

**EL EMPLEO DEL
ANÁLISIS DIMENSIONAL EN EL
PROYECTO DE SISTEMAS PASIVOS
DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO**

Discurso leído en el acto de su recepción como
Académico Correspondiente en Madrid por

Dr. D. Miguel Ángel Gálvez Huerta

el día 26 de julio de 2010

**EL EMPLEO DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL
EN EL PROYECTO DE SISTEMAS PASIVOS DE
ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO**

Depósito Legal: M-28.506-2010
Imprime: Realigraf, S. A.
C/ Pedro Tezano, 26 - 28039 Madrid

EL EMPLEO DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL EN EL PROYECTO DE SISTEMAS PASIVOS DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO

Discurso leído en el acto de su recepción como
Académico Correspondiente en Madrid por
Dr. D. Miguel Ángel Gálvez Huerta
el día 26 de julio de 2010

Arrecife (Lanzarote), Hotel Lancelot

Excmo. Señor Presidente de la Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote,
Sras. y Sres. Académicos,
Autoridades,
Señoras y Señores todos,
Buenas noches:

INTRODUCCIÓN

Como puede comprobarse observando la arquitectura popular, durante siglos se han acondicionado térmicamente los edificios de manera natural y con un coste económico razonable. Casi toda esta arquitectura es un catálogo de soluciones de adaptación de los edificios al clima, en las que se usan con sabiduría, sensibilidad y economía los elementos constructivos y las técnicas de acondicionamiento de las que disponen en sus alrededores.

A la vista de las realizaciones arquitectónicas actuales, costosas y mal adaptadas al clima, podría afirmarse que esta sabiduría instintiva ha desaparecido, diluida en la especialización técnica de arquitectos, ingenieros y constructores.

Sin embargo, al menos por lo que respecta al arquitecto, en el origen y centro de su actividad como proyectista todavía se encuentra la toma de una serie de decisiones que, aún siendo previas al acondicionamiento del edificio, influyen en él hasta casi determinarlo. Entre ellas se destacan las siguientes:

- La definición de la relación del edificio proyectado con el medio ambiente físico (sol, viento, terreno, agua y vegetación) en el que se implanta. En el caso de la edificación, normalmente las restricciones impuestas por las características del solar limitan mucho la actuación posible que, sin embargo, es trascendental en el ámbito del urbanismo.

- La configuración y composición material de la envolvente arquitectónica¹, más allá de la mera geometría y la creación de “espacios”², de manera que se minimice la repercusión energética del acondicionamiento térmico requerido.

Pese a que siempre han existido intentos de sistematización de estos problemas (desde la firmitas vitrubiana a la Arquitectura Bioclimática), normalmente se ha confiado en la intuición o “sensibilidad” del arquitecto y en su experiencia constructiva como garantes de la bondad de la respuesta. Que esto no es casi nunca cierto lo demuestra la mayoría de los edificios construidos.

De forma complementaria, los avances de la técnica de la climatización en el último siglo, junto con la errónea suposición de un abastecimiento energético inagotable, ha hecho posible afrontar el acondicionamiento térmico de cualquier propuesta arquitectónica, por disparatada que fuera desde el punto de vista energético, a costa de un elevado consumo y con el resultado final de instalaciones sobredimensionadas e ineficientes.

Por muchos motivos, hoy en día es evidente que se necesita reconsiderar y reconducir el uso que tanto arquitectos como ingenieros hacen de las técnicas constructivas y de los sistemas de acondicionamiento térmico, de forma que la contribución de los edificios al consumo de recursos naturales se reduzca, tal como está ocurriendo en otros sectores de la actividad humana.

En este contexto los sistemas pasivos de acondicionamiento térmico, por su imbricación con las técnicas constructivas y su trascendencia final en la imagen arquitectónica, se revelan como un instrumento fundamental para el arquitecto en la carrera por la excelencia energética de la edificación³, lo que ha motivado su elección como tema fundamental de este discurso.

En él, en primer lugar se los contextualiza desde tres perspectivas que, según la proximidad del enfoque, se califican de: lejana, intermedia y próxima. A continuación se los clasifica en el lugar que les corresponde, es decir, integrados en los

¹ La envolvente arquitectónica es la separación entre el interior de un edificio y el ambiente exterior que lo rodea. Sus componentes son, entre otros: las fachadas (muros, puertas y ventanas), el tejado y los elementos en contacto con el terreno (soleras y muros enterrados). Sus dimensiones y composición determinan el comportamiento energético del edificio.

² Suscribo en este punto el enfoque del Académico Francisco González de Posada, que atribuye a los arquitectos la tarea de delimitar recintos de aire.

³ Según el E2B Impact Assessment (2009), las metas del Consejo Europeo para 2020 son:

- Incrementar la eficiencia energética para reducir el consumo el 20% respecto del nivel de 2005
- Alcanzar una contribución del 20% de la energía total mediante energías renovables (mejora del 11,5% respecto de la contribución de 2005).
- Reducir un 20% la emisión de gases de efecto invernadero respecto de las de 1990 (14% respecto de las de 2005).

sistemas de climatización. La parte central del discurso constituye una reflexión sobre las herramientas empleadas en su proyecto, resaltando el potencial que en este sentido ofrece el Análisis Dimensional. Por último, se abre esta nueva vía de trabajo con la aplicación a uno de los sistemas de acondicionamiento pasivo de más relevancia en el ámbito arquitectónico durante las últimas décadas: el muro Trombe.

El objetivo último de estas reflexiones es el de proporcionar una base teórica para el acondicionamiento térmico de los edificios, de manera que en toda la fase de proyecto, pero especialmente en las decisiones iniciales, se asegure conseguir edificios durante cuyo uso se consuma la mínima energía posible en su acondicionamiento.

ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO PASIVO DE EDIFICIOS: CONTEXTUALIZACIÓN

Contexto lejano: sostenibilidad en la edificación

El término sostenibilidad, procedente de la biología y la ecología, se utiliza en estas ciencias para definir la tendencia de cualquier ecosistema a mantener un equilibrio dinámico, que se mantiene en el tiempo mediante el complejo entramado de interdependencias que relaciona las variables que lo caracterizan.

En 1987, el Informe Bruntland “Nuestro futuro común” propuso una nueva conceptualización del término, aplicada en este caso al desarrollo socioeconómico. Desde entonces ha pasado a designar un modelo de crecimiento consciente de que la presión ejercida por las actividades humanas sobre el medio ambiente genera en éste desequilibrios que pueden llegar a ser irreversibles y que, en consecuencia, deben ponerse límites a la explotación de los recursos de manera que su explotación actual no comprometa los de las generaciones venideras. Este planteamiento no deja de cuestionar, en cierta forma, el concepto de progreso y de crecimiento ilimitado defendido por la modernidad.

Más reciente es el uso del vocablo sostenibilidad aplicado a la edificación. Bajo esta denominación se agrupan las disciplinas que estudian el impacto de la actividad edificatoria sobre el medio ambiente. Algunos aspectos en los que esta actividad se muestra como insostenible son: la generación de residuos, la emisión de contaminantes y el uso abusivo de recursos limitados (suelo, agua y aire) que lleva asociada. Además, se empieza a ser consciente de que estos problemas no se limitan simplemente a la fase de explotación del edificio, sino que deben ser extrapolados a todo su ciclo vital (construcción, utilización y demolición). Por último, y a mayor escala (la que corresponde al ámbito del Urbanismo) no hay que olvidar las implicaciones socioeconómicas (gasto en infraestructuras, calidad de vida) asociadas al modelo de crecimiento urbano elegido.

Para comparar el consumo energético de las distintas actividades humanas se emplea la noción de energía primaria⁴ asociada. Por lo que se refiere al sector edificatorio⁵, el consumo durante su vida útil supone aproximadamente el 40% de la energía primaria gastada en la UE, con una distribución por usos que difiere ligeramente según se trate del sector residencial o comercial y administrativo (figura 1)⁶.

En este contexto, el acondicionamiento térmico de los edificios tiene una evidente repercusión en términos de energía primaria. De acuerdo con la visión enunciada, en la evaluación del coste energético asociado al acondicionamiento térmico de los edificios deben incluirse necesariamente la extracción, transporte y transformación de la energía utilizada por el sistema de climatización. En este sentido las diferentes fuentes energéticas convencionales de las que se dispone actualmente (electricidad o combustibles fósiles tradicionales) tienen muy diferente contribución final en términos de energía primaria.

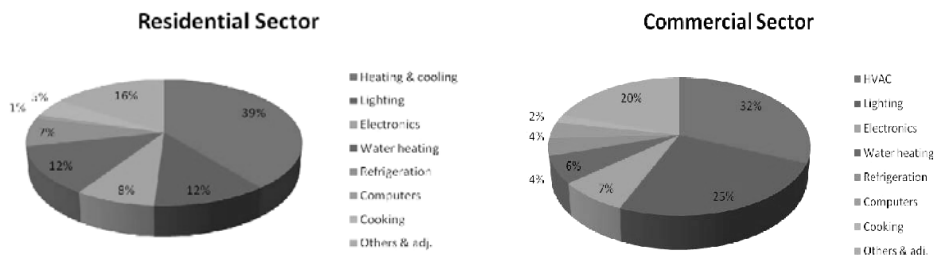


Figura 1. Empleo de la energía en el sector residencial (izquierda) y comercial (derecha)

⁴ Según UNE 15603:2008, energía primaria es la que no ha sido sometida a ningún proceso de conversión o transformación. Para su medición puede emplearse la masa de las emisiones de CO₂ generadas, expresadas en kg, calculada de acuerdo con unos criterios convenidos para la conversión.

⁵ Para un edificio, la energía primaria es la energía utilizada para producir la energía suministrada al edificio por los distintos conductores energéticos. En ella se incluye la energía requerida para la extracción, el procesamiento, el almacenamiento, el transporte, la generación, la transformación, la distribución y cualquier otra operación necesaria para el suministro.

⁶ Fuente: DOE Building Book 2008.

A este respecto, los sistemas pasivos emplean fuentes de energía renovables, especialmente la energía solar térmica. De este modo, la energía primaria empleada en ellos es casi exclusivamente la asociada a su construcción.

Contexto intermedio: eficiencia energética en la edificación

De acuerdo con la definición de eficiencia energética que figura en el artículo 2 de la Directiva Europea 2002/91/CE de 26 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios:

“Eficiencia energética de un edificio es la cantidad de energía consumida realmente o que se estime necesaria para satisfacer las distintas necesidades asociadas a un uso estándar del edificio, que podrá incluir entre otras cosas la calefacción, el calentamiento del agua, la refrigeración, la ventilación y la iluminación...”.

De acuerdo con ello, en lo que sigue se considerarán conceptos equivalentes la eficiencia energética de un edificio y el consumo de energía durante el funcionamiento de sus instalaciones de acondicionamiento del aire (calefacción, refrigeración y ventilación), a las que deberían añadirse, aunque aquí no se contemplan, las necesarias para satisfacer sus demandas de agua caliente e iluminación.

Si se tiene en cuenta a su vez que, de acuerdo con la expresión siguiente

$$C = \frac{\text{DEMANDA ENERGÉTICA}}{\text{RENDIMIENTO MEDIO DEL SISTEMA}} = \frac{D}{\eta}$$

en el consumo de energía de un edificio influyen tanto la demanda de energía a la que hace frente como el funcionamiento de las instalaciones con las que se responde a ella, es evidente que, si se persigue mejorar la eficiencia energética de un edificio, la reducción del consumo energético pasa por adoptar medidas encaminadas a disminuir su demanda o mejorar el rendimiento de sus instalaciones.

Desde este punto de vista de la eficiencia energética, los sistemas pasivos de acondicionamiento térmico suponen una reducción de la demanda energética de calefacción y refrigeración, que es aportada por medios renovables gratuitos.

En relación con los sistemas analizados en este discurso, puede decirse que la calificación de pasivos es en parte inexacta. La mayoría de estos sistemas requieren un consumo energético pequeño, asociado a equipos como bombas y ventiladores. Esto hace más apropiado el calificarlos como sistemas de bajo gasto energético, aunque deba mantenerse la clara distinción con los sistemas denominados activos, en los que se incluyen las instalaciones convencionales.

Ni que decir tiene que en este caso, por pequeñas que sean las implicaciones energéticas derivadas del rendimiento instantáneo de los equipos y rendimiento medio del sistema, los criterios de análisis son similares a los empleados en los sistemas activos.

Contexto próximo: Arquitectura Bioclimática

Puede decirse que, en tanto que pertenece al ámbito proyectual, la Arquitectura Bioclimática es uno de los últimos intentos de sistematización de la respuesta de los edificios al clima de un lugar.

Los límites de esta disciplina son borrosos, ya que incluye conocimientos de varios ámbitos del proyecto (construcción, instalaciones, meteorología), que comparten las siguientes características:

- La toma de decisiones de proyecto está, en gran medida, basada en un análisis climático de la zona, así como de las variaciones microclimáticas que se producen en el lugar.

- Tiene la pretensión de reducir el consumo energético asociado a los sistemas activos de acondicionamiento ambiental (higrotérmico, acústico y luminoso), utilizando estrategias arquitectónicas concretas encaminadas a este fin.

- Propone la implantación de sistemas especiales de acondicionamiento higrotérmico de bajo o nulo gasto energético.

- Utiliza herramientas de análisis y de verificación específicas para evaluar el comportamiento en tiempo real de la edificación proyectada, así como estimar la contribución al ahorro energético de los elementos pasivos utilizados.

En la historiografía de esta disciplina creo conveniente hacer una referencia a dos hitos relevantes:

El primer hito, fundacional, es la publicación en 1965 del primer tratado de arquitectura bioclimática, *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism*, debido al norteamericano Victor Olgyay. En este texto se sistematiza la respuesta que debe dar el proyecto de arquitectura al clima de un lugar. Para ello proponen una serie de estrategias arquitectónicas (protección solar, movimiento del aire, evaporación) que se deducen de un diagrama psicrométrico de confort de elaboración propia, la carta bioclimática de Olgyay.

En segundo lugar deben resaltarse las contribuciones del arquitecto israelí Baruch Givoni. Como en el caso anterior, también ha dado nombre a un diagrama bioclimático. Además, a él se debe un extenso catálogo de sistemas pasivos de acondicionamiento, en especial de refrigeración, que resaltan tanto por su integración arquitectónica como por venir siempre acompañados por herramientas físicas de análisis y cuantificación de resultados.

A partir de los trabajos mencionados, los últimos años han sido de multiplicación de las soluciones arquitectónicas bioclimáticas, basadas en análisis

climáticos en los que se manifiesta la huella de estos precedentes, y en las que se han ido incorporando cada vez con mayor naturalidad y dominio sistemas de acondicionamiento pasivo como el que se analiza en este discurso.

A modo de resumen, como integración de los contextos anteriores y desde la óptica de los sistemas pasivos de acondicionamiento, se propone la siguiente caracterización de la Arquitectura Bioclimática, basada en tres aspectos esenciales:

- Emplea fuentes de energía renovables para el acondicionamiento térmico.
- Lleva a cabo este acondicionamiento con la máxima eficiencia energética.
- Integra en el edificio los sistemas pasivos de acondicionamiento ambiental.

ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS: CLASIFICACIÓN

Sistemas de acondicionamiento térmico y climatización

El acondicionamiento térmico no es sino un caso particular de la climatización. Con carácter general, se entiende por climatización de edificios el conjunto de operaciones realizadas para garantizar el bienestar higrotérmico de los ocupantes y la salubridad del aire interior en los edificios. En este sentido, climatizar un edificio significa controlar:

- La temperatura operativa⁷, la velocidad y humedad relativa del aire de sus locales⁸, manteniéndolas dentro de unos límites determinados. Para ello y según el caso, se precisa calentar, enfriar, humectar o deshumidificar el aire, así como distribuirlo uniformemente.

- La calidad del aire, lograda mediante su renovación y filtrado.

Desde esta perspectiva puede decirse que un sistema de acondicionamiento térmico busca exclusivamente garantizar el control de la temperatura del aire en el interior del edificio, manteniéndola dentro de unos intervalos de confort⁹. Lo hace además en respuesta a unas pérdidas o ganancias de calor de sus locales. Por ello, en lo que sigue se estudiarán por separado los sistemas de calefacción y de refrigeración,

⁷ Variable que incluye la temperatura seca del aire y la temperatura de radiación de las paredes de un local (RITE 2007 IT 1.1).

⁸ En realidad, de la zona ocupada de los mismos (RITE 2007, IT 1.1).

⁹ Lo que significa que, en primera instancia, se dejan de lado tanto el control de la humedad del aire como la ventilación del edificio. Sin embargo, tanto uno como otro tienen implicaciones energéticas en el sistema de acondicionamiento térmico, que debe responder a las pérdidas o ganancias térmicas asociadas a la ventilación. Además, en los intercambios higrotérmicos, la extracción de humedad se hace mediante enfriamiento del aire y el aporte de humedad se hace casi siempre mediante transformaciones de saturación adiabática, lo que implica enfriamiento del aire.

según la dirección del flujo de calor manejado por el sistema (hacia dentro o hacia fuera del edificio, respectivamente)

Con estas consideraciones iniciales establecidas, la primera clasificación de los sistemas de acondicionamiento térmico que puede hacerse es la que contempla la energía empleada en su funcionamiento, en todos los subsistemas (producción, transporte y emisión) que lo integran. Según este criterio clasificador, puede distinguirse entre:

a) Sistemas activos, que consumen energía en todos sus subsistemas, especialmente en la producción¹⁰; y

b) Sistemas pasivos o de bajo gasto energético. En ellos, el consumo de energía se produce exclusivamente en los subsistemas de transporte y emisión y se limita al mínimo indispensable que no pueda aportarse por medios naturales.

Sistemas de acondicionamiento térmico activo

Por la cantidad de variantes que existen, es difícil clasificar los sistemas activos de calefacción y refrigeración. Generalmente se adopta como criterio clasificador el del fluido con el que se lleva la energía térmica a los locales, según el que estos sistemas se dividen en:

a) Calefacción y refrigeración por aire, que se difunde en el local mediante bocas de impulsión y de rejillas de extracción convenientemente distribuidas de manera que el aire neutralice las cargas térmicas del local y mantenga con uniformidad las condiciones de confort buscadas. Al propiciar el control del aire que se introduce y extrae del local estos sistemas pueden incorporar el aire de ventilación que se precise;

¹⁰ Por lo que respecta al sistema de producción de calor empleado, la clasificación se puede establecer en los siguientes términos:

- Transformación de la energía química de los combustibles tradicionales, sean estos sólidos (carbón), líquidos (gasóleo) o gaseosos (gas natural, propano y butano);

Transformación de la energía eléctrica por efecto Joule;

- Transformación de la energía eléctrica mediante ciclo frigorífico reversible (bomba de calor), cuyo foco frío puede ser el aire, el agua o el terreno;

- Combustión de biomasa sólida (residuos de explotaciones agrícolas), líquida (bioalcohol o biodiesel) o gaseosa (biogás);

- Aprovechamiento del calor residual de la generación eléctrica en motores o turbinas de gas (centrales de cogeneración); y

- Aprovechamiento de la radiación solar en captadores solares.

Por su parte, la producción de frío para la refrigeración puede hacerse mediante máquina frigorífica de ciclo de compresión, cuyo foco caliente puede ser el aire, el agua o el terreno, o con una máquina frigorífica de ciclo de absorción. En este último caso el calor necesario para hacer funcionar el subsistema de absorción puede producirse por cualquiera de los procedimientos descritos.

b) Calefacción y refrigeración por agua. Según sea la unidad terminal elegida, el intercambio de calor entre el agua y el aire del local puede realizarse de muchas formas, entre las que se destacan: con paneles (de pared, suelo o techo) radiantes fríos o calientes, el intercambio que predomina es por radiación; en radiadores y convectores se produce un intercambio por convección natural, que es mejorado sustancialmente con ventiloconvectores¹¹, al incorporar un ventilador; y

c) Calefacción y refrigeración por sustancia refrigerante, en la que también se emplean como equipos terminales los ventiloconvectores, que en este caso sustituyen la batería de agua fría o caliente por el evaporador o condensador de una máquina frigorífica.

Nótese que en los casos (b) y (c) la ventilación no se contempla, por lo que deberá garantizarse por otros sistemas distintos a los de acondicionamiento térmico.

Sistemas de acondicionamiento térmico pasivo

En el caso de los sistemas pasivos las clasificaciones se basan habitualmente en la fuente energética empleada para la producción térmica. Como quiera que esta fuente es diferente en ambos casos, se distingue aquí entre sistemas de calefacción y de refrigeración:

1. Calefacción pasiva

Está basada casi exclusivamente en el empleo del sol como fuente energética. De acuerdo con ello, y según el European Passive Solar Handbook, la clasificación de los sistemas puede hacerse atendiendo al elemento donde se hace la captación solar y a los elementos interpuestos entre ella y la utilización. Desde esta perspectiva, los sistemas pasivos de calefacción considerados son:

a) Captación directa. A través de ventanas (preferentemente orientadas al Sur), de lucernarios en el techo o por medio de elementos especiales como invernaderos (también orientados al Sur). La energía captada por este procedimiento tiene un límite, asociado al sobrecalentamiento del local por efecto invernadero; y

b) Captación indirecta, con acumulación. La acumulación puede realizarse en un depósito de agua (que puede ser un aljibe en la cubierta), en la propia envolvente del edificio (fachadas, paredes, suelos o techos) o mediante sistemas especiales integrados en el edificio, como lechos de grava bajo la solera (acumulación de calor sensible) o la incorporación de sustancias que cambian de fase en las capas del cerramiento (acumulación de calor latente).

La distribución del calor captado (o acumulado) a locales situados a distancia se hace con rapidez por medio del aire, aprovechando corrientes convectivas de las

¹¹ Conocidos también por el término inglés fan-coil.

masas de aire del edificio o, de manera más eficiente, haciéndolo circular por conductos. Para el movimiento del aire pueden emplearse medios motores naturales (ventilación eólica y térmica) o mecánicos (ventiladores), dependiendo de la cuantía de las pérdidas de presión que debe vencer el aire en su recorrido.

Respecto a la distribución del calor acumulado directamente a los locales adyacentes, se resalta la desventaja de la lentitud del intercambio (por conducción dentro de la acumulación y transmisión superficial del calor en la capa de contacto con el aire), compensada por el efecto de desfase entre la captación (por el día) y la cesión al local (por la noche), permitiendo acomodarla temporalmente a las horas de máxima demanda.

Conviene concluir esta sistematización de los sistemas pasivos de calefacción indicando que, pese a la hegemonía de la calefacción solar, existen otras fuentes naturales de energía térmica que se emplean en el acondicionamiento térmico de edificios. Por ejemplo, la estabilidad térmica diaria y estacional del terreno, le convierte en un elemento capaz de calentar (o enfriar) el aire exterior de ventilación antes de ser introducido en el edificio, reduciendo de forma gratuita la carga térmica que lleva asociada.

2. Refrigeración pasiva

A diferencia de la calefacción, se acostumbra a clasificar los sistemas de refrigeración pasiva atendiendo al sumidero térmico empleado para disipar el calor. Desde este punto de vista, pueden distinguirse los siguientes sistemas:

a) Refrigeración por intercambio de calor con el aire.

Cuando la temperatura del aire exterior desciende por debajo de la temperatura de confort, el aire de ventilación tiene la capacidad de neutralizar las cargas térmicas sensibles de los locales, en mayor proporción cuanto mayor sea el caudal de aire impulsado y más baja su temperatura. Existen numerosos sistemas pasivos de refrigeración que aprovechan este efecto durante las noches de verano. Como el periodo de tiempo durante el que el sistema funciona es bastante corto, y la temperatura del aire no lo suficientemente baja, la efectividad del sistema se consigue con grandes caudales de ventilación que se dirigen a elementos especiales (paredes, forjados, etc.) con gran capacidad de acumulación del calor diurno. Se persigue con este sistema enfriar el edificio durante las noches, para que comience el día siguiente en condiciones favorables para admitir las cargas térmicas que recibe.

Además de lo anterior, es suficientemente conocido que el aire en movimiento tiene también un efecto refrescante para las personas, pues facilita la disipación de su calor metabólico sobrante al acelerar el intercambio del calor a través de la piel. Este efecto de enfriamiento, que es tanto más potente cuanto más bajas sean la temperatura y contenido de humedad del aire, se debe contemplar, en el contexto de este discurso,

simplemente por su contribución al confort higrotérmico de los ocupantes, y nunca como constituyente del sistema de acondicionamiento del edificio¹².

b) Refrigeración por intercambio radiante con el cielo.

Todos los edificios se enfrían por las noches, de forma especialmente acusada si la noche es despejada y el clima es seco. El efecto se debe al intercambio de calor por radiación entre la superficie del edificio y la bóveda celeste. La cuantía de este efecto es la que correspondería al intercambio radiante entre la superficie construida y la superficie de bóveda celeste, si se la considerara como un cuerpo negro a una temperatura ficticia llamada temperatura de cielo.

Los sistemas pasivos que hacen uso de este efecto se basan en la colocación en la cubierta del edificio de radiadores especializados (superficies selectivas) que contribuyen durante la noche a reducir tanto la temperatura del aire como la de los paramentos interiores del edificio.

c) Refrigeración por intercambio de calor con el terreno.

Al igual que ocurría con la calefacción, puede aprovecharse la estabilidad térmica diaria y estacional del terreno para reducir gratuitamente la carga térmica de ventilación, al enfriarlo por intercambio de calor con el terreno antes de introducirlo en el edificio.

A esta clasificación debe añadirse el efecto enfriador que produce el agua en el aire especialmente cuando sus condiciones están muy alejadas de la saturación. Por el bajo gasto energético que conllevan los sistemas de enfriamiento evaporativo tradicionalmente se han considerado sistemas pasivos de refrigeración.

Para concluir este apartado, conviene resaltar que estas clasificaciones no pretenden otra cosa que ordenar los mecanismos físicos que intervienen en el acondicionamiento térmico por medios pasivos. La mayor parte de los sistemas que se emplean habitualmente, entre los que se incluye el muro Trombe, al que se dedica gran parte de este discurso, son sistemas mixtos, que participan en mayor o menor medida de las características descritas¹³.

Se muestran en las siguientes páginas varias propuestas y realizaciones del autor en el ámbito de los sistemas pasivos de acondicionamiento térmico (figuras 2, 3 y 4).

¹² Aunque sí contribuye a reducir la demanda de refrigeración al sistema al incrementar la temperatura seca del aire interior respecto de la cual se computa esta demanda.

¹³ No puede ser de otra forma, pues un sistema pasivo, al estar incorporado a la envolvente del edificio al que sirve, debe responder adecuadamente a las variaciones estacionales del clima para el que se diseña.

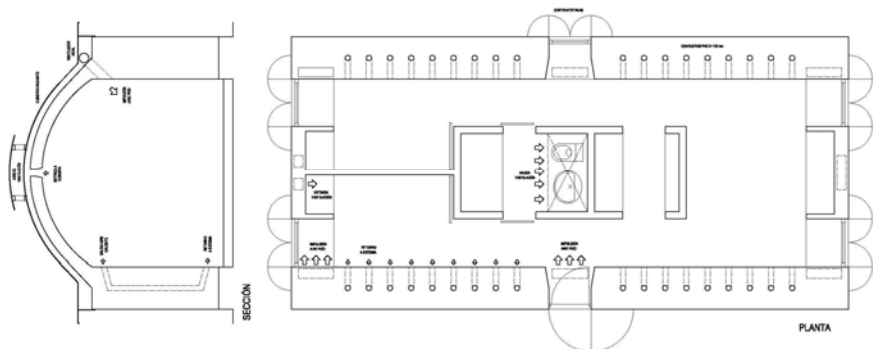


Figura 2. Prototipo de vivienda unifamiliar construida con tierra.
II SIACOT. Madrid. Octubre de 2003.



ALZADO SUR

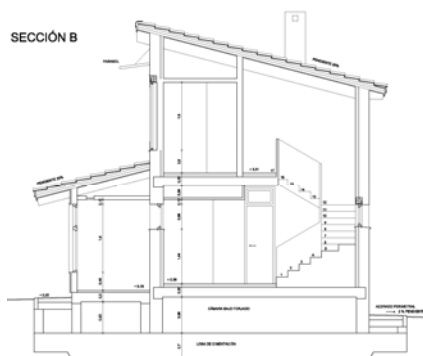


Figura 3. Vivienda unifamiliar Agudo. Villalbilla (Madrid). Año 2007.

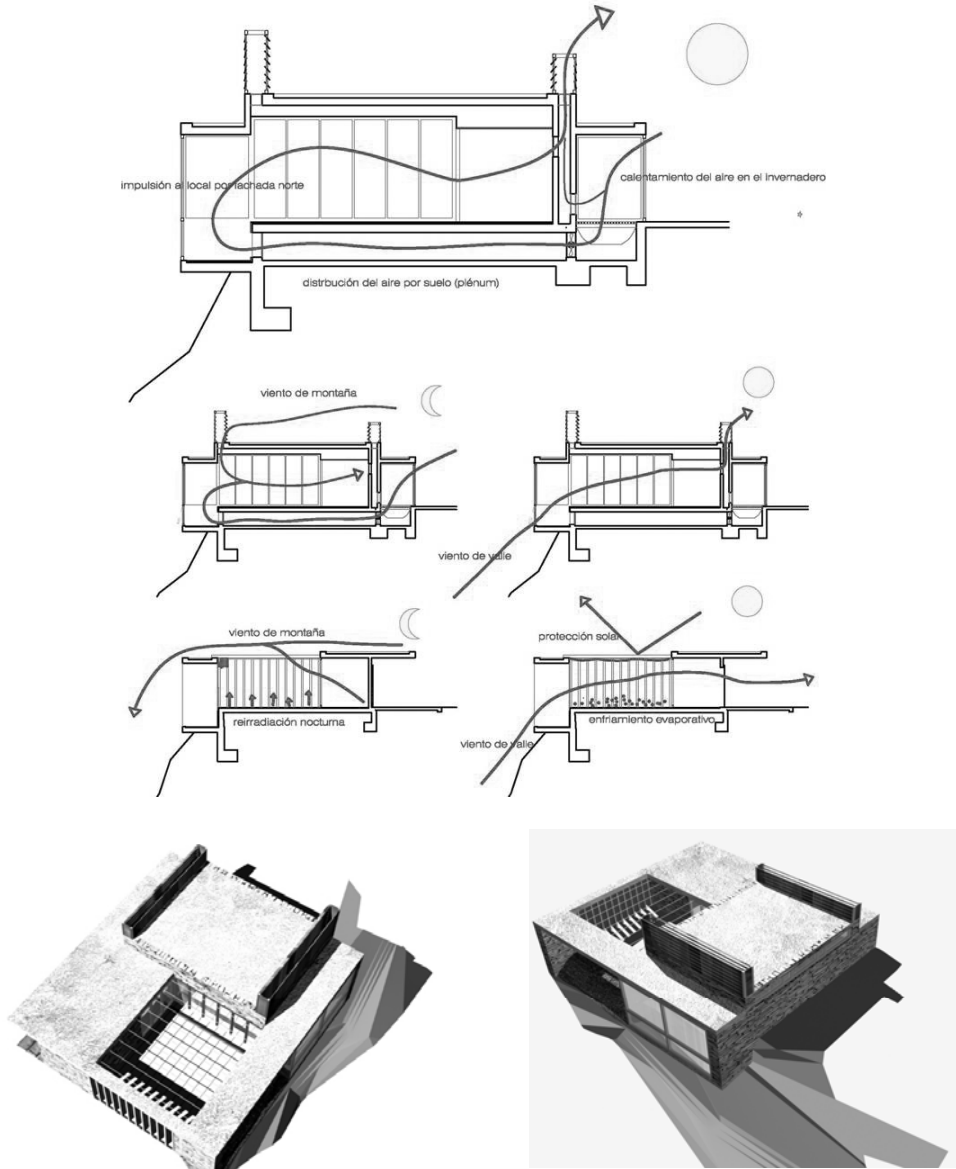


Figura 4. Anteproyecto de mirador. Sardón de Duero (Valladolid) en colaboración con S. García. Enero de 2009.

ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS: HERRAMIENTAS DE PROYECTO

Como es sabido, los sistemas de acondicionamiento térmico activos, entre los que se cuentan las instalaciones de calefacción y refrigeración convencionales, se dimensionan de acuerdo con la máxima potencia térmica que deben suministrar, determinada para las unas condiciones exteriores, llamadas de proyecto, que se encuentran muy próximas a las más desfavorables. A ello han respondido los métodos de cálculo de cargas térmicas tradicionales, fiando al diseño del sistema, un problema básico de ingeniería, la regulación de la instalación frente a las situaciones de carga parcial en las que casi siempre funciona.

La cuantificación de la energía consumida en el acondicionamiento, desde el punto de vista del proyecto, se reducía a problemas de adaptación de la producción a la demanda y a estimaciones de volumen de combustible necesario. Sólo con la aparición de herramientas más potentes de cálculo asociadas al desarrollo del ordenador, que permitían evaluar el comportamiento del edificio durante periodos de tiempo cada vez más cortos, fue posible incluir la respuesta temporal de los equipos a las cargas térmicas, y llevar a cabo estimaciones más precisas de la energía consumida en el acondicionamiento.

Por el contrario, los sistemas pasivos siempre se han enfocado desde una perspectiva energética. Al tratarse de sistemas integrados en la edificación, constituyendo partes de la misma, su tamaño generalmente viene impuesto. Con sus dimensiones ya predeterminadas, se ha tratado entonces de cuantificar su contribución a la demanda térmica del edificio. Este análisis se ha hecho casi siempre con valores medios, extendiéndose a periodos estacionales completos, para luego comprobar su funcionamiento en los momentos extremos. Por último, el proyecto de los sistemas pasivos debía completarse con la monitorización del sistema ejecutado, es decir, la toma de datos del ambiente interior en condiciones reales de ocupación, para poder contrastar el resultado y validar las decisiones de proyecto tomadas.

También en este caso las herramientas informáticas han revolucionado la forma de proyectar. Los actuales programas de simulación energética que incorporan módulos con sistemas pasivos permiten no sólo afinar el dato de su contribución a la demanda total, sino que también, al poder simular la evolución de las condiciones del ambiente interior, pueden anticipar si el ahorro energético se va a producir a costa del confort de los ocupantes.

Esta posibilidad de estimar cuáles van a ser las condiciones interiores durante la fase de proyecto completa, pero no elimina, la necesidad de llevara cabo la monitorización del edificio, siquiera sea para comprobar la validez de la simulación efectuada.

Bases físicas del acondicionamiento térmico

El comportamiento energético global de un edificio constituye un sistema dinámico complejo. Por un lado, el edificio responde a los cambios del ambiente exterior de distinta forma dependiendo de su forma, orientación y características constructivas. Por otro lado, sus instalaciones de acondicionamiento responden a las situaciones ambientales variables manteniendo unas condiciones interiores confortables, con un gasto energético dado.

En sentido amplio, las condiciones interiores requeridas en los edificios se refieren a su ambiente térmico, acústico y lumínico, así como a la calidad de su aire interior. Sin embargo, en el marco de este discurso el estudio se centra en el ambiente térmico, y en la energía necesaria para su acondicionamiento, aunque no son despreciables las implicaciones energéticas de conseguir una calidad del aire y un confort luminoso mínimos.

Cuando se quiere que un espacio habitado mantenga un ambiente térmico en condiciones adecuadas de temperatura y humedad relativa, y existen factores perturbadores, se necesita aportar o extraer calor del ambiente para restaurar las condiciones requeridas. Esta cantidad de calor recibe el nombre de carga térmica, siéndolo de calefacción o de refrigeración según la dirección del flujo de calor (hacia o desde el edificio).

La carga térmica de un edificio depende del clima, de la envolvente del edificio y de sus condiciones de funcionamiento. Como ni el primero ni el último de estos factores son uniformes, sino que dependen del instante considerado, se deduce que la carga térmica es siempre una función del tiempo, que puede ser llamada curva de cargas.

A partir de ella se define la demanda energética térmica como su integral a lo largo del periodo considerado (día, mes, estación o año). Tiene dimensiones de energía y se mide en kW.h o en J. Esta es una variable¹⁴ que permite cuantificar y comparar la bondad de la respuesta de un edificio al problema de su acondicionamiento térmico, si se mantienen las condiciones interiores del aire dentro de unos límites establecidos.

Para ello se requiere cuantificar los flujos de calor en el edificio a partir de la evolución de las temperaturas de la envolvente y del aire interior, lo que conduce a aplicar las leyes de la Termología a los diferentes sistemas, subsistemas y elementos que componen el edificio.

¹⁴ No es la única, pues la misma respuesta a estas cargas por parte de los sistemas encargados del acondicionamiento también influye en la demanda.

Bases físico-matemáticas de la modelización

Dada la complejidad de los fenómenos involucrados, el comportamiento térmico del edificio se simplifica, utilizando sólo las variables físicas relevantes, e interpretándolo mediante un sistema de ecuaciones que, para que tengan sentido físico han de ser homogéneas dimensionalmente. Todo ello constituye su modelo conceptual formal, que puede resolverse con ayuda de un modelo matemático o físico.

1) Resolución mediante modelos matemáticos

Estas ecuaciones se resuelven creando un modelo matemático, como es un sistema de ecuaciones, que pueden ser a su vez algebraicas o diferenciales (ordinarias o en derivadas parciales), con unas determinadas condiciones iniciales y/o de contorno. Su solución matemática se lleva a cabo, respectivamente, mediante operaciones algebraicas con números reales o por análisis matemático. Si se codifican en lenguaje de programación pueden ser utilizadas en un computador, mediante análisis numérico.

De esta última manera operan los programas de simulación energética de edificios, herramienta fundamental para el proyecto de acondicionamiento térmico.

Estos programas afrontan los siguientes aspectos del problema:

- La eficiencia energética del edificio (incluido su sistema de acondicionamiento), lo que significa determinar su consumo en condiciones de uso; y
- El confort térmico, es decir, estudiar la evolución en el tiempo de los índices de confort (temperatura seca y humedad relativa del aire, temperatura operativa del recinto, temperatura de las paredes, velocidad del aire).

Puede decirse que, en general, que responden a la siguiente estructura:

En primer lugar se plantean y resuelven de manera conjunta las ecuaciones de transferencia de cada uno de los cerramientos delimitadores, sean estos opacos o semitransparentes, y la ecuación de balance en el aire del recinto, en la que se incluye la energía aportada por el equipo de acondicionamiento proyectado. Las incógnitas de estas ecuaciones son las distintas temperaturas superficiales interiores de las paredes delimitadoras del recinto t_i y la temperatura del aire T_i de la zona.

En la resolución de las ecuaciones se trabaja con la hipótesis de que el sistema de acondicionamiento funciona para mantener el edificio entre dos temperaturas de consigna, máxima y mínima, lo que se traduce en que: si el edificio se mantuviera de forma espontánea entre estas temperaturas el sistema no funcionaría; si tendiera a descender la temperatura por debajo de la temperatura de consigna baja, el equipo proporcionaría calefacción hasta conseguir esta temperatura; si en esta situación el equipo no tuviera potencia de calefacción suficiente el edificio se enfriaría hasta la temperatura de equilibrio que le correspondiese en cada momento; y esta misma situación, aunque a la inversa, se daría si el edificio tendiera a superar la temperatura de consigna alta y el equipo no respondiera a este requerimiento.

Los programas de simulación a los que se hace referencia en este discurso se insertan en esta línea de trabajo. Según Velázquez et al (2001), la resolución de estas ecuaciones puede hacerse de dos formas:

- De forma directa, resolviendo simultáneamente las ecuaciones de la envolvente, de las zonas y de los equipos, sin restricciones en cuanto a su linealidad y admitiendo variaciones en el tiempo de los coeficientes que figuran en las ecuaciones. Se trata de un método muy exacto, aunque precisa de una descripción detallada de las condiciones de partida. Es el empleado en los programas de ordenador llamados Computer Fluids Dynamics (CFD), de los que el más conocido es ANSYS, con una aplicación a la construcción llamada TRN-SYS.

- De forma indirecta, aplicando el principio de superposición a leyes que ligan solicitaciones y respuestas en la envolvente, en el aire y en los equipos de acondicionamiento. A este grupo pertenecen los programas a los que se hace referencia en este discurso.

2) Resolución mediante modelos físicos

Por otro lado, y aunque no se emplee habitualmente este procedimiento en el proyecto de acondicionamiento ambiental, las ecuaciones que describen el fenómeno pueden estudiarse mediante modelos físicos reducidos, con los que obtener su solución física en la misma teoría (semejanza), o modelos analógicos con los que obtener su solución mediante solución física en otras teorías físicas (analogía).

En ambos casos los modelos deben cumplir una relación de semejanza con el prototipo. Aún presuponiendo en ellos una semejanza geométrica, la semejanza física total es imposible de lograr, por lo que hay que aceptar semejanzas físicas parciales, eligiendo las variables más significativas del fenómeno y despreciando otras.

En todos los problemas de modelos físicos, el Análisis Dimensional se ha erigido como herramienta fundamental.

Panorama general de los programas de simulación

Aunque aquí sólo nos referimos a modelos energéticos, se han desarrollado también numerosos modelos de iluminación, movimiento y calidad del aire, aspectos constructivos con los que el comportamiento energético tiene una evidente relación, y que no es extraño encontrarse reunidos en herramientas informáticas comunes.

Según Augenbroe y De Wilde (2009), la evolución histórica de esta rama del conocimiento se resume a continuación:

Los primeros intentos de computación se realizaron llevaron a cabo en la década de los años 1960, relacionados fundamentalmente con la resolución de problemas de transmisión de calor. Estas investigaciones condujeron durante la década siguiente a un extenso desarrollo de algoritmos para el cálculo de cargas térmicas (ASHRAE, Carrier). Sin embargo, fue en los años ochenta cuando verdaderamente eclosionó la elaboración de herramientas informáticas de simulación energética de

edificios, considerándose que de 1990 en adelante se está en un proceso de madurez y plena expansión de las mismas.

Entre los programas pioneros, llamados de primera generación, destaca especialmente DOE-2, del Lawrence Berkeley Laboratory de la Universidad de California, cuya primera versión data de 1982 y que en sus diversas versiones ha cumplido una vida útil de más de 20 años. Sigue siendo motor de cálculo de otros programas (por ejemplo, en España, de CALENER, herramienta informática de certificación energética) y junto a otros programas como i-BLAST, está en el origen de programas actuales más avanzados, como EnergyPlus.

Nos encontramos actualmente en la llamada segunda generación de programas de simulación. Entre los más de 300 reflejados en el directorio del U.S. Department of Energy, destacamos ESP^r, Ecotec (quizás el de mayor expansión comercial) y EnergyPlus.

Además de contar con algoritmos más precisos¹⁵ y de incorporar un mayor número de modelizaciones de subsistemas, estos nuevos programas responden fundamentalmente a la necesidad de disponer de interfaces cómodas y a la facilidad de intercambiar datos con otras aplicaciones (programas de dibujo, hojas de cálculo, etc).

Con los llamados programas de tercera generación, actualmente en desarrollo, se trata de lograr una plena integración de la simulación en los sistemas de dibujo asistido por ordenador (CAD, acrónimo de “computer aided design”), así como hacer posible el trabajar simultáneamente en tiempo real con todos los aspectos que intervienen en el proceso de diseño y que tienen implicaciones energéticas: la definición geométrica, la definición constructiva, las instalaciones y sus sistemas de control.

Como principal ventaja de estas herramientas, tal como están concebidas, se encuentra que es posible tener un conocimiento tan completo como se quiera del comportamiento del edificio. Este conocimiento es exhaustivo en el caso de los programas CFD, si bien a costa de un elevado coste computacional que en muchas ocasiones es inviable por el ingente trabajo de introducción de datos que comporta.

Siempre que la idealización sea correcta, pueden realizarse buenas aproximaciones sobre el comportamiento energético del edificio en sus primeras fases de diseño, y valorar alternativas de proyecto. Sin embargo, esta fase requiere una sólida formación (conocimiento de las bases de funcionamiento del programa) del profesional encargado del análisis.

Entre las desventajas, destacaría que, tal y como se deduce de las tendencias observadas en los nuevos programas, sigue quedando mucho por hacer en lo que se

¹⁵ Existen programas como MATLAB, que permiten intervenir y mejorar el modelo computacional.

puede llamar “toma de decisiones de proyecto”, y se revela fundamental el contar con herramientas que predigan el impacto de las diferentes opciones iniciales de diseño sobre el comportamiento energético del edificio.

Como resumen, quedaría por resaltar que además de la profundidad de análisis que ofrecen, los programas existentes en el mercado permiten modelar rápidamente las alternativas de materiales, forma, orientación, así como valorar la contribución de sistemas pasivos elementales propuestos, por lo que suponen una herramienta valiosísima para la sistematización de las propuestas arquitectónicas en las primeras fases de diseño.

El Análisis Dimensional: objeto y breve historia de la disciplina

Pese a que numerosos autores se han ocupado desde antiguo de ‘lo dimensional’ la creación del Análisis dimensional como disciplina se atribuye a P. W. Bridgman, cuyo *Dimensional Analysis* es el primer tratado de Análisis dimensional.

Para Bridgman el Análisis dimensional es un método de análisis cuyo objeto es el estudio de problemas o fenómenos físicos susceptibles de expresarse mediante una relación funcional entre determinadas magnitudes medibles y determinadas constantes dimensionadas que constituya una ecuación completa. En la línea de la mayoría de los posteriores usuarios de la disciplina, su contenido prioritario se identifica con el teorema π de Buckingham (1.914), que puede enunciarse como sigue:

<<La forma más general de toda ecuación $f(x_1, \dots, x_n) = 0$, que sea consecuencia de una teoría cuyas leyes fundamentales sean relaciones de proporcionalidad entre potencias con exponentes fijos es $F(\pi_1, \dots, \pi_i) = 0$, donde los π_i son los monomios independientes de dimensión nula o monomios π_i , que pueden formarse con las magnitudes consideradas.

El número de estos monomios independientes es $i = n - h$, donde h es la característica de la matriz formada con los exponentes dimensionales con relación a una base cualquiera.>>

Este texto clásico de Bridgman ha marcado la pauta de posteriores utilizaciones del método, dando lugar a una escuela de seguidores para los que los fructíferos resultados obtenidos ocultaban la preocupación de otros autores por lo que presentaba de arbitrario en la obtención de elementos dimensionales.

A mi juicio, las mayores aportaciones críticas, en el sentido de un mayor rigor en la aplicación del método, se deben a Palacios, cuyo texto *Análisis Dimensional*, de 1964, ha constituido en algunos aspectos el germen de una *Teoría Dimensional*, desarrollada años más tarde por González de Posada.

Inserto en esta última línea, distingo como notas caracterizadoras del Análisis Dimensional las siguientes:

a) Su referente son los fenómenos y problemas físicos, en tanto que inscritos en el seno de una teoría física determinada, de los que se pretende obtener expresiones generales en variables adimensionales que determinen la estructura funcional posible de las ecuaciones de estos fenómenos;

b) Su fundamento es el postulado de complitud de las ecuaciones de la Física;

c) Es una teoría matemática, basada en la teoría de las funciones homogéneas generalizadas, en la suposición de que éstas representan los fenómenos físicos; y

d) Gravita, casi hasta identificarse con él, en torno al teorema π , a partir del cual se obtiene una ley de nivel inferior (ley o ecuación de un problema concreto) deducida indirectamente de las leyes de nivel superior (leyes relacionales) de la teoría en la que se inserta el problema por mediación de la base.

En este discurso resalta que el Análisis Dimensional puede constituirse como una valiosa herramienta complementaria para conseguir soluciones generales a los problemas energético-térmicos que se plantean en las simulaciones por ordenador, en la confianza de que el empleo conjunto de ambas herramientas permita contrastar la validez de las soluciones generales, ajustar sus coeficientes y ordenar en nomogramas las variables más representativas de las soluciones ensayadas.

A modo de apertura de una línea de investigación se dedica a continuación una especial atención al Muro Trombe, objeto principal de reflexión en este discurso.

APLICACIÓN AL PROYECTO DEL MURO TROMBE: ESTUDIO DESDE LA SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y EL ANÁLISIS DIMENSIONAL

Descripción

El muro Trombe¹⁶ es un sistema pasivo de calefacción que funciona por calentamiento directo del aire y por acumulación del calor. Consiste en un cerramiento especial orientado al Sur (en el hemisferio Norte) y compuesto por los siguientes elementos:

- Hoja de cristal (simple o doble) de alta transmisividad;
- Cámara de aire;
- Elemento macizo delimitador (muro de gran espesor y densidad) revestido con una superficie selectiva (de alta absortividad frente a la radiación solar y baja emisividad para la radiación de onda larga) y en cuyas zonas superior e inferior se disponen unas aberturas con compuertas regulables que ponen en contacto el local adyacente y la cámara;
- Aislamiento móvil opcional por el exterior del vidrio; y
- Protección solar fija, en forma de parasol horizontal.

Los elementos anteriores se disponen entre sí de la forma que indica la figura 5.

Con este sistema se pretende acumular la energía térmica que, procedente del sol, atraviesa el cristal, distribuyéndola a un local adyacente en la cantidad y en el momento preciso para su acondicionamiento térmico.

Se trata, pues, de una estrategia pasiva de calefacción de locales en la que la distribución de la energía térmica se hace tanto de forma directa, por convección natural, como retardada, por acumulación y cesión al local con desfase en el tiempo respecto al momento de su captación.

Los elementos del sistema que se han descrito desempeñan las siguientes funciones:

- La hoja de cristal favorece el calentamiento del aire confinado en la cámara gracias a su propiedad de superficie selectiva frente a la radiación solar (efecto invernadero);
- La cámara de aire facilita la distribución de la energía térmica mediante fenómenos de convección natural;
- El muro opaco actúa de captador, acumulador y distribuidor de energía térmica. Este cometido se refuerza mediante la colocación del aislante al exterior, situación que limita la conducción del calor exclusivamente en la dirección deseada;
- Las aberturas permiten dirigir los flujos de aire entre la cámara y el local adyacente, en el sentido que muestra la figura; y

¹⁶ En referencia a su inventor, Félix Trombe.

- El parasol evita la incidencia de los rayos del sol y el correspondiente sobrecalentamiento durante los meses de verano.

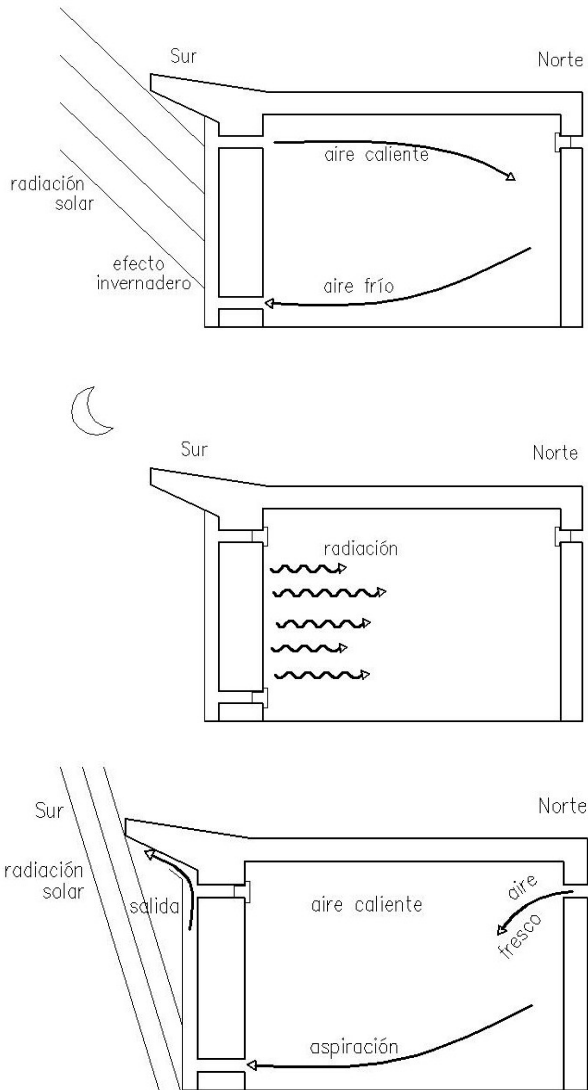


Figura 5. Comportamiento de un muro Trombe en verano e invierno.
Fuente: J. Tovar. Apuntes de Instalaciones y Servicios Técnicos. ETSAM (UPM).

Habitualmente se dimensiona el sistema con un espesor del muro (elemento predominante) tal que coincidan los instantes en que el sol deja de incidir sobre el muro y la onda térmica lo ha atravesado en su totalidad.

Para la superficie del muro se aceptan los valores de 0,25 a 0,75 m², según sean las temperaturas exteriores, por cada m² de superficie de local.

La superficie de rejillas necesaria se estima comprendida entre 100 y 200 cm² por cada m² de muro, distribuidos equitativamente entre las aberturas superiores e inferiores.

El espesor de la cámara se fija en 10 cm (espesores mayores producirían en esta cámara movimientos convectivos que incrementan las pérdidas).

En muchas ocasiones, para asegurar el caudal de aire que se mueve en la cámara y controlar efectivamente el aporte energético del aire al local, el mecanismo motor por tiro térmico se sustituye por un ventilador. En este caso se habla de muro Trombe activo, al llevar aparejado un consumo energético para hacer funcionar el ventilador.

Dada la complejidad del fenómeno objeto de estudio, estos parámetros de diseño de este elemento se han dejado tradicionalmente fiados a resultados experimentales.

En este sentido conviene resaltar que los estudios actuales más fructíferos, y por otro parte globales, se realizan mediante la modelización por ordenador de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno. Los resultados obtenidos se contrastan con medidas experimentales realizadas sobre prototipos monitorizados.

No obstante, dado que estas expresiones se inscriben en el seno de teorías termológicas clásicas es de esperar que el Análisis Dimensional permita encontrar expresiones generales que permitieran al menos operaciones tales como la determinación de las superficies de cerramiento y ventilación precisas para contrarrestar unas determinadas cargas de calefacción o la predicción de la influencia de la geometría (espesor y altura) de la cámara en el comportamiento térmico del conjunto, que ayuden en la investigación experimental.

Estudio desde el punto de vista termotécnico

Se analizan a continuación los fenómenos de intercambio de calor en un muro Trombe al que se le imponen unas condiciones exteriores variables, representadas por la temperatura del aire, del cielo y del suelo y por la intensidad de radiación total recibida. Del lado del local se considera una temperatura interior constante, mantenida por otro mecanismo de aporte energético.

En el análisis se han seguido, en parte, las ecuaciones de balance propuestas en el Engineering Manual del programa de simulación EnergyPlus versión 3.1 de abril de 2009.

Para cada una de las caras de los elementos que componen el sistema (cristal y muro), así como para la cámara de aire, se plantean las siguientes ecuaciones:

a) Temperaturas de equilibrio en las caras del vidrio θ_{ve} , θ_{vc} .

Se determinan resolviendo el sistema de ecuaciones siguientes:

$$h_{r,ve}(T_{rad} - \theta_{ve}) + h_{c,ve}(T_e - \theta_{ve}) + \frac{\lambda_v}{e_v}(\theta_{vc} - \theta_{ve}) + \alpha_v I_s \frac{h_{c,ve}}{h_{c,ve} + h_{c,vc}} = 0 \quad (\text{ec. 1})$$

$$h_{r,vc}(\theta_{mc} - \theta_{vc}) + \rho_{mc} \tau_v I_s + \frac{\lambda_v}{e_v}(\theta_{ve} - \theta_{vc}) + h_{c,vc}(\theta_c - \theta_{vc}) + \alpha_v I_s \frac{h_{c,vc}}{h_{c,ve} + h_{c,vc}} = 0 \quad (\text{ec. 2})$$

donde el coeficiente radiante exterior es:

$$h_{r,ve} = 4\sigma\epsilon_{ve} \left(\frac{T_{rad} + \theta_{ve}}{2} \right)^3$$

obtenido a partir de la temperatura radiante exterior T_{rad} , media de las temperaturas de radiación del suelo, T_{suelo} , del cielo, T_{cielo} y de los obstáculos, T_{obs} , según:

$$T_{rad} = F_{suelo}T_{suelo} + F_{cielo}T_{cielo} + F_{obs}T_{obs}$$

donde los distintos factores de forma F indican el porcentaje de los elementos (suelo, cielo y obstáculos) “visto” desde el vidrio. Para el caso de un elemento de fachada, como es el muro Trombe, sin obstáculos cercanos, puede tomarse: $F_{suelo} = 0,5$; $F_{cielo} = 0,5$; y $F_{obs} = 0$

Por su parte, los coeficientes interiores (radiante y convectivo) son, respectivamente:

$$h_{r,vc} = \sigma \frac{\epsilon_{vc} \epsilon_{mc}}{1 - (\epsilon_{vc})(\epsilon_{mc})} \left(\frac{\theta_{vc} + \theta_{mc}}{2} \right)^3$$

$$h_{c,vc} = 2h_c + 4v$$

con h_c según algoritmo ISO 15099, validado por Ellis (2003), corregido por la velocidad del aire de la cámara, v

$$h_c = 2\lambda \left(\frac{Nu}{d} \right)$$

en donde el número de Nusselt, $Nu = \max (Nu_1, Nu_2)$, y

$$Nu_1 = 0,0673838 Ra^{1/3}, \quad \text{para } 50.000 < Ra < 1.000.000$$

$$Nu_1 = 0,028151 Ra^{0,4134}, \quad \text{para } 10.000 < Ra < 50.000$$

$$Nu_1 = 1 + 1,7596678 E^{-10} Ra^{2,2984755}, \quad \text{para } Ra < 10.000$$

$Nu_2 = 0,242 (Ra/A)^{0,272}$, con Ra , número de Raileigh y A , relación de forma de la cámara $A = H/d$ (según expresión de ElSherbing, S.M., Raithby, G.D. y Hollands, K.T.G.)

b) Temperatura de equilibrio en la cara del muro en contacto con la cámara, θ_{mc} .

Para ello se parte de la ecuación de balance siguiente:

$$h_{r,mc}(\theta_{mc} - \theta_{vc}) + \alpha_{mc} \tau_v I_s + h_{c,mc}(\theta_c - \theta_{mc}) + q_{k\ mc} = 0 \quad (\text{ec. 3})$$

donde el coeficiente radiante en el lado interior de la cámara tiene la expresión:

$$h_{r,mc} = h_{r,vc} = \sigma \frac{\varepsilon_{vc} \varepsilon_{mc}}{1 - (1 - \varepsilon_{vc})(1 - \varepsilon_{mc})} \left(\frac{\theta_{vc} + \theta_{mc}}{2} \right)^3$$

y el flujo de calor que atraviesa la cara del muro, en régimen estacionario, es:

$$q_{k\ mc} = -\lambda_m \frac{(\theta_{mi} - \theta_{mc})}{e_m}$$

Si el flujo de calor que atraviesa la cara del muro depende del tiempo, su expresión es:

$$q_{k\ mc}(t) = -Y_0 \theta_{mi,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j \theta_{mi,t-\delta_j} + X_0 \theta_{mc,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j \theta_{mc,t-\delta_j} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{k\ mc,t-\delta_j}$$

en donde X_j , Y_j , Φ_j son los coeficientes de las funciones de transferencia del calor (CTFs), y $h_{c,mc}$ es igual que $h_{c,vc}$ ya definido (según algoritmo ISO 15099 corregido).

c) Velocidad media del aire en la cámara, v

Puede obtenerse a partir de la ecuación de balance de presiones siguiente:

$$\Delta p_T = \Delta p_d + \Delta p_J + \Delta p_{rejillas}$$

con Δp_T , incremento de presión debida al tiro térmico, de fórmula de definición:

$$\Delta p_T = \rho_0 \theta_0 g H \frac{|\theta_{c\ ent} - \theta_{c\ sal}|}{\theta_{c\ ent} \cdot \theta_{c\ sal}}$$

Δp_d , presión dinámica, de fórmula de definición:

$$\Delta p_d = \frac{\rho v^2}{2}$$

Δp_J , pérdidas de presión debidas al rozamiento. Según la fórmula de Hagen Pouseille, para caras plano paralelas en régimen laminar, su fórmula de definición es:

$$\Delta p_J = 12\mu \frac{H}{d^2} v$$

$\Delta p_{rejillas}$, pérdidas de presión en los elementos de entrada y salida a la cámara, con áreas A_{ent} y A_{sal} respectivamente. Su expresión es:

$$\Delta p_{rejillas} = \frac{\rho v^2}{2} (Z_{ent} + Z_{sal}),$$

donde Z_{ent} y Z_{sal} son los coeficientes de presión de los orificios de entrada y salida, respectivamente, de fórmulas:

$$Z_{ent} = \left(\frac{d \cdot B}{0,66 A_{ent}} - 1 \right)^2$$

$$Z_{sal} = \left(\frac{d \cdot B}{0,60 A_{sal}} - 1 \right)^2$$

A partir de estas expresiones, la expresión de la velocidad media del aire en la cámara es:

$$v = \frac{\left[\left(\frac{12\mu H}{d^2} \right)^2 + \left(\frac{2\rho^2(1+Z_{ent}+Z_{sal})\rho_0\theta_0g|\theta_{c\ ent} - \theta_{c\ media}|}{\theta_{c\ ent} \cdot \theta_{c\ media}} \right) \right]^{0.5} - \frac{12\mu H}{d^2}}{\rho(1+Z_{ent}+Z_{sal})} \quad (\text{ec. 4})$$

Si se tratara de un muro Trombe activo, la velocidad viene impuesta por el caudal Q que mueve el ventilador. Para una sección de paso $B \cdot d$, por la ecuación de continuidad, se obtiene:

$$v = \frac{Q}{B d} \quad (\text{ec. 4'})$$

d) Temperatura media del aire en la cámara, $\theta_{c\ media}$

Una vez obtenida la velocidad media del aire de la cámara, en ella puede plantearse la siguiente ley vertical de temperaturas:

$$\theta_c(h) = \frac{\theta_{vc} + \theta_{mc}}{2} - \left(\frac{\theta_{vc} + \theta_{mc}}{2} - \theta_{c\ ent} \right) e^{\frac{-h}{H_0}}$$

con $H_0 = \frac{\rho c d}{2 h_{cv}} v$, altura característica de la cámara. Lo que conduce a:

$$\theta_{c\ media} = \frac{1}{H} \int_0^H \theta_c(h) dh = \frac{\theta_{vc} + \theta_{mc}}{2} + \frac{H}{H_0} (\theta_{c\ sal} - \theta_{c\ ent}), \text{ y} \quad (\text{ec. 5})$$

$$\theta_{c\ sal} = \frac{\theta_{vc} + \theta_{mc}}{2} - \left(\frac{\theta_{vc} + \theta_{mc}}{2} - \theta_{c\ ent} \right) e^{\frac{-H}{H_0}} \quad (\text{ec. 5'})$$

e) Temperatura de la cara interior del muro, θ_{mi}

La temperatura de equilibrio en la cara del muro en contacto con el local al que sirve se obtiene mediante la ecuación de balance siguiente:

$$q_{k\ mi} + h_{c,mi}(T_i - \theta_{mi}) + h_{r,mi}(T_i - \theta_{mi}) = 0 \quad (\text{ec. 6})$$

con $h_{c,mi}$, según el algoritmo:

$$h_{c,mi} = 1,31|(\theta_{mi} - T_i)|^{1/3}$$

con $h_{r,mi}$, según la expresión:

$$h_{r,mi} = \varepsilon_{mi} \sigma \left(\frac{\theta_{mi} + T_i}{2} \right)^3$$

Por su parte, el flujo de calor que atraviesa la pared en régimen estacionario es:

$$q_{k,mi} = -\lambda_m \frac{(\theta_{mi} - \theta_{mc})}{e_m}$$

y el flujo de calor que atraviesa la pared, dependiente del tiempo, es:

$$q_{k,mi}(t) = -Z_0 \theta_{mi,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j \theta_{mi,t-\delta_j} + Y_0 \theta_{mc,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j \theta_{mc,t-\delta_j} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{k,mi,t-\delta_j}$$

en donde Y_j , Z_j , Φ_j son los coeficientes de las funciones de transferencia del calor (CTFs).

En la ecuación de balance se han tenido en cuenta las siguientes hipótesis simplificadoras:

- En el local se prescinde del intercambio radiante con cargas internas, fuentes luminosas y radiación solar incidente a través de otros huecos acristalados.
- Para los intercambios radiantes con las otras paredes del local se suponen todas a la misma temperatura, coincidente con la del aire del local.

A partir de este sistema de seis ecuaciones planteado se obtienen las seis incógnitas buscadas: θ_{ve} , θ_{vc} , θ_{mc} , θ_{mi} , v_c y $\theta_{c,media}$. Para la resolución analítica de todas las ecuaciones se plantea el siguiente proceso:

- Se resuelven las ecuaciones 1 a 4, en régimen permanente como si no hubiese movimiento de aire en la cámara. Para ello se deben dar valores iniciales de las temperaturas θ_{ve} , θ_{vc} , θ_{mc} y θ_{mi} de forma que se puedan obtener los coeficientes de transmisión superficial h_c y h_r de todas las superficies involucradas.

Las ecuaciones se expresan y resuelven de forma matricial $A \cdot \Phi = B$. Con la solución obtenida, los coeficientes de transmisión superficial h_c y h_r de todas las superficies se corrigen y se vuelven a resolver las ecuaciones hasta que las variaciones de los resultados sean inferiores a un intervalo dado.

Las ecuaciones, escritas para ser introducidas en la matriz, son las siguientes:

$$\left(h_{r,ve} + h_{c,ve} + \frac{\lambda_v}{e_v} \right) \theta_{ve} - \frac{\lambda_v}{e_v} \theta_{vc} = h_{r,ve} T_{rad} + h_{c,ve} T_e + \alpha_v I_s \frac{h_{c,ve}}{h_{c,ve} + h_{c,vc}} \quad (\text{ec. 7})$$

$$- \frac{\lambda_v}{e_v} \theta_{ve} + \left(h_{r,vc} + \frac{\lambda_v}{e_v} \right) \theta_{vc} - h_{r,vc} \theta_{mc} = \rho_{mc} \tau_v I_s + \alpha_v I_s \frac{h_{c,vc}}{h_{c,ve} + h_{c,vc}} \quad (\text{ec. 8})$$

$$- h_{r,mc} \theta_{vc} + \left(h_{r,mc} + \frac{\lambda_m}{e_m} \right) \theta_{mc} - \frac{\lambda_m}{e_m} \theta_{mi} = \alpha_{mc} \tau_v I_s \quad (\text{ec. 9})$$

$$- \frac{\lambda_m}{e_m} \theta_{mc} + \left(\frac{\lambda_m}{e_m} + h_{c,mi} + h_{r,mi} \right) \theta_{mi} = (h_{c,mi} + h_{r,mi}) T_i \quad (\text{ec. 10})$$

- Con los valores definitivos se considera una temperatura media del aire de la cámara

$$\theta_{c,media} = \frac{\left(\frac{\theta_{vc} + \theta_{mc}}{2} + T_i \right)}{2} \quad (\text{ec. 11})$$

- Se obtiene $h_{c,mc} = h_{c,vc}$ con el aire quieto a partir del número de Nusselt
- Se obtiene la velocidad del aire con las expresiones (ec. 4) o (ec. 4')
- Se obtiene $h_{c,mc} = h_{c,vc}$ corregido por la velocidad
- Se calcula la temperatura de salida del aire de la cámara, $\theta_{c,salida}$ con (ec. 5')
- Se calcula la nueva $\theta_{c,media}$ con la expresión (ec. 5)
- Se obtienen los flujos de calor al aire de la cámara y al aire del local

$$\Phi_{mc} = h_{c,mc} H B (\theta_{mc} - \theta_{c,media}) \quad (\text{en el muro})$$

$$\Phi_{vc} = h_{c,vc} H B (\theta_{vc} - \theta_{c,media}) \quad (\text{en el vidrio})$$

- El flujo suma de ambos

$$\Phi_{vmc} = 2h_{vc} H B \left(\frac{\theta_{vc} + \theta_{mc}}{2} - \theta_c \right)$$

sirve para elevar la temperatura del caudal de aire que atraviesa la cámara:

$$\Phi_{vmc} = c_{air} \rho_{air} v d B (\theta_{c,sal} - \theta_{c,ent})$$

- Por último, mediante la ecuación de balance del aire del local, si se considera a temperatura constante T_i :

$$\Phi_{calef} + \Phi_{int} + h_{mi}(\theta_{mi} - T_i) + c_{air} \rho_{air} v d B (\theta_{c,sal} - T_i) - \left(\sum_j U_j A_j + c_{air} \rho_{air} Q_{vent+inf} \right) (T_i - T_e) = 0$$

(ec. 12)

puede determinarse, en el tiempo, el porcentaje de calor aportado por el aire de la cámara, por el muro, por las cargas internas y por el sistema activo de calefacción, para neutralizar las pérdidas de calor del local.

Estudio desde el punto de vista dimensional

1. Estudio introductorio

Es numeroso el grupo de autores que han empleado métodos dimensionales para resolver problemas parciales del fenómeno que aquí se discute. Sin que la relación que se expone a continuación sea exhaustiva, se quiere aquí recordar las contribuciones que se consideran más relevantes:

- Trabajos de Eckert, Lorentz, Schmidt y Beckman sobre convección.

- Trabajos de ElSherbing, S.M., Raithby, G.D. y Hollands, K.T.G. acerca del número de Nusselt en cámaras de aire.

- Por su cercanía se quieren resaltar especialmente el conjunto de los trabajos que diferentes miembros del Grupo de Trabajo de Análisis Dimensional (GTAD) han dedicado a la resolución del problema de la transmisión del calor en muros (González San José), a la convección en placas y cámaras (Prieto, González y Fernández, Arenas y Herranz, Mudarra y Castaños¹⁷) y a los intercambios por radiación (Prieto y Fernández).

En todos los intentos anteriores s destaca la ausencia de enfoques genéricos del fenómeno. Indudablemente, la gran cantidad de variables que intervienen hace que la expresión general en variables adimensionales que proporciona el teorema π sea poco manejable, y en consecuencia, poco atractiva. Sin embargo, en este trabajo se defiende su valor como expresión más general del fenómeno, de la que poder obtener

¹⁷ Tesis Doctoral de L. Mudarra, de título *Estudio de la transmisión del calor en las superficies planas y en las cámaras de aire con aplicación del Análisis dimensional*, dirigida por el profesor D. Manuel Castaños.

expresiones de menor rango, según sean las hipótesis reductoras planteadas, y de resolver, según sean en cada caso las variables elegidas, problemas puntuales cada uno en la teoría que le es propia, todas ellas subteorías¹⁸ de la *Termomecánica del medio continuo*, en la que se enmarca el problema general analizado.

2. Presentación de variables independientes

Si se agrupan por elementos constructivos, puede hacerse el siguiente desglose:

a) En el vidrio, las variables que intervienen son:

- Variables relativas al ambiente exterior: T_{suelo} , T_{cielo} , $T_{obstáculos}$, θ_e , I_s (directa y difusa)
- Parámetros caracterizadores del vidrio:
 - Relativos a la transmisión superficial del calor: $h_{c,ve}$, $h_{r,ve}$, $h_{c,vc}$, $h_{r,vc}$,
 - Relativos a la radiación electromagnética de onda corta: α_v , τ_v
 - Relativos a la conducción del calor: λ_v
- Parámetros geométricos: e_v , H , B , F_{suelo} , F_{cielo} , $F_{obstáculos}$, F_{muro}
- Constantes universales: σ
- Variables termológicas: θ_{ve} , θ_{mc} , θ_{vc} , $q_{k,ve}$, $q_{k,vc}$

b) En el muro, las variables que intervienen son:

- Variables relativas al ambiente exterior: I_s (directa y difusa)
- Variables relativas al ambiente interior: T_i
- Parámetros caracterizadores del muro:
 - Relativos a la transmisión superficial del calor: $h_{c,mc}$, $h_{r,mc}$, $h_{c,mi}$, $h_{r,mi}$
 - Relativos a la radiación electromagnética de onda corta: α_m , ρ_m , ε_m
 - Relativos a la conducción del calor: λ_m , c_m , ρ_m
- Parámetros geométricos: e_m , H , B , F_{vidrio}
- Constantes universales: σ
- Variables termológicas: θ_{mc} , θ_{mi} , $q_{k,mc}$, $q_{k,mi}$

c) En la cámara, las variables que intervienen son:

- Variables relativas al ambiente interior: T_i
- Parámetros caracterizadores del aire la cámara: λ_a , c_a , ρ_a , μ_a , β_a
- Parámetros geométricos: d , H , B , A_{ent} , A_{sal}
- Constantes universales: g
- Variables pertenecientes a la Dinámica: $v_{c,media}$ (sólo en el caso de muro activo)
- Variables termológicas: $\theta_{c,media}$, q_{aire}

d) En el local anexo, las variables que intervienen son:

¹⁸ Noción empleada por González de Posada (1994), y aplicada en la Tesis Doctoral del autor.

- Variables relativas al ambiente interior: $\theta_i, T_{paredes}$
- Parámetros caracterizadores de la envolvente: U_G, n
- Parámetros geométricos: L, H, B

Si la presentación de variables se hace desde el punto de vista de las teorías involucradas, las 59 variables independientes que se considera que intervienen pueden agruparse de la siguiente forma:

- Relativas al ambiente
 - Exterior: $T_{suelo}, T_{cielo}, T_{obstáculos}, \theta_e, I_s$
 - Interior: $\theta_i, T_{paredes}$
- Relativas a la geometría: $H, B, L, e_v, e_m, d, F_{suelo}, F_{cielo}, F_{obst}, F_{vidrio-muro}, F_{local}, A_{ent}, A_{sal}$
- Relativas a la materia:
 - Aire: $c_a, \rho_a, \mu_a, \beta_a, \lambda_a$
 - Vidrio: $h_{c,ve}, h_{r,ve}, h_{c,vc}, h_{r,vc}, \alpha_v, \tau_v, \lambda_v, \varepsilon_v$
 - Muro: $h_{c,mc}, h_{r,mc}, h_{c,mi}, h_{r,mi}, \alpha_m, r_m, \varepsilon_m, \lambda_m, C_m$
 - Local: U_G, n
- Constantes universales: g, σ
- Relativas a la Dinámica: v_c
- Relativas a la Termología: $\theta, \theta_{c,media}, \theta_{ve}, \theta_{vc}, \theta_{mc}, \theta_{mi}, q_{k,ve}, q_{k,vc}, q_{k,mc}, q_{k,mi}, q_{aire}$
- Relativas al referencial espacio-tiempo: x, t

3. Resolución mediante *Análisis dimensional*

El problema más general que se resuelve en este discurso es el de la evolución temporal de la temperatura en cada uno de los puntos de las capas del cerramiento. Para lo que, con carácter previo, se recuerdan las hipótesis simplificadoras que se tienen en cuenta en adelante:

- El fenómeno se estudia como bidimensional.
- Los coeficientes caracterizadores de las propiedades termológicas de los materiales se consideran constantes.
- Se desprecia la capacidad de acumular calor del vidrio y del aire de la cámara.

Así mismo, para facilitar la interpretación de resultados algunas variables se han agrupado de la forma con la que se presentan en los textos de instalaciones térmicas más utilizados. Ejemplos en este sentido son:

- Las temperaturas del cielo, obstáculos y terreno, junto con sus correspondientes factores de forma se agrupan en la llamada temperatura radiante, T_{rad} , de fórmula de definición:

$$T_{rad} = F_{suelo} \cdot T_{suelo} + F_{cielo} \cdot T_{cielo} + F_{obst} \cdot T_{obst}$$

- A su vez, los coeficientes de transmisión $h_{r,ve}$ y $h_{c,ve}$ se agrupan en un coeficiente común $h_{cr,ve}$, que se define:

$$h_{cr,ve} = h_{r,ve} + h_{c,ve}$$

lo que permite emplear como variable representativa del ambiente exterior la temperatura equivalente, T_e , que agrupa T_{rad} y θ_e , según la expresión:

$$T_e = h_{r,ve} \cdot T_{rad} + h_{c,ve} \cdot \theta_e$$

en virtud de la cual el flujo de calor que atraviesa la pared es:

$$q_{k,ve} = h_{cr,ve} \cdot (T_e - \theta_{ve})$$

- La misma operación puede realizarse con la temperatura del aire interior θ_i , la temperatura radiante de las paredes del local, $T_{paredes}$, así como con el coeficiente convectivo de la superficie interior del muro Trombe $h_{c,mi}$, y su coeficiente radiante, $h_{r,mi}$ (que incluye el factor de forma F_{local} con el que el local es ‘visto’ desde la superficie del muro). En este caso, la temperatura que se emplea para caracterizar el ambiente interior es T_i , que agrupa $T_{paredes}$ y θ_i , según la expresión:

$$T_i = h_{r,mi} \cdot T_{paredes} + h_{c,mi} \cdot \theta_i$$

a partir de la que, con el coeficiente convectivo radiante $h_{cr,mi}$ construido “ad hoc”, el flujo de calor que atraviesa la pared se cuantifica con:

$$q_{k,mi} = h_{cr,mi} \cdot (\theta_{mi} - T_i)$$

- Los coeficientes convectivos del muro y del vidrio a la cámara $h_{c,mc}$ y $h_{c,vc}$ se consideran iguales, y se designan de aquí en adelante por $h_{c,cámara}$. Al tener el muro y el vidrio distintas emisividades frente a la onda larga, no puede decirse lo mismo de los respectivos coeficientes radiantes $h_{r,mc}$ y $h_{r,vc}$, que incluyen el factor de forma $F_{vidrio-muro}$, con el que estas superficies se “ven” entre sí.

- Por desprejarse su capacidad de acumulación del calor, las características termológicas del vidrio se representan mejor por su resistencia R_v que por su conductividad térmica λ_v .

De acuerdo con esta enumeración de variables, la ecuación más general del problema en variables ordinarias es:

$$f(T_e, I_s, h_{cr,ve}, a_{s,v}, t_v, \varepsilon_v, a_{s,m}, r_m, \varepsilon_m, R_v, c_m, \lambda_m, \rho_m, c_a, \rho_a, \mu_a, \beta_a, \lambda_a, h_{c,cámara}, h_{r,vc}, h_{r,mc}, \theta_{c,media}, e_v, e_m, d, A_{ent}, A_{sal}, H, B, g, \sigma, T_i, h_{cr,mi}; \theta; x, t) = 0$$

cuyos exponentes dimensionales se expresan en la base completa, con discriminación espacial $\{L_x, L_y, L_z, M, T, E, \Theta\}$.

En la figura 6 de la página siguiente se muestra la matriz de exponentes dimensionales en esta base, de rango $r = 7$. En aplicación del teorema π , y como quiera que el número de variables es $n = 36$, se obtienen $n - r = 36 - 7 = 29$ monomios adimensionales independientes, de los cuales 8 están compuestos por siete variables independientes entre sí y los 21 restantes el resto son factores de forma ω .

n=36		r = 7		s=29																																			
	t_i	μ_{μ}	l_s	h_{μ}	ρ_{μ}	h_{μ}	λ_{μ}	C_{μ}	μ_{μ}	f_{μ}	t_{μ}	h_{μ}	λ_{μ}	ρ_{μ}	C_{μ}	μ_{μ}	g	d	β_s	H	B	R_{μ}	e_{μ}	θ_{μ}	A_{ent}	A_{ent}	T_s	l_s	T_s	h_{μ}	ρ_{μ}	θ_{μ}	σ	θ	x	t			
L_1	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
L_1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	-1	0	-1	-1	0	-1	0	0	0		
L_2	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	-1	0	-1	0	-1	0	0		
M	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
T	0	0	0	-1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	0	0	1		
θ	0	0	0	-1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	-1	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	-1	-1	-1	1	-1	0	0		
Q	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	
π_{μ}					0	-1	0	1									1	0	-1																		0		
π_{l_s}					0	-1	0	0																														-1	
$\pi_{h_{\mu}}$					2	-1	-1	2													1																	0	
$\pi_{\lambda_{\mu}}$					0	1	-1	0												0	-1						1											0	
$\pi_{C_{\mu}}$					-2	2	0	-2												-1	-2		1															0	
$\pi_{\mu_{\mu}}$					0	-1	0	0																															1
$\pi_{f_{\mu}}$					0	0	0	0														1																	1
$\pi_{t_{\mu}}$					-1	1	0	-1														0	-1																0

	p	h	k	c	g	d	θ	μ_{μ}	l_s	B	A_{ent}	H	σ	β_s	t
L_1	-1	0	-1	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
L_1	-1	-1	0	0	0	0	0	1	1	-1	-1	0	1	0	0
L_2	-1	-1	0	0	1	0	0	1	1	0	-1	-1	1	0	0
M	1	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
T	0	-1	-1	0	-2	0	0	1	1	0	0	0	1	0	-1
θ	0	-1	-1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	4	1	0
Q	0	1	1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0

Figura 6. Matriz de exponentes dimensionales y monomios asociados a las variables independientes (naranja).

De acuerdo con ello se obtiene el siguiente sistema completo de 8 monomios adimensionales independientes:

$$\pi_{\mu} = \frac{\mu c}{h d}$$

$$\pi_{l_s} = \frac{I_s}{h \theta}$$

$$\pi_B = \frac{B d g c^2 \rho^2}{h \theta}$$

$$\pi_{A_{ent}} = \frac{A_{ent} h}{d \lambda_a}$$

$$\pi_H = \frac{H h^2}{g d^2 c^2 \rho^2}$$

$$\pi_{\sigma} = \frac{\sigma \theta^3}{h}$$

$$\pi_{\beta} = \beta \theta$$

$$\pi_t = \frac{h t}{d c \rho}$$

y de 21 factores de forma:

$$\begin{aligned}
 \varpi_{1,\varepsilon} &= \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_m}, \quad \varpi_{2,\varepsilon} = \frac{\alpha_v}{\varepsilon_m}, \quad \varpi_{3,\varepsilon} = \frac{\tau_v}{\varepsilon_m}, \quad \varpi_{4,\varepsilon} = \frac{\alpha_m}{\varepsilon_m}, \quad \varpi_{5,\varepsilon} = \frac{r_m}{\varepsilon_m}, \quad \text{y } \varpi_{6,\varepsilon} = \varepsilon_m \\
 \varpi_{1,h_c} &= \frac{h_{crmi}}{h_{c,camara}}, \quad \varpi_{2,h_c} = \frac{h_{crve}}{h_{c,camara}}, \quad \varpi_{3,h_c} = \frac{h_{rvc}}{h_{c,camara}}, \quad \varpi_{4,h_c} = \frac{h_{rmc}}{h_{c,camara}}, \\
 \varpi_{5,h_c} &= \frac{R_v}{h_{c,camara}}, \\
 \varpi_{1,\theta} &= \frac{\theta_{c,media}}{\theta}, \quad \varpi_{2,\theta} = \frac{T_e}{\theta}, \quad \varpi_{3,\theta} = \frac{T_i}{\theta}, \\
 \varpi_{1,d} &= \frac{e_m}{d}, \quad \varpi_{2,d} = \frac{e_v}{d}, \quad \varpi_{3,d} = \frac{x}{d} \\
 \varpi_\lambda &= \frac{\lambda_a}{\lambda_m}, \\
 \varpi_\rho &= \frac{\rho_a}{\rho_m}, \\
 \varpi_c &= \frac{c_a}{c_m}, \\
 \varpi_A &= \frac{A_{ent}}{A_{sal}},
 \end{aligned}$$

De forma que la expresión más general del fenómeno en monomios adimensionales es:

$$\Phi(\pi_\mu, \pi_\tau, \pi_B, \pi_A, \pi_H, \pi_\sigma, \pi_\beta, \pi_\tau, \varpi_{1,\varepsilon}, \varpi_{2,\varepsilon}, \varpi_{3,\varepsilon}, \varpi_{4,\varepsilon}, \varpi_{5,\varepsilon}, \varpi_{6,\varepsilon}, \varpi_{1,h_c}, \varpi_{2,h_c}, \varpi_{3,h_c}, \varpi_{4,h_c}, \varpi_{5,h_c}, \varpi_{1,d}, \varpi_{2,d}, \varpi_{3,d}, \varpi_{1,\theta}, \varpi_{2,\theta}, \varpi_{3,\theta}, \varpi_\lambda, \varpi_\rho, \varpi_c, \varpi_A) = 0$$

SIMBOLOGÍA Y NOTACIÓN

Se relaciona a continuación el significado de los símbolos empleados en este discurso, acompañados de las unidades del Sistema Internacional en las que se miden las variables representadas.

α_m : coeficiente de absorción del muro frente a la radiación solar (-)

α_v : coeficiente de absorción del vidrio frente a la radiación solar (-)

ε_m : emisividad de radiación de onda larga del muro (-)

ε_v : emisividad de radiación de onda larga del vidrio (-)

τ_v : coeficiente de transmisión del vidrio frente a la radiación solar (-)

r_m : coeficiente de reflexión del muro frente a la radiación solar (-)

σ : constante de Stefan Boltzmann, de valor $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

I_s : Intensidad total (directa y difusa) de radiación solar (W/m^2)

$h_{c,ve}$: coeficiente de transmisión superficial por convección entre el vidrio y el exterior ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

$h_{c,vc}$: coeficiente de transmisión superficial por convección entre el vidrio y la cámara ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

$h_{c,mc}$: coeficiente de transmisión superficial por convección entre el muro y la cámara ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

$h_{c,mi}$: coeficiente de transmisión superficial por convección entre el muro y el interior ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

$h_{r,ve}$: coeficiente de transmisión superficial por radiación entre el vidrio y el exterior ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

$h_{r,vc}$: coeficiente de transmisión superficial por radiación entre el vidrio y la cámara ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

$h_{r,mc}$: coeficiente de transmisión superficial por radiación entre el muro y la cámara ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

$h_{r,mi}$: coeficiente de transmisión superficial por radiación entre el muro y el interior ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

θ_{ve} : Temperatura de la superficie exterior del vidrio (°C)

θ_{vc} : Temperatura superficial del vidrio del lado de la cámara (°C)

θ_{mc} : Temperatura superficial del muro del lado de la cámara (°C)

θ_{mi} : Temperatura de la superficie interior del muro (°C)

$\theta_{c,media}$: Temperatura media del aire de la cámara (°C)

θ_e : Temperatura del aire del ambiente exterior (°C)

T_{cielo} : Temperatura del cielo (K)

$T_{terreno}$: Temperatura del terreno (K)

T_{obs} : Temperatura de los obstáculos exteriores (K)

θ_i : Temperatura del aire del ambiente interior (°C)

$T_{paredes}$: Temperatura de las paredes del ambiente interior (K)

e_v : espesor, dimensión del vidrio según el eje OX (m)

λ_v : conductividad térmica del vidrio ($\text{W/m}\cdot\text{°C}$)

c_a : calor específico del aire ($\text{W}\cdot\text{h/kg}\cdot\text{°C}$)

ρ_a : densidad del aire (kg/m^3)

μ_a : viscosidad dinámica del aire ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

β_a : coeficiente de dilatación volumétrico del aire (°C^{-1})

e_m : espesor, dimensión del muro según el eje OX (m)

λ_m : conductividad térmica del muro ($\text{W/m}\cdot\text{°C}$)

c_m : calor específico del muro ($W \cdot h / kg \cdot ^\circ C$)

ρ_m : densidad del muro (kg / m^3)

B : anchura, dimensión del muro y del vidrio según el eje OY (m)

H : altura, dimensión del muro y del vidrio según el eje OZ (m)

L : longitud, dimensión del local al que sirve el muro Trombe, según el eje OX

d : espesor, dimensión de la cámara según el eje OX (m)

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Arenas, A. y Herranz, A. (1985): Análisis Dimensional y sus aplicaciones. Tomo III. Aplicaciones a la transmisión del calor.
- Augenbroe y De Wilde (2009): Energy modelling. Incluido en: *A handbook of sustainable building design and engineering* (Mumovic y Santamouris, editores). Earthscan. Londres.
- Bedoya, C. y Neila, J. (1986): *Acondicionamiento y Energía Solar en Arquitectura*. Munilla Lería. Madrid.
- Cook, J. (ed) (1989): *Passive cooling*. MIT Press.
- Directiva Europea 2002/91/CE de 26 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios.
- EnergyPlus Manual. Versión 3.1 Abril 2009. Universidad de Illinois y Universidad de California. Ernest Orlando Lawrence Berkeley Laboratory. Department of Energy. US Gov.
- Ellis, P. (2003): *Development and validation of the unvented Trombe Wall Model in Energy Plus*. Master's Thesis: Universidad de Illinois.
- Gálvez, M.A. (1997): *Estudio Dimensional de las Teorías Termológicas Clásicas*. Tesis doctoral. UPM.
- Givoni, B. (1994): *Passive and low energy cooling of buildings*. John Wiley and sons.
- González de Posada, F. (1998): Discurso Ingreso Academia de Medicina.
- González de Posada, F. (1994): *Breviario de Teoría Dimensional*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Mudarra, L. (1992): *Estudio de la transmisión del calor en las superficies planas y en las cámaras de aire con aplicación del Análisis Dimensional*. Tesis doctoral. UPM.
- Olgay, V. (1964): *Arquitectura y clima*. Gustavo Gili.
- Prieto, J. I., González, C. y Fernández, R. (1995): *Selección mediante Análisis Dimensional de componentes tensoriales influyentes en fenómenos físicos: convección natural, flujo a la entrada de un conducto y descarga de un condensador*. XXXII Jornadas del GTAD. Paniza.
- Velázquez, R. et al. (2001): Herramienta de cálculo de la demanda energética. Manual de fundamentos técnicos. AICIA. Grupo de Termotecnia. E.S. Ingenieros de Sevilla.
- Tovar, J. (ed.): (2009): Apuntes de Instalaciones y Servicios Técnicos. ETSAM. UPM.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO PASIVO DE EDIFICIOS: CONTEXTUALIZACIÓN	7
Contexto lejano: sostenibilidad en la edificación	7
Contexto intermedio: eficiencia energética en la edificación	9
Contexto próximo: Arquitectura Bioclimática	10
ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS: CLASIFICACIÓN	11
Sistemas de acondicionamiento térmico y climatización	11
Sistemas de acondicionamiento térmico activo	12
Sistemas de acondicionamiento térmico pasivo	13
1. Calefacción pasiva	13
2. Refrigeración pasiva	14
ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS: HERRAMIENTAS DE PROYECTO	18
Bases físicas del acondicionamiento térmico	19
Bases físico-matemáticas de la modelización	20
Panorama general de los programas de simulación	21
El Análisis Dimensional: objeto y breve historia de la disciplina	23
APLICACIÓN AL PROYECTO DEL MURO TROMBE: ESTUDIO DESDE LA SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y EL <i>ANÁLISIS DIMENSIONAL</i>	25
Descripción	25
Estudio desde el punto de vista termotécnico	27
Estudio desde el punto de vista dimensional	34
1. Estudio introductorio	34
2. Presentación de variables independientes	35
3. Resolución mediante <i>Análisis dimensional</i>	36
SIMBOLOGÍA Y NOTACIÓN	40
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	41

**COLECCIÓN:
DISCURSOS ACADÉMICOS**

Coordinación: **Dominga Trujillo Jacinto del Castillo**

1. *La Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote en el contexto histórico del movimiento académico.* (Académico de Número). **Francisco González de Posada.** 20 de mayo de 2003. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
2. *D. Blas Cabrera Topham y sus hijos.* (Académico de Número). **José E. Cabrera Ramírez.** 21 de mayo de 2003. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
3. *Buscando la materia oscura del Universo en forma de partículas elementales débiles.* (Académico de Honor). **Blas Cabrera Navarro.** 7 de julio de 2003. Amigos de la Cultura Científica.
4. *El sistema de posicionamiento global (GPS): en torno a la Navegación.* (Académico de Número). **Abelardo Bethencourt Fernández.** 16 de julio de 2003. Amigos de la Cultura Científica.
5. *Cálculos y conceptos en la historia del hormigón armado.* (Académico de Honor). **José Calavera Ruiz.** 18 de julio de 2003. INTEMAC.
6. *Un modelo para la delimitación teórica, estructuración histórica y organización docente de las disciplinas científicas: el caso de la matemática.* (Académico de Número). **Francisco A. González Redondo.** 23 de julio de 2003. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
7. *Sistemas de información centrados en red.* (Académico de Número). **Silvano Corujo Rodríguez.** 24 de julio de 2003. Excmo. Ayuntamiento de San Bartolomé.
8. *El exilio de Blas Cabrera.* (Académica de Número). **Dominga Trujillo Jacinto del Castillo.** 18 de noviembre de 2003. Departamento de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas. Universidad de La Laguna.
9. *Tres productos históricos en la economía de Lanzarote: la orchilla, la barrilla y la cochinilla.* (Académico Correspondiente). **Agustín Pallarés Padilla.** 20 de mayo de 2004. Amigos de la Cultura Científica.
10. *En torno a la nutrición: gordos y flacos en la pintura.* (Académico de Honor). **Amador Schüller Pérez.** 5 de julio de 2004. Real Academia Nacional de Medicina.
11. *La etnografía de Lanzarote: "El Museo Tanit".* (Académico Correspondiente). **José Ferrer Perdomo.** 15 de julio de 2004. Museo Etnográfico Tanit.
12. *Mis pequeños dinosaurios. (Memorias de un joven naturalista).* (Académico Correspondiente). **Rafael Arozarena Doblado.** 17 diciembre 2004. Amigos de la Cultura Científica.
13. *Laudatio de D. Ramón Pérez Hernández y otros documentos relativos al Dr. José Molina Orosa.* (Académico de Honor a título póstumo). 7 de marzo de 2005. Amigos de la Cultura Científica.
14. *Blas Cabrera y Albert Einstein.* (Acto de Nombramiento como Académico de Honor a título póstumo del Excmo. Sr. D. **Blas Cabrera Felipe**). **Francisco González de Posada.** 20 de mayo de 2005. Amigos de la Cultura Científica.
15. *La flora vascular de la isla de Lanzarote. Algunos problemas por resolver.* (Académico Correspondiente). **Jorge Alfredo Reyes Betancort.** 5 de julio de 2005. Jardín de Aclimatación de La Orotava.

16. *El ecosistema agrario lanzaroteño*. (Académico Correspondiente). **Carlos Lahora Arán**. 7 de julio de 2005. Dirección Insular del Gobierno en Lanzarote.
17. *Lanzarote: características geoestratégicas*. (Académico Correspondiente). **Juan Antonio Carrasco Juan**. 11 de julio de 2005. Amigos de la Cultura Científica.
18. *En torno a lo fundamental: Naturaleza, Dios, Hombre*. (Académico Correspondiente). **Javier Cabrera Pinto**. 22 de marzo de 2006. Amigos de la Cultura Científica.
19. *Materiales, colores y elementos arquitectónicos de la obra de César Manrique*. (Acto de Nombramiento como Académico de Honor a título póstumo de **César Manrique**). **José Manuel Pérez Luzardo**. 24 de abril de 2006. Amigos de la Cultura Científica.
20. *La Medición del Tiempo y los Relojes de Sol*. (Académico Correspondiente). **Juan Vicente Pérez Ortíz**. 7 de julio de 2006. Caja de Ahorros del Mediterráneo.
21. *Las estructuras de hormigón. Debilidades y fortalezas*. (Académico Correspondiente). **Enrique González Valle**. 13 de julio de 2006. INTEMAC.
22. *Nuevas aportaciones al conocimiento de la erupción de Timanfaya (Lanzarote)*. (Académico de Número). **Agustín Pallarés Padilla**. 27 de junio de 2007. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
23. *El agua potable en Lanzarote*. (Académico Correspondiente). **Manuel Díaz Rijo**. 20 de julio de 2007. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
24. *Anestesiología: Una especialidad desconocida*. (Académico Correspondiente). **Carlos García Zepa**. 14 de diciembre de 2007. Hospital General de Lanzarote.
25. *Semblanza de Juan Oliveros. Carpintero – imaginero*. (Académico de Número). **José Ferrer Perdomo**. 8 de julio de 2008. Museo Etnográfico Tanit.
26. *Estado actual de la Astronomía: Reflexiones de un aficionado*. (Académico Correspondiente). **César Piret Ceballos**. 11 de julio de 2008. Iltre. Ayuntamiento de Tías.
27. *Entre aulagas, matos y tabaibas*. (Académico de Número). **Jorge Alfredo Reyes Betancort**. 15 de julio de 2008. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
28. *Lanzarote y el vino*. (Académico de Número). **Manuel Díaz Rijo**. 24 de julio de 2008. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
29. *Cronobiografía del Dr. D. José Molina Orosa y cronología de acontecimientos conmemorativos*. (Académico de Número). **Javier Cabrera Pinto**. 15 de diciembre de 2008. Gerencia de Servicios Sanitarios. Área de Salud de Lanzarote.
30. *Territorio Lanzarote 1402. Majos, sucesores y antecesores*. (Académico Correspondiente). **Luis Díaz Feria**. 28 de abril de 2009. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
31. *Presente y futuro de la reutilización de aguas en Canarias*. (Académico Correspondiente). **Sebastián Delgado Díaz**. 6 de julio de 2009. Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información.
32. *El análisis del tráfico telefónico: una herramienta estratégica de la empresa*. (Académico Correspondiente). **Enrique de Ferra Fantín**. 9 de julio de 2009. Excmo. Cabildo de Fuerteventura.

33. *La investigación sobre el fondo cósmico de microondas en el Instituto de Astrofísica de Canarias.* (Académico Correspondiente). **Rafael Rebolo López**. 11 de julio de 2009. Instituto de Astrofísica de Canarias.
34. *Centro de Proceso de Datos, el Cerebro de Nuestra Sociedad.* (Académico Correspondiente). **José Damián Ferrer Quintana**. 21 de septiembre de 2009. Museo Etnográfico Tanit.
35. Solemne Sesión Académica Necrológica de Homenaje al Excmo. Sr. D. Rafael Arozarena Doblado, Académico Correspondiente en Tenerife. *Laudatio Académica* por **Francisco González de Posada** y otras *Loas*. 24 de noviembre de 2009. Ilte. Ayuntamiento de Yaiza.
36. *La Cesárea. Una perspectiva bioética.* (Académico Correspondiente). **Fernando Conde Fernández**. 14 de diciembre de 2009. Gerencia de Servicios Sanitarios. Área de Salud de Lanzarote.
37. *La “Escuela Luján Pérez”: Integración del pasado en la modernidad cultural de Canarias.* (Académico Correspondiente). **Cristóbal García del Rosario**. 21 de enero de 2010. Fundación Canaria “Luján Pérez”.
38. *Luz en la Arquitectura de César Manrique.* (Académico Correspondiente). **José Manuel Pérez Luzardo**. 22 de abril de 2010. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
39. *César Manrique y Alemania.* (Académico Correspondiente). **Bettina Bork**. 23 de abril de 2010. Ilte. Ayuntamiento de Haría.
40. *La Química Orgánica en Canarias: la herencia del profesor D. Antonio González.* (Académico Correspondiente). **Ángel Gutiérrez Ravelo**. 21 de mayo de 2010. Instituto Universitario de Bio-Organica “Antonio González”.
41. *Visión en torno al lenguaje popular canario.* (Académico Correspondiente). **Gregorio Barreto Viñoly**. 17 de junio de 2010. Ilte. Ayuntamiento de Haría.
42. *La otra Arquitectura barroca: las perspectivas falsas.* (Académico Correspondiente). **Fernando Vidal-Ostos**. 15 de julio de 2010. Amigos de Écija.
43. *Prado Rey, empresa emblemática. Memoria vitivinícola de un empresario ingeniero agrónomo.* (Académico Correspondiente). **Javier Cremades de Adaro**. 16 de julio de 2010. Real Sitio de Ventosilla, S. A.
44. *El empleo del Análisis Dimensional en el proyecto de sistemas pasivos de acondicionamiento térmico.* (Académico Correspondiente). **Miguel Ángel Gálvez Huerta**. 26 de julio de 2010. Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid.

**HOTEL LANCELOT
ARRECIFE (LANZAROTE)**

**Patrocina:
Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid**