
	Combustible. Baja temperatura	
	Combustible. Condensación	
	Combustible. Biomasa	
	Eléctrica	
Generadores de ACS	Mismos tipo que Calderas	
	Bomba de calor aire-agua	
Torre de refrigeración	Circuito abierto	
	Circuito cerrado	
Equipos de cogeneración	Motor combustión interna	
Agua bruta		También es un recurso energético, ya que proporciona un sumidero o fuente de energía térmica a una temperatura estable

El comportamiento de estos equipos en lo que respecta a capacidad y rendimiento, sigue el mismo esquema que el CALENERVyP, esto es una serie de ecuaciones algebraicas sin base física que emulan el funcionamiento de los productores. Como en el CALENERVyP, se debe dar unos valores nominales de potencia y rendimiento, y las curvas multiplican estos valores para estimar su variación. Por lo tanto estos equipos son también plantillas de equipos.

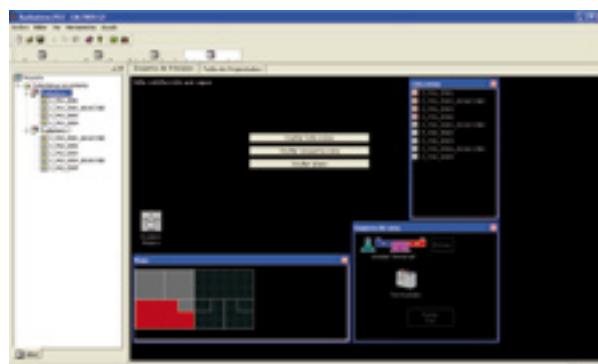
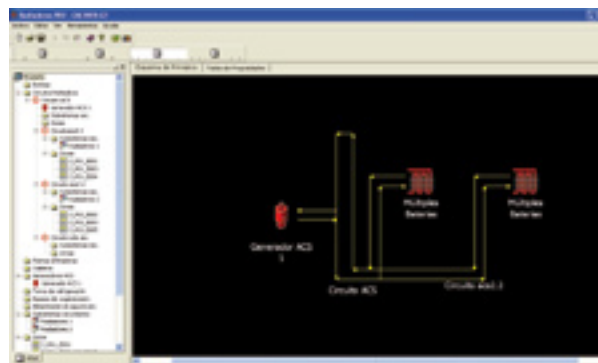
Los subsistemas primarios permiten cierta flexibilidad en la definición del sistema. Por ejemplo, el esquema de la figura muestra la definición de un sistema formado por dos partes: un subsistema primario con un circuito de ACS con un productor o generador (una caldera convencional, por ejemplo), dicho circuito entrega a 3 subcircuitos también de ACS y localizados en el subsistema primario. Dos de ellos entregan calor a sendos subsistemas secundarios de radiadores (que son siste-



mas finales que entregan a las zonas) y otro que entrega el agua caliente sanitaria.

Sin embargo los subsistemas secundarios no presentan en CALENER-GT esta flexibilidad y sólo se puede escoger de entre una lista de subsistemas. En el caso de la figura fue un sistema de radiadores.

Este sistema se mostraría en CALENER-GT como muestran las dos imágenes adjuntas.



Los subsistemas secundarios entre los que se puede elegir en GT son 16:

Categoría	Nombre	Comentario
Autónomos		Se llaman así porque no requieren de un subsistema primario que los abastezca. (por ejemplo, rooftop) La máquina dispone del productor (normalmente una bomba de calor)
	Caudal constante	
	Caudal variable	
	Caudal variable Temperatura variable	
	Mediante unidades terminales	Este es el caso de los multi-split o los sistemas de volumen de refrigerante variable
Bomba de calor bucle	Bomba de calor agua-aire en circuito cerrado	Una serie de bombas de calor enfrían o calientan las zonas y envían o toman la energía a un bucle de agua
Ventilación	Sólo ventilación	
	Termoventilación	
	Climatizadora de aire primario	Precisa un tratamiento especial (ver texto)
Todo aire	Caudal constante unizona	
	Caudal variable	
	Caudal constante	
	Doble conducto	
Ventiloconvectores	(Fan-coils)	
Solo calefacción	Por efecto Joule	Resistencia eléctrica
	Calefacción por agua	Radiadores
Solo refrigeración	Enfriamiento evaporativo	

Un inconveniente que tiene la asociación uno-a-uno de zonas a sistemas, es el que dos sistemas no pueden actuar sobre la misma zona y este caso se da con bastante frecuencia. Un caso típico, es aquel en el que existe un sistema que da servicios de calefacción y refrigeración, pero la ventilación la proporciona otro sistema, el llamado sistema de aire primario. Dicho aire necesita ser atemperado (calentado en invierno y enfriado en verano) hasta condiciones neutras (las del interior del edificio). Dicho aire no compensa cargas térmicas, tan sólo proporciona aire nuevo y no supone carga adicional para el sistema de climatización anterior. ¿Cómo se modeliza en CALENER-GT?

Dado que la zona no puede compartir dos sistemas, se debe crear una planta muda o fantasma y dentro de ella un espacio mudo o fantasma. Dicho espacio no debe tener ningún tipo de carga interna; ni luces, ni equipamiento (ordenadores, fotocopiadoras...), ni personas,

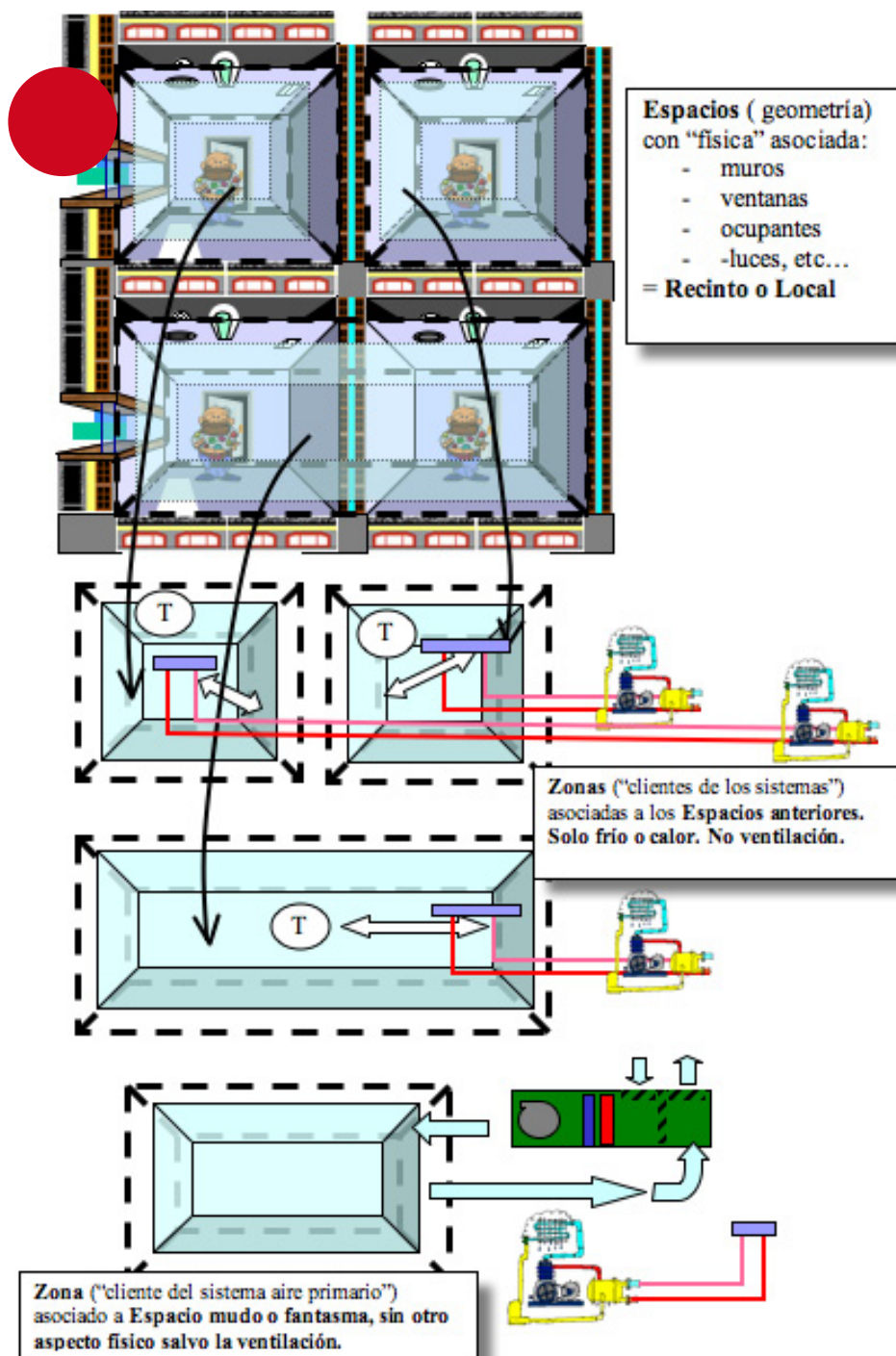
etc., nada excepto la necesidad de ventilación.

El dibujo quizá aclara un poco la situación. Los espacios son geometría pura sobre la que actúan (como se explicó en el capítulo introductorio) los conceptos físicos (flujos de calor o energía a través de muros, ventanas, o calor liberado en el volumen por personas, equipos, luces, etc.). Toda esta parte física intenta alterar la temperatura del aire contenido en el volumen, que usamos para controlar a su vez las condiciones de confort de las personas. Ese aire es “nuestro cliente” y por lo tanto CALENER-GT y DOE2 lo convierte en zona (sinónimo de “cliente del sistema”), y las peticiones del cliente (la demanda) está basada en variación de su temperatura seca respecto a su valor de consigna. Este binomio (geometría, física) define y constituye un recinto o local, para nuestro sentido intuitivo habitual. CALENER-GT no permite que dos sistemas sirvan al mismo cliente, de modo que los recintos originales se deben volver estan-

cos (no entra ni sale aire nuevo), y se debe crear otro espacio cuya única física asociada sea la ventilación (las renovaciones hora, por ejemplo) y se crea un sistema que actúa sobre él (el de aire primario).

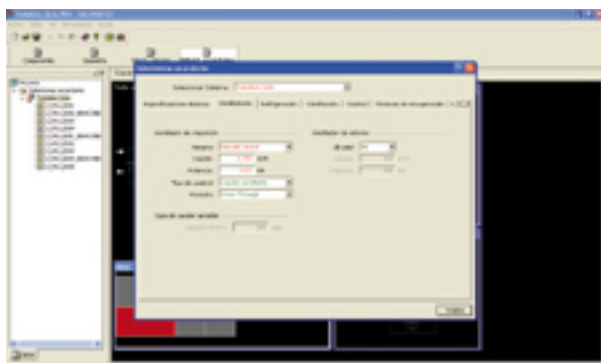
Esta forma de crear un modelo tiene un inconveniente. Como se aprecia en el dibujo el espacio fantasma –y por lo tanto su correspondiente zona fantasma– está desconectado del resto de zonas. El sistema de aire primario podría servir la ventilación a una, dos o a las tres zonas

simultáneamente. Sin embargo, como el aire primario gestiona el recurso “aire exterior” y lo hemos desligado del resto de “clientes”, no existe posibilidad alguna de usar el aire frío exterior para simular un enfriamiento gratuito durante épocas intermedias, que compensara las cargas térmicas debidas a otra razón física (muros, cargas internas, ventanas, etc.). Por lo tanto el sistema de aire primario no puede proporcionar dicho enfriamiento gratuito (free-cooling) según el modelo de CALENER-GT, aunque sí podría hacerlo el sistema real.



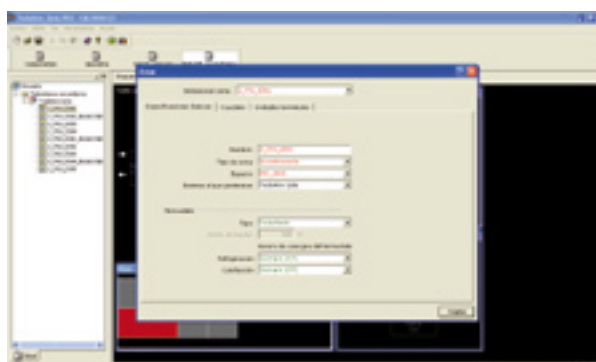
Control de los sistemas definidos en CALENER-GT

Entender cómo controla los sistemas CALENER-GT es importante para determinar los consumos “razonables” de la instalación. En el caso de los subsistemas secundarios de aire, el elemento clave que controla el funcionamiento del sistema, es el horario del ventilador. Esto es también así, en general, para cualquier subsistema secundario que tenga un ventilador. Por defecto le pone un horario, SIEMPRE FUNCIONANDO (las 8.760 horas del año). Puede crear confusión el hecho de que el siguiente escalafón en la jerarquía de control lo constituye la pestaña que indica CONTROL. Si no existe ventilador en el subsistema secundario, este sí constituye el control. En ella se puede indicar si los subsistemas primarios que forman los proveedores de frío y/o calor a este subsistema secundario están disponibles o no, o se le puede indicar un horario de disponibilidad. Así, aunque el subsistema primario esté disponible, si el motor del ventilador (subsistema secundario) no está en marcha, no se proporcionará ni frío ni calor y el consumo se verá muy reducido.



La demanda la establece cada zona en función de un horario de temperatura de consigna de verano y otro de invierno. El actuador sobre el terminal que intenta servir la demanda puede ser:

- Todo/nada.
- Proporcional.
- Acción inversa (en sistemas de volumen de aire variable).



Ejemplos de simulación

6

6.1 EJEMPLOS DE MODELOS DE EDIFICIOS

En lo que sigue se va a tratar de mostrar la modelización realizada en diferentes tipologías de edificio. Todos ellos son edificios construidos en la realidad.

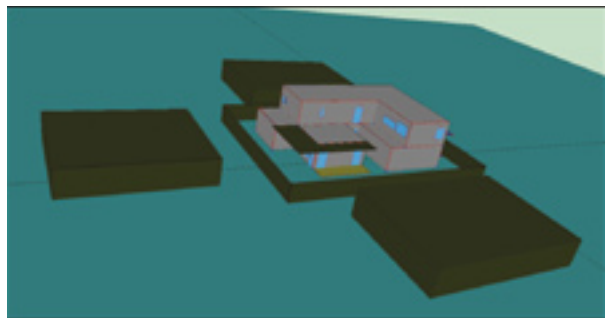
El uso de los edificios se ha clasificado en:

- Uso de vivienda, residencial:
 - Unifamiliares.
 - En bloque.
 - En bloque –adosados.
- Uso terciario:
 - Colegios.
 - Oficinas.
- Uso terciario, edificios singulares:
 - Aeropuertos.

En cada caso se hace un breve comentario de aquellas partes más importantes a tener en cuenta para su correcta modelización para la simulación.

Los ejemplos muestran su modelización para su uso en LIDER, CALENERVyp, aunque por su forma de definir el modelo (modelo-D) podrían ser prácticamente válidos para su uso en DOE2.1E.

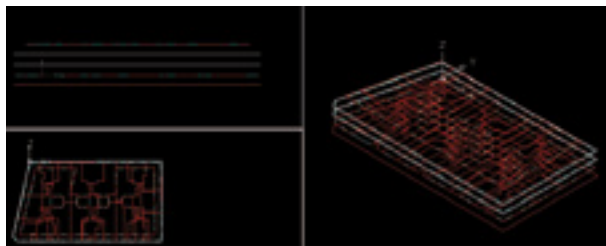
6.1.1 Modelo de vivienda unifamiliar



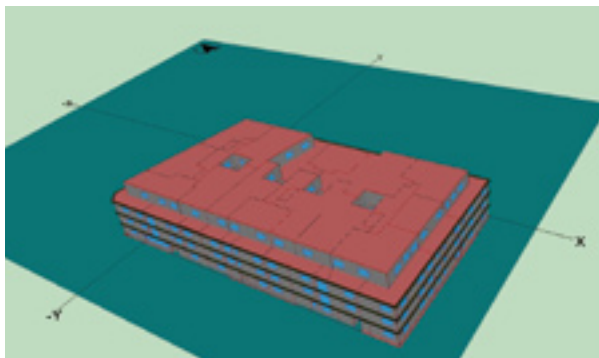
Se aprecia la modelización de los elementos de sombreado propios del edificio (balcones corridos) y aquellos externos (edificios colindantes o vallas).

6.1.2 Modelo de viviendas en bloque

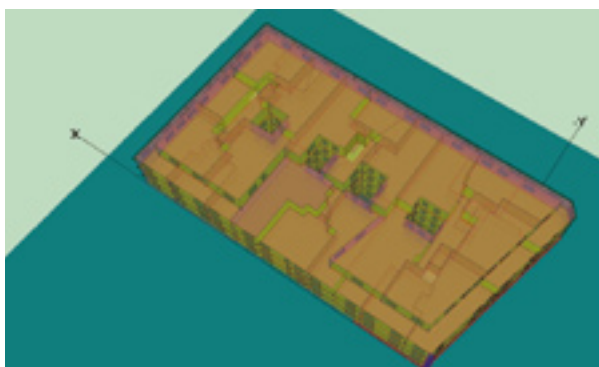
Modelo 2D de las plantas en AutoCAD©



Construcción del modelo 3D en CAD para su representación en LIDER, CALENERVYP.

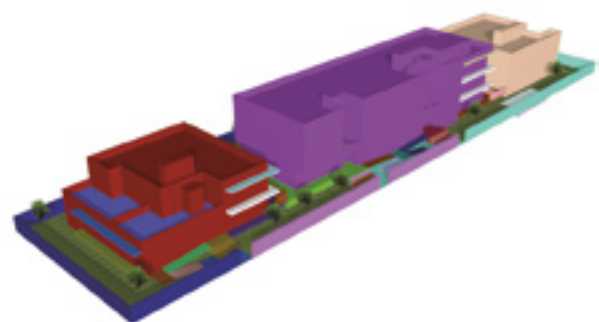


División en espacios (zonas) del edificio. Cada zona está asociada a un “consumidor” de servicios de calefacción y refrigeración. Cada uno se corresponde con una vivienda completa.

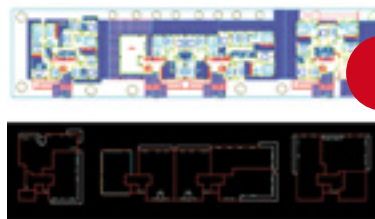


6.1.3 Modelo vivienda en bloque. Varios patios

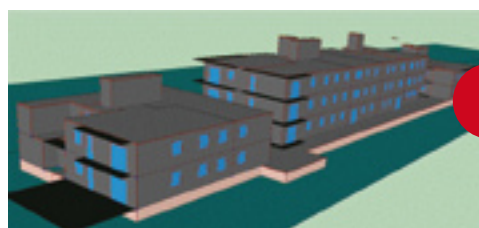
Modelo en 3D- estudio.



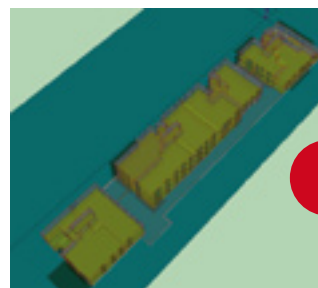
Modelo por secciones 2D en AutoCAD ©



Modelo 3D generado donde se ven los elementos para sombrear, propios del edificio.



Subdivisión en espacios o zonas de consumo (viviendas).

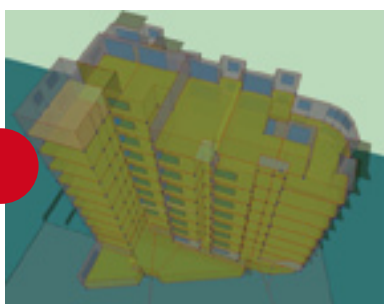


6.1.4 Viviendas en bloque con bajos comerciales

Plantas 2D en AutoCAD ©



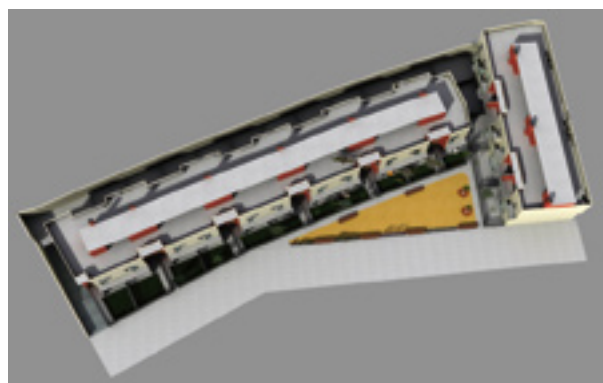
División de los espacios (zonas) por vivienda, por huecos de escalera-ascensor y por bajos comerciales.



6.1.5 Modelo de viviendas en bloque (chalets adosados)

En este caso se ha realizado un modelo geométrico del conjunto.

Render en 3D-Studio ©.

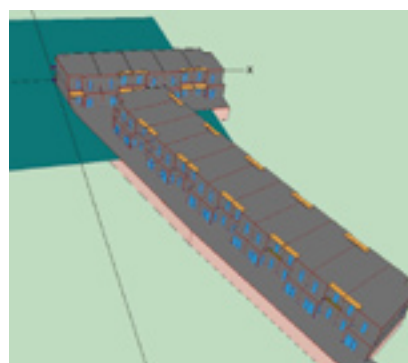


Planos de AutoCAD © y modelización básica.



Modelo final en LIDER. Aunque como regla, cada espacio es una vivienda, en este caso fue más sencillo hacer un modelo en que cada consumidor (cada vivienda) tenía asociados dos espacios, uno en cada planta que conforma el chalet adosado.

Este edificio es muy sensible a su orientación (ver capítulo 2).



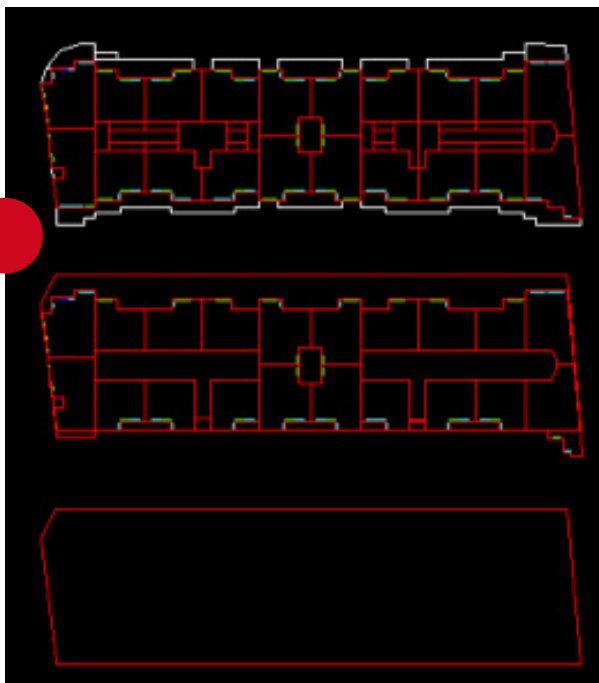
6.1.6 60 Viviendas unifamiliares. Viviendas, garajes y trasteros

Este edificio, por su forma, es muy sensible a la orientación geográfica del mismo.

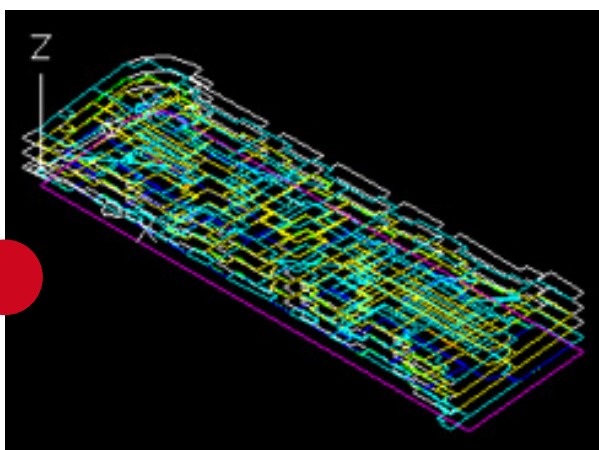
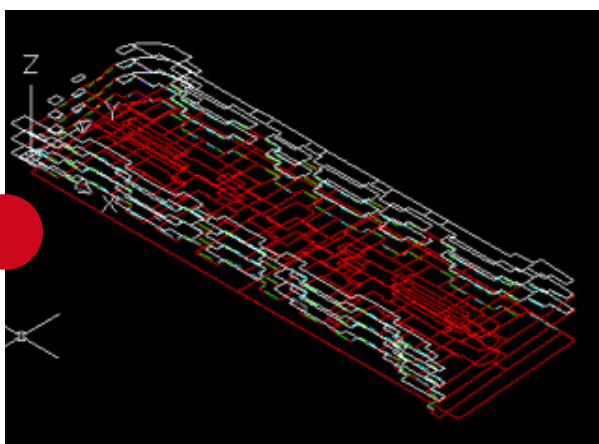
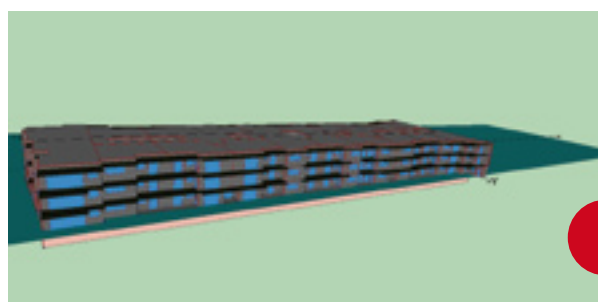
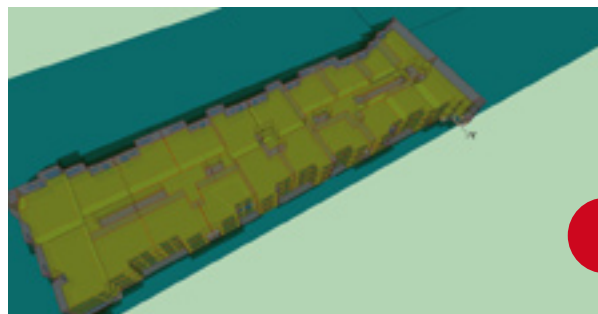
Render en 3D-Studio ©.



Esquema de las plantas 2D, del modelo geométrico del edificio y físico (colores) y su montaje en altura para generar el 3D.



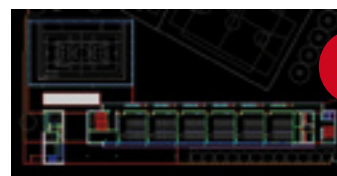
Subdivisión en zonas asociadas a viviendas (espacios acondicionados), garajes, trasteros y huecos de escalera y ascensor (no acondicionados).



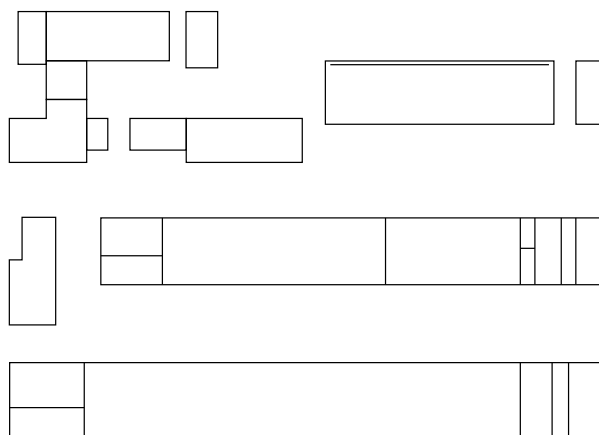
Uso TERCIARIO

6.1.7 Centro escolar

Plano en AutoCAD ©.



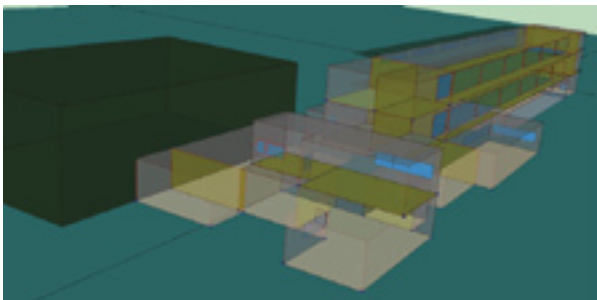
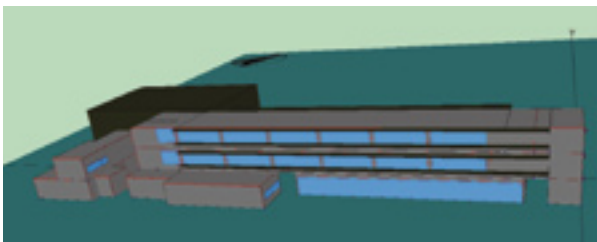
Modelo de espacios (zonas) en AutoCAD ©



Modelo en LIDER

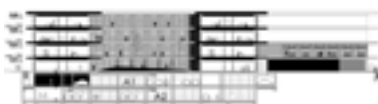
En este caso la arquitectura ha dotado de grandes cristalerías a las aulas para que tengan gran cantidad de luz natural. Por esta razón, se hace indispensable modelizar los balcones corridos laterales (en negro) por donde circulan los alumnos para entrar y salir de ellas, como elementos de sombreado propios del edificio, ya que estos elementos protegen en gran medida de la radiación directa procedente del sol.

El bloque negro grande representa un edificio colindante (el gimnasio) que no entraba en el análisis.

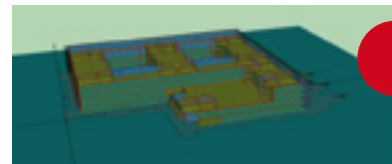
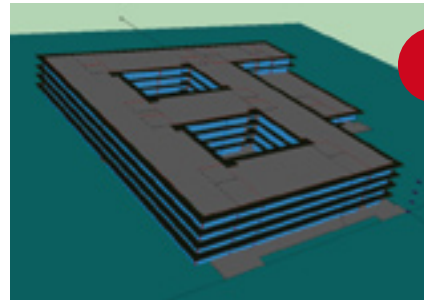
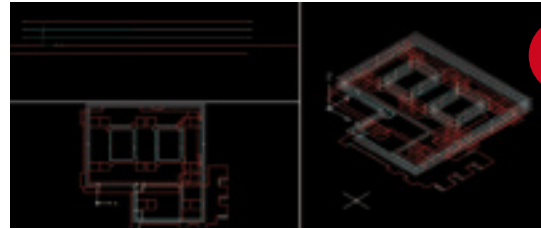


6.1.8 Edificio con usos administrativos múltiples (ubicado en el centro de España)

Render en 3D-Studio © y sección constructiva.



Modelo de simulación en AutoCAD ©.

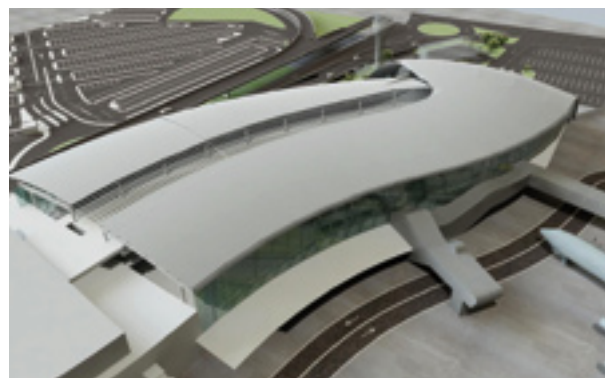


Este edificio tiene un problema claro. La enorme cantidad de acristalamiento exterior. Esto significa que a pesar de estar ubicado en el centro de España, la demanda de energía en refrigeración es excesiva si no se dota de unos buenos acristalamientos y se protege, en el modelo, con los elementos de sombreado ya previstos en el proyecto (ver render). Adicionalmente su compacidad es muy baja (muchas superficie exterior en relación a su volumen), lo que implica que precisa de un aislamiento considerable.

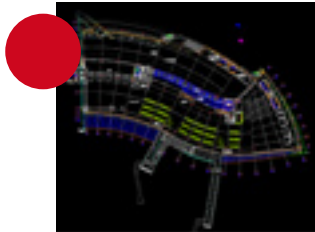
EDIFICIOS TERCIARIOS SINGULARES

6.1.9 Nueva terminal aeroportuaria

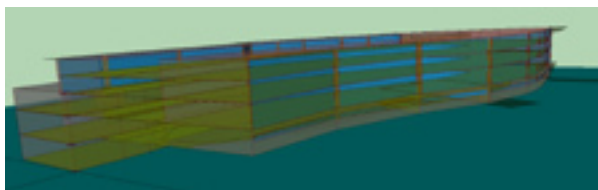
Render 3D-Studio ©



Planos en AutoCAD © y su modelización-D geométrica y térmica.



Modelo LIDER



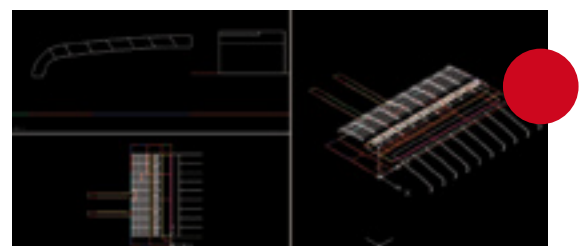
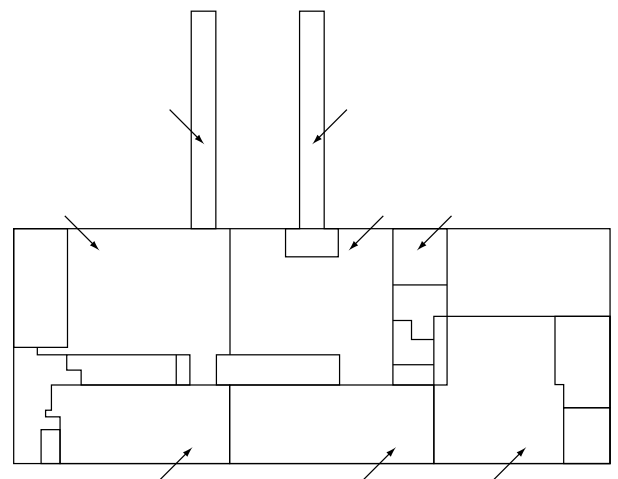
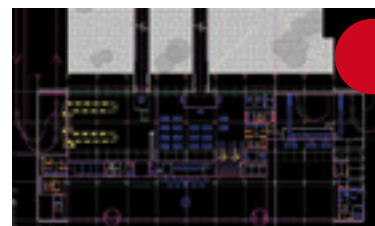
De nuevo esta terminal aeroportuaria dispone de mucha cantidad de cristales. Es importante modelizar, por lo tanto, todos aquellos elementos que arrojen sombra sobre el mismo. En las fotos se puede apreciar que se han incluido –como elementos de sombreado– los terminales por donde circulan los pasajeros al bajar del avion.

6.1.10 Nueva terminal aeroportuaria

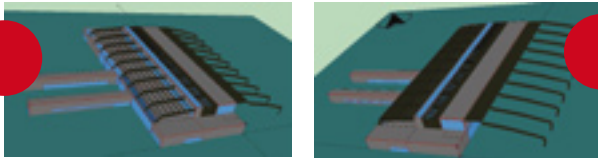
Render 3D- Studio ©



Planos de AutoCAD© de diseño y su modelización en zonas térmicas.



Modelo en LIDER, CALENERVvP

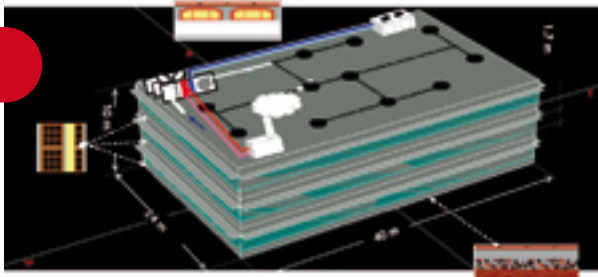


Como en el caso anterior, se ha visto la necesidad de modelizar los elementos de sombreamiento propios del edificio (marquesina negra de la derecha) e incluso los elementos estructurales, que por su disposición y cantidad arrojan también, y según la posición del sol, suficiente sombra sobre las zonas acristaladas.

Adicionalmente, los “dedos” por donde circulan los pasajeros, en este caso están acondicionados, por lo tanto se han modelizado como dos espacios más a considerar.

6.1.11 Ejemplo de análisis detallado de un edificio usando PowerDOE ©

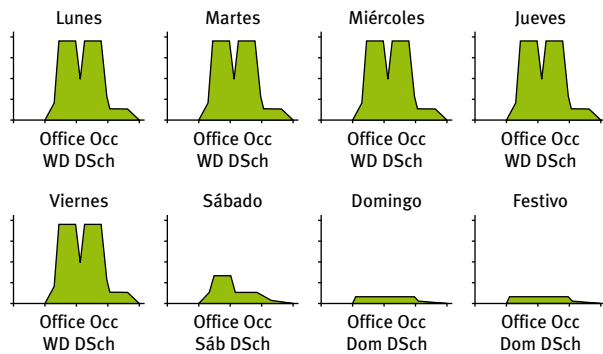
El siguiente representa un estudio hecho sobre un edificio ficticio, usado como ejemplo en el programa PowerDOE, que es una entrada gráfica de DOE2.



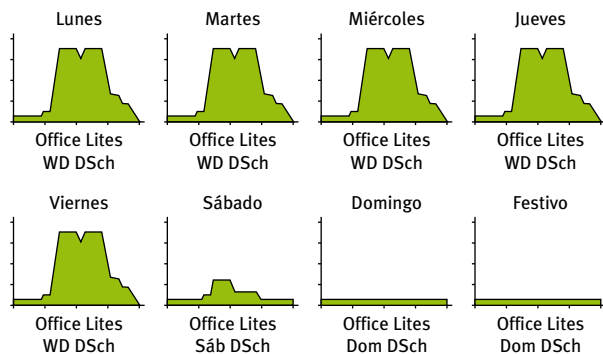
El edificio se muestra en la figura.

Se trata de un edificio de oficinas de tres plantas. Cada planta dispone de un subsistema secundario de volumen de aire variable. El subsistema primario lo forman un bucle de agua fría, producida por una enfriadora condensada por aire, y un bucle de agua caliente producida por una caldera de gas convencional. La ocupación media del edificio es de 249 personas realizando una actividad sedentaria. La iluminación artificial total son 46 kW. La potencia de equipos es de 23 kW. Los horarios semanales programados fueron los de la figura:

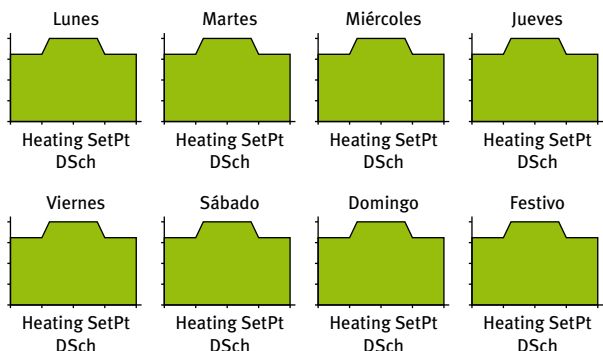
Week schedule: **Office occupancy WSch**
Assigned dates: 1/1 – 12/31



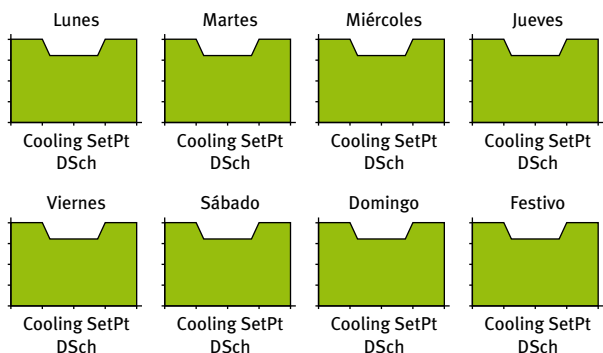
Week schedule: **Office lighting WSch**
Assigned dates: 1/1 – 12/31



Week schedule: **Heating SetPt WSch**
Assigned dates: 1/1 – 12/31



Week schedule: **Cooling SetPt WSch**
Assigned dates: 1/1 – 12/31

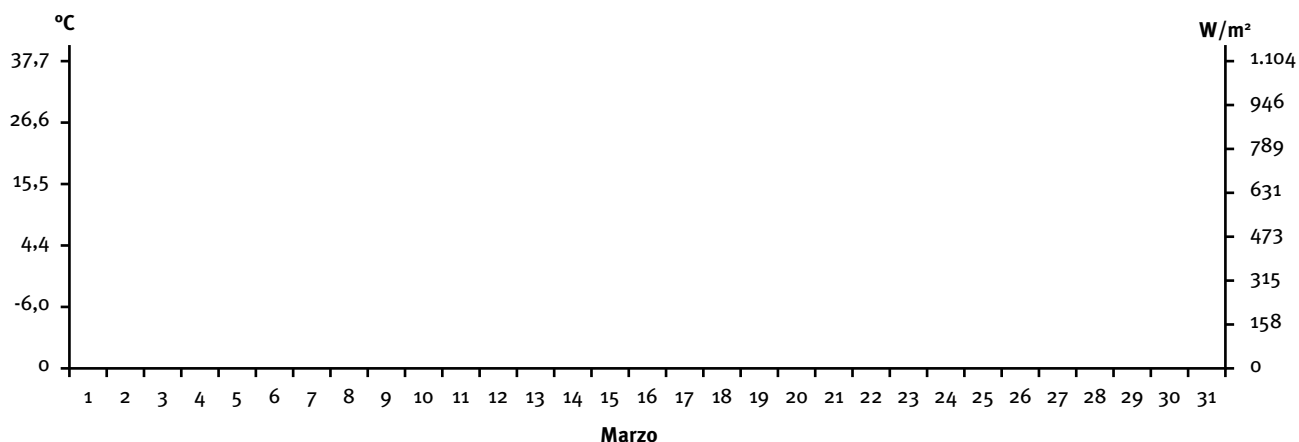
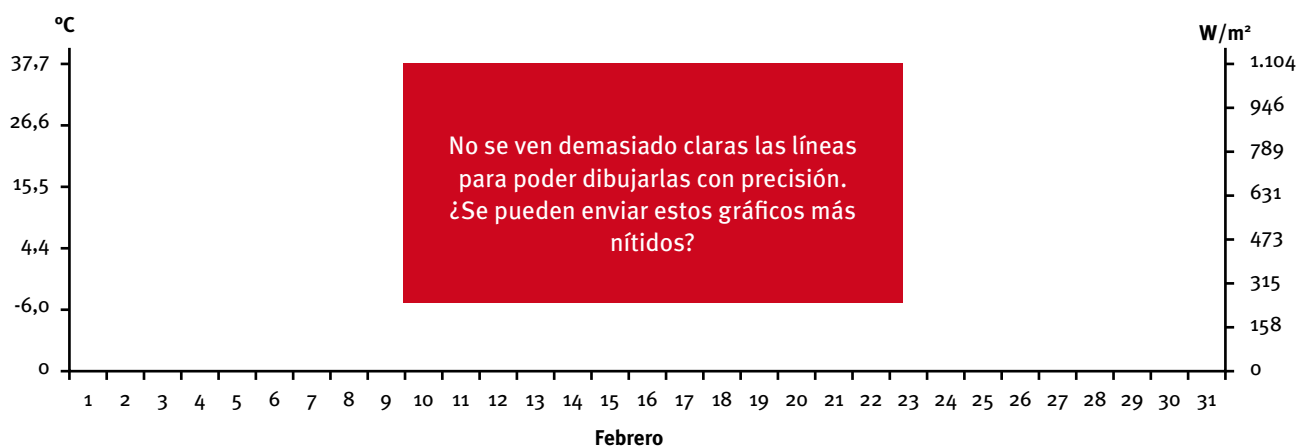
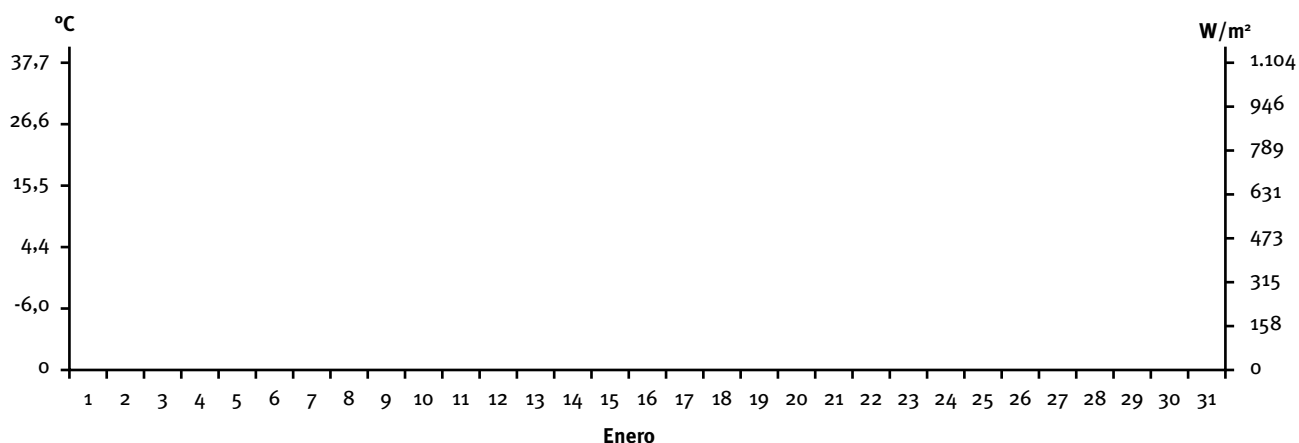


El termostato de invierno, durante las horas de ocupación se encuentra a 21 °C y fuera de la ocupación a 15 °C. Durante el periodo de verna los valores de consigna son: 24 °C y 30 °C respectivamente.

Los horarios semanales son válidos todo el año.

Se han escogido tres localidades españolas: Teruel, Sevilla y Valencia. La imagen muestra tres meses del año meteorológico tipo de Teruel (enero, febrero y marzo). Se muestra la radiación total sobre superficie horizontal y las temperaturas seca y húmeda. Se puede apreciar la existencia de días soleados y días nublados con poca radiación.

Año meteorológico: Teruel



- Temperatura seca
- Temperatura bulbo húmedo
- Radiación solar directa normal
- Radiación solar horizontal

Sistemas 12 h y 24 h en marcha

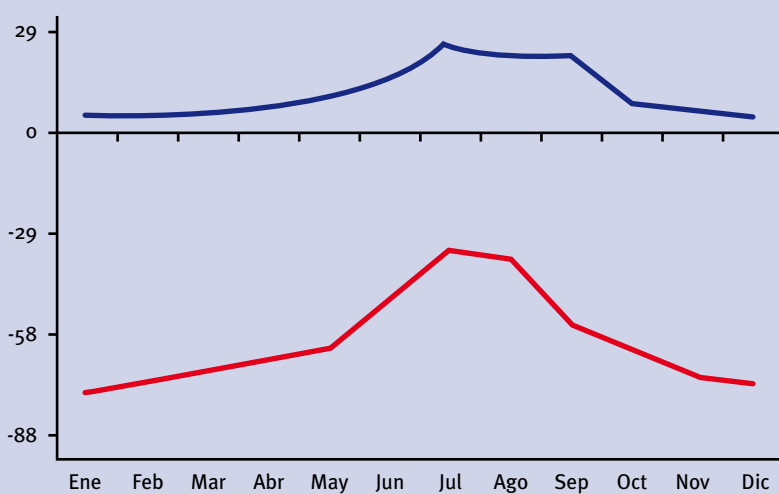
Con efectos didácticos se buscó hacer una comparativa entre extremos. Por un lado se mantuvieron en marcha los ventiladores de los sistemas VAV, 12 h cada día y por otro no se apagaron en todo el año. Se debe recordar que en CALENER-GT o DOE2 el funcionamiento de los

ventiladores, es el control que domina si el sistema está en marcha o no. Los sistemas de frío y calor estuvieron siempre disponibles bajo demanda.

Las gráficas siguientes muestran para el sistema de la planta baja, la carga pico por mes de frío y calor y el consumo de energía total por mes.

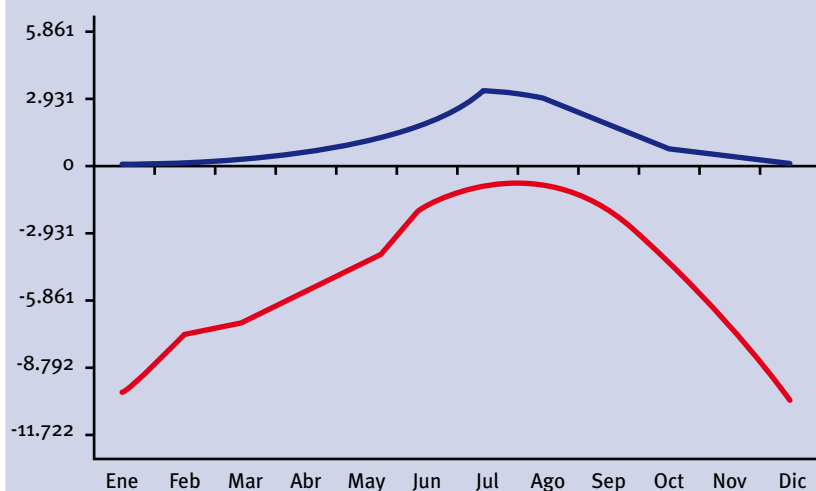
Ventiladores 12 horas

Sistema VAV#1. Planta 1. Carga Máxima (kW)
TERUEL



— Total Cooling Load — Total Heating Load

Sistema VAV#1. Planta 1. Carga Térmica Total (kWh)
TERUEL



72.802 (kWh)

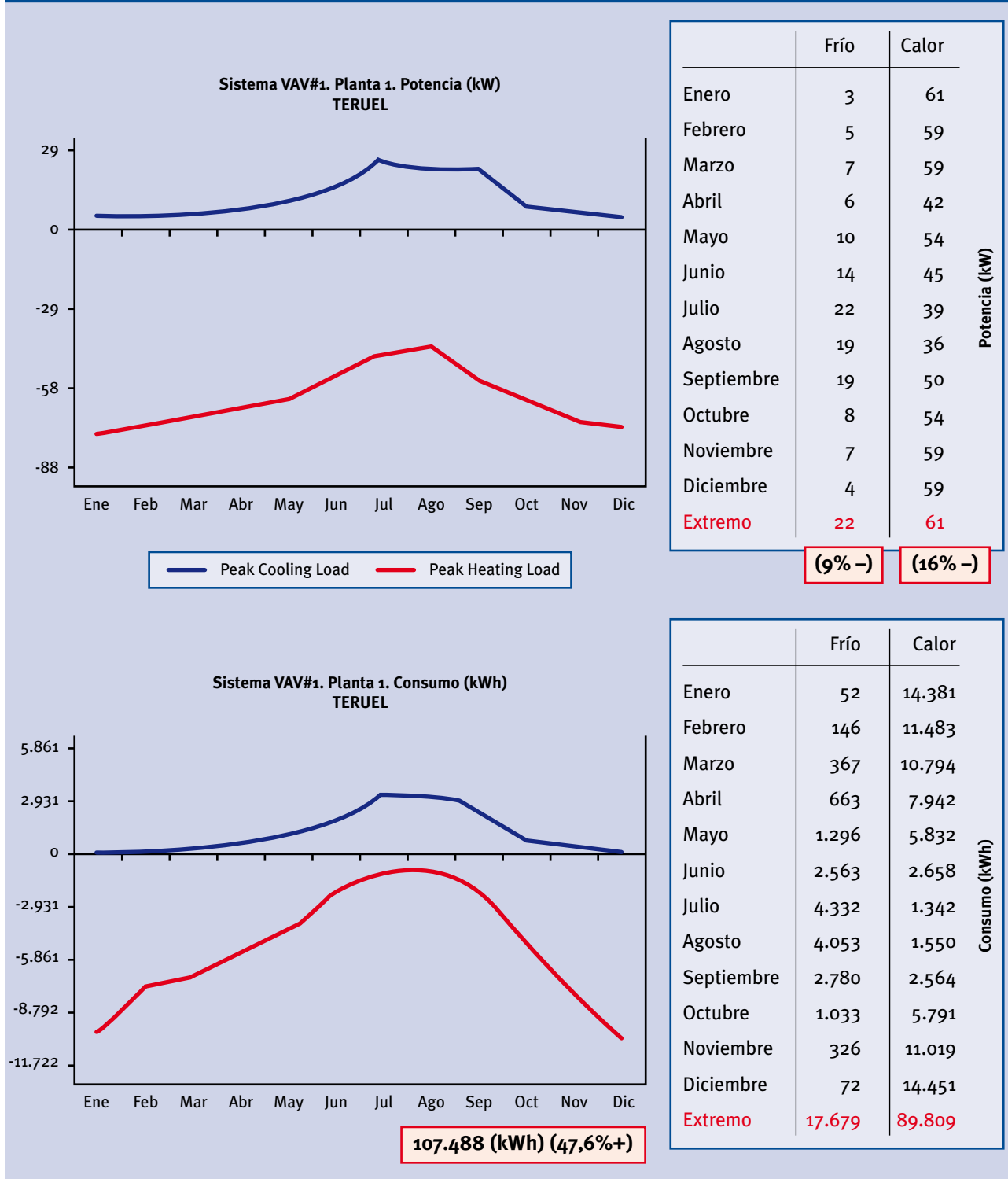
	Frío	Calor
Enero	4	70
Febrero	4	68
Marzo	5	65
Abril	6	60
Mayo	9	58
Junio	15	44
Julio	24	33
Agosto	21	34
Septiembre	20	52
Octubre	8	59
Noviembre	6	66
Diciembre	4	67
Extremo	24	70

Potencia (kW)

	Frío	Calor
Enero	52	10.583
Febrero	122	7.749
Marzo	296	7.558
Abril	526	5.706
Mayo	822	3.863
Junio	1.675	1.342
Julio	2.955	566
Agosto	2.606	651
Septiembre	1.698	1.348
Octubre	638	3.921
Noviembre	230	7.057
Diciembre	64	10.776
Extremo	11.685	61.117

Consumo (kWh)

Ventiladores 24 horas



Como era de esperar, la energía consumida por este subsistema, si se mantiene todo el año en marcha casi dobla (un 47,6% más) la energía consumida cuando está en marcha 12 h. Este efecto es algo menor si se contempla el consumo del edificio completo. En este caso la

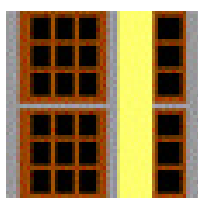
simulación da 239.653 kWh de consumo (12 h) y 316.717 kWh (24 h), o sea, un 32% más. Pero, por otro lado, al no existir arranques y paradas la potencia necesaria se reduce un 9% en frío y un 16% en calefacción para el subsistema 1 la planta baja.

	Potencia (%)		Consumo (%)	
	Frío	Calor	Frío	Calor
Valencia				
Edificio	-30	-11	20	69
Zona 1	-6	-7	45	76
Sevilla				
Edificio	-17	-10	17	79
Zona 1	-5	-7	30	88
Teruel				
Edificio	-6	-9	14	40
Zona 1	-8	-13	51	47

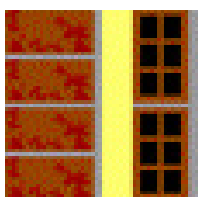
La tabla resume las variaciones porcentuales para el edificio y para la zona 1 (la planta baja). El edificio original es el que tenía los sistemas en funcionamiento 12 h. Se observa una reducción general de la potencia necesaria en todos los lugares y lógicamente un aumento de los consumos. Quizá puede resultar interesante ver que, en el caso de la refrigeración y para el edificio situado en Valencia, la reducción de potencia es considerable (30%) y en porcentaje el consumo aumenta menos (20%). Por lo tanto, parece que aquí el edificio es sensible a aumentar el tiempo de funcionamiento del sistema (arrancarlo antes y pararlo un poco después), con lo cual se podría conseguir reducir el coste de capital a expensas del de explotación, aunque quizá exista un coste óptimo.

Efecto de la capacidad de acumulación de energía. Masa del edificio

Al objeto de ilustrar lo que se comentó sobre el efecto de R y RC de la estructura de un edificio, se ha cambiado el muro original con una $U=0.53$ W/mK por otro muro con la misma conductividad, pero más pesado y por lo tanto con mayor capacidad de almacenamiento por unidad de superficie.



Muro original



Muro alternativo

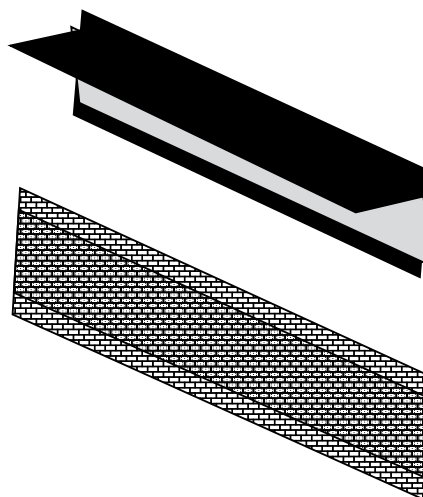
Los resultados de las simulaciones se resumen en la tabla siguiente:

	Potencia (%)		Consumo (%)	
	Frío	Calor	Frío	Calor
Valencia				
Edificio	-7	-6	-2	-32
Zona 1	-6	-5	-3	-24
Sevilla				
Edificio	-6	-6	-2	-34
Zona 1	-7	-5	-3	-27
Teruel				
Edificio	-5	-4	-1	-21
Zona 1	-11	-3	-5	-12

Como se argumentó, la uso de la masa del edificio parece que siempre va a favor, tanto de reducir los consumos anuales como de reducir la potencia necesaria. Es interesante observar el efecto de los climas. El consumo por refrigeración, no se ha visto muy alterado debido fundamentalmente a los cristales. Sin embargo el consumo de calefacción sí ha notado mucho la presencia de más masa en el caso de Valencia (una reducción del 32%) y Sevilla (34%). Pero no fue así para Teruel (12%). Valencia posee un clima que oscila cerca de las condiciones de temperatura de consigna internas del edificio, por lo tanto el efecto de la acumulación lo nota mucho. En Teruel el clima es muy frío en invierno con pocas posibilidades de acumular calor. El efecto de la masa hizo también que los picos de potencia se suavizaran obteniendo en todos los casos reducciones.

Efecto de suprimir el alero sobre los ventanales que rodean el edificio

El efecto de este elemento se tiene también en el edificio de oficinas que se expuso como ejemplo más arriba, que estaba situado en el centro de la península.



Como antes, la tabla siguiente resume el efecto de eliminar dicho elemento arquitectónico. Como regla general, se observa un aumento de la potencia de refrigeración (más acusada) sobre todo en Valencia, lo cual era de esperar ya que ahora entra el sol más fácilmente, pero también se observa un aumento de la potencia necesaria en calefacción sobre todo en Teruel, que es muy acusado.

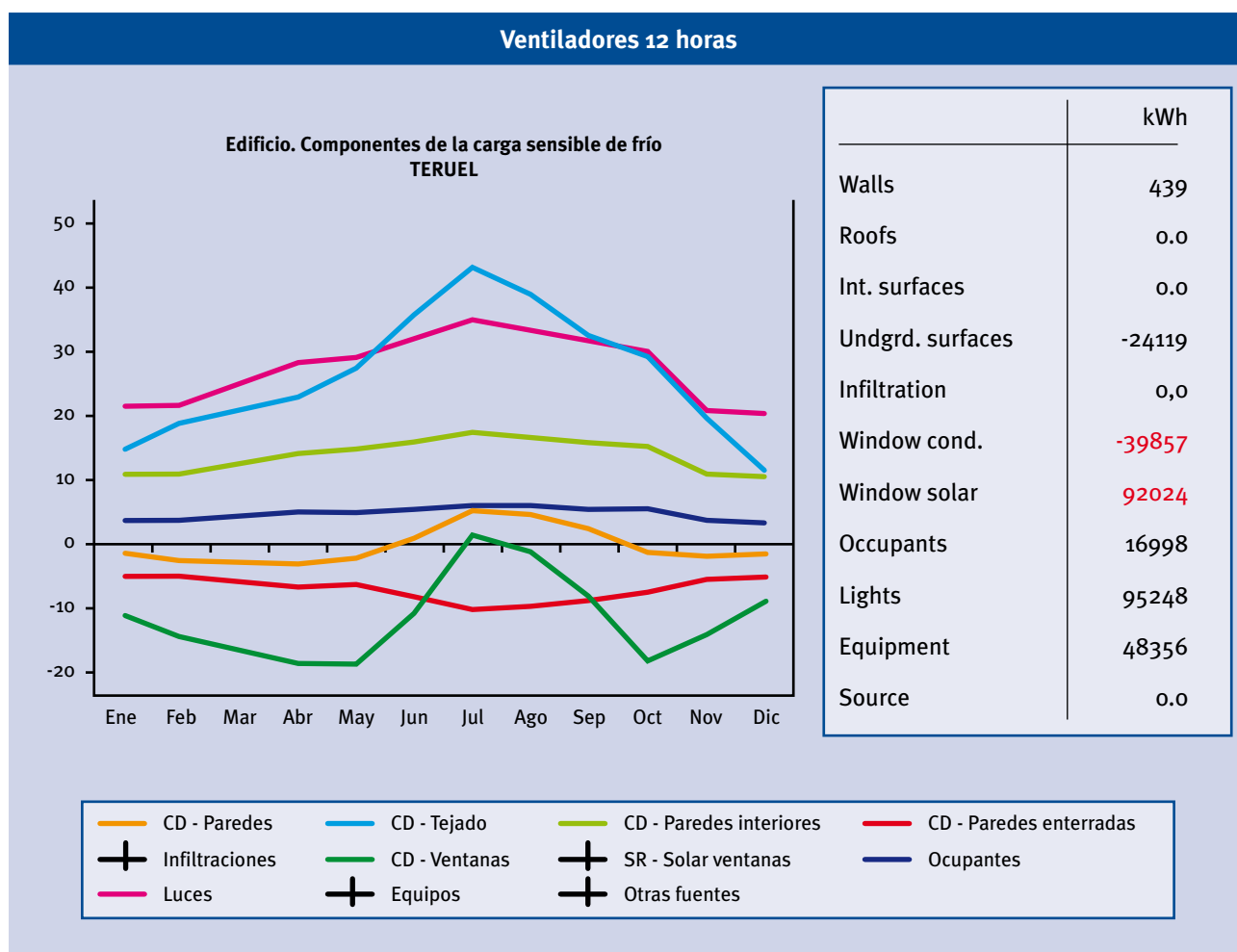
¿Qué le ocurre al consumo?

Parece claro que el consumo de refrigeración deba subir. ¿Cuánto? Bien, la simulación apunta a que alrededor de un 22% en todos los casos, destacando el caso de nuevo de Teruel (28%). También parece lógico que el consumo de calefacción se reduzca. Ahora tenemos una ganancia de calor extra, procedente del sol. Donde más se reduce es en Sevilla (13). Teruel es pues un clima curioso en este aspecto. Al quitar los aleros, se ha aumentado la necesidad de potencia de calefacción aunque su consumo se ha reducido.

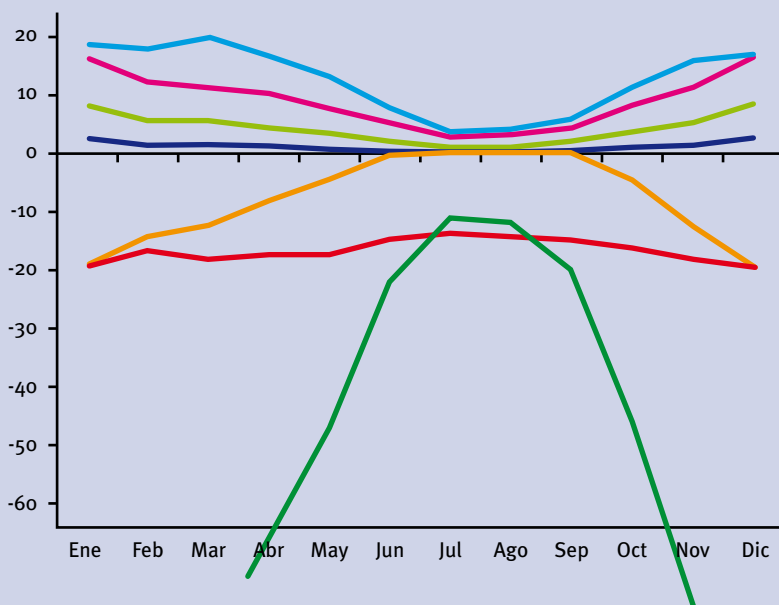
	Potencia (%)		Consumo (%)	
	Frío	Calor	Frío	Calor
Valencia				
Edificio	18	3	22	-12
Zona 1	24	4	25	-11
Sevilla				
Edificio	14	1	20	-13
Zona 1	12	3	22	-9
Teruel				
Edificio	17	14	28	-9
Zona 1	20	13	23	-9

Otros efectos

Por lo comentado más arriba, parece que los grandes ventanales están causando algunas dificultades. Así, se le pregunta al programa por las componentes de la energía sensible (de frío y calor) demandadas por los elementos del edificio y se obtienen las gráficas siguientes:



Ventiladores 12 horas

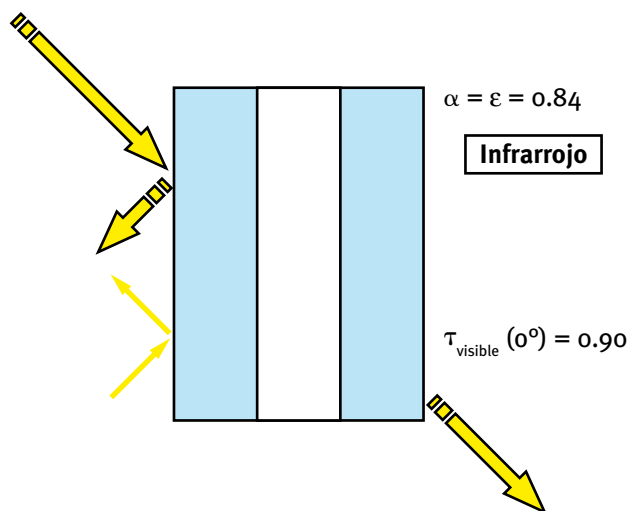
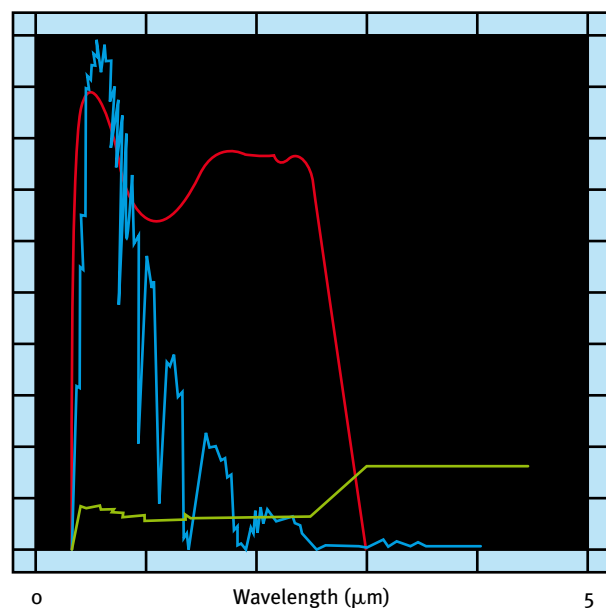
Edificio. Componentes de la carga sensible de calor
TERUEL

	kWh
Walls	-27255
Roofs	0.0
Int. surfaces	0.0
Undgrd. surfaces	-57295
Infiltration	0,0
Window cond.	-200167
Window solar	44839
Occupants	4659
Lights	32824
Equipment	15532
Source	0.0

CD - Paredes CD - Tejado CD - Paredes interiores CD - Paredes enterradas
 + Infiltraciones CD - Ventanas + SR - Solar ventanas + Ocupantes
 + Luces + Equipos + Otras fuentes

En rojo se ha marcado que de todos los elementos: luces, ocupantes, infiltraciones, muros, equipamiento, etc., quien está demandando más son los ventanales. ¿Qué ocurriría si se usara otro tipo de cristal con un factor solar menor?

El vidrio original tenía las siguientes características:



Se trata por lo tanto de un cristal doble, simétrico, con bastante transmisión en la zona del espectro visible. La gráfica inferior muestra el espectro solar (con las bandas de absorción debidas a los gases atmosféricos), donde se aprecia la transmisividad en el rango visible.

El nuevo cristal es un cristal doble con una deposición metálica en la superficie exterior:



Por lo tanto sus características radiantes no son simétricas (no da lo mismo hacer atravesar la radiación en un sentido u otro).

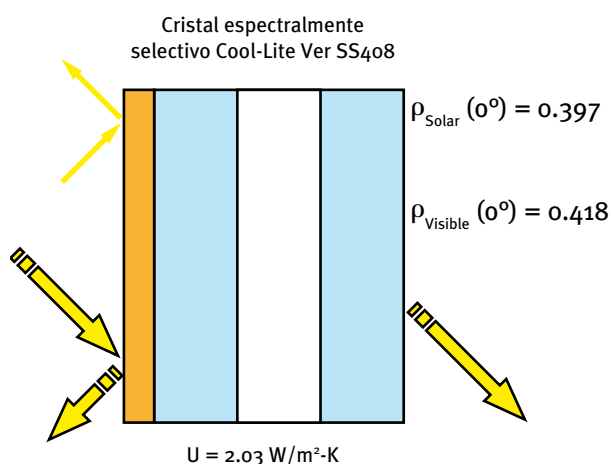
$$\varepsilon = 0.6$$

$$\tau_{\text{visible}}(0^\circ) = 0.07$$

$$\rho_{\text{visible}}(0^\circ) = 0.3$$

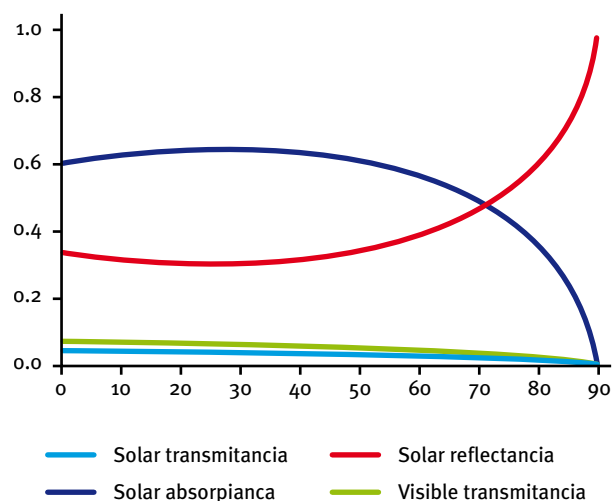
$$\tau_{\text{solar}}(0^\circ) = 0.05$$

$$SC = 0.17$$



El factor solar de este otro es tan sólo de 0.17 y su conductividad también es menor. Se muestran también las propiedades en el canal visible de transmisividades y reflectividades.

Por último la dependencia angular de las propiedades radiantes es:



Bien. ¿Qué ocurre cuando cambiamos todos los cristales dobles por este otro? La tabla resume los resultados de las simulaciones.

	Potencia (%)		Consumo (%)	
	Frío	Calor	Frío	Calor
Valencia				
Edificio	-23	-21	-13	-41
Zona 1	-16	-16	-15	-36
Sevilla				
Edificio	-23	-21	-15	-44
Zona 1	-18	-14	-17	-44
Teruel				
Edificio	-17	-24	-13	-29
Zona 1	-29	-25	-17	-21

El resultado general parece muy favorable. Existe una reducción de las potencias de refrigeración (frío) y calefacción y de los consumos. La reducción de potencia en refrigeración la dominan Valencia y Sevilla. En Teruel el efecto no es tan abultado. En calefacción, si es Teruel quién muestra la mayor reducción porcentual de potencia necesaria.

En cuanto al consumo, la localidad más sensible al efecto de este acristalamiento en calefacción es Sevilla, y Valencia le sigue de cerca. En refrigeración son prácticamente igual de sensibles todos los climas y su efecto se muestra en una reducción del 15% de promedio.

Conclusión

Lo anterior ha mostrado los resultados de sensibilidad (porcentajes de variación) de diferentes acciones para un mismo edificio situado en tres climas diferentes.

- Control y/o puesta en marcha/paro de los sistemas
- Efecto de la masa del edificio
- Efecto de los aleros
- Efecto del tipo de acristalamiento

La intención de este capítulo era pues, mostrar la potencialidad que tienen los programas de simulación, para la toma de decisiones que afectan al conjunto del coste de vida de edificios (capital –potencias– + explotación –consumos–) y finalmente al planeta a través de las emisiones de CO₂ asociadas a los consumos. En este caso DOE2, en su versión original, no posee una herramienta para convertir consumos en emisiones de CO₂, como los programas de calificación energética oficiales.



Herramientas informáticas de simulación

7.1 BREVE COMENTARIO SOBRE DIVERSOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN

Esta sección recoge unos breves apuntes sobre algunos de los programas más extendidos a nivel mundial para la simulación térmica de edificios. La lista no intenta ser exhaustiva, tan sólo dar una muestra.

BLAST	• HBLC (Heat Loads Balance Calculator), es un programa para la introducción gráfica de datos y generar un fichero de entrada para BLAST. EL edificio es dividido en plantas (2D) y dentro de ellas el usuario define zonas. • Materiales, horarios, composiciones, etc. se corresponden con los que aparecen en el manual de ASHRAE de 1977. • WIFE (Weather Information File Encoder), es un programa que ayuda a convertir ficheros meteorológicos: TDF-14, TMY, TR, SOLMET, SOLARZ80, ETAC-DATSAV. • Un programa CHILLER ayuda a extraer de catálogo las características de las máquinas para su modelización en el programa. • La salida está pensada para ser leída desde una hoja de cálculo, para posteriormente hacer cálculos y gráficas. • Permite obtener índices de confort en las zonas ocupadas y establecer frecuencias horarias de repetición de esos índices para estimar el confort final así obtenido.
BSIM	• SIMVIEW es un programa editor gráfico para definir la geometría, materiales, composiciones etc. Muestra la información en 3D, planta y muestra la base de datos en forma de árbol jerárquico. – Los modelos son exportables a RADIANCE para hacer un estudio con este programa pormenorizado de la iluminación si fuera necesario. – La geometría y los flujos de calor por paredes son exportables a ficheros de texto para ser usados por programas CFD para estudios pormenorizados de difusión de aire. (Otro nivel de cálculo) – Permite la visión en 3D con DirectX (la versión de Microsoft © de OpenGL). – Las propiedades de la envolvente se pueden exportar al programa danés oficial Bv98 para ver si cumple su normativa. – Los dibujos en CAD pueden ser grabados en DXF para que BSIM importe la geometría. – Los ficheros binarios de EnergyPlus se pueden convertir al formato de BSIM.
DeST	• CABD (Computer Aided Building Description). Utiliza Autocad © para la introducción de datos. • Las librerías son fácilmente ampliables. • Contiene 2 bases de datos modificables.

(Continuación)

DOE2.1E	• El fichero de entrada puede contener instrucciones (tipo programación) no sólo valores fijos. • El código fuente es accesible (coste adicional). • El usuario puede por tanto crear sus propios modelos.
ECOTECT	• Programa con entrada gráfica del edificio en 3D (usando OpenGL). • Analiza la insolación del edificio. • Crea sistemas de sombras óptimos de forma automática. • Una vez analizado el sombreado, puede guardar dicha información para aumentar la rapidez del cálculo cuando, en estudios paramétricos, las condiciones de sombra no cambian. • Permite la creación de “scripts” guiones. Programación externa de ciertos cálculos. • Escribe en otros formatos su modelo-D; ESP-r, EnergyPlus, Radiance, etc. • Puede importar información de CAD. • Comprueba normativa energética de UK, USA y Australia.
Energy Express	• Tiene una herramienta de fácil entrada CAD en 2D. • Puede importan información geométrica en formato DXF. • Contiene librerías con: – Soluciones constructivas. – Comportamiento de equipos a carga parcial. – Horarios de uso. – Datos climáticos. – Etc.
EnergyPlus	• Permite la conexión con otro programa para simular sistemas dinámicos en general llamado SPARK. La intención de los desarrolladores es poder simular instalaciones complejas. • Tiene versiones compiladas para Windows y para Linux, ya que el esquema de proceso es: – Entrada (generar Modelo-D -formato texto idf-). – Cálculo (modelo-S, interno). No gráfico. – Salida (texto, DXF).
Equest	• Versión gráfica de DOE2.
PowerDOE	• Versión gráfica de DOE2.
ESP-r	• Programa de una universidad inglesa. (www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm). • Definición en formato fijo y libre del modelo-D. • Bases de datos. • Importa y exporta a programas de CAD. • Software Libre. Hecho en fortran. Código fuente abierto. • Análisis detallado de los sistemas y redes eléctricas. • Los sistemas de climatización se analizan a otra frecuencia respecto de los sistemas de producción eléctrica. (Tiempos de respuesta distintos).

(Continuación)

IDA ICE	• Soporte comercial en: inglés, alemán, finlandés, y sueco. • Soporte de formación. • Debido a su origen “muy matemático”, resuelve el problema analizando los tiempos de respuesta de cada parte o componente. • Dispone de un lenguaje propio de programación. • Proporciona información de diagnóstico sobre la simulación. • Representación gráfica de los sistemas de aire (circuitos de aire) y de agua.
IES <VE>	• Programa con orientación profesional. El objetivo último de la compañía es que su modelo-D sea capaz de albergar toda la información en todas las etapas de diseño de un edificio (entorno IES). Enfocado a reutilizar la información. • Permite: – Simulación térmica dinámica. – Cálculo de iluminación: natural y artificial. – Cálculo de cargas térmicas. – Simulación de sistemas basada en componentes. – Diseño de conductos. – Diseño de tuberías. – Cálculo de sombra. – CFD. Cálculo detallado de ciertas partes. – Exporta e importa de DXF y gbxml. • Está formado por submódulos: – ModelIT: sirve para generar la parte del modelo-D correspondiente a la geometría. – ApacheCalc: genera un modelo-S para cargas térmicas. – MacroFlo: analiza la ventilación natural. – Apache HVAC: crea el modelo-D de los sistemas. Basado en componentes no en plantillas de sistemas. – SunCast: análisis de sombras. – MicroFlo: analiza el movimiento del aire usando CFD. – FlucsPro & Radiance: análisis de iluminación natural y artificial. – DEFT: para optimización de partes. – LifeCycle: para cálculos económicos. – Simulex: evacuación de las personas que habitan el edificio.
TRNSYS	• Creado por la Universidad de Wisconsin-Madison. • La creación del modelo-D se hace a través de un subprograma llamado TRNBuild o a través de SimCAD. • Los componentes se pueden programar en cualquier lenguaje compilándolos como DLL y respetando ciertas interfaces. • COMIS programa para analizar el movimiento del aire entre las zonas, se encuentra integrado en TRNFLOW. • Puede hacer estudios paramétricos con TRNEdit. • Pueden precompilarse modelos que sólo dejan ciertos parámetros abiertos a los usuarios con TRNSED.

7.2 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN

Aparte del requerimiento obvio de que los programas sean rápidos en el cálculo, los requerimientos mínimos para los programas de simulación energética de edificios no son fáciles de definir. La razón es que el concepto de “mínimos” depende de “para qué se hace la simulación”. Más que calificarlos de mínimos habría

que indicar el grado de detalle con el cual se calcula un conjunto o un cierto fenómeno.

Más adelante se ha incluido una comparativa extraída de (ver ref.) donde varios autores y/o responsables de programas de simulación, han recogido en una serie de Tablas, cómo tratan diferentes aspectos los diversos programas de simulación.

BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics)	Estadounidense
BSIM (Building Simulation)	Danés. Instituto Danés de la construcción
DeST	China. Tsinghua University
DOE2.1 (Department Of Energy)	Estadounidense
ECOTECT	Estadounidense. ECOTECT marca registrada de AutoDesk
EnerWin	Estadounidense
EnergyExpress	Australiano.(Centro estudios CSIRO)
Energy-10	Estadounidense. Universidad Wisconsin. NREL-National Renewable Energy Laboratories
EnergyPlus	Estadounidense.DOE. Lawrence Berkeley National Laboratory. Sucesor del DOE2 y BLAST
eQUEST	Estadounidense
ESP-r	Británico. Universidad Strathclyde Glasgow Escocia
HAP (Hourly Analysis Program)	Estadounidense. Compañía que produce equipos CARRIER
HEED (Home Energy Efficient Design)	Estadounidense. Departamento de Arquitectura de la Universidad de California
IDA- ICE (Indoor Climate Energy)	Sueco. Instituto sueco de matemáticas aplicadas. En 1995 se fundó una empresa EQUA con origen en ese instituto
IES <VE> Integrated Environment Solutions <Virtual Energy>	Británica. Empresa IES Ltd. Alianza con Google SketchUp
PowerDomus	Brasileño
SUNREL	Estadounidense. Universidad Wisconsin. NREL-National Renewable Energy Laboratories
TAS Thermal Analysis of Buildings	Británico.Compañía EDSL Ltd
TRACE	Estadounidense. Compañía productora de equipos. TRANE
TRNSYS – Transient of Systems	Estadounidense. Universidad Wisconsin. NREL-National Renewable Energy Laboratories

Comparación de las capacidades de los programas de simulación térmica de edificios

La tabla recoge los conceptos fundamentales (requerimientos mínimos o fundamentales si se prefiere) que debería incluir una simulación térmica de un edificio. La intensidad o detalles con que deben ser cubiertos estos

requisitos depende, como se ha dicho, del objetivo último del cálculo.

Como norma, si muchos programas contemplan un determinado detalle dentro de un epígrafe, eso significaría que o bien es un requisito importante o bien que es fácilmente implementable.

Tabla 1	Generalidades
Tabla 2	Cargas Térmicas
Tabla 3	Envolvente del edificio, luz natural e insolación
Tabla 4	Infiltración, ventilación, aire de la zona y flujo interzonal
Tabla 5	Sistemas de energía renovable
Tabla 6	Sistemas eléctricos y equipos
Tabla 7	Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, (en adelante CVAC)
Tabla 8	Equipos CVAC
Tabla 9	Emisiones medioambientales
Tabla 10	Disponibilidad de datos climáticos
Tabla 11	Estudios económicos
Tabla 12	Informes de resultados
Tabla 13	Validaciones

Tabla 1 Generales	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECT	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Solución de simulación:																				
– Cálculo secuencial: cargas/demanda (Edificio) >>sistemas>> plantas	X			X															X	
– Producción de recursos energéticos sin realimentación	X ²	X	X			X	X	X ⁴	X	X ⁵	X ⁶	X	X	X	X	X	X ⁷	X		X
– Cálculo simultáneo del conjunto: edificio + sistemas + plantas producción		X						X	X		X	X	X	X	X	X		X	X	X

(Continuación)

Tabla 1 Generales	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
– Solución iterativa del sistema no lineal		X						X	X	X	X		X	X	X	X	X			X
– Acoplamiento del cálculo de: cargas + sistema + planta		X					X	X	X	X	X		X	X	X	X	X			X
– La temperatura de la zona depende del comportamiento del sistema	X	X	X		X ⁸	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
– Posibilidad de temperatura flotante		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Paso de tiempo:																				
– Seleccionado por el usuario (para interacción meteorología/edificio)	X	X ¹⁰						X ¹¹	X ¹²		X ¹³			X	X	X ¹⁴	X			X ¹⁵
– Variable para la interacción (aire de la zona/sistemas)	X	X ¹⁰					X		X	X	X									
– Seleccionado por el usuario para ambos casos											X			X	X	X				X
– Adaptativo en función de la dinámica									X		X			X ¹⁸						

(Continuación)

Tabla 1 Generales	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Descripción geométrica:																				
• Paredes, suelos, techos	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X ¹⁹
• Ventanas, elementos de sombra extremos, lucernarios	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X ²⁰	X	X	X	X	X	X
• Polígonos de cualquier forma		X	X	X ²¹	X					X	X ²¹		X	X	X			X		
Importación de la geometría desde programas CAD		X ²²			X		X							X ²⁴		X ²⁵		X	X ²⁸	X ²⁶
Exportación de la geometría desde programas CAD					X				X ²²		X ²⁷									
Importar/exportar a otros programas					X				X ²⁹		X ³⁰									
Número de Zonas, Superficies, Equipos, Sistemas ilimitado (función de la capacidad del PC)		X ³¹	X		X				X	X ³²	X ³³	X ³⁴	X ³⁵	X	X	X		X	X	X ³⁶

- (2) Sólo IBLAST es capaz de calcular el comportamiento simultáneo (acoplado) de todas las zonas del edificio por el método de balance de energía.
- (3) ECOTECH exporta su modelo de definición a los modelos del EnergyPlus, ESP-r, HTB-2 y Radiance invoca el cálculo y recupera los resultados para mostrarlos.
- (4) CNE (California Non-residential Engine) usa la iteración para converger en el balance de energía (red térmica+sistemas+plantas) en cada paso de tiempo.
- (5) Los bucles de aire y agua son calculados de forma simultánea.
- (6) Las cargas térmicas y el bucle de aire se calculan simultáneamente y con realimentación. La plantas se calculan secuencialmente.

- (7) Dos versiones. Una libre con equipos muy idealizados y otra para investigación más compleja.
- (8) Basado en el método de la admitancia de CIBSE (UK) para la toma de decisiones previa.
- (10) Hasta 256 pasos en una hora.
- (11) Tiene un paso fijo de 15 min. pero los resultados se muestran de forma horaria.
- (12) 15 min. por defecto, pero el paso puede variar entre 10 min. y 1 hora. Se puede llegar a 1 min. pero hay riesgo de inestabilidad en el cálculo.
- (13) Entre 1 min. y 1 h para zonas y flujos. Puede trocarse más en caso de sistemas.

- (14) 1 h por defecto, pero puede ir desde 1 s a 24 h. Los horarios tienen como mínimo intervalos de 1 minuto.
- (15) Edificio y sistemas usan el mismo paso de tiempo. Por defecto 1h. Puede bajar hasta 0.1 s.
- (18) El usuario define las tolerancias de convergencia y el orden de integración.
- (19) Tiene en cuenta los factores de forma entre los cerramientos. Para las sombras por elementos adicionales necesita información extra.
- (20) En los lucernarios es capaz de calcular múltiples reflexiones.
- (21) Tienen limitado los números de lados del polígono.
- (22) DXF.
- (24) IFC 1.51, 2.0 y 2.x2.
- (25) Tiene su propio entorno CAD utilizando OPEN-GL (como en el caso de LIDER y CALENERVp).
- (26) Programa externo llamado SIMCAD que genera los ficheros en formato que TRNSYS puede procesar.
- (27) DXF, MicroGDS, Things, VRML.
- (28) XML.
- (29) Convierte ficheros de DOE2.2 y Blast. Sólo la geometría.
- (30) Exporta a EnergyPlus. Radiance y TSB13. Importa de ECOTECH.
- (31) Sólo un sistema de cada tipo por zona.
- (32) 4096 espacios, 8192 paredes/suelos/techos/ventanas/composiciones, 2048 sistemas todo aire.
- (33) Cantidades fijas de superficies por espacio, espacios, etc. Pero se pueden cambiar si se recompila.
- (34) 2500 espacios (pero dentro de ellos los elementos: suelos, techos, ventanas, etc. pueden ser ilimitados).
- (35) Limitado.
- (36) Se puede cambiar si se recompila.

Tabla 2 Cargas de las Zonas	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Balance de energía³⁸	X	X	X	X ³⁹	X	X			X	X ³⁹	X		X	X	X	X	X	X	X	X
¿Tienen en cuenta la absorción de vapor por los materiales?	X	X							X ⁴⁰		X				X	X		X		X
¿Cómo resuelve la transmisión por conducción?																				
– Dominio de la frecuencia (método de la admitancia)					X								X	X	X					
– Factor de respuesta temporal (funciones y transferencia)	X		X	X		X			X	X		X						X	X	X
– Diferencias finitas/volúmenes finitos								X			X			X ⁴⁴	X	X	X			
¿Cómo resuelve la transmisión por convección interior?																				
– Función de la temperatura	X	X							X		X ⁴⁵		X	X	X	X	X	X		X

(Continuación)

Tabla 2 Cargas de las Zonas	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
– Función del caudal de aire en el interior	X						X				X		X		X			X		
– Función de valores calculados por CFD															X					
– Valores de usuario ⁴⁶		X	X	X	X				X				X		X	X	X	X		X
Masa térmica interna se tiene en cuenta	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Confort humano																				
– Fanger	X		X		X				X		X			X	X	X		X		X
– Kansas State University	X								X						X					
– Pierce Two-node	X								X											
– MRT (temperatura radiante media)	X				X	X			X		X			X	X	X		X		X
– Discomfort radiante											X			X	X			X		
– CFD																				
– PAQ (calidad del aire percibida)		X																		
Cálculos automáticos para dimensionar los equipos. Día de diseño																				
– Temperatura seca	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	
– Temperatura húmeda			X	X		X	X		X	X		X		X	X			X	X	
– Definido por el usuario			X	X		X	X		X	X		X	X	X	X			X	X	X

(38) Solución “simultánea” en cada paso de tiempo de los procesos de radiación y convección. Atención: aunque cada uno puede tratar la solución de la radiación de forma distinta.

(39) Estos incluyen el efecto de la radiación en los factores de respuesta.

(40) Intercambio de calor y masa (vapor) en los cerramientos.

(44) Es opcional.

(45) Se puede establecer rango de valores. La convección externa e interna se recalculan a cada paso de tiempo. La opción se puede anular.

(46) Pueden ser valores fijos, correlaciones, etc.

Tabla 3 Envoltura del edificio Luz diurna Insolación	Blast	Bsim	DeST	DOE2.4E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Análisis solar																				
– Radiación solar directa, sus reflexiones a través de ventanas. Fuera adentro y dentro afuera (canal visible)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	
– Radiación solar difusa. Ganancias a través de las persianas es diferente si la radiación proviene del cielo o es la reflejada por el suelo (canal visible)			X	X		X	X		X	X		X		X	X			X	X	
– Entorno. La ganancia solar y la luz natural tienen en cuenta las reflexiones de edificios vecinos u otros elementos exteriores (canal visible)			X	X		X	X		X	X		X	X	X	X			X	X	X
– Asistente para optimizar sombras (canal visible)					X															
– Transmitancia variable de los elementos que sombrean (canal visible)	X				X				X	X					X			X		
– Activación/desactivación según horario de los elementos que sombrean (canal visible)	X	X	X		X				X	X			X	X	X		X	X	X	X

(Continuación)

Tabla 3 Envoltura del edificio Luz diurna Insolación	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
– Control de sombra definido por el usuario (canal visible)		X	X		X				X				X	X	X			X	X	X
– Elementos de sombra bi-direccionales (canal visible)									X		X			X	X			X	X	X
– Sombra al canal infrarrojo del cielo debido a obstáculos (canal infrarrojo)			X	X		X			X	X					X			X		X
Análisis de la distribución de la insolación en el interior/exterior (canal visible)																				
– Invariante en el tiempo y/o fijada por el usuario	X			X ⁶³					X		X		X				X			X
– La distribución se calcula cada hora	X			X ⁶⁵						X	X				X					X ⁶⁶
– La distribución se calcula en cada paso de tiempo ⁶⁷									X						X					
– El rayo de sol penetra a través de ventanas interiores (no de fachada). Lo llaman también segunda envolvente		X			X				X	X ⁶⁸				X ⁶⁹	X					X
Acristalamientos avanzados																				
– Las persianas se pueden controlar		X	X	X	X ⁷⁰		X		X	X	X		X	X	X		X	X		X
– Persianas dentro de acristalamientos múltiples			X	X	X				X	X	X ⁷¹			X	X			X		X

(Continuación)

Tabla 3 Envoltura del edificio Luz diurna Insolación	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
– Vidrios electro-cromáticos					X				X	X	X			X						
– Vidrios termo-cromáticos					X						X			X						
– Base de datos de cristales			X		X				X	X		X	X	X	X			X		X
– Usa los cálculos de WINDOWS 5.0									X	X										X
– Importa de WINDOWS 4.1	X			X						X	X						X		X	X
– Corrección por suciedad para la transmisión visible y solar					X				X					X						
– Contraventanas móviles de tormenta			X		X				X		X			X	X			X		X
– Elementos de sombra bidireccionales									X		X			X	X			X	X	X
– Persianas venecianas (con/sin control)			X		X				X	X	X		X		X					X
– Control de usuario de luz natural		X	X		X				X		X		X	X	X			X	X	X
– En cristales dobles, uso de gases especiales			X		X				X		X				X			X	X	

(63) El reparto interior es fijo (60% suelo, 40 al resto en función de la superficie). Salvo los espacios solares (invernaderos, atrios...) donde se calcula horariamente.

(65) La radiación solar directa sobre las superficies exteriores se calcula cada hora. Pero la fracción en sombra se calcula para las 24 h (por la noche no) de cada 2 semanas y se supone que dicha fracción se mantiene cierta (aunque el sol va cambiando su trayectoria en el cielo de día a día, se asume que se modifica muy poco).

(66) Debe calcularse externamente al programa, pero los valores pueden ser posteriormente introducidos.

(67) Cada hora calcula la radiación directa que entra por cada ventana y la guarda para ser usada durante la simulación (esto son 8.760 valores para cada ventana).

(68) Sólo atrios.

(69) Las fachadas con “doble piel”, la primera transparente, son tratadas por un elemento especial.

(70) Permite definir un “script” (guión) en el que se definen funciones. Dichas funciones pueden afectar a parámetros de la ventana.

(71) Múltiples representaciones; como propiedad del acristalamiento, como sombras de la zona o con un cálculo detallado.

(Continuación)

Tabla 3 Envoltura del edificio Luz diurna Insolación	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Cálculos generales en la envoltura																				
– Algoritmo de convección exterior																				
– Blast/Tarp	X								X										X	
– DOE2.1				X					X	X									X	
– MoWiTT									X		X								X	
– ASHRAE simple	X					X		X	X				X		X			X	X	
– Correlación Ito, Kimura, Oka (1974)											X				X					
– Definido por el usuario			X						X		X			X	X	X		X	X	X
– Cálculo de los factores de geometría internos		X	X						X	X	X			X	X			X		
– Separan componentes radiantes y convectivas en el exterior		X	X						X	X	X			X	X		X	X		X
Modelo del cielo																				
– Isótropo	X				X		X				X	X								
– Anisótropo		X	X	X	X	X			X	X	X	X		X	X				X	X
– Seleccionable		X			X						X			X	X					X
Luz natural y su control																				
– Iluminación interior por ventanas y tragaluces		X	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X			X	X	
– Iluminación artificial por escalones		X		X		X		X	X	X	X		X	X	X			X	X	X
– Reflexión de la luz natural en el interior				X					X	X	X				X			X		

(Continuación)

Tabla 3 Envoltura del edificio Luz diurna Insolación	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
– Acristalamientos complejos. Transmitancia bidireccional diferente											X			X	X			X		
– Cálculo de la radiosidad luces interiores (canal visible)									X		X			X	X			X		
– Mapas de iluminación natural en las habitaciones		X			X				X		X				X			X		
Temperatura superficial de las zonas⁹⁹	X	X			X	X			X	X	X ¹⁰²			X	X	X	X	X	X	X
Conducción a través de superficies																				
– 1D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
– 2D o 3D									X		X									
Conducción al terreno																				
– Método simple de ASHRAE																				X
– 1D		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
– 2D y 3D									X ¹⁰⁶											
Propiedades termofísicas variables					X									X		X				
Materiales con cambio de fase																	X			
Cerramientos formados por paneles fotovoltaicos. Tiene en cuenta sus características térmicas		X							X	X	X									

(99) Suelo, techo, ventanas, cubiertas, etc.

(106) Permite la entrada de datos de otros programas.

(102) Permite conocer la temperatura dentro de los muros.

Tabla 4 Infiltración, ventilación, aire de la zona y flujo interzonal	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECT	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Infiltraciones zonales	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cálculo automático de los coeficientes de presión del viento		X													X		X	X		
Ventilación natural		X							X					X	X	X	X	X		
Híbrida; ventilación natural y mecánica		X				X								X	X	X		X		
Apertura de ventanas para ventilación controlable¹¹²			X			X			X		X				X ¹¹⁴		X	X		
Flujo interzonal de aire (red de nodos de presión uniforme en cada zona)		X							X		X			X	X		X	X		
Ventilación por desplazamiento									X ¹¹⁵		X ¹¹⁶			X	X			X		
Puede mezclar soluciones con redes de nodos y soluciones de dinámica de fluidos CFD			X																	

(112) Basado el control en las condiciones de la zona o las exteriores.

(114) Las variables de control pueden ser: concentración de CO₂ en la zona, exteriores (velocidad de viento, dirección de viento, temperatura exterior).

(115) Modelos de Mundt y UCSD, automáticamente subdividen la zona.

(116) Vía CFD o subdividiendo las zonas.

Tabla 5 Sistemas de energías renovables	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Muros Trombe. Acumulación de energía solar en masas interiores	X	X ¹¹⁹		X	X				X	X	X ¹²⁰			X ¹²⁰	X		X	X		X
Almacenamiento en depósitos inferiores de cantos rodados											X						X			X
Captadores solares																				
– Planos con cubierta de cristal			X		X			X	X		X				X			X		X
– Planos sin cubierta					X						X									X
– De vacío																				X
– Alta temperatura concentradores																				X
Sistemas solares diseñados por el usuario																				X
Sistemas integrados captador-tanque. Termosifón																				X
Paneles Fotovoltaicos		X			X			X	X	X	X				X					
Pilas de hidrógeno											X									X
Eólica											X									X

(119) Se modeliza como una zona extra aparte.

(120) Se modeliza usando una zona extra y la red de nodos de flujo de aire interzonal.

Tabla 6 Sistemas eléctricos y equipos	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Potencia renovable (ver Tabla 5)								X	X	X	X									X
Distribución de la carga eléctrica y su gestión																				
- Cogeneración y gestión propia	X			X					X	X	X					X			X	X
- Componentes renovables																				X
Generadores de potencia																				
- De combustión interna	X			X					X	X	X								X	X
- Turbina	X			X					X	X	X								X	
- Turbina de microgeneración											X ¹³²									X
Conexión a red									X		X									X
Equipamiento: convertidores, inversores, etc.											X									
Carga eléctrica instantánea del edificio	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X		X	X	X		X		X

(132) Simula a un paso de tiempo similar al resto de plantas. El control se puede aplicar a las cargas y fuentes de potencia de forma individual. Se puede simular generación: monofásica, multifásica en corriente alterna, continua o

mixta. Para cada componente proporciona las componentes activa y reactiva, pérdidas de potencia, corrientes y fases, voltajes. Asimismo, calcula las exportaciones e importaciones de energía eléctrica a la red.

Tabla 7 Sistemas de climatización CVAC	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Componentes discretos			X						X		X			X	X			X		X
Sistemas idealizados	X		X		X	X			X		X			X	X		X			X
Sistemas configurables por el usuario (parametrizados o plantillas)		X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bucles de aire¹⁴⁰			X						X		X	X		X	X	X		X	X	X
Bucles de agua¹⁴¹			X						X	X	X	X		X	X			X	X	X
Bucles primarios y secundarios			X							X	X	X		X				X	X	X
Potencia de bombeo de fluidos										X	X	X		X					X	
Redes de tuberías de líquidos											X			X						
Redes de conductos de aire						X			X	X	X	X	X	X						X
Múltiples plenum de impulsión									X		X				X					X
Demanda de ventilación																				
– Por ocupante o por m ² de superficie			X			X			X	X			X	X	X ¹⁴⁸	X		X		X
– Horario de ventilación		X	X	X		X			X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
– Definida por el usuario		X	X								X			X	X			X		X
Modelo de CO₂ producido por ocupación		X									X	X		X	X					

(140) Permite ir poniendo componentes típicos del circuito de aire: cajas de mezcla, ventiladores, baterías, etc.

(141) Permite definir bucles de agua: fría, caliente, condensación, etc.

(148) Es capaz de hacerlo en función de la concentración de CO₂.

(Continuación)

Tabla 7 Sistemas de climatización CVAC	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Dimensionamiento de equipos automático																				
– Componentes. Plantas, terminales, etc.			X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	
– Bucle de aire		X				X			X			X		X	X			X	X	
– Bucles de agua									X	X		X		X	X			X	X	
Sistemas zonales de distribución de aire																				
– Volumen constante con recalentamiento	X	X	X	X			X	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	
– Volumen constante, 4 tubos, inducción	X		X						X			X		X	X				X	
– Volumen variable con recalentamiento	X	X	X	X			X		X	X	X	X		X	X			X	X	
– Volumen variable sin recalentamiento	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X		X	X			X	X	
– Volumen variable, con recalentamiento y velocidad variable		X	X						X						X			X	X	
– Unidades de inducción																				
Recalentamiento en serie				X					X	X		X		X					X	
Recalentamiento en paralelo				X					X	X		X		X					X	
– Doble conducto volumen constante	X	X		X		X			X	X	X	X		X	X				X	
– Doble conducto volumen variable	X	X		X					X	X	X	X		X	X				X	

(Continuación)

Tabla 7 Sistemas de climatización CVAC	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Unidades terminales de aire forzado																				
– Fancoil (2 tubos)	X		X								X	X								
– Fancoil (4 tubos)	X	X	X	X		X			X	X		X		X	X		X		X	
– Calentador	X		X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
– Ventilador	X			X		X		X	X	X	X	X	X	X	X		X		X	
– Acondicionador de ventana			X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
– Ventilador de retorno para recuperar energía									X			X		X	X		X		X	
Equipos unitarios																				
– De expansión directa																				
De calor y frío	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X
Degradación de la capacidad latente									X	X	X				X					X
– Calderas	X		X	X		X	X	X	X	X		X	X		X			X	X	X
– Bomba de calor compacta aire-aire	X	X	X	X		X		X	X	X		X	X		X	X		X	X	X
– Bomba de calor aire-agua	X		X	X		X			X	X		X			X			X	X	X

Tabla 8 Equipos de climatización CVAC	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Baterías de:																				
– Agua caliente	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X		X	X			X	X	X
– Calentadoras eléctricas	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X			X	X		X	X	X
– Calentadoras de gas	X			X		X	X		X	X		X		X	X			X	X	X
– Agua fría	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X		X	X	X		X	X	X
– Detallada aleteada	X								X		X					X				X
– Expansión directa																				
Factor de bypass para frío	X								X			X			X					
Velocidad variable	X								X											
Factor de bypass para calor	X								X											
Control de escarcha									X	X		X								
– Bomba de calor aire-agua	X		X	X						X	X	X			X					
Unidades radiantes/ convectivas																				
– Base eléctrica	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
– Base hidráulica	X	X				X			X	X	X	X		X	X				X	
– Baja temperatura radiante																				
Hidráulica	X	X							X		X ¹⁶⁸			X	X					X
Eléctrica	X	X							X		X ¹⁶⁸				X					X
– Alta temperatura radiante	X								X		X ¹⁶⁸			X	X					X
Deshumidificador				X					X	X									X	X

(168) Lo simula bien como componentes externos o extrae o inyecta la energía (calor) en el cerramiento. Suelo radiante.

(Continuación)

Tabla 8 Equipos de climatización CVAC	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Humidificador																				
– Vapor	X	X	X						X		X	X		X	X	X		X	X	
– Ducha de agua		X	X						X		X			X	X	X			X	
Control de humidificación																				
– Uso de baterías hidráulicas		X							X		X			X	X	X			X	X
– Uso de baterías expansión directa	X	X		X		X			X	X	X	X		X	X	X			X	X
Ventiladores																				
– Volumen constante	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X
– Volumen variable	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X
– Extracción	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Bombas																				
– Velocidad constante	X		X	X		X			X	X	X	X		X	X	X		X	X	X
– Velocidad variable	X		X	X					X	X	X	X		X	X			X	X	X
– Multietapa										X	X			X						X
– Acopladas a motor											X									
Intercambiadores de calor																				
– Placas										X	X			X					X	X
– Inmersión														X						X
– Carcasa y tubos											X			X						X
– Definición efectividad										X	X			X						X

(Continuación)

Tabla 8 Equipos de climatización CVAC	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Equipos de producción de frío																				
– Eléctrico centrífugo	X		X	X		X			X		X				X	X			X	
– Eléctrico centrífugo Inverter			X	X					X		X				X				X	
– Eléctrico alternativo	X		X			X			X		X				X				X	
– Eléctrico recuperación de calor	X		X	X					X		X				X				X	
– Eléctrico tornillo			X	X					X		X				X				X	
– Eléctrico scroll			X								X				X				X	
– Eléctrico COP=cte	X	X	X			X		X	X		X			X	X				X	
– Combustión interna alternativo	X		X	X					X		X				X				X	
– Combustión interna turbina	X		X						X		X				X				X	
– Absorción accionada a vapor	X		X	X					X	X		X							X	
– Absorción accionada a gas												X							X	
– Absorción accionada a gas/agua caliente	X			X					X	X									X	X
– Con enfriamiento gratuito	X			X					X	X				X				X	X	X
– Aire-agua			X		X					X								X	X	X
– Agua-agua	X		X		X				X	X				X				X	X	X

(Continuación)

Tabla 8 Equipos de climatización CVAC	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Equipos de condensación/evaporación																				
– Torre refrigeración 1 velocidad	X		X	X		X		X	X	X	X	X				X			X	X
– Torre refrigeración 2 velocidad									X		X	X							X	X
– Torre refrigeración velocidad variable				X					X	X	X	X							X	X
– Condensación por aire	X			X		X		X	X	X	X	X				X			X	X
– Condensador evaporativo	X			X					X	X									X	X
– Condensador por evaporación directa	X					X			X										X	
– Condensador por evaporación indirecta	X								X										X	
– Enfriamiento gratuito. Intercambiador			X	X					X	X		X		X					X	X
– Balsa de condensación									X	X		X								
– Condensación geotérmica horizontal									X	X										
– Condensación geotérmica vertical										X		X		X						
– DX-expansión directa-efectividad				X					X	X									X	X
– DX-expansión directa-def. de potencia									X											X

(Continuación)

Tabla 8 Equipos de climatización CVAC	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Almacenamiento estacional de calor y/o frío																				
– Agua caliente/fría/hielo	X																		X	X
– Intercambiadores geotérmicos										X										
– Tanques estratificados	X									X										X
– Tanque acoplado al terreno (sin aislar)																				X
– Materiales cambio de fase																				X
Equipos de producción de calor																				
– Caldera	X		X	X		X		X	X	X		X	X	X	X			X	X	X
– Calentador de agua	X					X			X	X	X			X	X				X	X
– Bomba de calor agua-agua geotérmica								X		X					X			X	X	X
Recuperadores aire-aire																				
– Sensible	X	X	X						X	X	X	X		X	X			X	X	X
– Sensible placas		X	X						X	X	X	X		X	X				X	X
– Sensible y latente	X	X	X						X	X	X	X		X	X				X	X
Agua caliente sanitaria ACS																				
– Red definida por el usuario											X									X
– Calentador doméstico				X		X		X	X	X				X	X			X	X	X
– Definición del consumo								X	X					X					X	X

(Continuación)

Tabla 8 Equipos de climatización CVAC	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
– Tanque estratificado	X																			X
– Tanques combinados para ACS/Calef.																				
Controles termostatos y estrategias de control																				
– Humidostato	X	X	X						X			X		X	X			X	X	
– Termostato zonal	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
– Setpoint temperatura impulsión a la zona	X	X	X	X				X	X	X	X	X		X	X			X	X	X
– Control por aire exterior	X	X							X	X	X	X		X	X			X	X	X
– Sistema disponible	X	X	X	X				X	X	X	X	X		X	X			X	X	X
– Control de carga de las plantas para programar sus etapas	X		X	X					X	X		X		X	X			X	X	X
– Control de condensación				X					X	X									X	X
– Ventilación nocturna para refrigeración				X		X			X	X	X		X	X	X		X		X	X
– Economizador	X			X		X		X	X	X	X	X	X	X	X				X	X
– Estrategia definida por el usuario		X								X				X	X					X

Tabla 9 Emissiones mediambientales	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Emissiones de plantas productoras de energía	X			X		X		X	X	X	X	X	X		X			X	X	
Emissiones en la ubicación del edificio	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X		X			X	X	
Gases efecto invernadero (CO₂, CO, CH₄, NO_x)	X			X		X		X	X	X	X	X	X		X			X		
Equivalentes de carbón de los gases emitidos	X			X					X			X			X			X		
Contaminantes (Pb, PM, SO₂)									X						X					
Precursores de ozono (NH₃, CH₄, NMVOC)									X											
Contaminantes peligrosos (Pb,Hg)									X											
Agua usada en producir potencia									X											X
Desechos nucleares									X											

Tabla 10 Disponibilidad de datos meteorológicos	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Los datos vienen con el programa	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X			X		
Los datos deben descargarse		X			X				X	X	X	X		X	X			X		
Generar datos horarios a partir de promedios mensuales			X		X										X					
Estimar radiación solar difusa a partir de la global			X	X					X						X			X		

(Continuación)

Tabla 10 Disponibilidad de datos meteorológicos	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Edición y procesado de los datos	X		X	X	X			X	X	X	X							X		
Formatos																				
– Cualquier formato		X			X	X	X		X		X			X	X	X	X			X
– EnergyPlus/ ESP-r ²¹⁵		X			X				X		X		X					X		X
– Año de referencia para test europeo ²¹⁶		X			X						X			X		X	X			X
– Año meteorológico típico TMY ²¹⁷	X		X		X				X	X	X			X		X	X		X	X
– Año meteorológico típico TMY 2 ²²⁰	X				X			X	X	X				X				X	X	X
– Consejo sobre recursos solares y eólicos									X											
– Año meteorológico para cálculos energéticos 2 ²²³			X	X	X				X	X										
– Red de observación superficial meteorológica y solar ²²⁴									X											
– Meteorología Internacional para cálculos energéticos ²²⁵					X				X					X					X	X
– Datos Japón AMeDAS ²²⁶																				X
– DOE2 text				X	X				X	X									X	
– BLAST text					X				X								X			
– ESP-r text									X		X									
– ECOTEC WEA text					X				X											

(215) Crawley, Hand (1999).

(216) Comisión europea (1985).

(217) NCDC- National Climatic Data Center EE.UU. (1981).

(220) NREL (1995).

223) ASHRAE (1997).

(224) NCDC (1993).

(225) ASHRAE (2001b).

226) Akasaka et al. (2003).

Tabla 11 Análisis económicos	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECT	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Coste de la energía																				
– Coste de la energía demandada		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
– Tarifas complejas		X	X	X			X		X	X		X	X		X				X	
– Variación temporal de la tarifa		X	X	X					X	X		X	X	X	X			X	X	X
– Fechas de facturación									X	X			X						X	
Coste de ciclo de vida																				
– Coste componentes y equipos			X	X		X		X	X	X		X			X				X	
– Coste ciclo de vida						X		X		X		X			X					X

Tabla 12 Generación de informes	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECT	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Informes estándar (predefinidos)	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X
Informes definidos por el usuario	X	X	X		X			X	X	X	X	X		X	X	X	X			X
Formato elegible por el usuario																				
– Separador por comas CSV					X	X		X	X	X	X				X		X		X	
– Texto		X	X		X				X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
– WinWord												X		X	X			X	X	
– Separado por tabuladores			X		X		X		X	X	X				X		X	X	X	X
– HTML		X			X				X	X					X					
– Gráficos					X		X	X		X	X	X	X	X	X	X		X		X

(Continuación)

Tabla 12 Generación de informes	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
– Estadísticas			X								X				X					X
Informes de cargas térmicas, cargas del sistema y cargas de las plantas de producción: horaria, semanal, mensual y anual	X	X	X			X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X
Frecuencias de repetición de una variable								X	X	X	X			X	X	X		X		X
Dependencia de una variable de otra									X		X			X	X	X		X		
Medidores																				
– Uso final de la energía	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X
– Demanda pico (carga térmica)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X
– Demanda pico por horas/días/ semanas/			X						X	X					X			X		X
– Consumo por tipo de energía	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
– Componentes asignadas a diferentes medidores		X	X							X	X			X	X			X		X
– Múltiples niveles de medición		X	X	X					X	X				X						X
Autodimensiona- miento de los equipos			X	X				X	X	X		X		X	X			X	X	
Comprobaciones de balances de energía								X	X		X				X			X		X
Salida visual del edificio introducido		X	X		X		X		X	X	X		X	X	X	X		X		

(Continuación)

Tabla 12 Generación de informes	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECT	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Diagramas de principio de los sistemas definidos									X	X	X			X	X	X				
Definición gráfica del sistema definido														X	X	X		X		X
Mostrar variables durante la simulación					X						X			X						X

Tabla 13 Validación	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECT	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
IEA ECB CS Anejo 1 ²³⁹											X									X
IEA ECB CS Anejo 4 ²⁴⁰											X									X
IEA SHC Task 8											X						X			X
IEA ECB CS Anejo 10											X									X
IEA SHC Task 12																				
– Envuelta BESTEST	X		X	X				X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
– Empírico ²⁴⁹		X	X								X						X	X		X
IEA SHC Task 22																				
– BESTTEST Vol. 1				X					X	X	X			X					X	X
– BESTTEST Vol. 2				X					X		X			X					X	X
– Calderas BESTEST									X		X									
– RADTEST ²⁵⁶				X							X			X						X
IEA ECB CS Anejo 41 Humedad																X				
HERS BESTEST	X			X									X				X			
ASHRAE 1052-RP	X			X					X											

(Continuación)

Tabla 13 Validación	Blast	Bsim	DeST	DOE2.1E	ECOTECH	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES<VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
BEPAC pruebas de conducción									X		X									
BRE/EDF validation project									X		X									
PASSYS											X									
CIBSE TM33											X				X			X		
ISO 13791																		X		

IEA SCH- Solar and Heating programm.

BEPAC- Building Environmental Performance Analysis Club (Canadá).

(239) Oscar Faber and partners (1980). Dep. Energy US (1981).

(240) Edificio comercial en Glasgow monitorizado 1984, informe Strachan (2000).

(249) Lomas et al. (1994).

(256) Achermann y Zweifel (2003).

Anexo 1: Transferencia de calor por radiación

En este apéndice se realiza una discusión de la transferencia de calor por radiación. Este suele ser un problema que los diversos programas intentan simplificar con diferentes aproximaciones debido a su dificultad.

El objetivo es que el lector entienda los aspectos básicos. Cómo se crea un modelo matemático del mismo y como las hipótesis simplificadas más comunes, permiten una manipulación práctica del problema, que puede llegar a ser muy complejo.

En la simulación de edificios se utilizan dos métodos fundamentalmente:

- Método de Oppenheim (o de las radiosidades, N ecuaciones).
- Método abreviado (N ecuaciones).
- Método de las conductancias o resistencias de radiación (N ecuaciones).
- Método de Gebhardt (N² ecuaciones).

Los principios fundamentales son los mismos en ambos casos y sólo cambia la forma de expresar el problema.

Ambos métodos hacen las siguientes hipótesis:

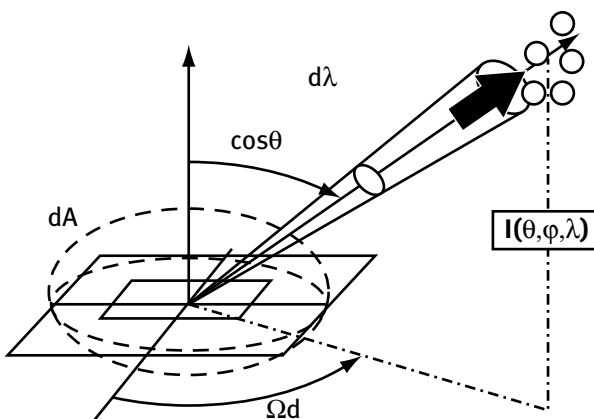
- La materia emite como un cuerpo gris.
- La intensidad de la radiación en la misma en cualquier dirección (emisión o irradiación difusa).
- Cada superficie se mantiene a una temperatura espacialmente uniforme.
- La radiosidad es la misma en cualquier punto de dicha superficie.

- El fluido encerrado (aire-húmedo) no participa –es transparente– a la radiación intercambiada.

La intensidad de la radiación se define de forma general por:

$$dQ_{\theta,\varphi,\lambda} = I(\theta,\varphi,\lambda) \cdot \cos\theta \cdot dA \cdot \Omega d \cdot d\lambda \left[\left(W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr) \right) \right]$$

Potencia por unidad de superficie, por unidad de longitud de onda y por estereoradian (unidad de ángulo sólido). Esto es, la energía emitida por la superficie en un segundo y que es introducida en un cierto cono (ver dibujo). La I se llama intensidad direccional, espectral. (Como es monocromática –una longitud de onda– se representa fotones –circuitos– todos del mismo tamaño –energía).



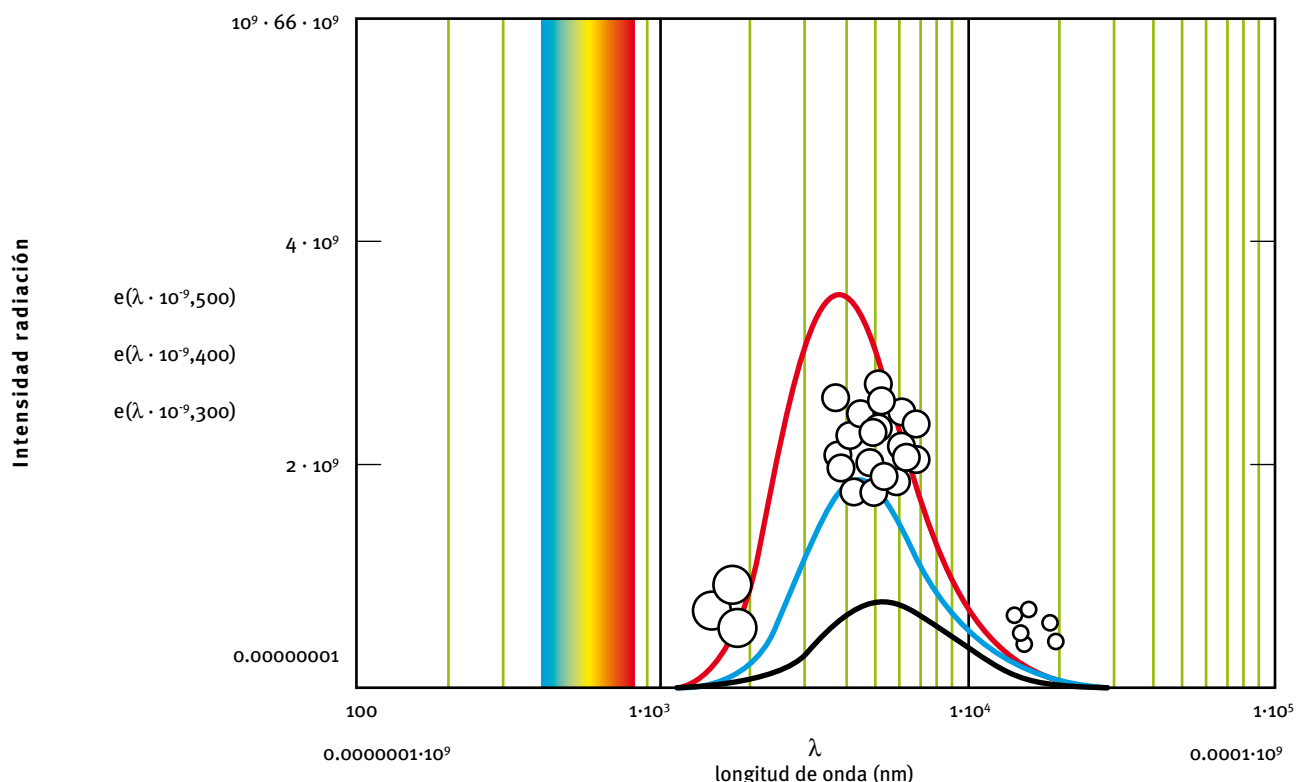
Si la I no depende de la dirección, la relación entre su valor en un cono y el valor integrado a toda la semiesfera es:

$$i(\lambda) = \pi \cdot I(\lambda) \left[\left(W/(m^2 \cdot \mu m) \right) \right]$$

Nota: Los valores integrados se representan en minúsculas.

La radiación se comporta a la vez como ondas electromagnéticas y como partículas. El tamaño de estas partículas (fotones) viene dado por la cantidad de energía que emite, dependiendo ésta de su longitud de onda electromagnética: a menor longitud de onda, mayor tamaño y energía. Una forma de pensar en ellos, que puede ser ilustrativa, es pensar en los fotones como pequeñas monedas cuyo valor representa la cantidad de energía que transportan. Existe una cantidad enorme de ellos, de forma que aunque cada uno tenga poco valor la suma de ellos acumula una gran cantidad de energía. Los objetos a cierta temperatura emiten fotones de ciertos tamaños energéticos de forma caótica en todas direcciones. La distribución de esta emisión sigue la ley de Planck.

Ley de Planck



La figura muestra la banda de longitudes del canal visible y la emisión de tres cuerpos negros a 500, 400 y 300 K. (Atención: la escala es logarítmica).

De manera que, según la temperatura, puede haber emisión de muchos fotones en ciertos rangos y muy pocos en otros rangos.

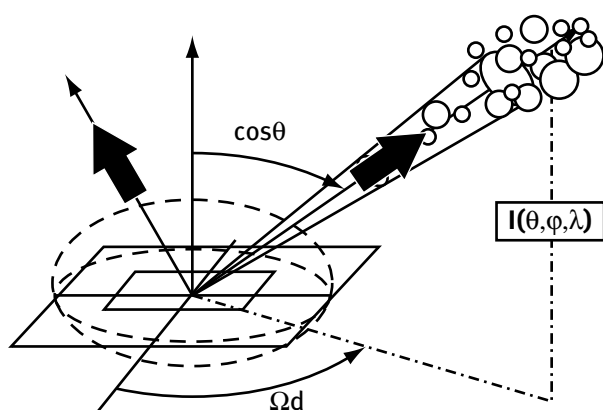
En el caso de la luz solar, ésta tiene su origen en la superficie del Sol, que está a unos 5.700 K y, por lo tanto, tiene muchos fotones en el rango visible. Sin embargo, salvo las luminarias incandescentes que tratan de imitar al Sol, en las temperaturas habituales el rango está desplazado al infrarrojo.

Esto hace que se pueda hacer un cálculo del intercambio de fotones en cada rango independientemente.

Si se integra (suma) toda la energía en cierto rango y se supone una emisión o irradiación difusa (misma intensidad en todas direcciones) la ecuación anterior se puede resumir en:

$$i = \pi \cdot I \left[\left(W / (m^2) \right) \right]$$

Los fotones infrarrojos tienen poco valor (por ejemplo, siguiendo el símil, de céntimo) mientras que los fotones visibles (la luz que usamos para ver) tienen un tamaño superior (por ejemplo, medio euro). La luz ultravioleta es mucho más energética (por ejemplo, un euro), etcétera. El dibujo muestra la intensidad direccional para todo el espectro (todos los fotones de todos los tamaños) uniforme en todas direcciones.



Imagine un recinto (volumen) definido por N superficies que lo encierran y que forman su contorno. Dichas superficies se clasifican de manera que la materia en cada una de ellas, se prevea que tenga una temperatura uniforme. En el caso de un edificio sería un cierto cerramiento o las partes en que se ha subdividido.

¿Cómo se puede evaluar la cantidad de energía que se intercambian en el rango de radiación infrarroja?, o más en general en cualquier tipo de fotón, siempre y cuando la intensidad de la radiación sea difusa (independiente de la dirección). El lector debe recordar que los cristales son opacos a esta radiación de manera que en ese rango el volumen está totalmente encerrado por materiales opacos.

La diferencia entre la energía radiante que sale de la superficie k (que se llama radiosidad j_k [W/m^2] y su correspondiente intensidad J_k [$\text{W}/\text{m}^2\text{sr}$]) y aquella que llega a ella (que se llama irradiancia g_k [W/m^2] y su correspondiente intensidad G_k [$\text{W}/\text{m}^2\text{sr}$]) es energía que la superficie obtiene por otros medios (conducción, convección o radiación de otra longitud de onda –otro tipo de fotones–) y que ha emitido de forma neta en forma de fotones infrarrojos. Escrito en forma matemática:

$$(1) \quad Q_{\text{rad},k} = q_{\text{rad},k} \cdot A_k = (j_k - g_k) \cdot A_k \quad [\text{W}]$$

Bien y ¿cuánta energía sale de k ? La radiosidad de la superficie tiene dos componentes para el infrarrojo, aquella energía emitida por el material al estar a una temperatura T_k –tiene por tanto un origen termofísico, en el movimiento de los átomos– y aquella radiación infrarroja que se originó en otro lugar y es el resultado de la reflexión sobre k .

$$(2) \quad j_k = \varepsilon_k \cdot e_{n,k} + \rho_k \cdot g_k \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

$e_{n,k}$ $\int$ emisividad como materia negra = σT^4 (W/m^2) T en (Kelvin) = ($^{\circ}\text{C}$) + 273.15.

σ $\int$ Constante Stephan-Boltzman = $5.67 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$)

ε_k $\int$ Emisividad de la materia, independiente de la longitud de onda –cuerpo gris.

ρ_k $\int$ reflectividad de la materia.

Existe una relación entre los coeficientes: emisividad e , reflectividad r , transmisividad t , para una misma sustancia. Su suma debe ser la unidad. Cada uno de ellos toma un valor entre 0 y 1. De forma general pueden depender de la dirección y de la longitud de onda (tamaño del fotón), pero en este caso su suma siempre debe dar la unidad (para cada tipo de fotón y para cada dirección). Para un cuerpo opaco a cierto tipo de fotones, $t=0$. Lo que implica: $r = 1-e$. Si no depende del tipo de fotón y de la dirección, se dice que el cuerpo es gris. Por último, un objeto emite en la medida que absorbe, por lo tanto, emisividad e y absorbitud a son iguales: $e=a$.

De (1) y de (2) se puede obtener también la relación:

$$(1.\text{bis}) \quad Q_{\text{rad},k} = \frac{(e_{n,k} - j_k)}{\rho_k / \varepsilon_k \cdot A_k} \quad [\text{W}]$$

El factor de visión, de forma o factor de geometría, se define para superficies cuya intensidad de radiación no dependa de la dirección (emisión o irradiancia difusa) por:

$$F_{k \rightarrow l} = \frac{Q_{\text{radiante que llega a l}}}{Q_{\text{radiante que sale de k}}} = \frac{1}{\pi \cdot A_k} \iint_{A_k, A_l} \frac{\cos \theta_k \cdot \cos \theta_l}{r^2} dA_k dA_l$$

Por lo tanto dice la fracción de energía radiante que sale de una superficie k y llega a l . Si de la superficie se lanzan líneas rectas, la fracción que llega a l de las que salieron de k mide el factor de visión.

– Preste atención, porque este factor no es simétrico, esto es; $F_{k,l} \neq F_{l,k}$. Sin embargo si es cierta la relación de reciprocidad:

$$A_k \cdot F_{k \rightarrow l} = A_l \cdot F_{l \rightarrow k}$$

– Observe que el factor de forma $F_{k,k}$ no es distinto de cero a menos que la superficie sea convexa o plana. De otra manera, si la superficie tiene forma de cuenco, tiene un factor de forma consigo misma. La energía que sale de ella vuelve a ella.

¿Cómo se calcula la energía que recibe una superficie? Sencillo: hay que sumar las aportaciones de todas las demás incluida ella misma –si tiene forma de cuenco–. Escrito en ecuación sería:

$$A_k \cdot g_k = \sum_{l=1}^N j_l \cdot A_l \cdot F_{l \rightarrow k}$$

Haciendo uso de la reciprocidad para cambiar el término dentro del sumatorio, de manera que la irradiancia queda:

$$(3) \quad g_k = \sum_{l=1}^N j_l \cdot F_{k \rightarrow l}$$

Las ecuaciones (1) (2) y (3) son las básicas que permiten plantear el problema de intercambio radiante.

Utilizando la (3) podemos eliminar g_k en (1) y (2) de forma que se reescriben como:

$$(4) \quad Q_{rad,k} = (e_{n,k} - j_k) \cdot \frac{A_k \cdot \epsilon_k}{\rho_k}$$

$$(5) \quad Q_{rad,k} = \left(j_k - \sum_{l=1}^N j_l \cdot F_{k \rightarrow l} \right) \cdot A_k$$

Se puede escribir un par de ecuaciones para cada superficie k y las incógnitas son $\{(Q_{rad,k}$ o $T_k)\}$ y j_k . Recuerde el lector que la primera es energía obtenida por conducción, convección o radiación –de índole distinta al rango de tamaño de fotones cuyo intercambio se está estudiando–, que la superficie transforma en radiación, –en el rango de estudio– y que emite de forma neta. La segunda es la temperatura uniforme de la superficie k -ésima y la tercera es la radiosidad de dicha superficie.

Por lo tanto hay $2N$ ecuaciones y $2N$ incógnitas.

Estas son las ecuaciones de partida de Oppenheim para el método de las radiosidades.

Método de las radiosidades (N ecuaciones)

Se pensó para simplificar y flexibilizar el cálculo del intercambio. De cada superficie se puede conocer, o bien la potencia radiante Q_{rad} o bien su temperatura. Con este método se resuelve un sistema de N ecuaciones (no $2N$) y se calculan las N radiosidades como paso intermedio.

El método es el siguiente:

Entre las ecuaciones (4) y (5) se elimina Q_{rad} de manera que se obtiene una ecuación que contiene las T_i (en el potencial emisivo de un cuerpo negro $e_{n,i} = \sigma T_i^4$):

$$j_k \cdot \rho_k + j_k \cdot \epsilon_k - \rho_k \sum_{l=1}^N j_l \cdot F_{k \rightarrow l} = \epsilon_k \cdot e_{n,k}$$

si $\tau_k = 0, \Rightarrow \rho_k = 1 - \epsilon_k$, entonces:

$$j_k - \rho_k \sum_{l=1}^N j_l \cdot F_{k \rightarrow l} = \epsilon_k \cdot e_{n,k}$$

donde se ha supuesto que las superficies son opacas. En forma más compacta utilizando el formalismo de la delta de Dirac ($\delta_{kl} = 1$ si $k=l$, $\delta_{kl} = 0$ si $k \neq l$).

$$\sum_{l=1}^N (\delta_{k,l} - (1 - \epsilon_k) \cdot F_{k \rightarrow l}) j_l = \epsilon_k \cdot e_{n,k}$$

(6) por ejemplo para la superficie $k = 1$:

$$(1 - (1 - \epsilon_1) \cdot F_{1,1}) \cdot j_1 + (1 - \epsilon_1) \cdot F_{1,2} \cdot j_2 + (1 - \epsilon_1) \cdot F_{1,3} \cdot j_3 + \dots = \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4$$

El sistema se construye con las ecuaciones (5) y (6). La (5) en caso de que el Q_{rad} sea conocido, la (6) en caso de que la temperatura (y por lo tanto $e_{n,k}$) sea conocida. Por ejemplo:

(7)

$$\begin{matrix} T_1 & \text{conocida} \\ Q_{rad,2} & \text{conocida} \\ \dots & \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 - (1 - \epsilon_1) \cdot F_{1,1} & -(1 - \epsilon_1) \cdot F_{1,2} & -(1 - \epsilon_1) \cdot F_{1,N} \\ -F_{2,1} & 1 - F_{2,2} & -F_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ j_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \sigma T_1^4 \\ Q_{rad,2} / A_2 \\ \dots \end{bmatrix}$$

Tras resolver este sistema de ecuaciones se obtienen las radiosidades j_k [W/m^2] y con ellas, y utilizando la ecuación (4), se obtiene para cada superficie aquella variable desconocida. Siguiendo con el ejemplo anterior:

$$Q_{rad,1} = (e_{n,1} - j_1) \cdot \frac{A_1 \cdot \epsilon_1}{\rho_1}$$

$$T_2 = \sqrt[4]{\left[\frac{Q_{rad,2} \cdot \rho_2}{A_2 \cdot \epsilon_2} + j_2 \right] \cdot \frac{1}{\sigma}}$$

Método abreviado (N ecuaciones)

Es un caso particular del anterior. En el caso de conocer todas las temperaturas de las N superficies, las incógnitas son los $Q_{rad,k}$. Por lo tanto las radiosidades son eliminadas entre las ecuaciones (4) y (5) –suponiendo que todas las superficies son opacas, $t=0$ –, dando lugar al siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\varepsilon_1} - F_{1,1} \frac{(1-\varepsilon_1)}{\varepsilon_1} & -F_{1,2} \frac{(1-\varepsilon_2)}{\varepsilon_2} & \dots & -F_{1,N} \frac{(1-\varepsilon_N)}{\varepsilon_N} \\ -F_{1,N} \frac{(1-\varepsilon_1)}{\varepsilon_1} & \frac{1}{\varepsilon_2} - F_{2,2} \frac{(1-\varepsilon_2)}{\varepsilon_2} & \dots & -F_{2,N} \frac{(1-\varepsilon_N)}{\varepsilon_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -F_{N,1} \frac{(1-\varepsilon_1)}{\varepsilon_1} & -F_{N,2} \frac{(1-\varepsilon_2)}{\varepsilon_2} & \dots & \frac{1}{\varepsilon_N} - F_{N,N} \frac{(1-\varepsilon_N)}{\varepsilon_N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{rad,1}/A_1 \\ Q_{rad,2}/A_2 \\ \dots \\ Q_{rad,N}/A_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-F_{1,1}) & -F_{1,2} & \dots & -F_{1,N} \\ -F_{2,1} & (1-F_{2,2}) & \dots & -F_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -F_{N,1} & -F_{N,2} & \dots & (1-F_{N,N}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma T_1^4 \\ \sigma T_2^4 \\ \dots \\ \sigma T_N^4 \end{bmatrix}$$

O en general:

$$\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1}\rho_1 & F_{1,2}\rho_2 & \dots & F_{1,N}\rho_N \\ F_{2,1}\rho_1 & F_{2,2}\rho_2 & \dots & F_{2,N}\rho_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1}\rho_1 & F_{N,2}\rho_2 & \dots & F_{N,N}\rho_N \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} Q_{rad,1}/\varepsilon_1 \cdot A_1 \\ Q_{rad,2}/\varepsilon_2 \cdot A_2 \\ \dots \\ Q_{rad,N}/\varepsilon_N \cdot A_N \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & \dots & F_{1,N} \\ F_{2,1} & F_{2,2} & \dots & F_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} & F_{N,2} & \dots & F_{N,N} \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \sigma T_1^4 \\ \sigma T_2^4 \\ \dots \\ \sigma T_N^4 \end{bmatrix}$$

$$([I] - [F_{i,k}\rho_k]) \cdot \left[\frac{Q_{rad,k}}{\varepsilon_k \cdot A_k} \right] = ([I] - [F_{i,k}]) \cdot [\sigma T_k^4]$$

Si se invierte la primera matriz se obtiene una relación directa entre las temperaturas de las superficies y el Q_{rad} de cada una de ellas:

$$\begin{bmatrix} Q_{rad,1}/A_1 \\ Q_{rad,2}/A_2 \\ \dots \\ Q_{rad,N}/A_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\varepsilon_1} - F_{1,1} \frac{(1-\varepsilon_1)}{\varepsilon_1} & F_{1,2} \frac{(1-\varepsilon_2)}{\varepsilon_2} & \dots & F_{1,N} \frac{(1-\varepsilon_N)}{\varepsilon_N} \\ F_{2,1} \frac{(1-\varepsilon_1)}{\varepsilon_1} & \frac{1}{\varepsilon_2} - F_{2,2} \frac{(1-\varepsilon_2)}{\varepsilon_2} & \dots & F_{2,N} \frac{(1-\varepsilon_N)}{\varepsilon_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} \frac{(1-\varepsilon_1)}{\varepsilon_1} & F_{N,2} \frac{(1-\varepsilon_2)}{\varepsilon_2} & \dots & \frac{1}{\varepsilon_N} - F_{N,N} \frac{(1-\varepsilon_N)}{\varepsilon_N} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} (1-F_{1,1}) & -F_{1,2} & \dots & -F_{1,N} \\ -F_{2,1} & (1-F_{2,2}) & \dots & -F_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -F_{N,1} & -F_{N,2} & \dots & (1-F_{N,N}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma T_1^4 \\ \sigma T_2^4 \\ \dots \\ \sigma T_N^4 \end{bmatrix}$$

Método de las conductancias

Se trata de una manera de escribir las ecuaciones que permite asimilar el problema de radiación a un problema de transferencia de calor por conducción utilizando el símil de la resistencia o conductancia eléctrica –teniendo presente que la transferencia de energía radiante es no-lineal.

Se parte del método de las radiosidades, pero suponiendo que se conoce la temperatura de todas las superficies, de manera que el sistema de ecuaciones queda:

$$\begin{matrix} T_1 \text{ conocida} \\ T_2 \text{ conocida} \\ \dots \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 - (1-\varepsilon_1) \cdot F_{1,1} & -(1-\varepsilon_1) \cdot F_{1,2} & -(1-\varepsilon_1) \cdot F_{1,N} \\ 1 - (1-\varepsilon_2) \cdot F_{2,1} & -(1-\varepsilon_2) \cdot F_{2,2} & -(1-\varepsilon_2) \cdot F_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ j_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \\ \varepsilon_2 \sigma T_2^4 \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \rho_1 \cdot F_{1,1} & \rho_1 \cdot F_{1,2} & \rho_1 \cdot F_{1,N} \\ \rho_1 \cdot F_{2,1} & \rho_2 \cdot F_{2,2} & \rho_2 \cdot F_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ j_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \\ \varepsilon_2 \sigma T_2^4 \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$\left(\begin{bmatrix} 1/\rho_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1/\rho_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & F_{1,N} \\ F_{2,1} & F_{2,2} & F_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ j_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \sigma T_1^4 / \rho_1 \\ \varepsilon_2 \sigma T_2^4 / \rho_2 \\ \dots \end{bmatrix}$$

Para resumir las matrices se pueden simbolizar como sigue:

$$\left([I] \cdot \left\{ \frac{1}{\rho_k} \right\} - [F_{k,l}] \right) \cdot \{ j_k \} = \{ \varepsilon_k \sigma T_k^4 / \rho_k \}$$

$$\left\{ \frac{1}{\rho_k} \right\} = \begin{bmatrix} 1/\rho_1 \\ \dots \\ 1/\rho_N \end{bmatrix}, [I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \{ \varepsilon_k \sigma T_k^4 / \rho_k \} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \sigma T_1^4 / \rho_1 \\ \varepsilon_2 \sigma T_2^4 / \rho_2 \\ \varepsilon_N \sigma T_N^4 / \rho_N \end{bmatrix}$$

$$\left([F_{k,l}] - [I] \cdot \left\{ \frac{1}{\rho_k} \right\} \right) \cdot \{ j_k \} + \{ \varepsilon_k \sigma T_k^4 / \rho_k \} = \{ 0 \}$$

donde,

$$[a_{k,l}] = [F_{k,l}] - [I] \cdot \left\{ \frac{1}{\rho_k} \right\}$$

Expresión que se usará posteriormente. O bien directamente:

$$\begin{matrix} T_1 & \text{conocida} \\ T_2 & \text{conocida} \\ \dots & \end{matrix} \quad \begin{bmatrix} 1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot F_{1,1} / \varepsilon_1 & (1 - \varepsilon_1) \cdot F_{1,2} / \varepsilon_1 & (1 - \varepsilon_1) \cdot F_{1,N} / \varepsilon_1 \\ 1 - (1 - \varepsilon_2) \cdot F_{2,1} / \varepsilon_2 & 1 - (1 - \varepsilon_2) \cdot F_{2,2} / \varepsilon_2 & (1 - \varepsilon_2) \cdot F_{2,N} / \varepsilon_2 \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ j_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma T_1^4 \\ \sigma T_2^4 \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$[C] \cdot \{ j_k \} = \{ \sigma T_k^4 \}$$

Si se invierte la matriz [C] de forma que $[C]^{-1} = [D]$, la suma de los elementos de una fila de [D] tiene la propiedad de siempre dar 1. Las radiosidades despejadas se substituyen en (1.bis) para obtener la expresión:

$$\begin{aligned} j_k &= \sum_{l=1}^N D_{kl} \cdot \sigma T_l^4 \\ 1 &= \sum_{l=1}^N D_{kl} \\ Q_{\text{rad},k} &= \frac{(e_{n,k} - j_k)}{\rho_k / \varepsilon_k \cdot A_k} \quad [\text{W}] \end{aligned} \quad \left| \quad \Rightarrow Q_{\text{rad},k} = \frac{\left(\sigma T_k^4 \cdot 1 - \sum_{l=1}^N D_{kl} \cdot \sigma T_l^4 \right)}{\rho_k / \varepsilon_k \cdot A_k} = \frac{\left(\sum_{l=1}^N D_{kl} \cdot (\sigma T_k^4) - (\sigma T_l^4) \right)}{\rho_k / \varepsilon_k \cdot A_k}$$

En definitiva:

$$Q_{\text{rad},k} = \left(\sum_{l=1}^N \frac{D_{kl} \cdot (\sigma T_k^4 - \sigma T_l^4)}{\rho_k / \varepsilon_k \cdot A_k} \right) = \sum_{l=1}^N \frac{D_{kl} \cdot \varepsilon_k \cdot A_k}{\rho_k} (\sigma T_k^4 - \sigma T_l^4) = \sum_{l=1}^N G_{kl} \cdot \sigma (T_k^4 - T_l^4) = \sum_{l=1}^N \frac{\sigma (T_k^4 - T_l^4)}{R_{kl}}$$

$$Q_{\text{rad},k} = \sum_{l=1}^N \frac{\sigma (T_k^4 - T_l^4)}{r_{kl}} \cdot A_k$$

La conductancia $G_{k,l}$ o su inversa $R_{k,l}$ nos indica facilidad o dificultad para el intercambio de energía entre las superficies k y l .

El problema es no-lineal como se puede apreciar, pero en la simulación de edificios se linealiza la expresión anterior de la siguiente forma:

$$Q_{\text{rad},k} = \sum_{l=1}^N \frac{\sigma (T_k^4 - T_l^4)}{r_{kl}} \cdot A_k =$$

$$\sum_{l=1}^N \frac{(T_k^2 + T_l^2) \cdot (T_k + T_l)}{R_{kl}} \sigma \cdot (T_k - T_l) \cdot A_k = A_k \cdot \sum_{l=1}^N h_{\text{rad},k,l} \cdot (T_k - T_l)$$

$$h_{\text{rad},k,l} = \frac{(T_k^2 + T_l^2) \cdot (T_k + T_l)}{R_{kl}} \sigma \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

Los $h_{\text{rad},k,l}$ son conocidos como coeficientes equivalentes de radiación, de la superficie k con la superficie l . En principio son función de las temperaturas T_k y T_l , pero en la simulación de edificios suele tomarse la temperatura interna de consigna del aire para el cálculo de la $h_{\text{rad},k,l}$.

Método de Gebhart

Gebhart define un factor de absorción $B_{k,l}$ como la fracción de energía radiante emitida por A_k , que es absorbida por A_l considerando todas las trayectorias (reflexiones) posibles de la misma entre A_k y A_l . En ecuación:

$$(8) \quad B_{k,l} = \frac{\text{Energía absorbida por } A_l \text{ con origen en la emisión de } A_k}{\varepsilon_k A_k \sigma T_k^4} = \frac{Q_{\text{abs},l(k)}}{\varepsilon_k A_k \sigma T_k^4}$$

Nota: El lector debe apreciar que la emisión es, según la fórmula anterior, la debida a aspectos termofísicos –agitación térmica– del material de la superficie A_k .

Nota: Factores de absorción habrán $N \times N = N^2$.

¿Qué tiene de interesante este método? Fundamentalmente que relaciona la emisión de energía de una superficie A_k con su absorción por otra A_l después de todas las reflexiones y suponiendo que, salvo la A_k , las demás no emiten nada. Es por lo tanto muy útil para estudiar qué sucede con –cómo se distribuyen– los fotones de onda corta (luz visible del Sol y/o luminarias), ya que la superficie que los emite es aquella sobre la que inciden los rayos solares tras atravesar un acristalamiento o el propio acristalamiento. Siendo su reflexión sobre esta superficie, el origen de radiación en el primer caso. Se volverá sobre esto más adelante.

Como se vio, la irradiancia g_l sobre A_l se puede calcular con la ecuación (3). Así la cantidad absorbida por A_l de la energía radiante que le llega es:

$$Q_{\text{abs},l} = \alpha_l \cdot A_l \cdot g_l = \alpha_l \cdot A_l \cdot \sum_{i=1}^N j_i \cdot F_{l \rightarrow i} \quad [\text{W}]$$

¿Cómo podemos relacionar esta energía absorbida con el factor $B_{k,l}$? La cuestión está en que la expresión anterior tiene en cuenta la emisión y la energía reflejada simultáneamente en la N superficies y $B_{k,l}$ exige sólo la emisión de A_k . El truco está en poner –de forma ficticia o matemáticamente– la temperatura absoluta de todas las superficies a $0[K]$, con lo cual el único origen de radiación está en la emisión de A_k . Las demás superficies pueden absorber y reflejar energía, pero en ninguna de ellas existe un origen de radiación (en este caso un origen termofísico, debido a temperatura). Así, los valores de las radiosidades $j_{i,(k)}$, usadas para calcular un valor de g_k en estas condiciones con la ecuación (3), serviría para calcular $Q_{abs,l,(k)}$. La ecuación anterior se reescribe como:

$$(9) \quad Q_{abs,l,(k)} = \alpha_l \cdot A_l \cdot g_{l,(k)} = \alpha_l \cdot A_l \cdot \sum_{i=1}^N j_{i,(k)} \cdot F_{l \rightarrow i} \quad [W]$$

Los valores $j_{i,(k)}$ se pueden considerar como valores parciales de radiosidad. Utilizando la expresión matricial desarrollada más arriba:

$$\left\{ \begin{aligned} [F_{k,l}] - [I] \cdot \left\{ \frac{1}{\rho_k} \right\} \cdot \{j_k\} + \left\{ \varepsilon_k \sigma T_k^4 / \rho_k \right\} &= \{0\} \\ [a_{k,l}] &= [F_{k,l}] - [I] \cdot \left\{ \frac{1}{\rho_k} \right\} \end{aligned} \right.$$

Cuya solución es:

$$\{j_k\} = -[a_{k,l}]^{-1} \cdot \left\{ \varepsilon_k \sigma T_k^4 / \rho_k \right\}$$

Si el término independiente de temperaturas $\{\varepsilon_k \sigma T_k^4 / \rho_k\}$ se hacen todas las entradas nulas salvo la temperatura de T_k y se resuelve, los valores de radiosidad obtenidos son los valores parciales $j_{l,(k)}$ buscados.

Veamos formalmente el resultado. La inversa de una matriz $[a_{k,l}]$ se puede calcular como la matriz transpuesta de la matriz cofactor (la matriz original con sus elementos substituidos por sus adjuntos), esto es $[A_{k,l}]^T$, y dividida por el determinante $D = \det[a_{k,l}]$.

$$[a_{k,l}]^{-1} = \frac{1}{D} [A_{k,l}]^T = [\gamma_{k,l}]$$

Así, si suponemos que estamos calculando el factor de absorción de la superficie A_k de Gebhart, haríamos:

$$\begin{bmatrix} j_{1,(k)} \\ j_{2,(k)} \\ j_{k,(k)} \\ \dots \\ j_{N,(k)} \end{bmatrix} = -\frac{1}{D} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{1k} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & \dots & \dots \\ A_{k1} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{N,1} & \dots & \dots & \dots & A_{N,N} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\rho_k} (\varepsilon_k \sigma T_k^4) \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

Luego:

$$\begin{bmatrix} j_{1,(k)} \\ j_{2,(k)} \\ j_{k,(k)} \\ \dots \\ j_{N,(k)} \end{bmatrix} = -\frac{1}{D} \begin{bmatrix} A_{k,1} \\ A_{k,2} \\ A_{k,k} \\ \dots \\ A_{k,N} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\rho_k} (\varepsilon_k \sigma T_k^4)$$

Así, a partir de la definición del factor de absorción (8) y de la ecuación (9), tenemos:

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{abs,l,(k)} &= \alpha_l \cdot A_l \cdot g_{l,(k)} = \alpha_l \cdot A_l \cdot \sum_{i=1}^N j_{i,(k)} \cdot F_{l \rightarrow i} \quad [W] \\ B_{k,l} &= \frac{Q_{abs,l,(k)}}{\varepsilon_k A_k \sigma T_k^4} \end{aligned} \right.$$

$$B_{k,l} = -\frac{\alpha_l \cdot A_l}{(\varepsilon_k \sigma T_k^4) \cdot A_k} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{\rho_k} \cdot (\varepsilon_k \sigma T_k^4) \cdot \left(\sum_{i=1}^N F_{l \rightarrow i} \cdot A_{k,i} \right)$$

Finalmente:

$$B_{k,l} = -\frac{\varepsilon_l \cdot A_l}{A_k} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{\rho_k} \cdot \left(\sum_{i=1}^N F_{l \rightarrow i} \cdot A_{k,i} \right)$$

Ahora se define un coeficiente beta:

$$\beta_{k,l} = -\left(\frac{A_k}{A_l} \right) \cdot \left(\frac{\rho_k}{\varepsilon_l} \right) B_{k,l} = -\frac{1}{D} \cdot \left(\sum_{i=1}^N F_{l \rightarrow i} \cdot A_{k,i} \right)$$

Luego todos los N^2 betas se pueden expresar como:

$$[\beta_{k,l}] = -\frac{1}{D} \cdot ([F_{l,i}]) \cdot ([A_{i,k}])^T = -\frac{1}{D} \cdot [A_{k,i}] \cdot [F_{l,i}]^T = -\frac{1}{D} \cdot [A_{k,i}] \cdot [F_{i,l}]$$

La primera es la matriz cofactor de $[a_{k,i}]$ y la segunda es la matriz transpuesta de los factores de forma. Luego todos los factores de absorción de Gebhart se escriben como:

$$(10) [\beta_{k,l}] = \left(\frac{A_k}{A_l} \right) \cdot \left(\frac{\rho_k}{\varepsilon_l} \right) [B_{k,l}] = -\frac{1}{D} \cdot [A_{k,i}] \cdot [F_{i,l}]$$

Por ejemplo, la absorbida por 4 de la emitida por 3:

$$\beta_{3,4} = \left(\frac{A_3}{A_4} \right) \cdot \left(\frac{\rho_3}{\varepsilon_4} \right) \cdot B_{3,4} = -\frac{1}{D} (A_{3,1} F_{4,1} + A_{3,2} F_{4,2} + A_{3,3} F_{4,3} + A_{3,4} F_{4,4} + \dots + A_{3,N} F_{4,N})$$

¿Y si se trata de la misma superficie? La absorbida por 3 de la emitida por 3.

$$\beta_{3,3} = \left(\frac{\rho_3}{\varepsilon_3} \right) \cdot B_{3,3} = -\frac{1}{D} (A_{3,1} F_{3,1} + A_{3,2} F_{3,2} + A_{3,3} F_{3,3} + A_{3,4} F_{3,4} + \dots + A_{3,N} F_{3,N})$$

Este resultado es ilustrativo. Incluso si la superficie A_3 es plana o convexa, de manera que $F_{3,3}=0$, su ifactor de absorción no es 0!, porque indirectamente a través de las reflexiones la energía que emitió vuelve a ella y es absorbida. Este hecho es el que se refleja en la ecuación anterior.

La ecuación (10) indica de qué dependen los factores de absorción:

- Los factores de geometría $F_{k,i}$
- Reflectancia de cada superficie $\{\rho_i\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, N$
- Emisividad de cada superficie $\{\varepsilon_i\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, N$
- Áreas de cada superficie $\{A_i\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, N$

Luego con la información geométrica y las propiedades radiantes de cada superficie los coeficientes $B_{k,l}$ están fijados y son independientes de las temperaturas.

La energía que fue emitida por k y se absorbió en l se calcula directamente con (8). Por lo tanto, TODOS los $B_{k,l}$ tienen un valor incluso si la temperatura T_k fuera cero y, en consecuencia, TODOS los $B_{k,l}$ están definidos.

Otra forma de estimar estos coeficientes se basa en utilizar la expresión del método abreviado que repetimos a continuación:

$$\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} \rho_1 & F_{1,2} \rho_2 & \dots & F_{1,N} \rho_N \\ F_{2,1} \rho_1 & F_{2,2} \rho_2 & \dots & F_{2,N} \rho_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} \rho_1 & F_{N,2} \rho_2 & \dots & F_{N,N} \rho_N \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} Q_{rad,1} / \varepsilon_1 A_1 \\ Q_{rad,2} / \varepsilon_2 A_2 \\ \dots \\ Q_{rad,N} / \varepsilon_N A_N \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & \dots & F_{1,N} \\ F_{2,1} & F_{2,2} & \dots & F_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} & F_{N,2} & \dots & F_{N,N} \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \sigma T_1^4 \\ \sigma T_2^4 \\ \dots \\ \sigma T_N^4 \end{bmatrix}$$

$$([I] - [F_{l,k} \rho_k]) \cdot \left[\frac{Q_{rad,k}}{\varepsilon_k A_k} \right] = ([I] - [F_{l,k}]) \cdot [\sigma T_k^4]$$

El coeficiente de absorción se obtendría ahora haciendo $T_l=0$, salvo una cierta superficie k que se convierte en emisora. Eso haría que, puesto que no existe emisión propia de la superficie l debida a causas termo-físicas, la $Q_{rad,l}$ tenga ahora la expresión:

$$Q_{rad,l} = A_l \cdot (j_l - g_l) = A_l \cdot (\rho_l g_l - g_l) = A_l \cdot g_l \cdot (\rho_l - 1)$$

En caso de las superficies opacas quedaría:

$$Q_{rad,l} = A_l \cdot (j_l - g_l) = A_l \cdot (\rho_l g_l - g_l) = -A_l \varepsilon_l g_l$$

Mientras que para la superficie que hemos dejado emitiendo resulta:

$$Q_{rad,k} = A_k \cdot (j_k - g_k) = A_k \cdot (\varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k g_k - g_k) = A_k (\varepsilon_k \sigma T_k^4 - (1 - \rho_k) g_k)$$

Por lo tanto el sistema anterior queda:

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} \rho_1 & F_{1,2} \rho_2 & \dots & F_{1,N} \rho_N \\ F_{k,1} \rho_1 & F_{k,2} \rho_2 & \dots & F_{k,N} \rho_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} \rho_1 & F_{N,2} \rho_2 & \dots & F_{N,N} \rho_N \end{bmatrix} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -A_1 g_{1,(k)} (1 - \rho_1) / \varepsilon_1 \cdot A_1 \\ A_k (\varepsilon_k \sigma T_k^4 - (1 - \rho_k) g_{k,(k)}) / \varepsilon_k \cdot A_k \\ \dots \\ -A_N g_{N,(k)} (1 - \rho_N) / \varepsilon_N \cdot A_N \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & \dots & F_{1,N} \\ F_{k,1} & F_{k,2} & \dots & F_{k,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} & F_{N,2} & \dots & F_{N,N} \end{bmatrix} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma T_k^4 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} \rho_1 & F_{1,2} \rho_2 & \dots & F_{1,N} \rho_N \\ F_{k,1} \rho_1 & F_{k,2} \rho_2 & \dots & F_{k,N} \rho_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} \rho_1 & F_{N,2} \rho_2 & \dots & F_{N,N} \rho_N \end{bmatrix} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma T_k^4 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -A_1 g_{1,(k)} (1 - \rho_1) / \varepsilon_1 \cdot A_1 \\ -A_k g_{k,(k)} (1 - \rho_k) / \varepsilon_k \cdot A_k \\ \dots \\ -A_N g_{N,(k)} (1 - \rho_N) / \varepsilon_N \cdot A_N \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & \dots & F_{1,N} \\ F_{k,1} & F_{k,2} & \dots & F_{k,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} & F_{N,2} & \dots & F_{N,N} \end{bmatrix} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma T_k^4 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} \rho_1 & F_{1,2} \rho_2 & \dots & F_{1,N} \rho_N \\ F_{k,1} \rho_1 & F_{k,2} \rho_2 & \dots & F_{k,N} \rho_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} \rho_1 & F_{N,2} \rho_2 & \dots & F_{N,N} \rho_N \end{bmatrix} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -A_1 g_{1,(k)} (1 - \rho_1) / \varepsilon_1 \cdot A_1 \\ -A_k g_{k,(k)} (1 - \rho_k) / \varepsilon_k \cdot A_k \\ \dots \\ -A_N g_{N,(k)} (1 - \rho_N) / \varepsilon_N \cdot A_N \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} F_{1,1} \rho_1 & F_{1,2} \rho_2 & \dots & F_{1,N} \rho_N \\ F_{k,1} \rho_1 & F_{k,2} \rho_2 & \dots & F_{k,N} \rho_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} \rho_1 & F_{N,2} \rho_2 & \dots & F_{N,N} \rho_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & \dots & F_{1,N} \\ F_{k,1} & F_{k,2} & \dots & F_{k,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} & F_{N,2} & \dots & F_{N,N} \end{bmatrix} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma T_k^4 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} \rho_1 & F_{1,2} \rho_2 & \dots & F_{1,N} \rho_N \\ F_{k,1} \rho_1 & F_{k,2} \rho_2 & \dots & F_{k,N} \rho_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} \rho_1 & F_{N,2} \rho_2 & \dots & F_{N,N} \rho_N \end{bmatrix} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -A_1 g_{1,(k)} (1 - \rho_1) / \varepsilon_1 \cdot A_1 \\ -A_k g_{k,(k)} (1 - \rho_k) / \varepsilon_k \cdot A_k \\ \dots \\ -A_N g_{N,(k)} (1 - \rho_N) / \varepsilon_N \cdot A_N \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} F_{1,k} \rho_k \\ F_{k,k} \rho_k \\ \dots \\ F_{N,k} \rho_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,k} \\ F_{k,k} \\ \dots \\ F_{N,k} \end{bmatrix} \end{pmatrix} \cdot \sigma T_k^4$$

Finalmente,

$$\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} \rho_1 & F_{1,2} \rho_2 & \dots & F_{1,N} \rho_N \\ F_{k,1} \rho_1 & F_{k,2} \rho_2 & \dots & F_{k,N} \rho_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} \rho_1 & F_{N,2} \rho_2 & \dots & F_{N,N} \rho_N \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} -A_1 g_{1,(k)} / A_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_1)}{A_1 \varepsilon_1} \\ -A_k g_{k,(k)} / A_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_k)}{A_k \varepsilon_k} \\ \dots \\ -A_N g_{N,(k)} / A_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_N)}{A_N \varepsilon_N} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} F_{1,k} \rho_k \\ F_{k,k} \rho_k \\ \dots \\ F_{N,k} \rho_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,k} \\ F_{k,k} \\ \dots \\ F_{N,k} \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} F_{1,k}(\rho_k - 1) \\ F_{k,k}(\rho_k - 1) \\ \dots \\ F_{N,k}(\rho_k - 1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_1 g_{1,(k)} / A_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_1)}{A_1 \varepsilon_1} \\ A_k g_{k,(k)} / A_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_k)}{A_k \varepsilon_k} \\ \dots \\ A_N g_{N,(k)} / A_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_N)}{A_N \varepsilon_N} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{1,1} \rho_1 & F_{1,2} \rho_2 & \dots & F_{1,N} \rho_N \\ F_{k,1} \rho_1 & F_{k,2} \rho_2 & \dots & F_{k,N} \rho_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1} \rho_1 & F_{N,2} \rho_2 & \dots & F_{N,N} \rho_N \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} F_{1,k}(1-\rho_k) \\ F_{k,k}(1-\rho_k) \\ \dots \\ F_{N,k}(1-\rho_k) \end{bmatrix}$$

Donde,

$$\begin{bmatrix} A_1 g_{1,(k)} \varepsilon_1 / A_k \varepsilon_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_1) \varepsilon_k}{A_1 \varepsilon_1^2} \\ A_k g_{k,(k)} \varepsilon_k / A_k \varepsilon_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_k) \varepsilon_k}{A_k \varepsilon_k^2} \\ \dots \\ A_N g_{N,(k)} \varepsilon_N / A_k \varepsilon_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_N) \varepsilon_k}{A_N \varepsilon_N^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{k,1} \cdot \frac{A_k(1-\rho_1) \varepsilon_k}{A_1 \varepsilon_1^2} \\ B_{k,k} \cdot \frac{A_k(1-\rho_k) \varepsilon_k}{A_k \varepsilon_k^2} \\ \dots \\ B_{k,N} \cdot \frac{A_k(1-\rho_N) \varepsilon_k}{A_N \varepsilon_N^2} \end{bmatrix} = \left\langle \begin{matrix} \text{Si} \\ \text{opacos} \end{matrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} B_{k,1} \cdot \frac{A_k \varepsilon_k}{A_1 \varepsilon_1} \\ B_{k,k} \cdot \frac{A_k}{A_k} \\ \dots \\ B_{k,N} \cdot \frac{A_k \varepsilon_k}{A_N \varepsilon_N} \end{bmatrix} =$$

Gebhart mostró la relación de reciprocidad:

$$A_k \varepsilon_k B_{k,l} = A_l \varepsilon_l B_{l,k}$$

De modo que:

$$\begin{bmatrix} A_1 g_{1,(k)} \varepsilon_1 / A_k \varepsilon_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_1) \varepsilon_k}{A_1 \varepsilon_1^2} \\ A_k g_{k,(k)} \varepsilon_k / A_k \varepsilon_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_k) \varepsilon_k}{A_k \varepsilon_k^2} \\ \dots \\ A_N g_{N,(k)} \varepsilon_N / A_k \varepsilon_k \sigma T_k^4 \cdot \frac{A_k(1-\rho_N) \varepsilon_k}{A_N \varepsilon_N^2} \end{bmatrix} = \left\langle \begin{matrix} \text{Si} \\ \text{opacos} \end{matrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} B_{l,k} \\ B_{k,k} \\ \dots \\ B_{N,k} \end{bmatrix}$$

Si la relación entre los coeficientes de absorción de la superficie A_k a todas las demás, incluida ella misma, se obtiene por:

$$\begin{bmatrix} B_{1,k} \\ B_{k,k} \\ \dots \\ B_{N,k} \end{bmatrix} = ([I] - [F_{k,l} \rho_l])^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{1,k}(1-\rho_k) \\ F_{k,k}(1-\rho_k) \\ \dots \\ F_{N,k}(1-\rho_k) \end{bmatrix}$$

los N^2 coeficientes se pueden obtener componiendo una matriz con el resultado anterior:

$$\begin{bmatrix} B_{1,1} & \dots & B_{1,k} & \dots & B_{1,N} \\ B_{2,1} & \dots & B_{k,k} & \dots & B_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{N,1} & \dots & B_{N,k} & \dots & B_{N,N} \end{bmatrix} = ([I] - [F_{k,l} \rho_l])^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{1,1}(1-\rho_1) & \dots & F_{1,k}(1-\rho_k) & \dots & F_{1,N}(1-\rho_N) \\ F_{2,1}(1-\rho_1) & \dots & F_{k,k}(1-\rho_k) & \dots & F_{N,k}(1-\rho_N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{N,1}(1-\rho_1) & \dots & F_{N,k}(1-\rho_k) & \dots & F_{N,N}(1-\rho_N) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} B_{1,1} & \dots & B_{1,k} & \dots & B_{1,N} \\ B_{2,1} & \dots & B_{k,k} & \dots & B_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{N,1} & \dots & B_{N,k} & \dots & B_{N,N} \end{bmatrix} = ([I] - [F_{k,l} \rho_l])^{-1} \cdot [(1-\rho_l) F_{k,l}]$$

Fácilmente se puede ver el sentido físico. Suponiendo que todas las superficies son opacas:

$$B_{k,l} = \alpha_k F_{k \rightarrow l} + F_{k \rightarrow 1} \rho_1 B_{1,l} + F_{k \rightarrow 2} \rho_2 B_{2,l} + \dots + F_{k \rightarrow N} \rho_N B_{N,l}$$

La expresión indica que la energía que sale de A_k y es absorbida en A_l es debida a la que directamente va de k a l (primer término), más aquella que va de k a A_1 , allí es reflejada y por lo tanto se convierte en la única emisión de A_1 –ya que suponemos que su $T_1 = 0$ [K]– y multiplicamos por $B_{1,l}$ para saber de esa reflejada en 1 cuánta absorbe l y así con la 2 y con la 3 , etcétera salvo la propia k que fue evaluada la primera en el sumatorio.

Esta ecuación, escrita para todas las parejas k y l y despejando los coeficientes, da finalmente n sistemas de n ecuaciones para resolver N^2 coeficientes B :

$$[B_{k,l}] = ([I] - [F_{k,l} \rho_k])^{-1} \cdot ([\alpha_l F_{k,l}])$$

que es justo el que habíamos obtenido antes.

Todo esto es interesante para el caso de la radiación de onda corta. En este caso el término de emisión $\epsilon_k \sigma T_k^4$ ya no es debido a un origen térmico de la superficie, sino que viene de fuera, del sol. No todas las superficies de un local, o espacio son irradiadas por el Sol y,

por lo tanto, no todas actúan como fuentes de radiación de onda corta.

¿Cómo podemos saber la cantidad neta de radiación que sale de una cierta superficie? Sencillo: a la energía que emite se le debe restar la cantidad que absorbe. Por lo tanto la expresión es:

$$Q_{rad,k} = Q_{emitido,k} - Q_{abs,k} = A_k q_{emitido,k} - \sum_{i=1}^N Q_{abs,k,(i)}$$

El término del sumatorio contiene sólo aquellas superficies A_i que actúan como fuentes de radiación. En caso de radiación infrarroja son todas. En caso de la luz visible sólo aquellas que contienen un acristalamiento o que reciben luz solar. Así, para el intercambio en el infrarojo, la expresión queda:

$$Q_{rad,k} = Q_{emitido,k} - Q_{abs,k} = A_k (\epsilon_k \sigma T_k^4) - \sum_{i=1}^N B_{i,k} \cdot A_i (\epsilon_i \sigma T_i^4)$$

Para completar la discusión anterior se comentan dos coeficientes más y su relación con el coeficiente de absorción de Gebhart.

Hottel y Sarofim definieron otros coeficientes $S_k S_l$ y $f_{k,l}$, que llamaron área total de intercambio y factor de visión o geométrico total. Se utilizan para calcular el intercambio neto de energía radiante $Q_{rad,k,l}$ cuando todas las superficies tienen temperatura nula salvo A_k y A_l .

$$Q_{rad,k,l} = S_k S_l \sigma (T_k^4 - T_l^4) = A_k f_{k,l} \sigma (T_k^4 - T_l^4)$$

Nota: el lector puede observar el parecido de esta expresión con un término de la conductancia $G_{k,l}$.

Si lo anterior se expresa haciendo uso de los coeficientes de absorción de Gebhart tenemos:

$$Q_{rad,k,l} = A_k (\epsilon_k \sigma T_k^4) B_{k,l} - A_l (\epsilon_l \sigma T_l^4) B_{l,k}$$

Esto es, la energía que sale de k y absorbe l, menos la que sale de l y absorbe k. Por lo tanto positivo, si de la que sale de k, l absorbe más que ésta transfiere de vuelta a k. Así k, de forma neta, envía energía radiante a l. Usando la relación de reciprocidad de los coeficientes de Gebhart:

$$Q_{rad,k,l} = A_k \epsilon_k B_{k,l} \sigma (T_k^4 - T_l^4)$$

Comparando con los coeficientes de Hottel y Sarofim:

$$A_k \epsilon_k B_{k,l} = S_k S_l = A_k f_{k,l}$$

Si lo relacionamos con los beta:

$$S_k S_l = A_l \frac{\epsilon_k \epsilon_l}{1 - \epsilon_k} \beta_{k,l}$$

$$f_{k,l} = \frac{A_l}{A_k} \frac{\epsilon_k \epsilon_l}{1 - \epsilon_k} \beta_{k,l}$$

De forma que $S_k S_l$ y $f_{k,l}$ están formados a partir de la geometría y propiedades como los coeficientes $B_{k,l}$ y se pueden obtener a partir de ellos.

Así la expresión, usando estos coeficientes, de la cantidad de energía radiante neta que sale de una superficie A_k dada es:

$$Q_{rad,k} = A_k (\epsilon_k \sigma T_k^4) - \sum_{l=1}^N S_l S_k (\sigma T_l^4)$$

$$Q_{rad,k} = A_k (\epsilon_k \sigma T_k^4) - \sum_{l=1}^N A_l f_{l,k} (\sigma T_l^4)$$

De donde:

$$f_{k,l} = \epsilon_k \frac{Q_{rad,k,l}}{\epsilon_k A_k \sigma T_k^4} = \frac{Q_{rad,k,l}}{A_k \sigma T_k^4} =$$

$$= \frac{\text{Energía absorbida en } A_l \text{ de la emitida por } A_k}{\text{Energía emitida por } A_k \text{ supuesta negra}}$$

Luego $f_{k,l}$ es otra factor de absorción. Lo mismo ocurre con $S_k S_l$.

$$S_k S_l = A_k \frac{Q_{rad,k,l}}{A_k \sigma T_k^4} = \frac{Q_{rad,k,l}}{\sigma T_k^4}$$

$$\frac{\text{Energía absorbida en } A_l \text{ de la emitida por } A_k}{\text{Densidad de flujo de energía emitida por } A_k \text{ supuesta negra}}$$

Por otro lado tenemos:

$$A_k \epsilon_k B_{k,l} = A_k f_{k,l}$$

$$\epsilon_k B_{k,l} = f_{k,l}$$

$$\epsilon_k \sum_{l=1}^N B_{k,l} = \sum_{l=1}^N f_{k,l}$$

Como toda la energía radiante emitida debe ser absorbida finalmente, tenemos:

$$\sum_{l=1}^N B_{k,l} = 1$$

$$\sum_{l=1}^N f_{k,l} = \epsilon_k$$

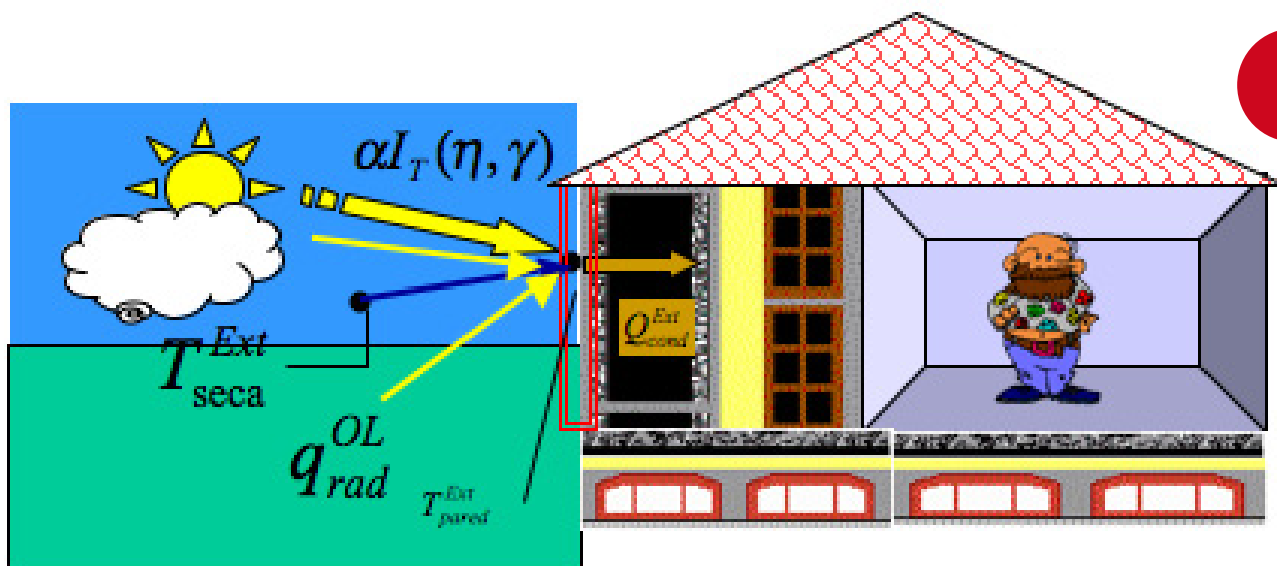
Luego la suma de cada k-ésima fila de la matriz de factores de forma totales $[f_{k,l}]$ debe sumar ϵ_k . Esto es análogo al factor de forma $[F_{k,l}]$. De hecho coincide en el caso de que las superficies sean negras $\epsilon_k=1$. Es más, si todas son superficies negras se cumple:

$$f_{k,l} = B_{k,l} = F_{k,l}$$

$$S_k S_l = A_k F_{k,l}$$

Anexo 2: Temperatura sol-aire

Para simplificar los fenómenos exteriores de intercambio de energía los programas, a menudo, usan el concepto de temperatura sol-aire.

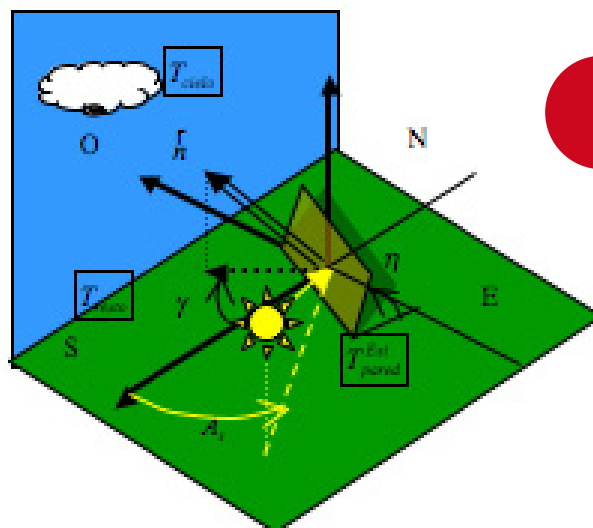


Como se aprecia en el dibujo, en la superficie exterior del edificio se puede realizar el siguiente balance de energía:

$$q_{\text{cond}}^{\text{Ext}} = q_{\text{conv}}^{\text{Ext}} + q_{\text{rad}}^{\text{Oc}} + q_{\text{rad}}^{\text{OL}}$$

$$q_{\text{cond}}^{\text{Ext}} = h_{\text{conv}}^{\text{Ext}} (T_{\text{seca}}^{\text{Ext}} - T_{\text{pared}}^{\text{Ext}}) + \alpha I_T(\eta, \gamma) + q_{\text{rad}}^{\text{OL}}$$

I_T es la radiación total (W/m^2) que inciden sobre la superficie que posee cierta orientación (compuesta de su parte directa y su parte difusa –a su vez, esta proviene del cielo y de la parte reflejada por el entorno).



La parte del intercambio correspondiente a la onda larga OL, en principio se debería analizar como un recinto en el que hay tres superficies a tres temperaturas diferentes: Tcielo, Tresto, Tpared. Una vez hecho el análisis se puede linealizar la solución como se muestra:

$$q_{rad}^{OL} = \alpha_{OL} \sigma F_{pared,cielo} [T_{cielo}^4 - T_{pared}^{Ext,4}] + \alpha_{OL} \sigma F_{pared,resto} [T_{resto}^4 - T_{pared}^{Ext,4}]$$

$$q_{rad}^{OL} = h_{rad}^{pared-cielo} (T_{cielo} - T_{pared}^{Ext}) - h_{rad}^{pared-resto} (T_{resto} - T_{pared}^{Ext}) =$$

$$(h_{rad}^{pared-cielo} T_{cielo} - h_{rad}^{pared-resto} T_{resto}) - (h_{rad}^{pared-cielo} - h_{rad}^{pared-resto}) T_{pared}^{Ext}$$

$$h_{rad}^{pared-cielo} \approx h_{rad}^{pared-resto} = h_{rad}$$

$$q_{rad}^{OL} = h_{rad} (T_{cielo} - T_{resto}) = h_{rad} \Delta T_{cielo-resto}$$

Donde,

α_{OL} es la absorptividad en el rango de onda larga.

$F_{pared,cielo}$ es el factor de visión del cielo desde la pared o superficie.

$F_{pared,resto}$ es el factor de visión de lo que no es cielo, desde la pared o superficie.

Finalmente si se reorganiza la ecuación original del balance teniendo en cuenta esta linealización se tiene:

$$q_{cond}^{Ext} = (h_{conv}^{Ext} + h_{rad}) (T_{sol-aire,n} - T_{pared,n}^{Ext}) \quad [Wm^{-2}]$$

Donde la Tsol-aire se define por:

$$T_{sol-aire} = T_{seca}^{Ext} + \frac{\alpha_{OC} I_T(\eta, \gamma)}{h_{conv}^{Ext} + h_{rad}} - \frac{h_{rad} \Delta T_{cielo-resto}}{h_{conv}^{Ext} + h_{rad}}$$

Por lo tanto la temperatura sol-aire nos permite conocer (usando un coeficiente equivalente de convección) la cantidad de calor que entra por conducción desde el exterior, en un instante dado.

Atención: Esta excitación exterior del edificio depende de la orientación de la superficie, por lo tanto en un mismo instante, la excitación de cada muro puede ser diferente (diferente incidencia de la radiación solar y/o visión del cielo y los alrededores).

Anexo 3: Transferencia de calor unidimensional multicapa

Este apéndice contiene las bases matemáticas que usan la mayor parte de los programas informáticos para el cálculo de calor a través de cerramientos opacos (sin cámaras ventiladas). Su contenido, al ser matemático, es algo arduo de leer; se ha intentado, sin embargo, dar un enfoque aplicado enfatizando aquellas expresiones fundamentales que aparecen en muchos manuales de programas de simulación, entre ellos LIDER y CALENERVyP y GT (programas de certificación energética en España). La información contenida en este capítulo debería capacitar al lector para su programación informática.

La resolución de la transmisión de calor multicapa unidimensional pasa por la resolución de la ecuación de conducción de calor unidimensional siguiente:

$$\frac{\partial T^2}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

α f: difusividad térmica (m^2/s).

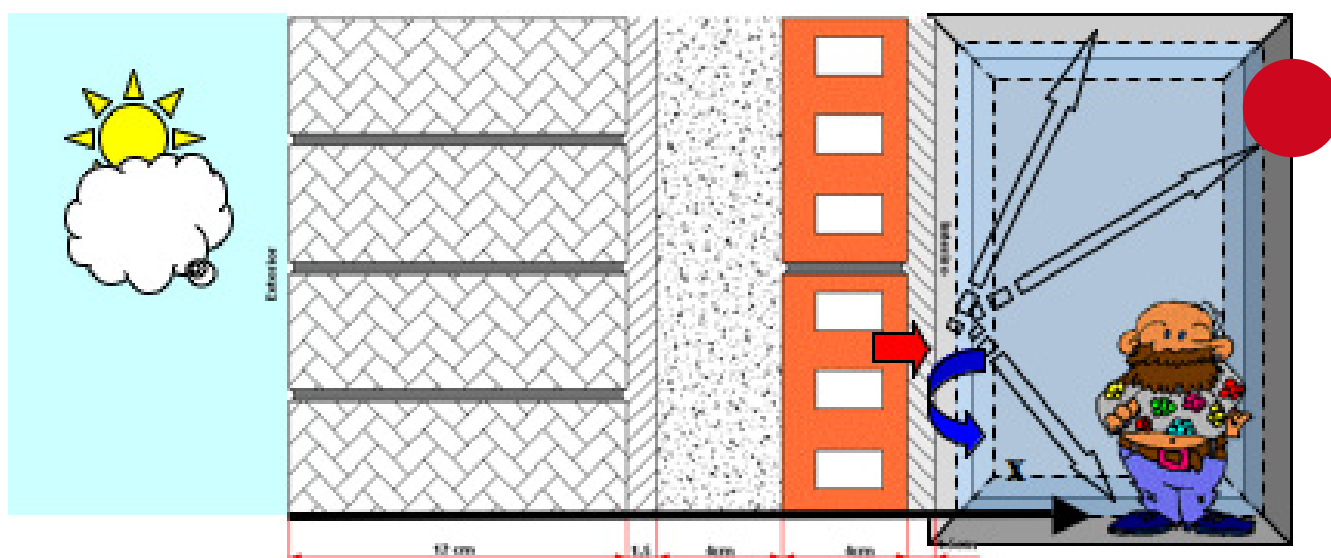
$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$$

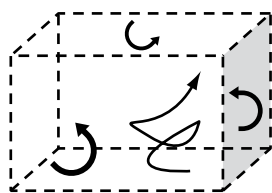
kf: conductividad térmica del material (W/mK).

ρ f: densidad (kg/m^3).

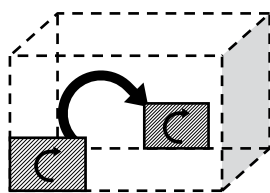
c_p f: capacidad calorífica (J/kgK).

que debe ser aplicada sobre cada capa de material con ciertas condiciones de contorno. Llamo la atención del lector que de acuerdo al eje de x tomado, un valor positivo indica que el calor se dirige hacia el interior, mientras que un valor negativo indica que sale o lo pierde el recinto.





Orientación geométrica habitual de las superficies que forman la frontera de un volumen en coherencia con la orientación del volumen.



Orientación tomada para la superficies para que un elemento físico (el flujo de calor -parte rallada-) sea positivo al entrar al volumen. Toma sentido contrario al caso anterior

Al hacerlo se hacen las siguientes hipótesis:

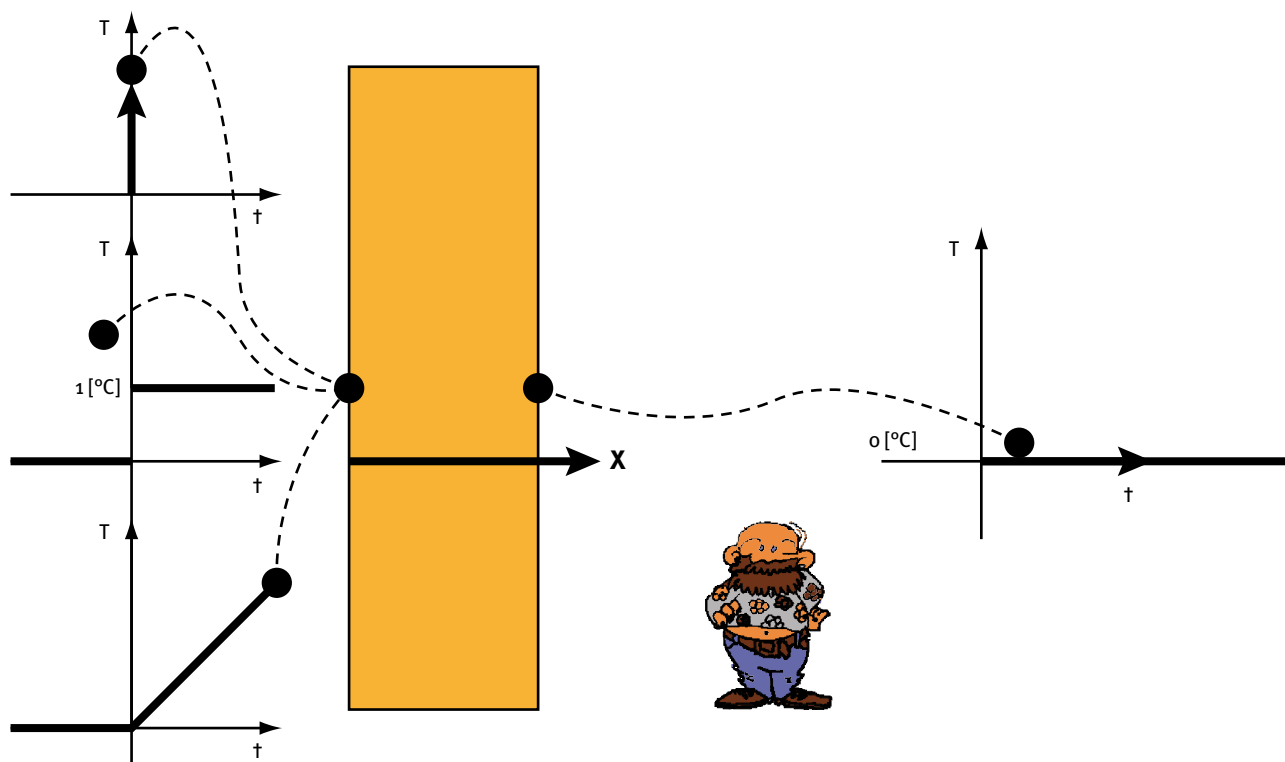
- El material es isótropo (homogéneo). Esto es sólo aproximado en el caso de ladrillos, por ejemplo.
- El calor, la energía, fluye perpendicularmente al muro.
- La temperatura en el contacto de los materiales es la misma.

Las excitaciones de la capa son debidas a cambios de temperatura (estrictamente de la superficie). Excitaciones fundamentales son, por ejemplo:

- Impulso de temperatura de duración infinitamente pequeña y magnitud infinitamente grande (Delta de Dirac).
- Un escalón (función de Heaviside) unitario de temperatura.
- Una subida en rampa de temperatura con cierta pendiente.

Si se observa, cada una de estas funciones es la derivada de la siguiente (en el sentido generalizado, o también llamado en matemáticas “distribuciones”, de la derivada, ya que en el sentido clásico de derivada ésta no existe, por ejemplo en $t=0$ la función escalón no tiene derivada clásica).

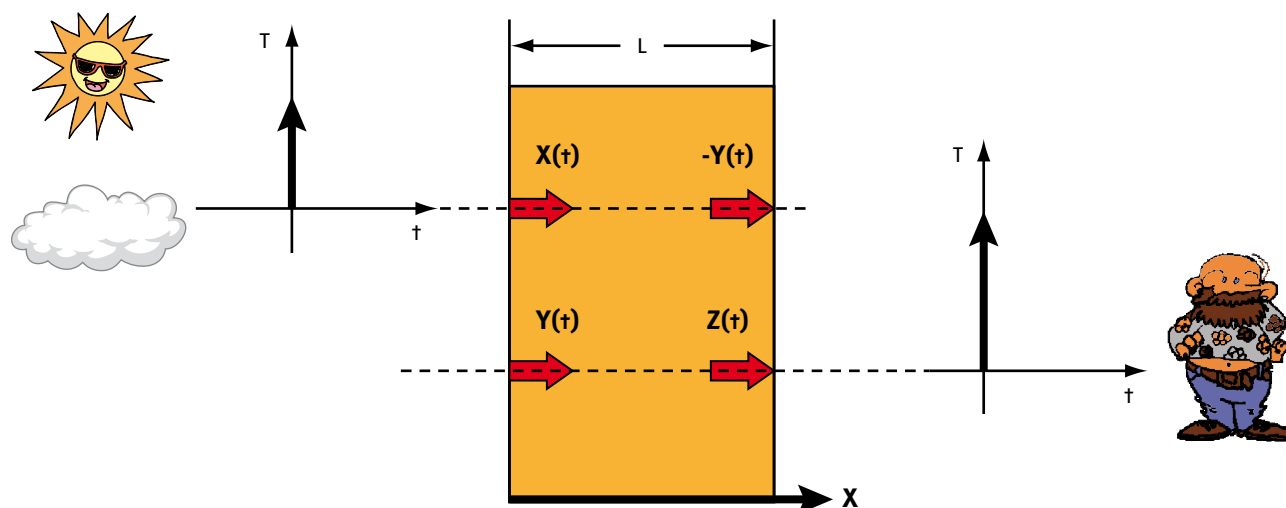
La respuesta buscada es la densidad del flujo de calor (W/m^2) que por conducción llega, bien al lado opuesto



de la excitación, bien al mismo lado de la excitación. En general, la literatura especializada ha llamado a estas respuestas $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ en función de la localización del par (excitación, respuesta). Más tarde se verá que se deben hacer matizaciones adicionales respecto al tipo de señal de excitación (pulso, escalón, rampa, triángulo, etc.) y respecto al modo de muestreo de la respuesta (esto es, con qué cadencia se observa el flujo de calor).

Una representación de dichas respuestas y excitaciones se puede ver en la figura. Como se mostrará más adelante, la respuesta en la densidad de flujo de calor por la cara exterior de un muro debida a cambios interiores de temperatura es igual (cambiado el signo) a la respuesta en la cara interior debida a un cambio exterior. (Nota: esto es así siempre y cuando el muro no sea ventilado).

Particularmente interesante es la respuesta $Z(t)$, ya que indica la densidad de flujo de calor interior debida a cambios de temperatura interiores. Esta respuesta sirve, en el método de las series temporales radiantes, para descubrir el ritmo al cual la radiación que incide sobre la cara interior de un muro es devuelta en forma de convección al aire del volumen.



Para resolver la respuesta de una capa se debe resolver la ecuación:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Con las condiciones de contorno siguientes:

$$t = 0 \rightarrow T(x, 0) = 0$$

$$t > 0 \rightarrow T(0, t) = 1, T(L, t) = 0$$

Que implican que inicialmente la capa está a 0°C y que la temperatura en la cara exterior se levanta súbitamente

a 1°C (respuesta ante un escalón, llamada también respuesta indicial).

Para hallar la solución se usa la transformada de Laplace en la variable temporal.

$$\begin{aligned} L(T(x, t)) &= LT(x, s) = \int_0^\infty e^{-st} T(x, t) dt \\ L\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t)\right) &= \frac{\partial^2 LT}{\partial x^2}(x, s) = \frac{d^2 LT}{dx^2}(x, s) \\ L\left(\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}(x, t)\right) &= \frac{1}{\alpha} [s \cdot LT - T(x, 0)] = \frac{s}{\alpha} LT(x, s) \end{aligned}$$

De manera que la ecuación diferencial parcial pasa a ser ordinaria en x y con la variable compleja s como “parámetro”. Ecuación diferencial de 2º orden homogénea.

$$\frac{d^2 LT}{dx^2}(x,s) = \frac{s}{\alpha} LT(x,s)$$

$$\frac{d^2 LT}{dx^2}(x,s) = -\frac{s}{\alpha} LT(x,s) = 0$$

con las condiciones de contorno:

$$LT(0,s) = \frac{1}{s}$$

$$LT(L,s) = 0$$

La primera representa la transformada de Laplace de un escalón en $t=0$. La solución general de la ecuación es:

$$LT(x,s) = C_1 \exp\left[-x \sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] + C_2 \exp\left[x \sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]$$

al aplicar la condiciones de contorno queda:

$$LT(x,s) = \frac{1}{s} \frac{\text{sh}\left[(L-x)\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{\text{sh}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}$$

esta es la transformada de Laplace de la respuesta temporal de la temperatura en cualquier punto ante una excitación escalón de temperatura (de 1 °C) en el exterior.

La función de transferencia de un sistema es la respuesta ante una excitación impulso (delta de Dirac). Esta excitación se obtiene como la derivada generalizada de la excitación escalón. Si se usa la propiedad de la transformada de Laplace:

$$L = \left[\frac{df}{dx}\right] = s \cdot L[f] - f(0)$$

Tenemos:

$$LT_{\delta,o}(x,s) = \frac{\text{sh}\left[(L-x)\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{\text{sh}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}$$

Esta es la transformada de la respuesta en temperatura ante una excitación impulsiva de temperatura en la cara externa. Dado que lo que deseamos es la densidad del flujo de calor debemos usar la fórmula:

$$q(x,t) = -k \frac{dT}{dx}(x,t) \quad [W/m^2]$$

Luego derivando respecto a x normalmente:

$$Lq_{\delta,o}(x,s) = k \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{\text{ch}\left[(L-x)\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{\text{sh}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}$$

Análogamente, pero esta vez excitando a la capa con un escalón de temperaturas en la superficie interior se obtiene:

$$LT(L,s) = 0$$

$$LT(L,s) = \frac{1}{s}$$

$$LT_{\delta,L}(x,s) = \frac{\text{sh}\left[x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{\text{sh}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}$$

$$Lq_{\delta,L}(x,s) = -k \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{\text{ch}\left[x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{\text{sh}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}$$

Utilizando estas expresiones, finalmente podemos relacionar la temperatura y el flujo de calor a un lado de la capa, con la temperatura y el flujo de calor al otro lado. Para ello hay que recordar que la respuesta ante una excitación cualquiera se construye como la convolución de la respuesta ante impulsos de un tamaño proporcional al valor de la señal de entrada. La transformada de la convolución es el producto de las transformadas de Laplace; de la función de transferencia –respuesta ante un impulso– y la transformada de la señal de entrada. Adicionalmente, al ser un modelo lineal, la respuesta ante una combinación lineal de las entradas es la combinación lineal de las respuestas. De otro modo, la densidad del flujo de calor en un cierto punto es la suma de aquel debido a las excitaciones a un lado de la capa más la debida a excitaciones en el otro lado.

Con todo lo anterior la respuesta final del sistema “capa” de un material se puede resumir en la siguiente ecuación matricial:

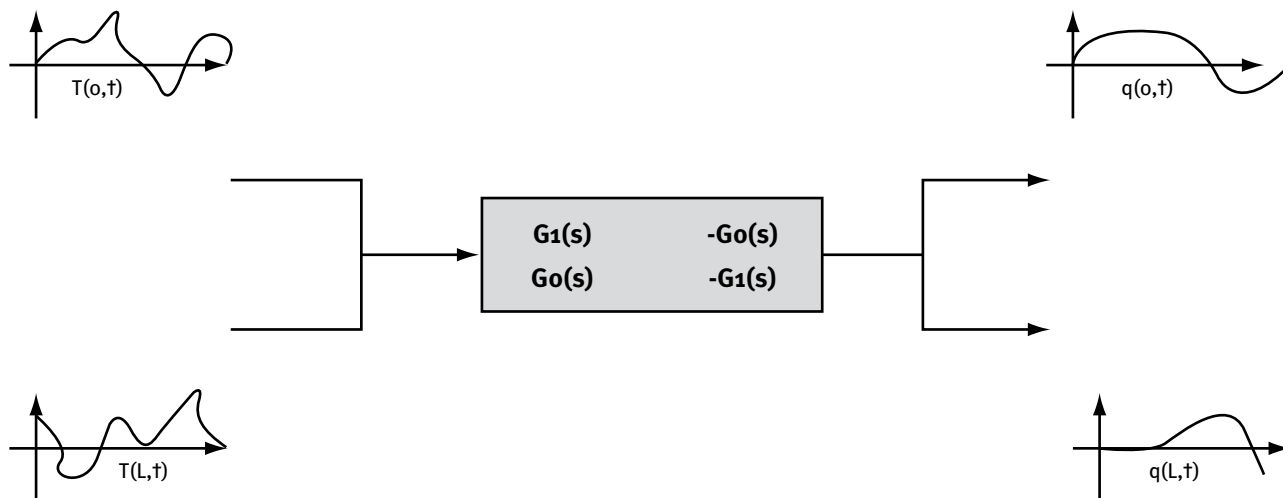
$$\begin{bmatrix} Lq(o,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lq_{\delta,o}(o,s) & Lq_{\delta,L}(o,s) \\ Lq_{\delta,o}(L,s) & Lq_{\delta,L}(L,s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(o,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{\text{ch}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{\text{sh}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]} & -k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{1}{\text{sh}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]} \\ k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{1}{\text{sh}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]} & -k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{\text{ch}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{\text{sh}\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(o,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\delta}(s) & Y_{\delta}(s) \\ -Y_{\delta}(s) & Z_{\delta}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1(s) & -G_o(s) \\ G_o(s) & -G_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

La expresión anterior muestra la transformada de Laplace de las respuestas “parciales” X, Y, Z debidas a una excitación impulso (de temperatura). De ahí el subíndice delta. La notación con G(s) es más común en la literatura de control automático de sistemas. Una representación podría ser.



$LT(o,s)$ y $LT(L,s)$ representan la transformada de Laplace temporal de las excitaciones arbitrarias que puede recibir este sistema “capa” y las $Lq(o,s)$ y $Lq(L,s)$ son las transformadas de Laplace de la respuesta en densidad de flujo de calor.

Se puede escribir también como:

$$\begin{bmatrix} Lq(o,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lq_{\delta,o}(o,s) & Lq_{\delta,L}(o,s) \\ Lq_{\delta,o}(L,s) & Lq_{\delta,L}(L,s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(o,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R \cdot M(s) \frac{\text{ch}[M(s)]}{\text{sh}[M(s)]} & -1/R \cdot M(s) \frac{1}{\text{sh}[M(s)]} \\ 1/R \cdot M(s) \frac{1}{\text{sh}[M(s)]} & -1/R \cdot M(s) \frac{\text{ch}[M(s)]}{\text{sh}[M(s)]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

con

$$R = \frac{L}{k}, \quad M(s) = L \sqrt{\frac{s}{\alpha}} = \sqrt{L^2 \frac{1}{k/\rho \cdot c_p}} \sqrt{s} = \sqrt{RC} \sqrt{s}$$

$$C = \rho \cdot c_p \cdot L$$

$$\begin{bmatrix} Lq(o,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{RC}}{R} \sqrt{s} \frac{ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]} - \frac{\sqrt{RC}}{R} \sqrt{s} \frac{1}{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]} \\ \frac{\sqrt{RC}}{R} \sqrt{s} \frac{1}{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]} - \frac{\sqrt{RC}}{R} \sqrt{s} \frac{ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

Donde R es la resistividad térmica de la capa y C es la capacidad de almacenamiento de energía por unidad de superficie de la capa. Así, se aprecia que el producto RC y R determinan el comportamiento dinámico de la capa.

Sin embargo, los muros están formados por muchas capas “conectadas” en serie, de forma que la temperatura de un lado de una capa es la temperatura del otro lado de la siguiente capa, y lo mismo con el flujo de calor. Por esta razón se debe despejar la temperatura y la densidad del flujo de calor a un lado en función de sus valores al otro lado, para poder componer la solución final.

$$\begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] & -\frac{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{k\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} \\ -k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] & ch\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] & -R \frac{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} \\ -\frac{1}{R} L\sqrt{\frac{s}{\alpha}} sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] & ch\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch[M(s)] & -R \frac{sh[M(s)]}{M(s)} \\ -\frac{1}{R} M(s) sh[M(s)] & ch[M(s)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}] & -R \frac{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{\sqrt{RC} \sqrt{s}} \\ -\frac{1}{R} (\sqrt{RC} \sqrt{s}) sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}] & ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix}$$

O bien la relación inversa:

$$\begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch[M(s)] & R \frac{sh[M(s)]}{M(s)} \\ \frac{1}{R} M(s) sh[M(s)] & ch[M(s)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix}$$

Nota: $A(s) = D(s)$

Finalmente, si en lugar de usar la temperatura de la superficie como excitación se usara la temperatura del aire u otra temperatura equivalente (con su coeficiente de convección asociado, constante en el tiempo) que incluyera efectos de la radiación la relación entre las temperaturas y los flujos de calor, se podría escribir:

$$\begin{aligned} q_{ext} &= h_{ext} \cdot (T_{ext}(t) - T(o,t)) \\ Lq_{ext}(s) &= h_{ext} \cdot (LT_{ext}(s) - LT(o,s)) = Lq(o,s) \\ q_{int} &= h_{int} \cdot (T(L,t) - T_{int}(t)) \\ Lq_{int}(s) &= h_{int} \cdot (LT(L,s) - LT_{int}(s)) = Lq(L,s) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT_{ext}(s) \\ Lq_{ext}(s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT_{int}(s) \\ Lq_{int}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/h_{int} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix}$$

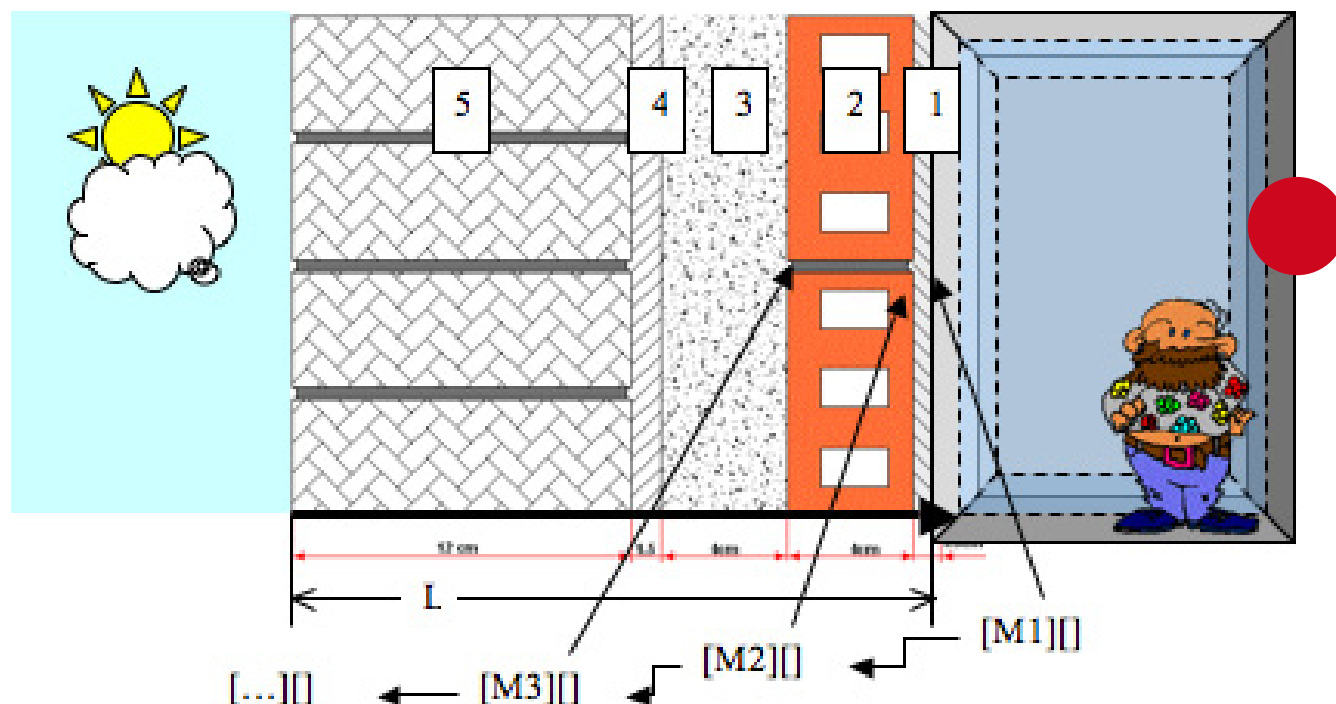
O bien la relación inversa:

$$\begin{bmatrix} LT_{ext}(s) \\ Lq_{ext}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{int} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT_{int}(s) \\ Lq_{int}(s) \end{bmatrix}$$

Esta también es la forma general cuando existe una “capa” que no acumula energía y sólo ofrece resistencia térmica. Sería el caso de una cámara de aire no ventilada. En ese caso, $1/h$ se debería substituir por la resistividad (km^2/W) de la capa.

Una vez tenemos cómo se relaciona la temperatura y la densidad del flujo de calor a ambas caras de una capa se puede componer la respuesta de un muro multicapa.



Matemáticamente supone multiplicar las matrices de cada capa en el orden que poseen (de fuera hacia adentro):

$$\begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}_5 \cdots \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}_2 \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA(s) & BB(s) \\ CC(s) & DD(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix}$$

O bien en orden inverso, esto es, de la capa más interna a la más externa, teniendo en cuenta el cambio de signo de ciertos elementos de cada matriz si se usan las matrices inversas:

$$\begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix}_1 \cdots \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix}_{n-1} \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix}_n \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ Lq(o,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT_{int}(s) \\ Lq_{int}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/h_{int} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix}_1 \cdots \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix}_n \begin{bmatrix} 1 & -1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT_{ext}(s) \\ Lq_{ext}(s) \end{bmatrix}$$

$x=0$ es la superficie exterior del muro y $x=L$ es la cara interior. Si se añade la convección a la matriz y se usan las temperaturas del aire a ambos lados, se modifica como sigue cuando expresamos lo que ocurre fuera en función de lo que ocurre dentro (inverso al anterior):

$$\begin{bmatrix} LT_{ext}(s) \\ Lq_{ext}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} AA(s) & BB(s) \\ CC(s) & DD(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT_{int}(s) \\ Lq_{int}(s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT_{ext}(s) \\ Lq_{ext}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA_h(s) & BB_h(s) \\ CC_h(s) & DD_h(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT_{int}(s) \\ Lq_{int}(s) \end{bmatrix}$$

Llamo la atención del lector sobre el hecho de que el orden del producto de matrices no es conmutativo. Eso significa que el orden de colocación de las capas cambia la dinámica. Por ejemplo: si ponemos el aislante en el interior de la vivienda, cuando arranquemos la calefacción la potencia irá a subir la temperatura del aire interior muy rápidamente, ya que la masa del muro no se puede calentar al estar el aislante primero. Sin embargo, si el aislante se coloca más al exterior, el aire interior del recinto tardará más en llegar a la temperatura de confort ya que la masa interna del muro se irá calentando. En cualquier caso, cuando se llega a un estado estacionario, la cantidad de calor que fluirá a través del muro será la misma en los dos casos, ya que sólo depende de la resistencia térmica total del muro y ésta si es la misma, independientemente del orden de las capas.

Una discusión más detallada sobre el comportamiento cualitativo de los muros lo encontrará el lector en el texto.

Llegados a este punto, la composición anterior nos ha servido para construir la matriz de transferencia del muro multicapa. No obstante, la respuesta que nos interesa se encuentra en la densidad del flujo de calor en cada lado, de forma que hay que reescribir el sistema así.

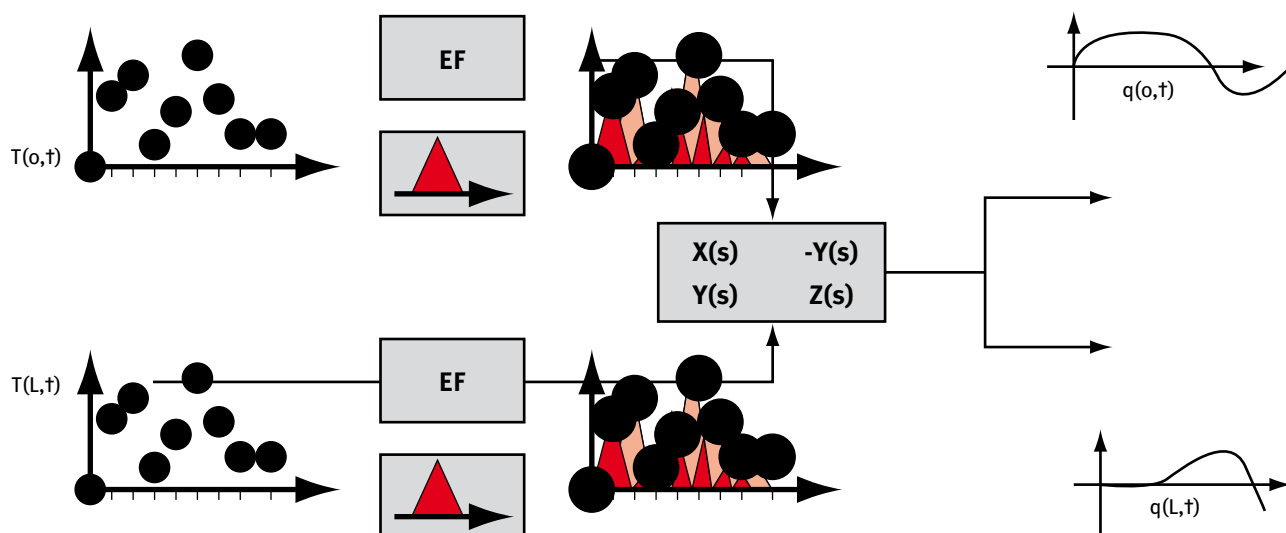
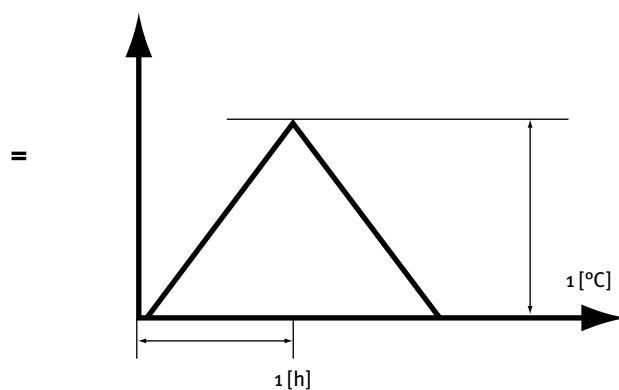
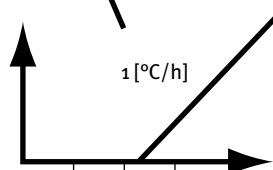
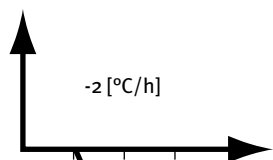
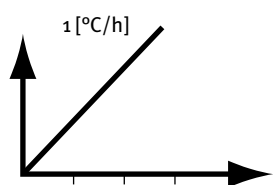
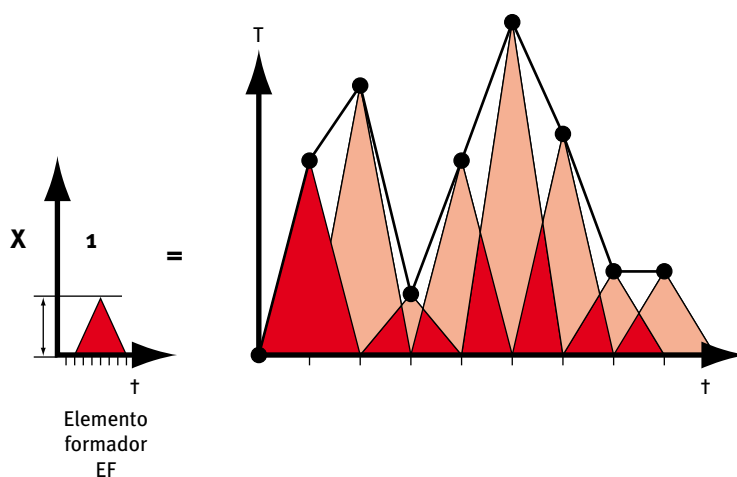
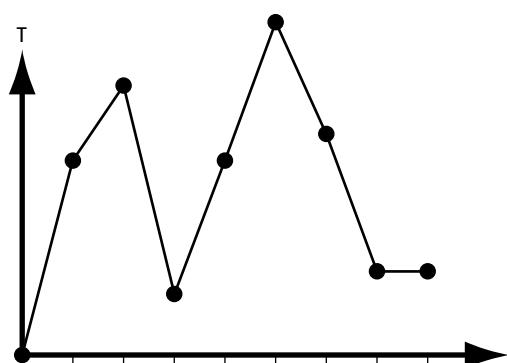
$$\begin{bmatrix} Lq(o,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DD_h(s)/BB_h(s) & -1/BB_h(s) \\ 1/BB_h(s) & -AA_h(s)/BB_h(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(o,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(s) & -Y(s) \\ Y(s) & Z(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

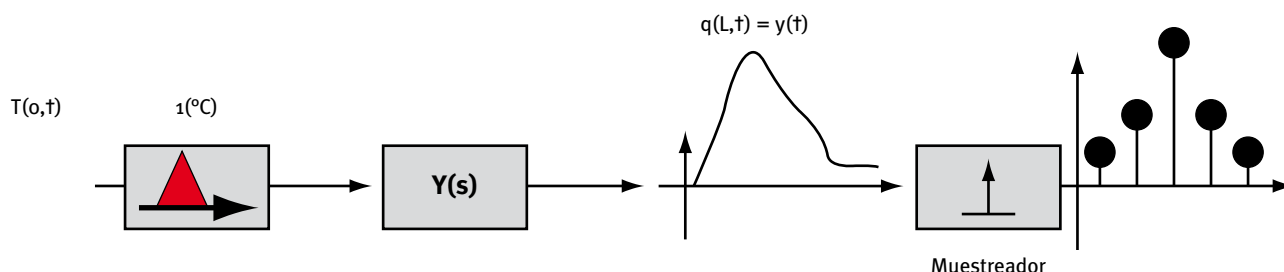
En teoría, este sería el final. Buscando la antitransformada de Lq para ciertas excitaciones anuales $T(o,t)$ y $T(L,t)$, obtendríamos los flujos de energía. Sin embargo, aquí es donde empiezan una serie de métodos para intentar resolver y manipular la solución. En lo que sigue se van a comentar los más comunes.

Factores de respuesta. (Response factors en la literatura inglesa)

Como habitualmente los programas de simulación disponen de información meteorológica horaria (esto es, radiación, temperatura seca exterior, etc.) a intervalos de 1 hora, la señal de entrada debe “reconstruirse”. La forma más simple es uniendo los valores con una línea recta. Para que dicha reconstrucción sea automática se utiliza un elemento formador EF (hold function en inglés), que en el caso de los factores de respuesta es un triángulo. El triángulo tiene una base de 2 pasos de tiempo (2 horas habitualmente) y una altura de 1 °C. Por lo tanto, la pendiente es de 1 °C/h. Dicho triángulo se forma como combinación lineal de la respuesta a una rampa.



Los factores de respuesta son el conjunto de valores muestreados a una cierta cadencia (1 hora normalmente) de la respuesta en densidad de flujo de calor que se obtiene a una excitación triángulo de 1 °C de salto. Por la linealidad del comportamiento del muro, la respuesta ante un triángulo de otro tamaño (digamos 10 °C) será 10 veces la respuesta en densidad de flujo de calor obtenida para el triángulo unidad. La figura muestra, esquemáticamente, los factores de respuesta del flujo interior de calor debido a una excitación exterior.



Altura 1 [°C]	Altura T [°C]
$q(<0) = 0$	$q(<0) = 0$
$q(0) = y(0)$	$q(0) = y(0) \cdot T$
$q(1\Delta t) = y(1)$	$q(1\Delta t) = y(1) \cdot T$
$q(2\Delta t) = y(2)$	$q(2\Delta t) = y(2) \cdot T$
...	...

Del mismo modo, para flujo de calor en el exterior –aunque este es menos interesante– sería:

$$q(0,j\Delta t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n) \cdot T(o,j\Delta t - n\Delta t) - \sum_{n=0}^{\infty} y(n) \cdot T(L,j\Delta t - n\Delta t)$$

$j = 0, 1, 2, 3, \dots$

Estas expresiones aparecen comúnmente en los manuales de programas de simulación (Manuales del LIDER, CALENER-GT, DOE2, EnergyPlus, etc.).

La respuesta total es la respuesta a la suma de una sucesión de triángulos de diferente altura (temperatura) decaídos un cierto paso de tiempo (1 hora). Por lo tanto la respuesta es la suma de las respuestas al triángulo de altura variable y decaídos en el tiempo. En forma matemática:

$$q(L,j\Delta t) = \sum_{n=0}^{\infty} y(n) \cdot T(o,j\Delta t - n\Delta t)$$

$j = 0, 1, 2, 3, \dots$

, esto es, el flujo de calor en un momento es la suma de las infinitas contribuciones de las temperaturas previas y la actual (triángulos previos y el actual). Aquella que sucedió hace mucho tendrá poco peso (valor $y(x)$ bajo), mientras que las más recientes tendrán un peso mayor.

Si se tiene en cuenta la respuesta debida a variaciones de temperatura en el otro lado (en el interior) la respuesta total es la suma de ambas respuestas parciales:

$$q(L,j\Delta t) = \sum_{n=0}^{\infty} y(n) \cdot T(o,j\Delta t - n\Delta t) + \sum_{n=0}^{\infty} z(n) \cdot T(L,j\Delta t - n\Delta t)$$

$j = 0, 1, 2, 3, \dots$

Obviamente, en la práctica no se usa una suma de términos infinita con una cantidad de valores muestreados infinitos. Más adelante se mostrará cómo se puede hacer la operación anterior. Por ahora, el problema que tenemos es cómo calcular esos factores de respuesta. A esta labor hay muchas alternativas según autores.

Las funciones de transferencia $X(s)$, $Y(s)$ y $Z(s)$ contienen toda la información sobre la respuesta dinámica del muro. De hecho, si la variable compleja se substituye por su valor imaginario puro $j\omega$ (ω se mide en radianes/segundo = $2\pi/T$, T es el período en segundos), estas funciones nos dan la respuesta ante excitaciones periódicas (senoidales) de temperatura con una pulsación ω (frecuencia $1/T$ hercios). Por ejemplo, para la temperatura diaria, si variara de forma senoidal pura –más fría a las 7 a.m. y más caliente a las 2 p.m.– tendría una frecuencia $1/(24 \cdot 3.600) = 1.16 \cdot 10^{-5}$ Hz o una pulsación de $2\pi/(24 \cdot 3.600) = 7.3 \cdot 10^{-5}$ rad/s. Para una cierta frecuencia $j\omega$, $X(j\omega)$ nos da la admitancia exterior, $Y(j\omega)$ la impedancia y $Z(j\omega)$ la admitancia interior. Estos son números complejos, que como en el caso de redes eléctricas, relaciona la excitación (aquí cierta pulsación de temperatura) con la respuesta (densidad de flujo de calor) y denota un desfase y una amortiguación de su efecto. Así, cuando la temperatura es máxima fuera,

por ejemplo, el flujo de calor dentro no tiene porqué serlo, ese máximo se producirá en otro momento y la densidad del flujo de calor será más reducida que en un caso estacionario puro (que representa un caso de impedancia puramente resistiva, sólo parte real). En casas antiguas de muros gruesos apreciamos que hacia el atardecer, cuando fuera hace frío, dentro de la casa se está caliente. Ese es un caso en el que el flujo de calor llega más tarde al interior (se desfasa temporalmente respecto a la temperatura exterior).

Las funciones de transferencia se caracterizan por la localización de sus polos. Esto es, aquellos valores de su argumento complejo que hacen que la función se “dispare” hacia infinito. Los polos con parte imaginaria indican respuestas oscilantes del sistema ante una excitación impulsional. Este no es el caso de “cosas térmicas”, como el calentamiento de los muros, de forma que los polos sólo pueden ser números reales. Adicionalmente, no pueden ser reales positivos ya que la respuesta se “dispararía” de nuevo hacia infinito (flujos de calor infinitos ante un impulso de temperatura no tienen sentido físico). Por lo tanto, los polos sólo pueden ser números reales negativos, ya que dan lugar a respuestas no oscilantes que desaparecen con el tiempo. Hay que tener especial cuidado, ya que se trata de un sistema representado por una ecuación diferencial parcial y éstas, de algún modo, son equivalentes a un sistema infinito de ecuaciones diferenciales ordinarias y, por lo tanto, va a tener una cantidad infinita “modos”, asociados a polos, todos ellos negativos. Recordemos la expresión de la matriz de transferencia y las funciones que la forman:

$$\begin{bmatrix} Lq(o,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DD_h(s)/BB_h(s) & -1/BB_h(s) \\ 1/BB_h(s) & -AA_h(s)/BB_h(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(o,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(s) & -Y(s) \\ Y(s) & Z(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

Esto es:

$$\begin{aligned} X(s) &= DD_h(s)/BB_h(s) \\ Y(s) &= 1/BB_h(s) \\ Z(s) &= -AA_h(s)/BB_h(s) \end{aligned}$$

Donde DD(s), AA(s) BB(s) son el resultados de multiplicar las tres funciones siguientes:

$$\begin{aligned} A(s) &= D(s) = \text{ch}[\sqrt{RC} \sqrt{s}] \\ B(s) &= R \frac{\text{sh}[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{[\sqrt{RC} \sqrt{s}]} \\ C(s) &= \frac{1}{R} (\sqrt{RC} \sqrt{s}) \text{sh}[\sqrt{RC} \sqrt{s}] \end{aligned}$$

en algún orden. El lector debe advertir que los polos de X(s), Y(s) y Z(s) son aquellos valores que anulan el denominador de todas ellas y que es igual a BB(s). Luego, como era de esperar, los polos son iguales para las tres y caracterizan al muro, que a su vez depende de los valores de resistencia térmica R y capacidad de acumulación de energía C de cada capa.

Existen diversos autores que en lugar de buscar las raíces de BB(s) = 0 –ecuación característica– que como se verá puede llegar a ser bastante complicado y costoso, utilizan un método que consiste en aproximar las funciones de transferencia por un modelo con un número de polos finito. Así, por ejemplo, Wang y Chen aplican un método que llaman regresión en el dominio de la frecuencia de las funciones de transferencia. Consiste en ajustar un modelo en la variable s a las funciones de transferencia X(s), Y(s) y G(s). Esto es, a la forma general:

$$\bar{Q}(s) = \frac{\beta_0 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \beta_3 s^3 + \dots + \beta_r s^r}{1 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \dots + \alpha_m s^m} = \frac{\bar{B}(s)}{1 + \bar{A}(s)}$$

$$r \leq m$$

Se escogen N (habitualmente 50) frecuencias (normalmente entre 10^{-3} y 10^{-8} Hz; recuerde el lector que 10^{-5} Hz es la frecuencia de un día) y se hace que la función G de aproximación y la función de transferencia original se aproximen de acuerdo con algún criterio. Por ejemplo, Wang y Chen escogen como función a minimizar:

$$J(\bar{\theta}) = \sum_{k=1}^N \left| \bar{B}(j\omega_k) - G(j\omega_k) \cdot [1 + \bar{A}(j\omega_k)]^2 \right|^2$$

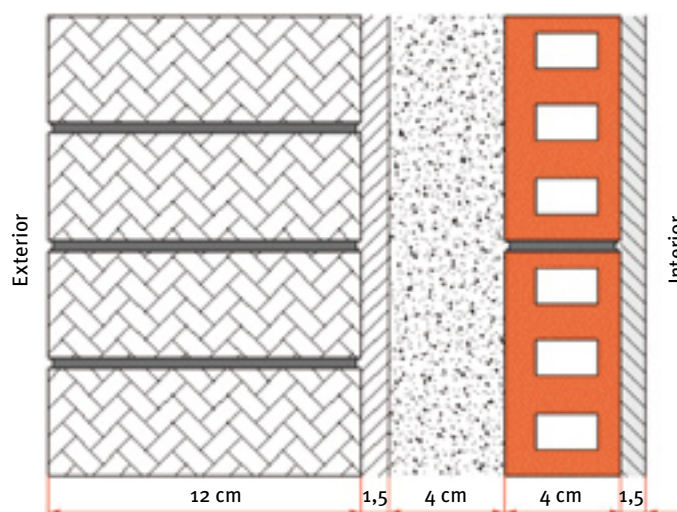
$$\bar{\theta} = [\beta_0 \quad \beta_1 \quad \dots \quad \alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots]$$

Los betas y los alfas son los parámetros del ajuste y G representa cualquier función X(s), Y(s) o Z(s).

Como no es la intención de esta guía el hacer un estudio pormenorizado, sino el dar las claves para entender los principios usados por los programas de simulación, en este punto y para más detalles sobre estos métodos, remitimos al lector a las referencias.

Prosigamos pues con la forma general para el cálculo de los polos del sistema original.

Tomemos un muro de peso medio (307 kg/m²) y veamos cómo es su función característica:



		Espesor [m]	K [W/mK]	Densidad [kg/m³]	Cp [J/kgK]	R [m²K/W]	C [J/m²K]	RC [s]
	Exterior					1/16.67		0
5	Ladrillo macizo 1/2 pie	0.12	0.87	1800	1380	0.14	298080	41731.2
4	Enfoscado de cemento	0.015	1.4	2000	1050	0.01	31500	315
3	Poliestireno expandido	0.04	0.033	25	837	1.21	837	1012.7
2	Ladrillo hueco sencillo	0.04	0.49	1200	920	0.08	44160	3532.8
1	Enlucido de yeso	0.015	0.3	800	920	0.05	11040	552
	Interior					1/9.09		0

El cálculo del valor de la matriz de transferencia sobre el eje real negativo es:

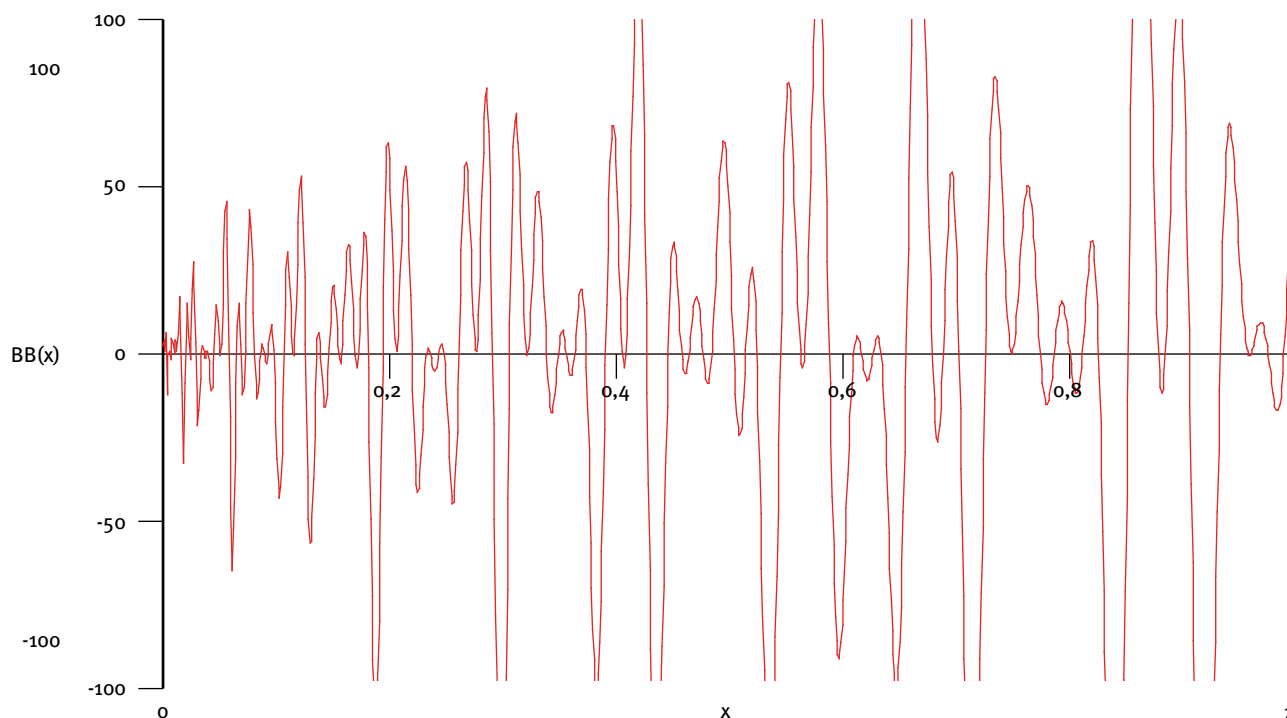
$$\begin{bmatrix} LT(o,x) \\ Lq(o,x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(x) & B(x) \\ C(x) & D(x) \end{bmatrix}_5 \dots \begin{bmatrix} A(x) & B(x) \\ C(x) & D(x) \end{bmatrix}_2 \begin{bmatrix} A(x) & B(x) \\ C(x) & D(x) \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,x) \\ Lq(L,x) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(o,x) \\ Lq(o,x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} AA(x) & BB(x) \\ CC(x) & DD(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,x) \\ Lq(L,x) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(o,x) \\ Lq(o,x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA_h(x) & BB_h(x) \\ CC_h(x) & DD_h(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,x) \\ Lq(L,x) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(o,x) \\ Lq(L,x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DD_h(x)/BB_h(x) & -1/BB_h(x) \\ 1/BB_h(x) & -AA_h(s)/BB_h(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(o,x) \\ LT(L,x) \end{bmatrix}$$

La representación gráfica de $BB_n(x)$ (x está en radianes/segundo).



Cada corte con el eje de abscisas representa una raíz de $BB(x)$ y por lo tanto un polo. El lector puede observar la forma de oscilar de la función, sobre todo cerca del origen. En principio, los polos más cercanos al origen se corresponden con aquellos modos que perduran más en el tiempo ante una excitación impulsional.

¿Cómo se puede usar esta información para generar los factores de respuesta?

La respuesta se obtiene calculando la respuesta ante una excitación rampa de temperatura y, como se vio, usando después una combinación de rampas se genera la respuesta ante una excitación triángulo de temperatura unitario. La respuesta ante una rampa con cierta pendiente se puede obtener como la transformada inversa de Laplace del producto de la función de transferencia correspondiente por la transformada de Laplace de la rampa. Finalmente, los polos son útiles para hallar la inversa de la transformada de Laplace y por tanto la solución.

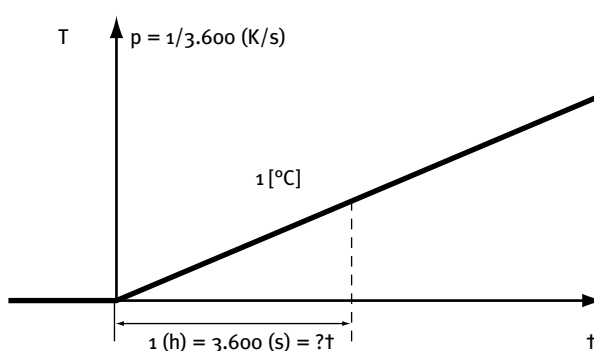
El problema que tenemos ahora es calcular la siguiente fórmula:

$$q(L,t) = L^{-1}[Y(s) \cdot Lrampa(s)]$$

$$Lrampa(s) = LT(o,s)$$

$$rampa(t) = \begin{cases} 0 & \leftarrow t < 0 \\ p \cdot t & \leftarrow t \geq 0 \end{cases}$$

$$Lrampa(s) = \left[\frac{p}{s^2} \right]$$



Por lo tanto, la función compleja cuya inversa hay que calcular para obtener el flujo de calor en el interior ante una rampa externa de aumento de temperatura con un paso de tiempo de 1 h es:

$$Lq_{\text{rampa}}(L,s) = \frac{p}{s^2 BB(s)}$$

$$p = 1/3.600$$

Si se aplica la teoría de números complejos, una función compleja $f(s)$ uniforme y analítica como son las que nos ocupan, (en concreto meromorfa; esto es, que posee ciertas características aplicables a sus ceros y polos –que en este caso son infinitos–) se puede expresar utilizando la teoría de residuos de los números complejos, que dice que la función se puede descomponer como una suma infinita:

$$f(s) = \sum_{k=0}^{\infty} GP_k(s)$$

donde $GP_k(s)$ es la parte principal de la expansión de la función $f(s)$ en serie de McLaurin alrededor de su k -ésimo polo. Esto es, si una raíz s_n del denominador de $f(s)$ –que son los polos de $f(s)$ – tiene multiplicidad m (se repite m veces) la función $GP(s)$ para ese polo se escribe como:

$$GP(s) = \frac{A_m}{(s-s_n)} + \frac{A_{m-1}}{(s-s_n)^{m-1}} + \frac{A_{m-2}}{(s-s_n)^{m-2}} + \dots + \frac{A_1}{(s-s_n)^1}$$

donde los m valores A son los residuos en este polo de orden m .

Así, la función anterior que hay que antitransformar, se puede escribir:

$$Lq_{\text{rampa}}(L,s) = \frac{p}{s^2 BB(s)} = p \cdot \frac{1}{s^2 BB(s)} = p \cdot \left[\frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s - (-x_k))} \right] = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s + x_k)}$$

$$p = 1/\Delta t$$

Para $p = 1$ tenemos:

$$\frac{1}{s^2 BB(s)} = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s - (-x_k))} = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s + x_k)}$$

Obviamente, $s=0$ es un polo de orden 2 (se ha llamado a sus residuos con la letra C) y el resto de polos (ceros de $BB(s)$) sabemos que son números reales negativos ($-x_k$) y se puede demostrar que todos son de orden 1. A su residuo asociado se le ha llamado $A_{(k)}$.

¿Cómo se calculan los residuos de una función $f(s)$?

De su definición se puede ver fácilmente que en el caso de ser de orden 1 la fórmula es:

$$A_1 = \lim_{s \rightarrow s_n} [f(s) \cdot (s - s_n)]$$

Si es un polo de orden m los residuos se obtendrán de las fórmulas:

$$\begin{aligned}
 A_m &= \lim_{s \rightarrow s_n} [f(s) \cdot (s-s_n)^m] \\
 A_{m-1} &= \lim_{s \rightarrow s_n} \left[\frac{d[f(s) \cdot (s-s_n)^m]}{ds} \right] \\
 A_{m-2} &= \frac{1}{2} \lim_{s \rightarrow s_n} \left[\frac{d^2[f(s) \cdot (s-s_n)^m]}{ds^2} \right] \\
 A_{m-3} &= \frac{1}{3 \cdot 2} \lim_{s \rightarrow s_n} \left[\frac{d^3[f(s) \cdot (s-s_n)^m]}{ds^3} \right] \\
 &\dots \\
 A_1 &= \frac{1}{(m-1)!} \lim_{s \rightarrow s_n} \left[\frac{d^{m-1}[f(s) \cdot (s-s_n)^m]}{ds^{m-1}} \right]
 \end{aligned}$$

Así, para la función $Lq_{\text{rampa}}(L, s)$ tendremos:

Para $s = 0$, polo de 2 orden $\Rightarrow$ dos residuos

$$\begin{aligned}
 C_2 &= \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right] = \frac{1}{BB(0)} \\
 C_1 &= \frac{1}{(2-1)!} \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{d}{ds} \left(\frac{1}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right) \right] = - \frac{1}{BB(0)^2} \cdot \frac{dBB}{ds}(0)
 \end{aligned}$$

Para $s = -x_k$, polos de orden 1 $\Rightarrow$ solo un residuo

$$A_{(k)} = \lim_{s \rightarrow -x_k} \left[\frac{1}{s^2 BB(s)} \cdot (s - (-x_k)) \right] = \lim_{s \rightarrow -x_k} \frac{1}{s^2 \cdot dBB(s)/ds} = \frac{1}{(-x_k)^2 \cdot dBB(-x_k)/ds}$$

En la última expresión para calcular el límite indeterminado (o/o) se ha usado la regla de L'Hopital (derivar el numerador y el denominador).

Los residuos son números reales. Así, una vez obtenidos queda por invertir la transformada de Laplace anterior. La transformada inversa de una suma es la suma de las antitransformadas, de manera que si se hace uso de antitransformadas básicas:

$$\begin{aligned}
 L^{-1} \left[\frac{1}{s^2} \right] &= f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & t \geq 0 \end{cases} \\
 L^{-1} \left[\frac{1}{s} \right] &= f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \\
 L^{-1} \left[\frac{1}{s-a} \right] &= f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ e^{at} & t \geq 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

obtenemos la dependencia temporal de la respuesta del flujo de calor interior ante una rampa de temperatura exterior de pendiente p :

$$q_{\text{rampa}}(L,t,p) = \begin{cases} 0 & \leftarrow t < 0 \\ p \cdot \left[C_2 \cdot t + C_1 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{(k)} \cdot e^{x_k \cdot t} \right] & \leftarrow t \geq 0 \end{cases}$$

$$p = 1/\Delta t$$

Ya casi hemos obtenido la respuesta buscada y que nos va a permitir obtener los factores de respuesta. Debemos obtener el flujo de calor ante una excitación triángulo exterior. Para ello se superpone la respuesta anterior a tres rampas decaladas en el tiempo (un paso de tiempo -1 h cada vez) y con la pendiente adecuada.

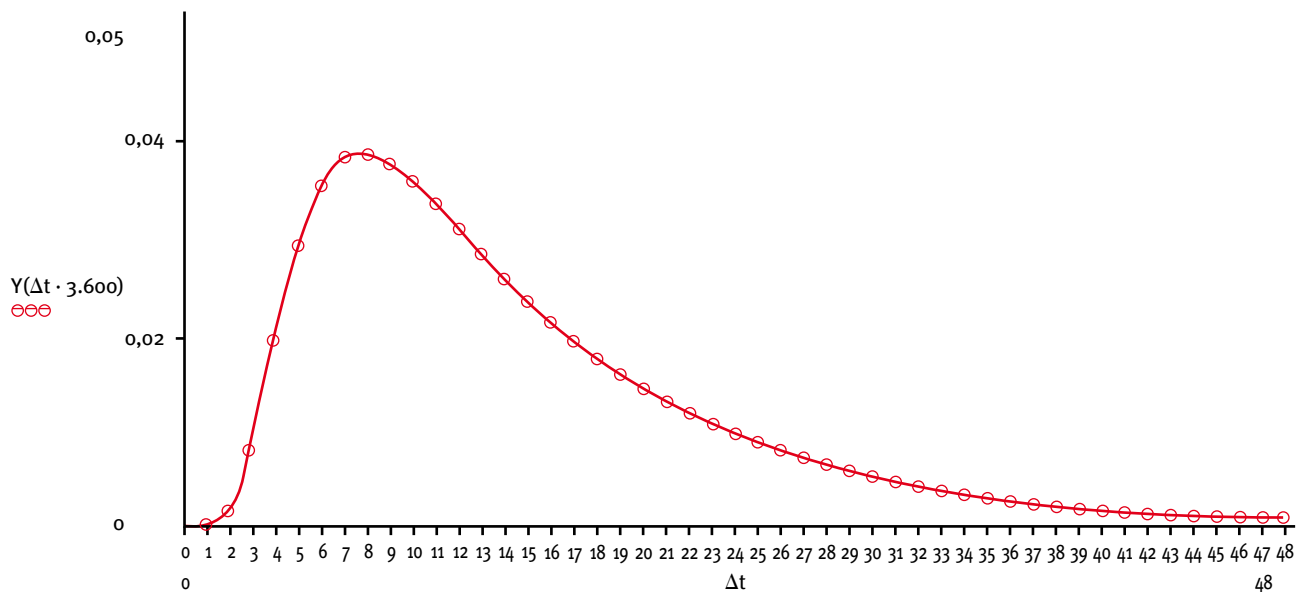
$$q_{\text{triángulo_unitario}}(L,t) = q_{\text{rampa}}(L,t,p) + q_{\text{rampa}}(L,t-\Delta t,-2p) + q_{\text{rampa}}(L,t-2\Delta t,p)$$

$$q_{\text{triángulo_unitario}}(L,t) = q_{\text{rampa}}(L,t,p) - 2 \cdot q_{\text{rampa}}(L,t-\Delta t,p) + q_{\text{rampa}}(L,t-2\Delta t,p)$$

$$p = 1/\Delta t$$

$$\Delta t = 3.600 \text{ [segundos] habitualmente}$$

La gráfica que sigue muestra la respuesta de la densidad del flujo de calor $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ en el interior ($x=L$) ante una excitación exterior triángulo unitario de temperatura con un paso de 1 h para el muro del ejemplo:



Finalmente, con esta respuesta se estiman los factores de respuesta Y como el valor de la respuesta anterior a cada paso de tiempo (mostrado en círculos):

$$y_j = q_{\text{triángulo_unitario}}(L,j \cdot \Delta t)$$

$$j = 0, 1, 2, 3, 4 \dots$$

$$\Delta t = 3600 \text{ [segundos] habitualmente}$$

Del mismo modo, se obtendría la respuesta para X y para Z. En el caso de X se debería calcular:

Para $s = 0$, polo de 2 orden $\Rightarrow$ dos residuos

$$C_2 = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{DD(s)}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right] = \frac{DD(0)}{BB(0)}$$

$$C_1 = \frac{1}{(2-1)!} \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{d}{ds} \left(\frac{DD(s)}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right) \right] = \frac{dDD(0)}{ds} \cdot \frac{1}{BB(0)} - \frac{DD(0)}{BB(0)^2} \cdot \frac{dBB}{ds}(0)$$

Para $s = -x_k$ polos de orden 1 $\Rightarrow$ solo un residuo

$$A_{(k)} = \lim_{s \rightarrow -x_k} \left[\frac{DD(s)}{s^2 BB(s)} \cdot (s - (-x_k)) \right] = \lim_{s \rightarrow -x_k} \frac{\frac{dDD(s)}{ds} (s + x_k) + DD(s)}{s^2 \cdot dBB(s)/ds} = \frac{DD(-x_k)}{(-x_k)^2 \cdot dBB(-x_k)/ds}$$

y por último, para Z tendríamos:

Para $s = 0$, polo de 2 orden $\Rightarrow$ dos residuos

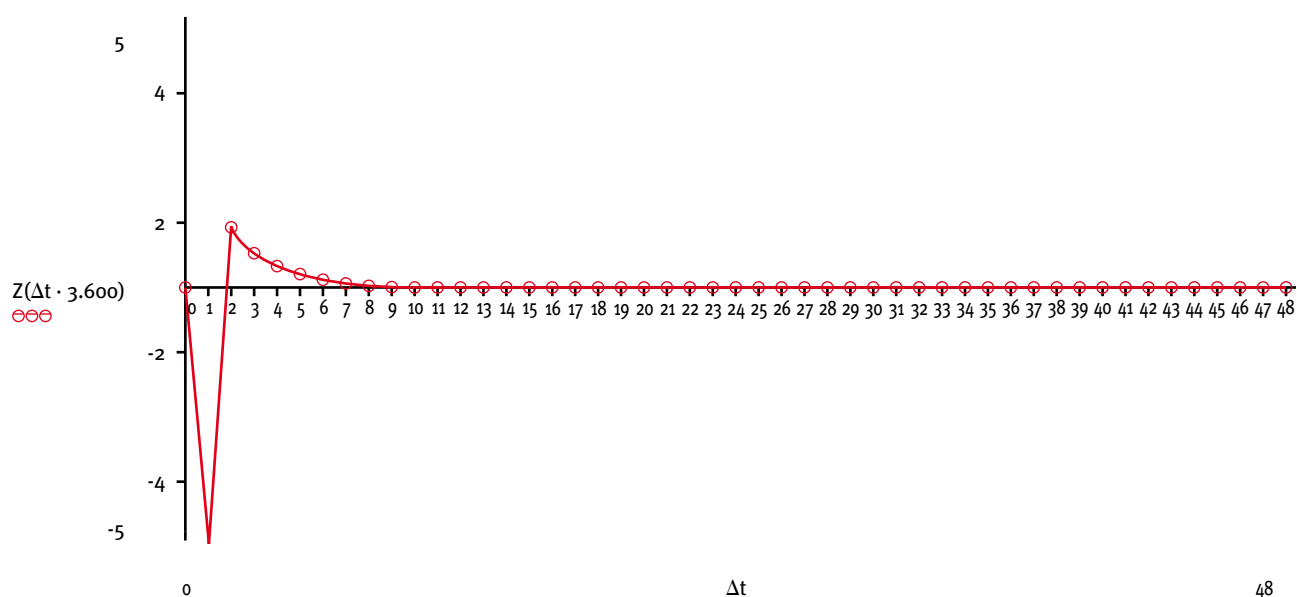
$$C_2 = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{-AA(s)}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right] = \frac{-AA(0)}{BB(0)}$$

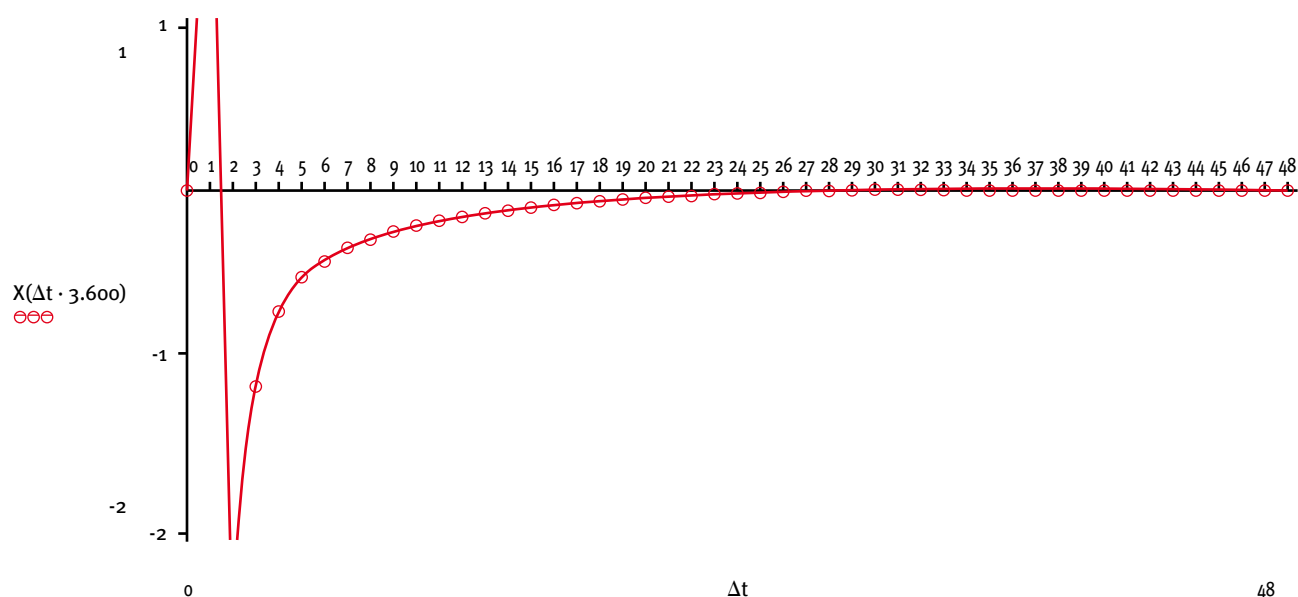
$$C_1 = \frac{1}{(2-1)!} \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{d}{ds} \left(\frac{-AA(s)}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right) \right] = \frac{dAA(0)}{ds} \cdot \frac{1}{BB(0)} - \frac{-AA(0)}{BB(0)^2} \cdot \frac{dBB}{ds}(0)$$

Para $s = -x_k$ polos de orden 1 $\Rightarrow$ dos residuos

$$A_{(k)} = \lim_{s \rightarrow -x_k} \left[\frac{-AA(s)}{s^2 BB(s)} \cdot (s - (-x_k)) \right] = \lim_{s \rightarrow -x_k} \frac{\frac{-dAA(s)}{ds} (s + x_k) - AA(s)}{s^2 \cdot dBB(s)/ds} = \frac{-AA(-x_k)}{(-x_k)^2 \cdot dBB(-x_k)/ds}$$

Las figuras siguientes representan dichas respuestas:





La tabla siguiente muestra dichos factores horarios de respuesta.

Hora	yj (W/m²K)	zj (W/m²K)	xj (W/m²K)
0	0	-0.0001	1.128e-4
1	2.953e-6	-5.03836	10.855
2	8.77e-4	1.71531	-2.846
3	7.635e-3	0.94904	-1.202
4	0.019	0.61076	-0.781
5	0.029	0.39396	-0.599
6	0.035	0.25481	-0.502
7	0.038	0.1654	-0.438
8	0.039	0.10789	-0.389
9	0.038	0.07084	-0.349
10	0.036	0.04693	-0.313
11	0.033	0.03144	-0.282
12	0.031	0.02138	-0.254
13	0.028	0.01481	-0.228
14	0.026	0.01049	-0.206
15	0.023	0.00762	-0.185
16	0.021	0.00569	-0.167
17	0.019	0.00437	-0.15
18	0.017	0.00346	-0.135
19	0.016	0.00281	-0.122
20	0.014	0.00233	-0.11
21	0.013	0.00197	-0.099
22	0.012	0.00169	-0.089
23	0.01	0.00147	-0.08
24	9.345e-3	0.00129	-0.072

¿Porqué tienen esas formas?

La respuesta Y es la densidad del flujo de calor debida al cambio de temperatura fuera. Por eso, inicialmente no sabe que ha habido un cambio y no hay flujo. Luego aparece el flujo hacia el interior (positivo), va creciendo hasta alcanzar un máximo y luego decrece hasta cero, como era de esperar. Para este muro, su valor máximo de calor está a las 7 u 8 horas de producirse el pico de temperatura fuera.

La respuesta X es inicialmente positiva, muy rápida y grande, ya que el flujo de calor se mide en el mismo lado (fuera) donde se está produciendo el cambio de temperatura. A la hora la temperatura baja, el muro está caliente y empieza a perder calor por ese mismo lado (flujo negativo) y se va reduciendo hasta cero.

La respuesta Z es inicialmente grande y negativa porque estamos mirando el flujo de calor en el interior ($x=L$) debido a un cambio interior. Es negativa porque el calor sale del recinto. Sin embargo, pasada una hora, cuando la temperatura dentro vuelve a bajar, el flujo se hace positivo –el muro está más caliente– y devuelve el calor al recinto de forma cualitativamente similar a X, pero no idéntica, ya que la composición del muro no es simétrica. Este comportamiento de Z devolviendo energía pasado un tiempo se usa como base del método de las series radiantes.

Solo queda ver cómo se puede aplicar en la práctica para calcular la evolución del flujo de calor que atraviesa el muro

Como no se pueden tomar los infinitos factores de respuesta, como se comentó, se usa el hecho de que las exponenciales se reducen, y tras cierto tiempo solo queda la primera exponencial que corresponde al primer polo. Al formar el triángulo con rampas, la respuesta a partir del segundo paso de tiempo sólo depende del sumatorio de exponenciales. A partir de ese instante se supone que la razón entre dos factores de respuesta se mantiene constante y depende del primer polo:

$$\frac{Y(j\Delta t)}{Y((j-1)\Delta t)} = \frac{Cte \cdot e^{-x_1 \Delta t \cdot j}}{Cte \cdot e^{-x_1 \Delta t \cdot (j-1)}} = e^{-x_1 \Delta t} = e^{-x_1 \cdot 3600} = c$$

Esta se conoce como la **razón común**.

La respuesta en flujo de calor interno debida a cambios de temperatura fuera sería:

$$q(n\Delta t) = y_0 \cdot T_{\text{ext}}(n\Delta t) + \sum_{k=1}^p y_k \cdot T_{\text{ext}}((n-k)\Delta t) + c \cdot y_k \cdot T_{\text{ext}}((n-p-1)\Delta t) + c^2 \cdot y_k \cdot T_{\text{ext}}((n-p-2)\Delta t) + \dots$$

Donde la respuesta se ha truncado en el p-ésimo término y para el resto se ha usado la razón común. Si ahora se resta a esta expresión su valor un paso de tiempo antes queda:

$$\begin{aligned} q((n-1)\Delta t) &= y_0 \cdot T_{\text{ext}}((n-1)\Delta t) + \sum_{k=1}^p y_k \cdot T_{\text{ext}}((n-k-1)\Delta t) + \frac{1}{c} [c^2 \cdot y_k \cdot T_{\text{ext}}((n-p-2)\Delta t) + c^3 \cdot y_k \cdot T_{\text{ext}}((n-p-3)\Delta t) + \dots] \\ c \cdot q((n-1)\Delta t) &= c \cdot y_0 \cdot T_{\text{ext}}((n-1)\Delta t) + \sum_{k=1}^p c \cdot y_k \cdot T_{\text{ext}}((n-k-1)\Delta t) + [c^2 \cdot y_k \cdot T_{\text{ext}}((n-p-2)\Delta t) + c^3 \cdot y_k \cdot T_{\text{ext}}((n-p-3)\Delta t) + \dots] \\ q(n\Delta t) &= c \cdot q((n-1)\Delta t) + y_0 \cdot T_{\text{ext}}(n\Delta t) + \sum_{k=1}^p T_{\text{ext}}((n-k)\Delta t) \cdot [y_k - c \cdot y_{k-1}] \end{aligned}$$

Esta ecuación relaciona el flujo de calor en el instante n con su valor anterior, la temperatura actual y una historia de temperaturas anteriores. A la misma se le puede superponer, como se vio, el efecto de una respuesta en Z.

$$q(n\Delta t) = c \cdot q((n-1)\Delta t) + y_0 \cdot T_{\text{ext}}(n\Delta t) + \sum_{k=1}^p T_{\text{ext}}((n-k)\Delta t) \cdot [y_k - c \cdot y_{k-1}] + z_0 \cdot T_{\text{int}}(n\Delta t) + \sum_{k=1}^p T_{\text{int}}((n-k)\Delta t) \cdot [z_k - c \cdot z_{k-1}]$$

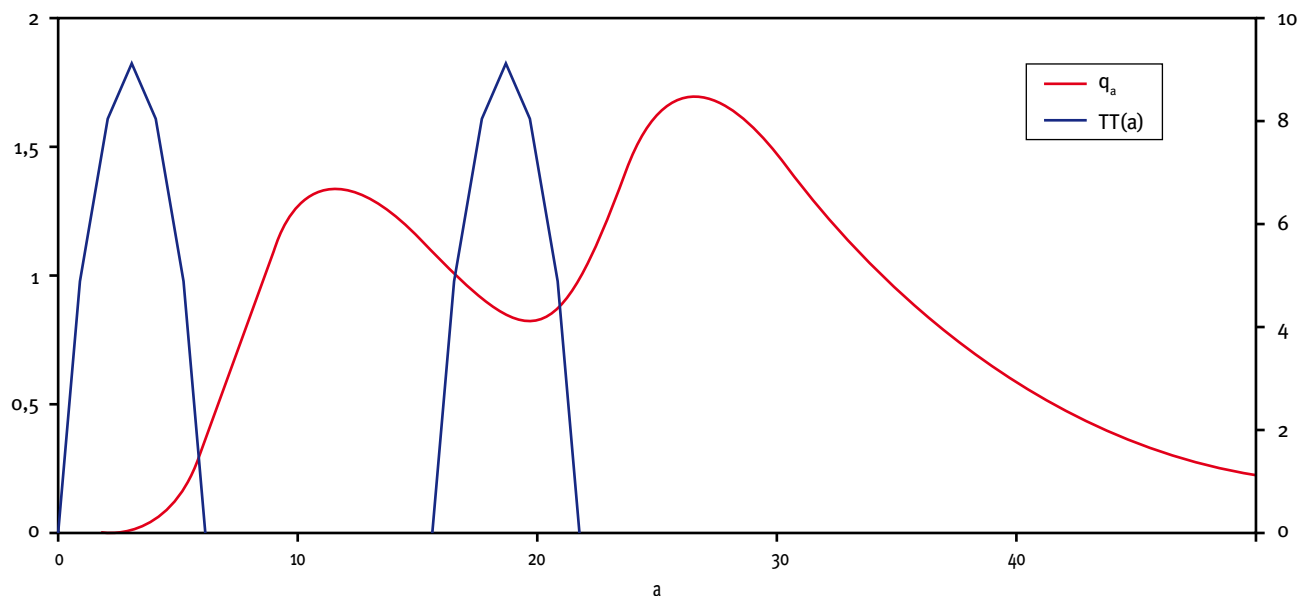
El lector debe apreciar que la razón común es la misma, ya que depende del primer polo, que es una característica del muro.

La figura siguiente muestra el flujo de calor para dos pulsos de temperatura parabólico en el exterior consecutivos, según la ecuación:

$$-t[\text{horas}]^2 + 6 \cdot t[\text{horas}] = t[n\Delta t]$$

$$\Delta t = 1 \text{ hora}$$

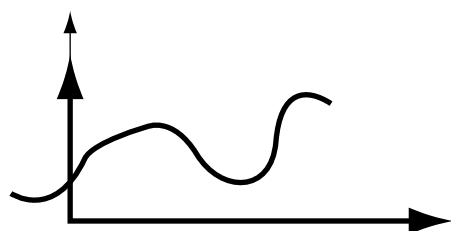
Las ecuaciones anteriores representan unas ecuaciones en diferencias. El valor del flujo de calor depende de su valor anterior, de la excitación en ese momento y en momentos anteriores. Se pueden obtener otras ecuaciones en diferencias que hagan depender el flujo de calor de un número superior de flujos de calor anteriores y, por lo tanto, la dependencia de las temperaturas anteriores se reduce. Eso hace que se necesiten menos “pesos” (valores de respuesta). Para obtener dichas ecuaciones se suele usar la transformada-Z. A los “pesos” obtenidos hasta aquí la literatura los llama factores de respuesta (Thermal Response Factors TRF), a los obtenidos del uso de la transformada Z los llama factores de respuesta de conducción (Conduction Transfer Factors CTF).



¿En qué consiste el método de la transformada Z?

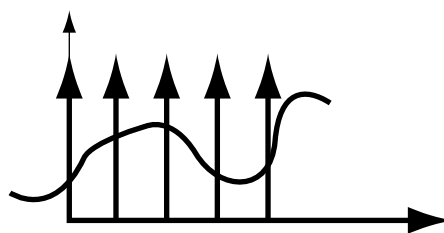
Quizá la figura lo aclare un poco. En el método anterior disponemos de la señal de entrada (la temperatura), muestreada cada cierto paso de tiempo. Así, la idea ahora es muestrear la salida con la misma cadencia y obtener la relación entre ambas. Dicha relación es la transformada-Z del sistema dinámico (el muro en nuestro caso).

¿En qué consiste muestrear? Muestrear se puede representar como la aplicación de una Delta de Dirac a una función $f(t)$. El resultado es un pulso en $t=0$ con una “fuerza” igual al valor de la función $f(t)$ en $t=0$. Nota: el lector debe ser consciente que la función Delta de Dirac, como tal, no es una función sino una distribución: una funcional o una función generalizada.



$$\delta(f(t)) = f(0) \cdot \delta(0)$$

Así, si queremos muestrear, lo que se debe hacer es crear una función tren de impulsos unitarios decalados el paso de muestreo, llamado muestreador (sampler en inglés).



$$\text{Muestreador}(f(t)) = f(0) \cdot \delta(0) + f(\Delta t)\delta(t-\Delta t) + f(2\Delta t)\delta(t-2\Delta t) + f(3\Delta t)\delta(t-3\Delta t) + \dots$$

A esta función se le llama función muestreada, denotada como $f^*(t)$. ¿Cuál es la transformada de Laplace de esta función? Bien, si tenemos en cuenta que la transformada del impulso unitario es 1, y teniendo presente que decalar en el tiempo una función implica multiplicar la función transformada original por $e^{-s\Delta t}$, tenemos:

$$Lf^*(s) = f(0) \cdot 1 + f(\Delta t)e^{-s\Delta t} + f(2\Delta t)e^{-s2\Delta t} + f(3\Delta t)e^{-s3\Delta t} + \dots$$

$$z = e^{s\Delta t}$$

$$Lf^*(s) = f(0) \cdot z^0 + f(\Delta t)z^{-1} + f(2\Delta t)z^{-2} + f(3\Delta t)z^{-3} + \dots$$

La figura resume, pues, el concepto de la transformada Z. La relación entre las transformadas de Laplace de la señal de salida muestreada $O^*(t)$ y la señal de entrada muestreada $I^*(t)$ es la transformada Z del sistema. Hay que señalar que implícitamente se asume que se ha tomado un elemento formador EF para reconstruir la señal de entrada. En muchos libros, a la matriz de transferencia que contiene la respuesta al elemento formador unitario (en nuestro caso un triángulo unitario de temperatura) recibe la denominación $G^*(s)$, y que expresada en función de $z = e^{-s\Delta t}$ es la matriz de transferencia-Z $G(z)$ (para un elemento formador dado).

Como curiosidad, el lector puede apreciar que de forma muy similar un reproductor mp3 o mp4, reconstruye una canción a partir de datos discretos leídos en su disco duro.

$$G(z) = \frac{O(z)}{I(z)}$$

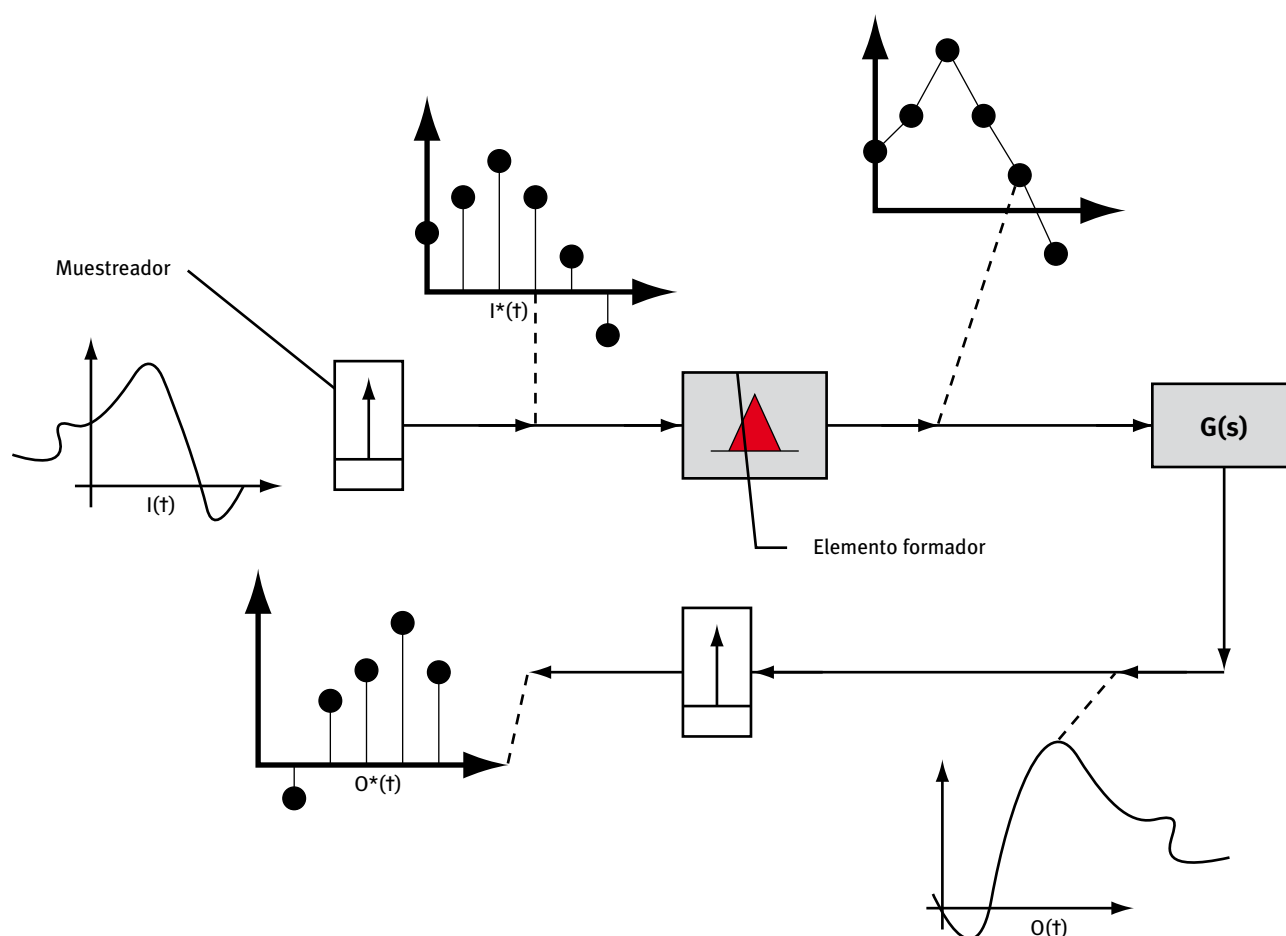
$$O(z) = L(O^*(t))$$

$$I(z) = L(I^*(t))$$

Teniendo en cuenta las expresiones para las transformadas z que están relacionadas con los valores discretos de las entradas y salidas medidos con cierta cadencia, como polinomios en z con exponentes negativos y con infinitos términos, tenemos:

$$G(z) = \frac{a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + \dots}{b_0 z^0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + \dots}$$

La razón de que existan infinitos términos arriba y abajo para esta función de transferencia es porque, como se dijo más arriba, un sistema dinámico representado por una ecuación en derivadas parciales es “parecido” a un sistema dinámico formado por un número infinito de ecuaciones diferenciales ordinarias. Cada una de ellas representa la dinámica de un “modo o forma” en que la variable (en este caso el flujo de calor) se relaja hasta cero (de algún modo, representa la cantidad de tiempos característicos del sistema). Como se verá en otro apartado, en simulación, para ciertas respuestas (la del aire de los recintos), programas como CALENERVp y CALENER-GT (DOE2) utilizan modelos aproximados más sencillos. En ellos $G(z)$ es un cociente de polinomios finitos. El orden de estos polinomios indica cuántos tiempos característicos han sido considerados.



Cuando le aplicamos una señal de entrada muestreada cualquiera $I^*(t)$, la salida muestreada $O^*(t)$ debe venir dada por la ecuación:

$$O(z) = G(z) \cdot E(z) = \frac{a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + \dots}{b_0 z^0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + \dots} = \frac{N(z)}{D(z)} \cdot I(z)$$

$$O(z) \cdot D(z) = N(z) \cdot I(z)$$

$$\{o_0 z^0 + o_1 z^{-1} + o_2 z^{-2} + o_3 z^{-3} + \dots\} D(z) = N(z) \{i_0 z^0 + i_1 z^{-1} + i_2 z^{-2} + i_3 z^{-3} + \dots\}$$

Como se trata de polinomios, para que sean iguales deben ser iguales los coeficientes de cada término z . Luego, para un término z^{-m} cualquiera, la ecuación es:

$$o_m \cdot b_0 + \{o_{m-1} \cdot b_1 + o_{m-2} \cdot b_2 + o_{m-3} \cdot b_3 + o_{m-4} \cdot b_4 + \dots\} = i_m \cdot a_0 + \{i_{m-1} \cdot a_1 + i_{m-2} \cdot a_2 + i_{m-3} \cdot a_3 + i_{m-4} \cdot a_4 + \dots\}$$

$$o_m \cdot b_0 = i_m \cdot a_0 + \{i_{m-1} \cdot a_1 + i_{m-2} \cdot a_2 + i_{m-3} \cdot a_3 + i_{m-4} \cdot a_4 + \dots\} - \{o_{m-1} \cdot b_1 + o_{m-2} \cdot b_2 + o_{m-3} \cdot b_3 + o_{m-4} \cdot b_4 + \dots\}$$

Esta última ecuación relaciona la salida en el instante m con la entrada en el instante m , entradas anteriores y valores de la salida anteriores. Es, por lo tanto, una generalización de la ecuación que obtuvimos para los factores de respuesta. Para poder calcularla hay que conocer los valores de los coeficientes a y b . Estos son el resultado de aplicar el elemento formador (el triángulo unitario) a la matriz de transferencia del muro. Las series infinitas dentro de los corchetes, como se verá, se truncan en función de la precisión buscada y del paso de tiempo usado. Como se vio, dicha respuesta en flujo de calor dentro se obtiene a partir de la respuesta a una rampa de temperatura fuera, como:

$$Lq_{\text{rampa}}(L, s) = \frac{p}{s^2 BB(s)} = p \cdot \frac{1}{s^2 BB(s)} = p \cdot \left[\frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s - (-x_k))} \right] = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s + x_k)}$$

$$p = 1/\Delta t$$

Para $p = 1$ tenemos:

$$\frac{1}{s^2 BB(s)} = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s - (-x_k))} = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s + x_k)}$$

Se sabe que cada término anterior corresponde a una rampa, un valor constante y exponenciales negativas (respectivamente); pues bien, si se muestrean se obtiene su transformada-Z como suma de las transformadas-Z:

$$Lq_{\text{rampa}}(L, z) = p \cdot \left[\frac{C_2 \Delta t}{z(1-z^{-1})^2} + \frac{C_1}{1-z^{-1}} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{1-e^{-x_k \Delta t} \cdot z^{-1}} \right]$$

$$p = 1/\Delta t$$

Cuando hacemos la suma de los quebrados anteriores su común denominador necesario para poder sumar es:

$$\text{Denominador} = z(1-z^{-1})^2 \prod_{k=1}^{\infty} (1-e^{-x_k \Delta t} \cdot z^{-1})$$

Teniendo en cuenta que la entrada a esta respuesta, es una rampa con una transformada Z igual a:

$$LT_{\text{rampa}}(0, z) = p \frac{\Delta t}{z(1-z^{-1})^2}$$

$$p = 1/\Delta t$$

El denominador de la función de transferencia Z queda:

$$D(z) = \prod_{k=1}^{\infty} (1 - e^{-x_k \Delta t} \cdot z^{-1})$$

De aquí se puede ver que:

$$b_0 = 1$$

$$b_1 = -\sum_{k=1}^{\infty} e^{-x_k \Delta t}$$

$$b_2 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=m+1}^{\infty} e^{-x_m \Delta t} \cdot e^{-x_k \Delta t}$$

$$b_3 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=m+1}^{\infty} \sum_{j=k+1}^{\infty} e^{-x_m \Delta t} \cdot e^{-x_k \Delta t} \cdot e^{-x_j \Delta t}$$

$$\dots$$

¿Cuántos términos son necesarios para evaluar cada coeficiente?

Bien, como los polos son números negativos cada vez más grandes (en valor absoluto), los términos a retener dependen del paso de tiempo y de la precisión. Por ejemplo, si se deseara una precisión de $\pm 10^{-10}$ entonces:

$$e^{-x_{\max} \Delta t} < 10^{-10} \approx e^{-23}$$

$$x_{\max} \cdot (\Delta t = 3600[s]) > 23$$

$$x_{\max} > 23/3600[\text{Hz}]$$

Valores absolutos de polos mayores que esta frecuencia serían despreciados en el cálculo.

¿Cómo obtenemos los coeficientes a del numerador?

Se podrían obtener como se ha hecho con el denominador, evaluando los productos y las sumas, pero se puede hacer de forma algo más eficiente. La respuesta temporal sabemos que tiene la forma:

$$q_{\text{rampa}}(L, t, p) = \begin{cases} 0 & \leftarrow t < 0 \\ p \cdot \left[C_2 \cdot t + C_1 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{(k)} \cdot e^{-x_k \cdot t} \right] & \leftarrow t \geq 0 \end{cases}$$

$$p = 1/\Delta t$$

Así podemos evaluar su valor a cada paso de tiempo $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t$, etc.. de forma que:

$$\frac{O(z) \cdot D(z)}{I(z)} = N(z)$$

$$D(z) = \prod_{k=1}^{\infty} (1 - e^{-x_k \Delta t} \cdot z^{-1})$$

$$I(z) = \frac{\Delta t}{z(1-z^{-1})^2}$$

$$\frac{z(1-z^{-1})^2}{\Delta t} \cdot \prod_{k=1}^{\infty} (1 - e^{-x_k \Delta t} \cdot z^{-1}) \cdot O(z) = N(z)$$

De donde se obtiene:

$$a_0 = \frac{1}{\Delta t} \left\{ C_2 \Delta t + C_1 + \sum_{k=1}^{\infty} d_n e^{-x_k \Delta t} \right\}$$

$$a_1 = \frac{1}{\Delta t} \left\{ C_2 2\Delta t + C_1 + \sum_{k=1}^{\infty} d_n e^{-x_k 2\Delta t} \right\}$$

$$\dots$$

Por lo tanto el método se resume en:

- 1) Encontrar los polos del muro.
- 2) Calcular D(z) con dichos polos.
- 3) Evaluar la respuesta temporal a una rampa a cada paso de tiempo y con ello obtener $O^*(t)$.
- 4) Evaluar los coeficientes a usando la expresión:

$$\frac{z(1-z^{-1})^2}{\Delta t} \cdot D(z) \cdot O(z) = N(z)$$

Existe una alternativa del método anterior que consiste en usar los factores de respuesta.

Se basa en el hecho de que el cociente entre salida y entrada muestreada, sea cual sea la entrada, siempre da el mismo resultado; por lo tanto, cuando la entrada es un triángulo, su transformada-Z es 1 (es el valor que toma el triángulo en $t=0$). Por lo tanto, igualando los co-

cientes de la respuesta ante una rampa y ante el triángulo:

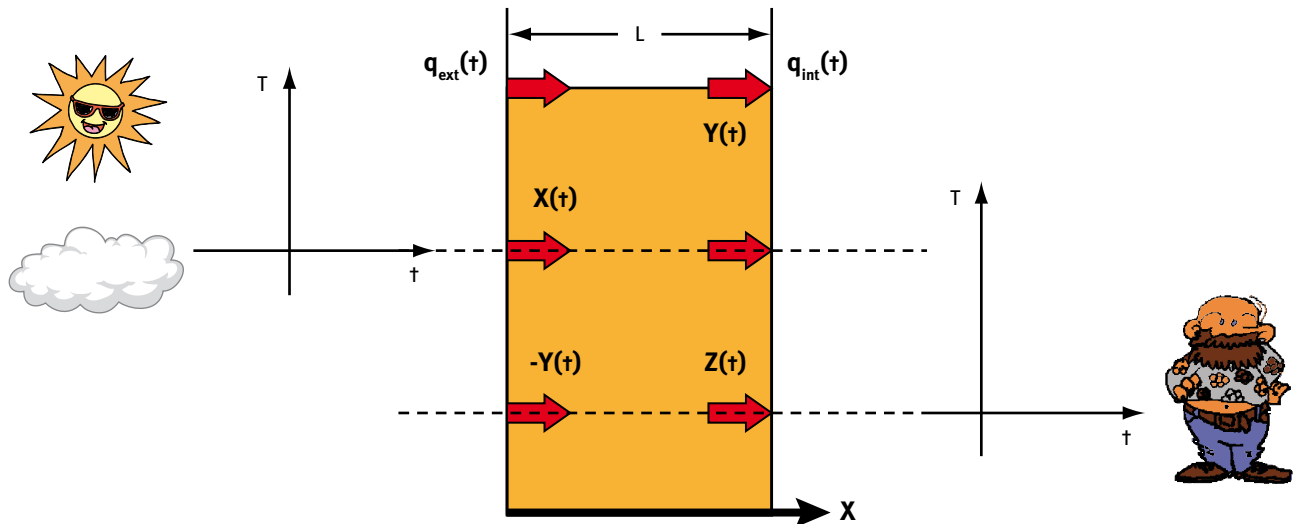
$$G(z) = \frac{N\Delta(z)}{1} = \frac{y_0 + y_1 z^{-1} + y_2 z^{-2} + \dots}{1} = \frac{N(z)}{D(z)}$$

$$\left\{ y_0 + y_1 z^{-1} + y_2 z^{-2} + \dots \right\} \left\{ b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots \right\} = N(z)$$

Igualando potencias de z iguales tenemos:

$$\begin{aligned} a_0 &= y_0 \cdot b_0 \\ a_1 &= y_0 \cdot b_1 + y_1 \cdot b_0 \\ a_2 &= y_0 \cdot b_2 + y_1 \cdot b_1 + y_2 \cdot b_0 \\ &\dots \\ a_j &= \sum_{k=0}^j y_k \cdot b_{j-k} \end{aligned}$$

para el flujo en el interior debido a un excitación de temperatura exterior.



La aplicación de todo lo anterior a un muro, la respuesta total dentro y fuera debido a excitaciones dentro y fuera usando la expresión general vista anteriormente, da como resultado:

$$q_{ext}(n\Delta t) = \sum_{j=0}^m T_{ext}((n-j)\Delta t) \cdot ax_j - \sum_{j=0}^m T_{int}((n-j)\Delta t) \cdot ay_j - \left\{ \sum_{j=1}^m q_{ext}((n-j)\Delta t) \cdot b_j \right\}$$

$$q_{int}(n\Delta t) = \sum_{j=0}^m T_{ext}((n-j)\Delta t) \cdot ay_j + \sum_{j=0}^m T_{int}((n-j)\Delta t) \cdot az_j - \left\{ \sum_{j=1}^m q_{int}((n-j)\Delta t) \cdot b_j \right\}$$

$$b_0 = 1$$

$$b_1 = -\sum_{k=1}^{\infty} e^{-x_k \Delta t}$$

$$b_2 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=m+1}^{\infty} e^{-x_m \Delta t} \cdot e^{-x_k \Delta t}$$

$$b_3 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=m+1}^{\infty} \sum_{j=k+1}^{\infty} e^{-x_m \Delta t} \cdot e^{-x_k \Delta t} \cdot e^{-x_j \Delta t}$$

Usando los factores de respuesta x, y, z:

$$ax_j = \sum_{k=0}^j x_k \cdot b_{j-k}, \quad ay_j = \sum_{k=0}^j y_k \cdot b_{j-k}, \quad az_j = \sum_{k=0}^j z_k \cdot b_{j-k}$$

O de otra forma:

$$q_{ext}(n\Delta t) = T_{ext}(n\Delta t) \cdot ax_o - T_{int}(n\Delta t) \cdot ay_o + historia_q_{ext} T_{ext} - historia_q_{ext} T_{ext} - historiaq_{ext}$$

$$q_{int}(n\Delta t) = T_{ext}(n\Delta t) \cdot ay_o + T_{int}(n\Delta t) \cdot az_o + historia_q_{int} T_{ext} - historiaq_{int} T_{int} - historiaq_{int}$$

Esta última forma de cálculo es la empleada, por ejemplo, por EnergyPlus®.

Anexo 4: Obtención de los factores de respuesta de muros a una excitación diaria (24 h)

La expresión que proporciona la cantidad de calor que llega por conducción a través de un muro al interior de un espacio como se vio es:

$$q_h = -\sum_{j=0}^n Z_j \cdot T_{i,h-j\Delta t} + \sum_{j=0}^n Y_j \cdot T_{e,h-j\Delta t}$$

$q_h \equiv [W/m^2]$ flujo de calor por conducción ahora, en la hora h .

$T_{i,h-j\Delta t} \equiv$ temperatura interior hace j pasos de tiempo $\Delta t = 1$ hr.

$T_{e,h-j\Delta t} \equiv$ temperatura exterior hace j pasos de tiempo $\Delta t = 1$ hr.

$Z_j, Y_j \equiv$ factores de respuesta en el instante j .

$n \equiv$ es un número entero lo suficientemente grande en función de la respuesta del muro.

Dado que se busca la respuesta periódica las temperaturas se repiten cada 24 h por lo tanto las sumas se pueden reescribir por días así:

$$\begin{aligned} q_h = & -\sum_{j=0}^{23} Z_j \cdot T_{i,h-j\Delta t} + \sum_{j=0}^{23} Y_j \cdot T_{e,h-j\Delta t} + \dots \\ & -\sum_{j=24}^{47} Z_j \cdot T_{i,h-j\Delta t} + \sum_{j=24}^{47} Y_j \cdot T_{e,h-j\Delta t} + \dots \\ & -\sum_{j=48}^{71} Z_j \cdot T_{i,h-j\Delta t} + \sum_{j=48}^{71} Y_j \cdot T_{e,h-j\Delta t} + \dots \end{aligned}$$

y si se separa el primer término de las Z (lo mismo se haría con las Y),

$$\begin{aligned} q_h = & -Z_0 \cdot T_{i,h} - \sum_{j=1}^{23} Z_j \cdot T_{i,h-j\Delta t} + \sum_{j=0}^{23} Y_j \cdot T_{e,h-j\Delta t} + \dots \\ & -Z_{24} \cdot T_{i,h-24\Delta t} - \sum_{j=25}^{47} Z_j \cdot T_{i,h-j\Delta t} + \sum_{j=24}^{47} Y_j \cdot T_{e,h-j\Delta t} + \dots \\ & -Z_{48} \cdot T_{i,h-48\Delta t} - \sum_{j=49}^{71} Z_j \cdot T_{i,h-j\Delta t} + \sum_{j=48}^{71} Y_j \cdot T_{e,h-j\Delta t} + \dots \end{aligned}$$

por la periodicidad de las temperaturas $T_{i,h} = T_{i,h-24} = T_{i,h-48} = \dots$ así recombina los coeficientes tenemos los coeficientes periódicos buscados:

$$\begin{aligned} Z_{p0} &= Z_0 + Z_{24} + Z_{48} + Z_{72} + \dots \\ Z_{p1} &= Z_1 + Z_{25} + Z_{49} + Z_{73} + \dots \\ &\dots \\ Z_{p23} &= Z_{23} + Z_{47} + Z_{71} + Z_{95} + \dots \end{aligned}$$

de igual manera se haría para las Y . Esto significa que sólo hacen falta 24 coeficientes para el caso de periodicidad diaria. Finalmente, la expresión para el calor que pasa cada hora sería:

$$q_h = -\sum_{j=0}^{23} Z_{pj} \cdot T_{i,h-j\Delta t} + \sum_{j=0}^{23} Y_{pj} \cdot T_{e,h-j\Delta t}$$

$q_h \equiv [W/m^2]$ flujo de calor por conducción ahora, en la hora h .

$T_{i,h-j\Delta t}$ $\equiv$ temperatura interior hace j pasos de tiempo $\Delta t = 1$ hr.

$T_{e,h-j\Delta t}$ $\equiv$ temperatura exterior hace j pasos de tiempo $\Delta t = 1$ hr.

Z_{pj}, Y_{pj} $\equiv$ factores de respuesta en el instante j .

Si la temperatura interior se asume constante y dado que la suma de la serie de la Y_j es igual a la suma de la serie de las Z_j la expresión anterior se puede reducir a:

$$q_h = \sum_{j=0}^{23} Y_{pj} \cdot (T_{e,h-j\Delta t} - T_i)$$

$q_h \equiv [W/m^2]$ flujo de calor por conducción ahora, en la hora h .

$T_i \equiv$ temperatura interior constante.

Ejemplo de valores para tres tipo de muro:

	Espesor (mm)	Conductividad (W/mK)	Densidad (kg/m³)	Cp (J/kgK)	Resistencia térmica (m²K/W)
Muro 1. $U = 0.7$ (W/m²K)					
Conv. ext	–	–	–	–	0.059
Hormigón	50	1.731	2243	841	–
Aislante	51	0.043	91	841	–
Yeso	20	0.727	1922	841	–
Conv. Int.	–	–	–	–	0.121
Muro 1. $U = 0.356$ (W/m²K)					
Conv. ext	–	–	–	–	0.059
Ladrillo	100	1.333	2002	921	–
Bloque Hor.	300	0.138	304	841	–
Aislante	15	0.043	91	841	–
Yeso	20	0.727	1922	841	–
Conv. Int.	–	–	–	–	0.121
Muro 3. $U = .29$ (W/m²K)					
Conv. ext	–	–	–	–	0.059
Ladrillo	100	1.333	2002	921	–
Aislante	125	0.043	91	841	–
Hormigón	300	1.731	2243	841	–
Yeso	20	0.727	1922	841	–
Conv. Int.	–	–	–	–	0.121

$T_{e,h-j\Delta t}$ $\equiv$ temperatura exterior hace j pasos de tiempo $\Delta t = 1$ hr.

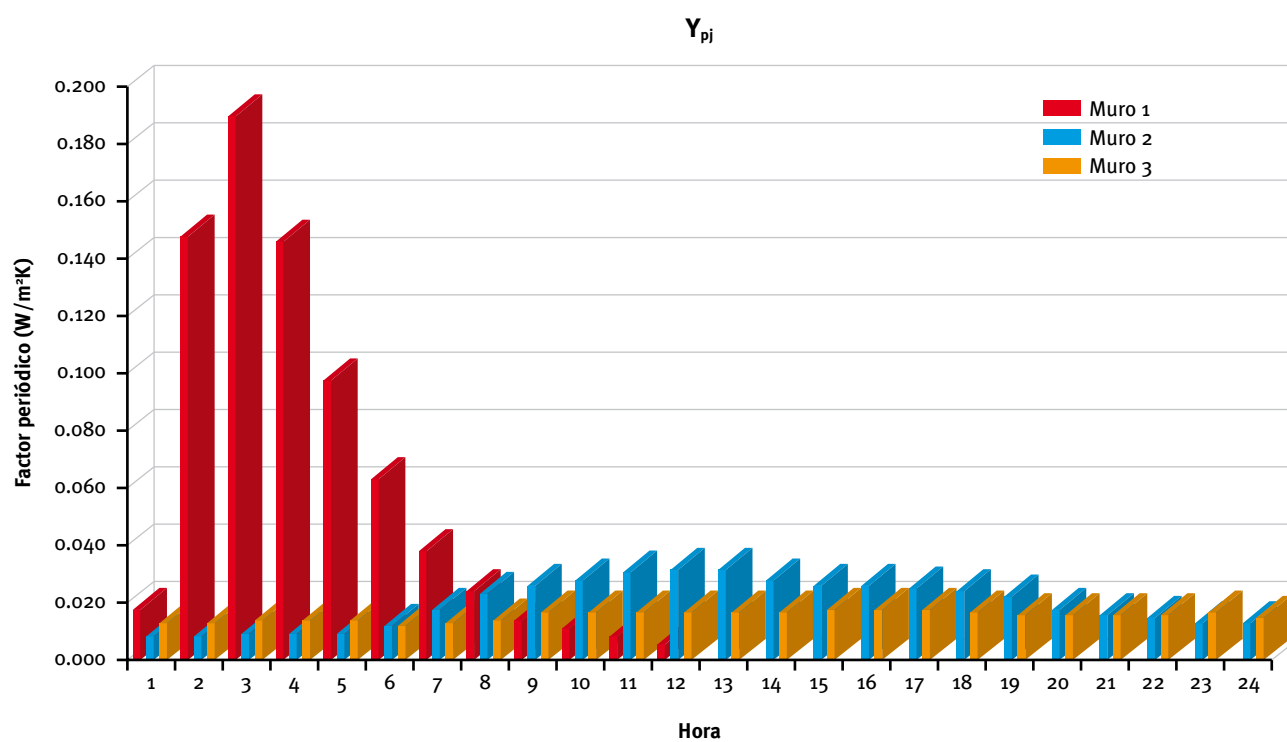
Z_{pj}, Y_{pj} $\equiv$ factores de respuesta en el instante j .

Esta sería la respuesta del calor por conducción que llega al interior ante una excitación en la temperatura exterior de tipo periódico, con periodo de 24h.

Del mismo modo, la respuesta del muro ante variaciones de la temperatura interna fijando la externa a un mismo valor (o por ejemplo).

$$q_h = - \sum_{j=0}^{23} Z_{pj} \cdot T_{i,h-j\Delta t}$$

$q_h \equiv [W/m^2]$ flujo de calor por conducción ahora, en la hora h .



Anexo 5: Respuesta por el método de la transición de estados

La razón de este apéndice es mostrar otra forma de proceder cuando se pretende hacer simulaciones. En este caso se ha aplicado a un muro.

Los métodos con más antigüedad, como DOE2, usan una frecuencia de muestreo en todo el proceso fija.

La alternativa más evidente es hacer el tiempo muestreo variable, incluso adaptativo según las necesidades. Programas más recientes (adaptaciones del anterior) permiten cambiar el tiempo de muestreo, como el EnergyPlus. Incluso usa cierta forma de adaptación del paso del tiempo a los cambios basada en el método de los factores de respuesta haciendo interpolaciones.

En general, el problema aparece por la rigidez debida a partes del sistema que reaccionan muy rápido (tiempos característicos cortos o frecuencias –polos– altos).

Otra posibilidad muy reciente, consiste en cambiar el punto de vista. En lugar de observar los eventos como simultáneos (sinónimo de: “todos inciden en un instante dado”, singularidad temporal), lo cual crea problemas al necesitar de la resolución de sistemas de ecuaciones, se plantea la posibilidad de ir resolviendo los eventos de forma independiente, que van dejando su impronta en el tiempo. La cadena de eventos (numerados por la secuencia temporal) da como resultado la simulación. La simultaneidad se rompe y queda relegada al interior de los componentes de un sistema de simulación. Así, cada componente es llamado en función de sus necesidades de reacción ante las excitaciones. Se trata de mirar al sistema desde sus señales de salida y no desde el eje temporal “universal” para todos los componentes. Esta forma de proceder, adicionalmente permite una mejor gestión de controles bruscos (tipo todo-nada, por ejemplo).

En esa dirección, a continuación se muestra cómo se puede obtener un modelo de respuesta de un muro,

usando la teoría básica desarrollada en el Anexo sobre funciones de respuesta de muros, de forma que el paso de tiempo pueda ser elegido. (Por ejemplo, bien en función de una señal de entrada cambiante rápidamente –temperatura– o mejor, en función de lo cambiante que sea su señal de salida –flujo de calor).

Método de transición de estados

Como se vio en el apéndice sobre la respuesta de un muro ante excitaciones de temperatura, la respuesta general temporal de un muro ante un escalón de temperatura tiene la forma general (expresada en forma temporal). Esta es la respuesta en flujo de calor dentro o fuera ante una excitación de temperatura dentro o fuera.

$$\Phi(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-x_k t}$$

Si en lugar de usar esta respuesta indicial (que contiene toda la dinámica del muro y, por lo tanto, supone calcular los polos como se vio anteriormente) se corta la serie infinita de algún modo, escogiendo los tiempos de respuesta y los residuos A_k o bien cortanto a partir de cierto término de la serie; Ozaki y Watanabe (OJO) propusieron otra “función generalizada” que representa la respuesta en flujo de calor del muro y cuya integral coincide con toda la energía que pasa. Para ello, la energía asociada a los términos que cortan la concentran en un pulso en $t=0$ (digamos que envía de golpe una pequeña cantidad de energía –la cortada– y luego va enviando el resto). La expresión queda:

$$\Phi(t) = A_0 + \sum_{k=1}^m A_k e^{-x_k t} + Q\delta(t)$$
$$Q = \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{A_k}{x_k} \text{ [J/m}^2 \text{ K]}$$

A_0 es la conductividad térmica $U(W/m^2K)$ del muro. Se demuestra fácilmente, ya que cuando haya pasado mucho tiempo y se alcance el estacionario, la suma de exponenciales vale cero y queda sólo la conductividad del muro. La razón para la expresión de Q se obtiene si se integra la energía asociada al modo k :

$$\text{Energía}_k = \int_0^{\infty} A_k e^{-x_k t} dt = A_k \left[\frac{e^{-x_k t}}{-x_k} \right]_0^{\infty} = A_k \left[0 - \frac{1}{-x_k} \right] = \frac{A_k}{x_k}$$

Para este nuevo modelo cuya respuesta ante un escalón de temperatura definimos tiene una transformada de Laplace:

$$L(\Phi(t)) = L\phi(s) = \frac{A_0}{s} + \sum_{k=1}^m \frac{A_k}{s+x_k} + Q$$

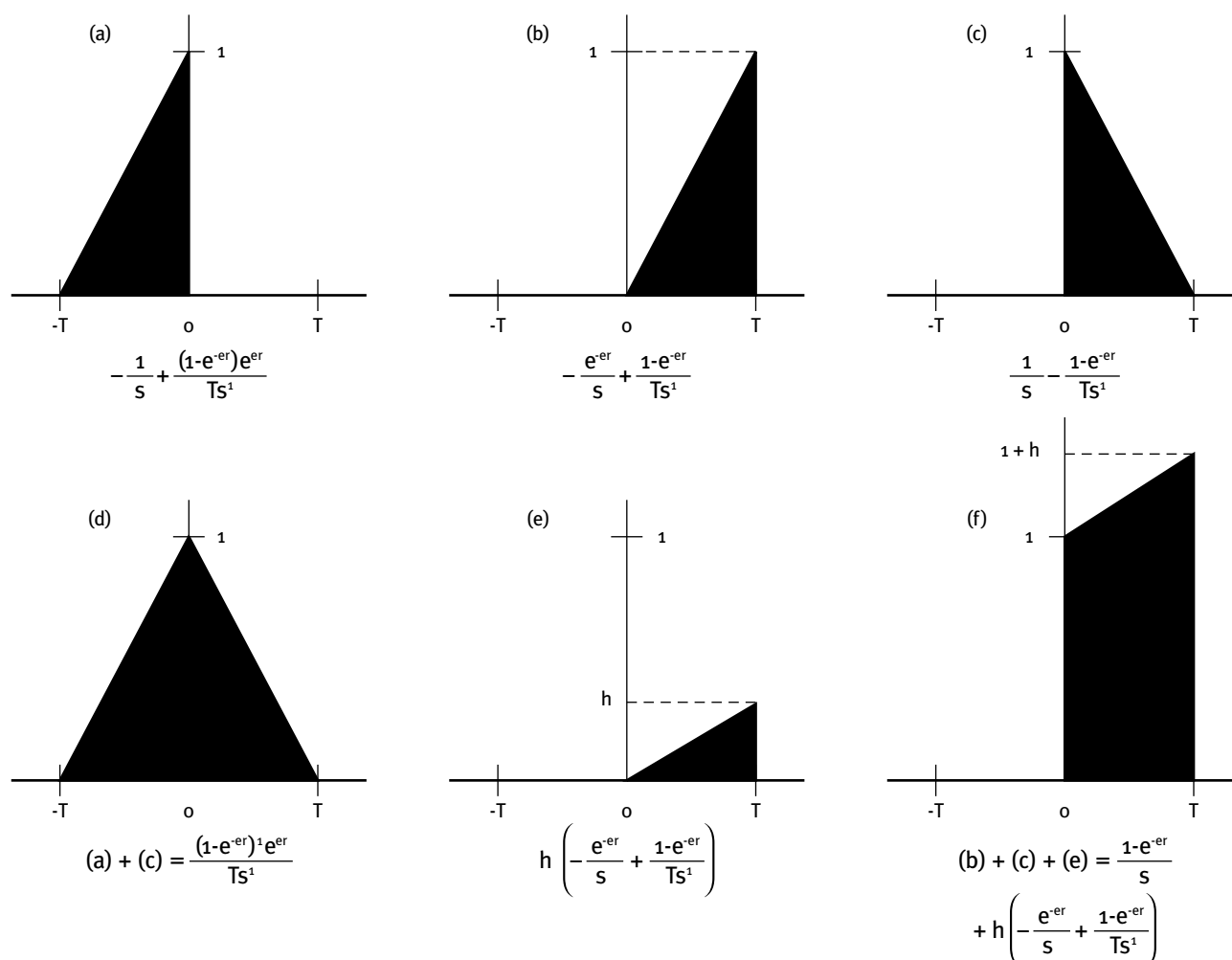
Se puede obtener su función de transferencia (respuesta ante un impulso de temperatura, en lugar de un

escalón) derivando la función respecto al tiempo. Parece difícil hacer la derivada de un pulso de Dirac, pero en transformada de Laplace es sencillo, basta multiplicar por s para obtener la transformada de la función derivada, de manera que:

$$L(\Phi(t)) = L\phi(s) = A_0 + \sum_{k=1}^m \frac{A_k s}{s+x_k} + Qs = G(s)$$

Como se vio, las señales de entrada son muestreadas y se aplican a un elemento formador (en inglés hold function). Como ahora se pretende poder variar la cadencia de la señal de entrada según la necesidad, se precisa de otro tipo de función: una trapezoidal (véase el dibujo). Tiene además la ventaja de eliminar el triángulo rojo, que es innecesario cuando la señal de entrada se corta. Ante una señal de entrada u , se cumple la relación siguiente necesaria para la entrada al elemento formador trapezio:

$$h \cdot u_n = u_{n+1} - u_n$$





La función de transferencia Z ante esta excitación trapecio unitario (salto 1°C en $t=0$ con cierta pendiente $(1+h)/T$), parametrizada por h , de forma similar a lo que ocurría con el triángulo se puede obtener muestreando la señal de salida y transformándola con Laplace (definición de transformada Z):

$$G(z) = Z \left\{ G(s) \cdot G_{\text{trapecio_unitario}}(s) \right\}$$

$$G(z) = A_0 + \sum_{k=1}^m \frac{A_k \cdot (1-z^{-1})}{1-e^{-x_k T} z^{-1}} + h \cdot \sum_{k=1}^m \frac{A_k (1-e^{-x_k T} - x_k T)}{x_k T} \cdot \frac{z^{-1}}{1-e^{-x_k T} z^{-1}} + \frac{Q}{T} (1-z^{-1})$$

$$T = \Delta t = \text{paso de tiempo}$$

Ante una señal de entrada $U(z)$ se obtiene una de salida $Y(z)$:

$$Y(z) = G(z) \cdot U(z)$$

Si en la expresión anterior cada sumando se estudia por separado, se tiene:

$$Y(z) = G(z) \cdot U(z) = A_0 U(z) + \sum_{k=1}^m W_k(z) + \frac{Q}{T} (1-z^{-1}) \cdot U(z)$$

$$W_k(z) = \left[\frac{A_k \cdot (1-z^{-1})}{1-e^{-x_k T} z^{-1}} + h \cdot \frac{A_k (1-e^{-x_k T} - x_k T)}{x_k T} \cdot \frac{z^{-1}}{1-e^{-x_k T} z^{-1}} \right] \cdot U(z)$$

Los w_k se definen como los estados internos del muro (puede haber otras definiciones). Si se igualan, como siempre, los coeficientes de los términos del mismo grado en los polinomios en z^{-1} , se obtiene la siguiente ecuación en diferencias:

$$W_{k,0} = A_k \cdot u_0$$

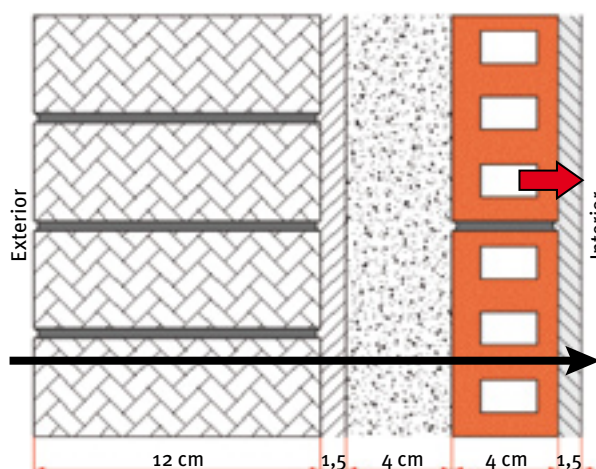
$$W_{k,n} = e^{-x_k T} W_{k,n-1} + \frac{A_k (1-e^{-x_k T})}{x_k T} (u_n - u_{n-1})$$

donde se ha hecho uso de la relación $h_{u,n-1} = u_n - u_{n-1}$. Relaciona los valores muestreados en $n-1$ con los nuevos valores en n . Se basa sólo en el instante anterior, de ma-

nera que el paso de tiempo puede cambiar. La solución final sería:

$$y_n = A_0 \cdot u_n + \sum_{k=1}^m W_{k,n} + \frac{Q}{T} (u_n - u_{n-1})$$

Veamos cómo se aplica en la práctica. Imaginemos que deseamos saber el flujo interior de conducción debido a cambios exteriores e interiores de temperatura. De forma que llamamos a las respuestas parciales q_{ii} y q_{ie} , flujo de calor (W/m^2) en el interior por conducción debido a cambios de temperatura en el interior y en el exterior respectivamente. La respuesta total es q_i



Tenemos pues:

$$q_{ii,n} = A_o \cdot T_{i,n} + \sum_{k=1}^m W_{k,n}^{ii} + \frac{Q^{ii}}{T} (T_{i,n} - T_{i,n-1})$$

$$q_{ie,n} = A_o \cdot T_{e,n} + \sum_{k=1}^m W_{k,n}^{ie} + \frac{Q^{ie}}{T} (T_{e,n} - T_{e,n-1})$$

$$q_{i,n} = q_{ii,n} \cdot q_{ie,n}$$

$$W_{k,n}^{??} = e^{-x_k t} \cdot W_{k,n-1}^{??} + \frac{A_k^{??}(1-e^{-x_k t})}{x_k T} (T_{-,n} - T_{-,n-1})$$

Se ha escrito de forma general la evolución de los estados. El residuo A_o es el mismo siempre (la conductividad), los polos o frecuencias características también, pero el resto de residuos dependen de la localización de la excitación y la respuesta, por eso se ha puesto doble interrogación (??).

Una serie de definiciones simplificarán la formulación:

$$\varphi_k = e^{-x_k t}$$

$$p_k = \varphi_k - \frac{(1-\varphi_k)}{x_k T} = \varphi_k - 1 - q_k, \quad 1 + q_k = \frac{(1-\varphi_k)}{x_k T}$$

$$a_{??} = A_o + \sum_{k=1}^m A_k^{??} \cdot (1 + q_k) + \frac{Q^{??}}{T}$$

$$b_{??} = \sum_{k=1}^m A_k^{??} \cdot p_k - \frac{Q^{??}}{T}$$

$$D_{n-1}^i = \sum_{k=1}^m \varphi_k W_{k,n-1}^i + b_{ii} \cdot T_{i,n-1} - b_{ie} \cdot T_{e,n-1}$$

Una forma “resumida” de calcular es usando la expresión propuesta por Watanabe:

$$q_{i,n} = a_{ii} \cdot T_{ii,n} - a_{ie} \cdot T_{ie,n} + D_{n-1}^i$$

los estados se actualizan con:

$$W_{k,n}^{ii} = \varphi_k W_{k,n-1}^{ii} + p_k (A_k^{ii} T_{i,n-1} - A_k^{ie} T_{e,n-1}) + q_k (A_k^{ii} T_{i,n-1} - A_k^{ie} T_{e,n-1})$$

Pero, para mayor claridad, veamos un poco más en detalle el proceso de cálculo. El flujo de calor total será:

$$q_{i,n} = A_o \cdot T_{e,n} + \sum_{k=1}^m W_{k,n}^{ie} + \frac{Q^{ie}}{T} (T_{e,n} - T_{e,n-1}) + A_o \cdot T_{i,n} + \sum_{k=1}^m W_{k,n}^{ii} + \frac{Q^{ii}}{T} (T_{i,n} - T_{i,n-1})$$

$$q_{i,n} = A_o \cdot T_{e,n} + A_o \cdot T_{i,n} + \sum_{k=1}^m W_{k,n}^{ie} + W_{k,n}^{ii} + \frac{Q^{ie}}{T} (T_{e,n} - T_{e,n-1}) + \frac{Q^{ii}}{T} (T_{i,n} - T_{i,n-1})$$

$$W_{k,n}^i = W_{k,n}^{ie} + W_{k,n}^{ii}$$

$$W_{k,n}^i = W_{k,n-1}^i \cdot \varphi_k + A_k^{ie} \frac{1-\varphi_k}{x_k T} [T_{e,n} - T_{e,n-1}] + A_k^{ii} \frac{1-\varphi_k}{x_k T} [T_{i,n} - T_{i,n-1}]$$

en definitiva, la evolución del estado k-ésimo del lado interior es:

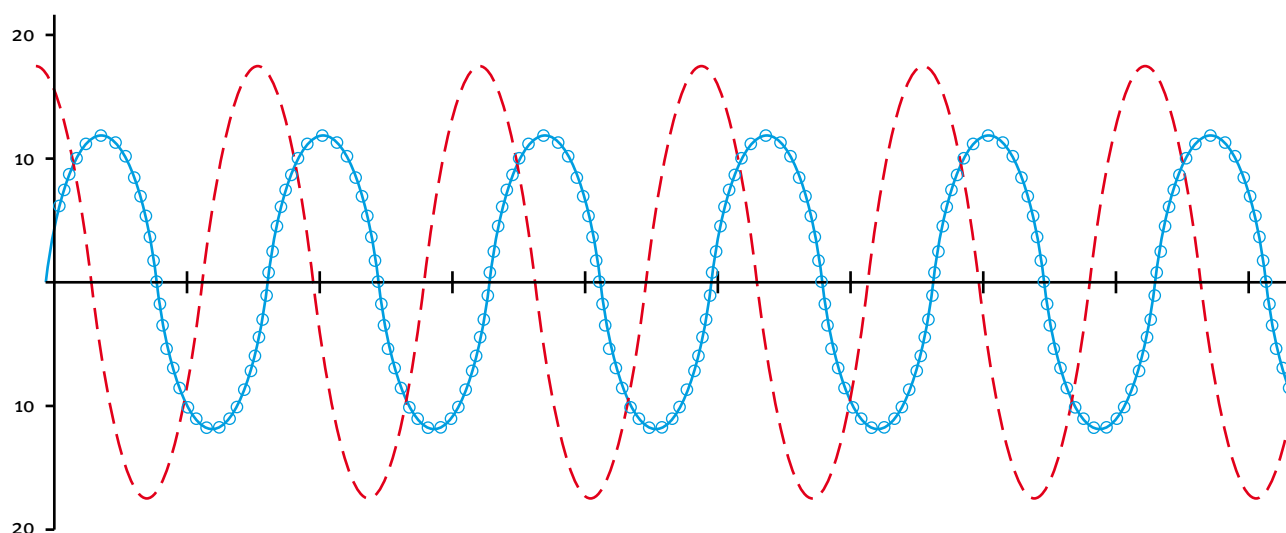
$$W_{k,n}^i = W_{k,n-1}^i \cdot \varphi_k + \frac{1-\varphi_k}{x_k T} [(A_k^{ie} T_{e,n} - A_k^{ii} T_{i,n}) - (A_k^{ie} T_{e,n-1} - A_k^{ii} T_{i,n-1})]$$

que junto con la ecuación:

$$q_{i,n} = A_o \cdot T_{e,n} + A_o \cdot T_{i,n} + \sum_{k=1}^m w_{k,n}^i + \frac{Q^{ie}}{T} (T_{e,n} - T_{e,n-1}) + \frac{Q^{ii}}{T} (T_{i,n} - T_{i,n-1})$$

forman la base del método para obtener la evolución del flujo de calor interior. La forma de proceder sería:

- 1 Se ponen los estados a cero. $w_{k,0}^i = 0$. $n = 0$.
- 2 Se establece un paso de tiempo $T = \Delta t$ (que puede ir cambiando). $n = n + 1$.
- 3 Se calculan los $\{\varphi_k\}$ con este paso de tiempo.
- 4 Se calcula la evolución de los m k -estados interiores con las temperaturas anteriores y la nuevas temperaturas (dentro y fuera). $\{w_{k,n}^i\}$.
- 5 Se suman los estados y con la ecuación $q_{i,n}$ se evalúa el flujo de calor interno.
- 6 Se repite el proceso desde el punto 2.



La gráfica muestra el resultado del cálculo ante una señal senoidal de temperatura fuera de $10\text{ }(^{\circ}\text{C})$ de amplitud y media $0\text{ }(^{\circ}\text{C})$. En rojo (discontinuo) se muestra la respuesta suponiendo que el muro no acumula energía (respuesta instantánea suponiendo que sólo depende de la conductividad y en fase con la oscilación exterior de temperatura).

En azul (continua) se muestra el cálculo exacto, que en el caso senoidal es posible. La respuesta es senoidal, pero se encuentra desfasada en el tiempo (retrasada) y el pico (valor máximo) se ha reducido respecto al anterior (ver introducción). Este es el efecto del parámetro RC.

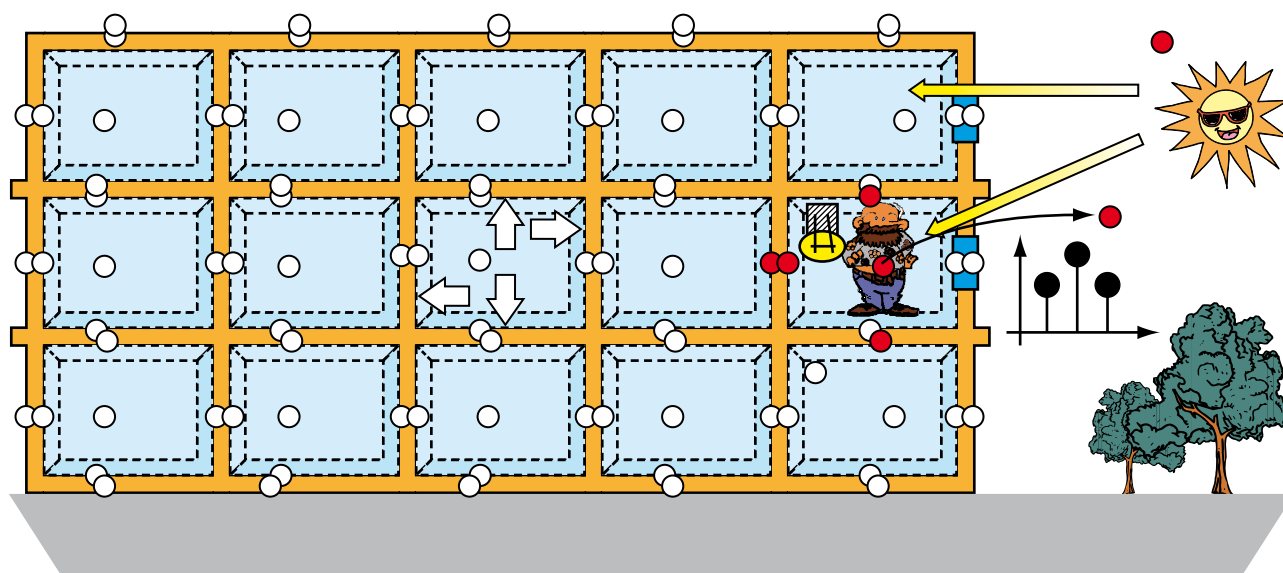
Por último, los círculos muestran el valor obtenido con el método anterior. Se puede observar que concuerdan bastante bien. Además, los valores muestrados se puede ver que no están igualmente espaciados en el tiempo. Están más próximos en las crestas. La señal de entrada de temperatura se ha muestreado de manera que cada vez que la temperatura exterior cambia, una cierta cantidad se “inyecta” en el muro para ver su respuesta. El proceso de simulación está controlado, en este caso, por la señal de entrada, no por el tiempo.

Finalmente, indicar que del mismo modo se haría con la señal de flujo de calor en el exterior. Cada señal llevaría un “juego” de estados asociados que deberían ser actualizados en cada llamada.

Anexo 6: Apéndice. Factores de respuesta de una zona

En este apéndice se incluye una discusión sobre el concepto de factores de respuesta de una zona. La idea es intentar profundizar en algunos conceptos muy usados en la literatura de simulación y cálculo de cargas térmicas de edificios por ordenador.

Como su nombre indica, la intención es obtener pares (excitación, respuesta) muestreados cada cierto tiempo (1 hora). Esta cadencia es el ritmo “universal” del cual se intenta obtener “fotografías” de la evolución de todo el proceso. Para ello se debe componer para la zona el sistema de ecuaciones que contengan aquellas variables que influyen sobre la temperatura de la zona. Como se comentó en el texto, relaciones de influencia muy alejadas se desprecian.



Los procesos que se consideran son:

- 1) Conducción hacia la superficie interior que da al volumen (muros, ventanas, muebles, etc.).
- 2) Convección desde las superficies interiores al aire asociado al volumen.
- 3) Radiación de onda larga OL entre las superficies.
- 4) Fuentes radiantes que inciden en el interior: solar y luces.
(Se puede ampliar la cantidad de procesos considerados: ocupantes, infiltración, etc.).

Bien, para un instante de muestreo $n\Delta t$ (en adelante n) cada superficie interior que da al volumen de la zona debe cumplir el balance (todo son “numeritos” de las magnitudes u objetos físicos evaluados en el instante n , y su sentido positivo es “llegando” a la superficie interior, por unidad de área):

$$(q_{conv,j} + q_{rad,OL} + q_{cond,j} + q_{entrada,j})n = 0$$

De izquierda a derecha son: calor por convección (W/m^2), calor proveniente del intercambio radiante entre las superficies (nota: los cristales son, a estos efectos, opacos), calor por conducción y calor recibido debido al Sol o a luces.

$$q_{conv,j}(n) = h_{int}(T_{local}(n) - T_j(n))$$

$$q_{radOL,j}(n) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{i,j}^* \cdot A_j} (T_i(n) - T_j(n))$$

Para la obtención del flujo de radiación se usó el circuito estrella (ver texto).

$$q_{cond,j}(n) = \sum_{m=0}^{\infty} -y_{j,m} \cdot T'_j(n-m) + \sum_{m=0}^{\infty} z_{j,m} \cdot T_j(n-m)$$

Para la conducción se han usado los factores de respuesta Y y Z del muro j . T'_j representa la historia de las temperaturas en la superficie “pareja” de la superficie j .

Si se tratara de un cristal, se supone que apenas acumula energía, de modo que la ecuación sería:

$$q_{cond,j}(n) = U_{cristal}(T'_j(n) - T_j(n))$$

Substituyendo en la primera ecuación y dejando a un lado las incógnitas tenemos:

$$\left[z_{j,0} - h_{int} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{i,j}^* \cdot A_j} \right] \cdot T_j(n) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{i,j}^* \cdot A_j} \cdot T_i(n) = - \sum_{m=1}^{\infty} z_{j,m} \cdot T_j(n-m) + \sum_{m=0}^{\infty} y_{j,m} \cdot T'_j(n-m) - h_{int} \cdot T_{local}(n) - q_{e,j}(n)$$

Existe una ecuación como esta por cada “objeto físico” asociado a una superficie que delimita el volumen. Para obtener el valor global se debe aplicar dicho objeto sobre la superficie (multiplicar la ecuación anterior por el área de j con el signo correcto).

Las temperaturas interiores $T(n)$ están ligadas por la parte de radiación de onda larga.

Si se tratara un cerramiento que diera al exterior, la ecuación sería usando el concepto de $T_{sol-aire}$ y teniendo en cuenta que los factores son ahora X e Y:

$$(q_{sol-aire} + q_{cond,j})_n = 0$$

$$(y_{j,o} - h_{eq}) \cdot T_j(n) = - \sum_{m=1}^{\infty} y_{j,m} \cdot T_j(n-m) - \sum_{m=0}^{\infty} x_{j,m} \cdot T'_{sol-airej}(n-m) - h_{eq} T_{sol-aire}(n)$$

La definición de función de transferencia es la respuesta del sistema ante una excitación impulso cuando inicialmente todo está a cero (todas las temperaturas a 0 °C). Si se trata de un sistema continuo es una Delta de Dirac; si se trata de un sistema muestreado la señal de entrada es 1, pero en los intervalos de muestreo la señal puede variar como quiera. Como se vio, eso depende del elemento formador. El estándar que usa la literatura es un triángulo.

El conjunto de ecuaciones de balance de energía para cada superficie se puede escribir en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1N} \\ C_{21} & C_{22} & & \\ \dots & & & \\ C_{N1} & C_{N2} & \dots & C_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1(n) \\ T_2(n) \\ \dots \\ T_N(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1(n) \\ B_2(n) \\ \dots \\ B_N(n) \end{bmatrix}$$

Con,

$$C_{jj} \left[z_{j,o} - h_{int} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{i,j}^* \cdot A_j} \right]$$

$$C_{j,i} = \frac{G_{j,i}^*}{A_j}$$

$$B_j = - \sum_{m=1}^{\infty} z_{j,m} \cdot T_j(n-m) - h_{int} T_{local}(n) - q_{e,j}(n)$$

Donde se ha hecho:

$$T'_j(n-m) = 0$$

ya que, como se ha dicho, para obtener la funciones de transferencia se pone todo a cero (las temperaturas vecinas también). Nótese que el vector independiente B es función de la historia previa de los cerramientos, de la temperatura que tenga el local en ese momento y de otras excitaciones: el Sol, las luces, etc.

La matriz (C) es constante, de modo que una vez calculada se puede invertir para despejar las temperaturas de las superficies.

$$[T]_i = [C]^{-1} [B]_i = [D] [B]_i$$

La ecuación del balance para el volumen V de aire (con cierta densidad y capacidad calorífica 1 kJ/kgK aproximadamente) que tendría sólo en cuenta los aportes convectivos sería:

$$\frac{dT_{local}}{dt} = \frac{(Q_{conv} - Q_{sistema})}{\rho V c_p}$$

donde:

$$Q_{conv} = \sum_{i=1}^N A_i \cdot h_i \cdot (T_i + T_{local})$$

Si aproximamos la derivada de la T local tenemos:

$$T_{local}(n) - T_{local}(n-1) \cdot \frac{\rho V c_p}{\Delta t} = \sum_{i=1}^N A_i \cdot h_i (T_i(n) - T_{local}(n)) = Q_{sistema}$$

$$Q_{sistema} = \sum_{i=1}^N A_i \cdot h_i \cdot T_i(n) - \left[\frac{\rho V c_p}{\Delta t} + \sum_{i=1}^N A_i \cdot h_i \right] \cdot T_{local}(n) + \frac{\rho V c_p}{\Delta t} T_{local}(n-1)$$

El sistema matricial y esta última ecuación nos dan la solución al problema planteado. Por ejemplo, si se deseara saber los factores de respuesta de las ganancias de calor (en inglés se conoce como heat-gain weighting factors), ¿cómo habría que proceder? Esto es, cuando existe una ganancia de calor en la zona, ¿cómo pasa finalmente a ser carga de refrigeración para el sistema $Q_{sistema}$? Tenemos en este caso un par (excitación=pulso de energía –potencia–, respuesta=potencia)

Bien, imaginemos que la entrada es una señal de radiación procedente del Sol. Habitualmente, los programas de simulación (CALENERVp o LIDER, DOE2) hacen un reparto fijo entre las superficies internas de esta señal de entrada. Así, dicho reparto, dado que queremos saber los factores de respuesta, debe sumar 1 (pulso unitario).

$$\sum_{i=1}^N q_{e,i} = 1$$

Todas las demás señales deben permanecer a cero, incluida la temperatura del local.

Con la ecuación matricial se van calculando en los intervalos de muestreo las temperaturas interiores, y con la ecuación del aire se calcula el ritmo al cual la energía va pasando al aire y se convierte en carga para el sistema.

Es algo así como disparar el flash de una cámara en la habitación a oscuras, y con un sensor muy sensible ver cómo la energía del flash va al aire de la habitación $T_{local} = 0^\circ\text{C}$ y nuestro equipo va sacando la energía que pasa al aire. Nota: no toda la energía del “flash” pasará al aire, parte escapará a través de los cerramientos.

Otra relación muy importante es lo que en la literatura inglesa llaman air-temperature weighting factors. En este caso la excitación la producimos en la temperatura del local (de la zona). Subimos la temperatura 1°C en un paso de tiempo, y al siguiente vuelve a cero. La respuesta la observamos en la cantidad de energía del sistema de nuevo. Así tenemos ahora el par (excitación=temperatura del local, respuesta = $Q_{sistema}$). Ahora no existe nada (todo a cero) salvo el cambio de la temperatura del local. ¿Qué significa ahora la respuesta $Q_{sistema}$? El $Q_{sistema}$ es el valor que nos permite mover la temperatura del local al ritmo impuesto por el impulso. Cuando subimos la temperatura, inicialmente necesitamos del sistema para hacerlo. Al tiempo parte del calor del aire va pasando a los cerramientos y para seguir aumentando la temperatura necesitamos dar más potencia al sistema. Finalmente, cuando la temperatura empieza a bajar, el sistema reducirá su potencia porque los cerramientos (más calientes) le empezarán a devolver calor. Si el enfriamiento fuera muy acelerado podría necesitarse, por parte del sistema, de potencia adicional para enfriar al ritmo impuesto. (Nota: recuerdo al lector que, por la forma como se ha construido la respuesta, las excitaciones poseen un triángulo como elemento formador).

Los valores de las respuestas (calor w) en ambos casos con una cadencia de un paso de tiempo (1 hora) serían los factores de respuesta.

Para no tener que almacenar muchos de estos valores, como se mostró en el apéndice sobre los muros, se usa la matriz de transferencia en transformada Z (que no es más que expresar los valores de la respuesta usando unos cuantos valores previos de la entrada y otros tanto de la respuesta). Así, la respuesta muestreada sería:

$$Q(z) = d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots$$

$$d_0 = Q(0), d_1 = Q(\Delta t), d_2 = Q(2\Delta t), \dots$$

En el caso de ser la respuesta a un pulso serían los factores de respuesta.

La función de transferencia para la ganancia de calor la suelen representar en la literatura (CALENER-GT o DOE2) como:

$$H_q(z) = \frac{Q_{\text{sist}}(z)}{q(z)} = \frac{v_0 + v_1 z^{-1} + v_2 z^{-2}}{1 + w_1 z^{-1} + w_2 z^{-2}}$$

La función de transferencia del aire del local la representan:

$$H_T(z) = \frac{Q_{\text{sist}}(z)}{T_{\text{local}}(z)} = \frac{g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + g_3 z^{-3}}{1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}}$$

Nótese que los polinomios de cociente y denominador no son infinitos. Por lo tanto, se está asumiendo un orden finito (número de modos de respuesta) para ambas señales y, por lo tanto, a partir de cierto instante los valores muestreados d (bien debidos a una ganancia de calor q , bien debidos a cambios de temperatura del local T) se considera que caen según una razón común $Q(n)/Q(n-1)=c$. Veamos cómo se puede usar esta razón común para pasar de la expresión en factores de respuesta (infinitos términos) a la expresión en transformada Z. Atención: la forma de estas matrices y el número de términos usados es algo arbitrario que han fijado los programas basados en la experiencia.

Supongamos que se tiene una función $H(z)$ así:

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots}$$

La respuesta $r(z)$ ante una entrada $e(z)$ se calcularía igualando los polinomios como:

$$H(z) = \frac{\text{Respuesta}(z)}{\text{Entrada}(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots}$$

$$(r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} + \dots)(b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots) = (a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots)(e_0 + e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2} + \dots)$$

$$r_0 = \frac{1}{b_0}(a_0 e_0)$$

$$r_1 = \frac{1}{b_0}(a_0 e_1 + a_1 e_0 - b_1 r_0)$$

...

$$r_n = \frac{1}{b_0}(a_0 e_n + a_1 e_{n-1} + a_2 e_{n-2} + \dots - b_1 r_{n-1} - b_2 r_{n-2} - \dots - b_n r_0)$$

o

$$b_0 r_n = \sum_{i=0}^n a_i e_{n-i} - \sum_{i=1}^n b_i r_{n-i}$$

Esto ya se vio en la parte dedicada a muros. La idea es ver la forma de la expresión. Allí también se vio que cuando se usan los factores de respuesta (sólo la excitación) para ver la respuesta y a partir de cierto instante se usa la razón común, la expresión tomaba la forma (d_i ahora son los factores de respuesta):

$$r_n - cr_{n-1} = d_0 e_n + \sum_{k=1}^m (d_k - cd_{k-1}) e_{n-k} = d'_0 e_n + \sum_{k=1}^m d'_{n-k} e_{n-k}$$

Si se comparan ahora las expresiones anteriores se descubren los valores de a_i y b_i .

$$H(z) = \frac{d_0 + d'_1 z^{-1} + d'_2 z^{-2} + \dots + d'_m z^{-m}}{1 - cz^{-1}}$$

¿Y si se volviera a aplicar el método pero ahora creando otra razón común con los d' , de forma que a partir de un cierto valor m_1 , con $1 \leq i \leq m_1 < m$, $d'_{i+1}/d'_i = c_1$? Pues se obtendría:

$$H(z) = \frac{d_0 + d'_1 z^{-1} + d'_2 z^{-2} + \dots + d'_{m_1} z^{-m_1}}{1 - (c+cl)z^{-1} + (c \cdot cl)z^{-2}}$$

$$d''_i = d'_i - c_1 d'_{i-1}$$

El DOE2 (probablemente CALENERVYP tampoco) no sigue este método para obtener la matriz de transferencia Z , lo que hacen es plantear un sistema de ecuaciones. Para la respuesta a la ganancia de calor se tiene:

$$d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots = \frac{v_0 + v_1 z^{-1} + v_2 z^{-2}}{1 + w_1 z^{-1} + w_2 z^{-2}}$$

$$v_0 = d_0$$

$$v_1 = d_1 + d_0 w_1$$

$$v_2 = d_2 + d_1 w_1 + d_0 w_2$$

$$0 = d_3 + d_2 w_1 + d_1 w_2$$

Pero existen 5 incógnitas (v_0, v_1, v_2, w_1, w_2). Falta una ecuación. ¿Cuál? Bien, se trata de un balance de energía final o global. Para ese balance hay que sumar toda la energía que el sistema ha debido extraer:

$$f = \sum_{i=0}^{\infty} d_i = \sum_{i=0}^m d_i + \sum_{k=0}^{\infty} d_{m+1+k} \cdot c^k = \sum_{i=0}^m d_i + \frac{d_{m+1}}{1-c} = \frac{v_0 + v_1 z^{-1} + v_2 z^{-2}}{1 + w_1 z^{-1} + w_2 z^{-2}}$$

El sentido de esta ecuación es que cuando la señal de entrada es constante, la respuesta también lo es (estado estacionario) de forma que para el caso de las ganancias de energía q , en estacionario, no toda la energía pasa al aire de la zona y debe ser extraído por el sistema, tan sólo una fracción f (menor que uno, ya que el pulso era unitario), el resto va saliendo de la zona y el equipo se lleva el resto (o sea f).

Imaginemos que llegamos a conocer los pesos $\{v_0, v_1, v_2, w_1, w_2\}$ para la respuesta del sistema ante las ganancias de calor de una zona concreta, y los pesos $\{g_0, g_1, g_2, g_3, p_1, p_2\}$ para la respuesta del sistema ante las alteraciones de temperatura de esa zona. La ecuaciones que relacionan respuestas con excitaciones son:

$$Q_{\text{sist}}(n) = Q(n) = Q_n = v_0 q_n + v_1 q_{n-1} + v_2 q_{n-2} - w_1 Q_{n-1} - w_2 Q_{n-2}$$

para la respuesta ante una ganancia de calor. (DOE2 al principio de la simulación repite tres veces el día 1 de Enero para obtener valores estacionarios de q y de Q y luego ya empieza con el año entero. Funciona si no existen elementos muy masivos en la zona).

Para la respuesta ante variaciones de la temperatura de la zona tenemos:

$$Q_{\text{sist}} = Q(n) = Q_n = g_0 T_{\text{local},n} + g_1 T_{\text{local},n-1} + g_2 T_{\text{local},n-2} + g_3 T_{\text{local},n-3} - p_1 Q_{n-1} - p_2 Q_{n-2}$$

Sin embargo, por la forma de calcular la simulación (ver texto) desacoplando sistemas y edificio, habitualmente se deseará saber cómo cambia la temperatura de la zona cuando el sistema actúa con cierta capacidad. Hay que despejar, pues, $T_{\text{local},n}$:

$$\left\{ Q_n + p_1 Q_{n-1} + p_2 Q_{n-2} - (g_1 T_{\text{local},n-1} + g_2 T_{\text{local},n-2} + g_3 T_{\text{local},n-3}) \right\} \frac{1}{g_0} = T_{\text{local},n}$$

De los pares (excitación, respuesta) queda claro que los pesos $\{v_0, v_1, v_2, w_1, w_2\}$ son adimensionales, al ser ambos potencias térmicas. Los tres primeros $\{v_0, v_1, v_2\}$ dependen del tipo de ganancia (luces, Sol, personas, etc.) y de los tipos constructivos de los elementos asociados al contorno de la zona. Los dos últimos $\{w_1, w_2\}$ contienen la información sobre la respuesta a largo plazo, por ello no dependen apenas del tipo de ganancia, pero sí de los elementos constructivos. De hecho, esta es la razón por la cual $\{w_1, w_2\}$ son muy parecidos a los valores $\{p_1, p_2\}$ de la otra excitación.

Los pesos $\{g_0, g_1, g_2, g_3\}$ si tienen unidades (W/K) son algo así como una conductancia térmica. Si mantuviésemos la temperatura del aire de la habitación siempre a 1°C , $T_n = T_{n-1} = T_{n-2} = T_{n-3} = 1$ (en lugar de producir un pulso –subir y bajar–) mientras todo lo demás está a cero, ¿cuál sería la respuesta Q estacionaria $Q_n = Q_{n-1} = Q_{n-2}$? Sería la cantidad de calor que el sistema debería extraer (en este caso aportar por lo tanto $Q_{\text{sist}} = Q$ sería negativo) para mantener el aire del local a 1°C . Por lo tanto:

$$\frac{Q}{T_{\text{local}}} = \frac{g_0 + g_1 + g_2 + g_3}{1 + p_1 + p_2} = U_{\text{Total}}$$

Es decir, la conductancia térmica total de la zona (el contacto total de la zona con su entorno). Esto implica que la U_{Total} no sólo debe contener las conductancias de todos los cerramientos, acristalamientos, cubiertas, etc. en paralelo, sino que debería incluir la infiltraciones (que se pueden tratar como un “contacto térmico” más).



Referencias

DOCUMENTOS Y LIBROS

- Drury Crawley, John W. Hand, Michaël Kummert, Brent T. Griffith. *Contrasting the capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs*. July 2005.
- *Energy conservation through building design*. Edited by Donald Watson. New York, etc.: McGraw-Hill, (S. a.: 1979). ISBN-007068460X.
- J. A. Clarke, Oxford [etc.]. *Energy simulation in building design*. Butterworth-Heinemann, 2001 ISBN-0750650826.
- *Building heat transfer*. Morris Grenfell Davies. Chichester: John Wiley, cop. 2004. ISBN- 047084731X- 9780470847312.
- Levermore, G.J. *Building energy mangement systems: applications to low-energy HVAC and natural ventilation control*. London: E & FN Spon, 2000 ISBN-0419225900.
- *Engineering Reference*. EnergyPlus. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energy-plus/pdfs/engineeringreference.pdf>
- *DOE2.1 Technical Reports*. Informes técnicos de DOE2. <http://gundog.lbl.gov/dirpubs/d2all.html>
- McQuiston ans Spitler. *ASHRAE Cooling and Heating load calculation manual*. 1991.
- Hittle D.C. Bishop R. *An improved root-finding procedure for use in calculating transient heat flow through multilayered slabs*. International Journal of Heat and Mass Transfer 26 (11), 1685-1693.415. 1983.

- Morris Grenfell Davies, John Wiley and Sons Ltd. *Building Heat Transfer*. ISBN-13:978-0-470-84731-2.
- Chris Underwood & Francis W.H. *Modelling methods for energy in buildings*. Yik. BlackWell Publishing.

EN INTERNET, SOFTWARE DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

- G-Maps. Modelización geométrica con base topológica. Universidad de Poitiers. <http://www.sic.sp2mi.univ-poitiers.fr/themes/ig/ig-05.php>
- Extensible Markup Language www.w3.org/XML/
- International Alliance for Interoperability (IFI) <http://www.iai-international.org/>
- Radiance <http://radsite.lbl.gov/radiance/home.html>
- Guías de la IEA –Agencia Internacional de la Energía para la validación de programas de simulación energética. <http://www.iea-shc.org/task22/publications/index.html>
- Directorio de software sobre simulación energética de edificios. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/
- COMIS <http://epb.lbl.gov/comis/> <http://www.arch.hku.hk/research/BEER/best.htm>

(IDA ICE – Indoor Climate and Energy)

<http://www.equa.se/ice/intro.html>

(PowerDomus)

http://www2.pucpr.br/educacao/lst/software_powerdomus.html

(Energy10)

<http://www.nrel.gov/buildings/energy10>

(eQUEST)

<http://www.doe2.com/equest>

(ESP-r)

<http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>

(HAP-Hourly Analysis Program)

<http://www.commercial.carrier.com>

(HEED- Home Energy Efficient Design)

<http://www.aud.ucla.edu/heed>

(IES <VE>- Virtual Environment)

<http://www.iesve.com>

(BLAST-Building Loads Analysis and System Thermodynamics tool)

<http://www.bso.uiuc.edu/BLAST>

(bSIM- Building Simulation)

<http://www.bsim.dk>

(DOE2.2)

<http://doe2.com/download/doe-22/>

<http://gundog.lbl.gov/>

<http://www.doe2.com>

(ECOTECT)

<http://www.ecotect.com>

<http://www.squ1.com>

(Ener-Win)

<http://members.cox.net/enerwin/>

(EnergyExpress)

<http://www.ee.hearne.com.au>

(SUNREL)

<http://www.nrel.gov/buildings/sunrel>

(TAS)

<http://www.edsl.net>

(TRNSYS)

<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>

<http://www.aiguasol.com/>

Guía nº 1:

Guía técnica.

Mantenimiento de instalaciones térmicas

Guía nº 2:

Guía técnica.

Procedimientos para la determinación del rendimiento energético de plantas enfriadoras de agua y equipos autónomos de tratamiento de aire

Guía nº 3:

Guía técnica.

Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos.

Incluye CD-ROM con programa AISLAM

Guía nº 4:

Guía técnica.

Torres de refrigeración

Guía nº 5:

Guía técnica.

Procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas

Guía nº 6:

Guía técnica.

Contabilización de consumos

Guía nº 7:

Comentarios al Reglamento

de Instalaciones Térmicas en los Edificios.

RITE - 2007

Guía nº 8:

Guía técnica.

Agua caliente sanitaria central

Guía nº 9:

Guía técnica.

Enfriamiento gratuito y recuperación de energía del aire

Guía nº 10:

Guía técnica.

Selección de equipos de transporte de fluidos: bombas y ventiladores

Guía nº 11:

Guía técnica.

Diseño de centrales de calor eficientes

Guía nº 12:

Guía técnica.

Condiciones climáticas exteriores de proyecto

Guía nº 13:

Guía técnica de procedimientos y aspectos de la simulación

de instalaciones térmicas en edificios



c/ Madera, 8 - 28004 Madrid
Tel.: 91 456 49 00. Fax: 91 523 04 14
comunicacion@idae.es
www.idae.es

No vale.
Colocado únicamente
como referencia visual.



P.V.P.: 20 € (IVA incluido)