

GUÍAS

Manual de
fundamentos
técnicos de
calificación
energética
de edificios
existentes CE3

005(2)

www.idae.es





IDAE

Instituto para la Diversificación
y Ahorro de la Energía

Manual
de fundamentos
técnicos
de calificación
energética
de edificios
existentes CE3



IDAE

Instituto para la Diversificación
y Ahorro de la Energía

Guía IDAE: Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3

Edita: IDAE

Diseño: Juan Martínez Estudio

Maquetación: Sedán Oficina de Imaginación

Depósito Legal: M-26893-2012

Madrid, julio 2012

El presente manual ha sido redactado por un equipo de trabajo formado por la Unidad de Eficiencia Energética de APPLUS NORCONTROL, S.L.U., Grupo de Termotecnia de AICIA-Universidad de Sevilla, Instituto Ildefonso Cerdá, Unidad de calidad en la construcción del Instituto Eduardo Torroja, Unidad de edificación y ordenación del territorio de la Fundación Labein, El Grupo de Ingeniería Térmica de la Universidad de Cádiz y por la Dirección de Tecnología de REPSOL.

Además se ha contado con la participación de los siguientes asesores: Margarita de Luxán (Universidad Politécnica de Madrid), Gloria Gómez y Emilia Román. Ramón Velázquez y Alberto Viti (Ingenieros consultores) y Rafael Guzmán (Universidad de Málaga).

Esta publicación está incluida en el fondo editorial del IDAE, en la serie Calificación de Eficiencia Energética de Edificios.

Está permitida la reproducción, parcial o total, de la presente publicación, siempre que esté destinada al ejercicio profesional por los técnicos del sector. Por el contrario, debe contar con la aprobación por escrito del IDAE, cuando esté destinado a fines editoriales en cualquier soporte impreso o electrónico.

ÍNDICE

Introducción _____	7
· Medidas de mejora	
· Bases de datos de valores orientativos que se cargan por defecto	
Introducción y objetivos del documento _____	13
Procedimiento simplificado en base horaria para la obtención de la demanda energética de un edificio _____	17
· Conceptos generales de la simulación realizada para obtener las demandas de calefacción y refrigeración del edificio	
· Cálculo de las demandas de calefacción y refrigeración: hipótesis, nivel de modelización y valores por defecto	
· Cálculo de la demanda de agua caliente sanitaria	
Desarrollo de correlaciones en base mensual y estacional para estimar la demanda energética de un edificio _____	27
· Desarrollo de las correlaciones: descripción general de la metodología seguida	
· Modelos de calefacción	
· Modelos de refrigeración	
Procedimiento para la obtención de las prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor _____	37
· Introducción y metodología	
· Obtención de factores de ponderación	
· Integración de los factores de ponderación y su utilización en el procedimiento simplificado para certificación de eficiencia energética de edificios existentes de viviendas	
· Integración de los factores de ponderación y su utilización en el procedimiento simplificado para certificación de eficiencia energética de edificios terciarios	
Procedimiento para la simulación horaria de equipos y sistemas de producción de calor y frío _____	53
· Conceptos globales de la simulación	
· Alcance e hipótesis generales	
· Proceso de simulación	

Anexos	63
Anexo I. Cálculo del área solar	65
· Factor de sombra de radiación directa	
Anexo II. Cálculo de caudales de ventilación/infiltración	73
Anexo III. Caracterización de puentes térmicos	81
Anexo IV. Transmisión de calor a través de cerramientos opacos unidimensionales	85
· Algoritmos de cálculo	
· Secuencia de cálculo del algoritmo 1: cálculo de la función de transferencia en régimen transitorio para un cerramiento unidimensional opaco	
· Secuencia de cálculo del algoritmo 2: cálculo de las condiciones de contorno	
· Secuencia de cálculo del algoritmo 3: cálculo de las temperaturas superficiales	
· Secuencia de cálculo del algoritmo 4: cálculo de la ganancia a través de un cerramiento opaco	
Anexo V. Transmisión de calor a través de cerramientos en contacto con el terreno	93
· Introducción	
· Algoritmos de cálculo	
· Secuencia de cálculo del algoritmo 1: determinación de las propiedades	
· Secuencia de cálculo del algoritmo 2: cálculo de las pérdidas en régimen permanente	
· Secuencia de cálculo del algoritmo 3: cálculo de la función de transferencia. Decisión del método de cálculo	
· Secuencia de cálculo del algoritmo 4: cálculo de la función de transferencia en régimen transitorio para un cerramiento unidimensional opaco por el método de la transformada Z	
· Secuencia de cálculo del algoritmo 5: cálculo de la función de transferencia en régimen transitorio para un cerramiento unidimensional opaco por medio de diferencias finitas	
· Secuencia de cálculo del algoritmo 6: cálculo de la diferencia de temperatura superficial interior respecto del valor medio anual y de los flujos de calor	

Anexo VI. Balance de energía en un espacio _____ **101**

- Introducción
- Secuencia de cálculo del algoritmo 1: selección de los factores de ponderación precalculados
- Algoritmo 2: cálculo de las ganancias sobre un espacio
- Secuencia de cálculo del algoritmo 3: cálculo de la carga a temperatura constante
- Secuencia de cálculo del algoritmo 4: cálculo de la extracción de calor y de la temperatura real

Anexo VII. Implementación del cálculo del rendimiento medio estacional en edificios terciarios _____ **111**

- Paso 1: cálculo de las demandas ($P(t)$)
- Paso 2: cálculo del factor de carga parcial ($FCP(t)$)
- Paso 3: cálculo del rendimiento medio mensual

Anexo VIII. Valores por defecto: rendimientos nominales de bombas de calor _____ **123**

Anexo IX. Ejemplos de desarrollo del proceso de simulación _____ **127**

- Ejemplo 1: autónomo multizona
- Ejemplo 2: CAP y UTA de caudal constante unizona

Introducción

El presente documento constituye el *Manual de fundamentos técnicos del procedimiento simplificado de certificación de eficiencia energética de edificios existentes CE3*.

Además de este manual, la documentación que complementa el programa informático que soporta el procedimiento está formada por:

- Manual de usuario.
- Guía de recomendaciones para la mejora de la eficiencia energética.

Toda esta documentación puede descargarse de la página web del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, de la sección dedicada a la eficiencia energética en la edificación.

Este procedimiento ha sido desarrollado en el marco del concurso público convocado por el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE), para la "Contratación de procedimientos para la Certificación Energética de Edificios Existentes" (Código del proyecto E4-11261). En este marco, la empresa APPLUS NORCONTROL, S.L.U., adjudicataria del mismo, desarrolla el procedimiento simplificado CE3 para la certificación energética de edificios existentes de vivienda, pequeño y mediano terciario así como gran terciario, conforme a las disposiciones del proyecto de Real Decreto de certificación energética de edificios existentes, contando con la participación del siguiente equipo de trabajo:

- Unidad de eficiencia energética APPLUS NORCONTROL, S.L.U. (APPLUS):
 - Elisa Castaño Alarcón
 - Margarita Hernández Díez
 - Luisa Fernanda Rodríguez Cuadrado
 - Pilar López Sánchez
 - Iván Ruelas Cerda
- Grupo de Termotecnia de AICIA-Universidad de Sevilla (AICIA):
 - Servando Álvarez Domínguez
 - José Luis Molina Félix
 - José Manuel Salmerón Lissén
 - Rafael Salmerón Lissén
 - Juan Francisco Coronel Toro
 - Luis Pérez Lombrard
 - Pilar Monsalvete
 - José Sánchez Ramos
 - Manuela Gordillo Bellido
 - Raúl García Blanco
 - Miguel Puig García
- Institut Ildefons Cerdà, fundación privada (I. CERDÁ):
 - Elisabet Viladomiú
 - César Muñoz

- Unidad de calidad en la construcción del Instituto Eduardo Torroja (IETcc):
 - José Antonio Tenorio Ríos (Responsable)
 - Fernando Martín-Consuegra Ávila
 - María Jesús Gavira Galocha
 - Germán de Diego Aguado
 - Daniel Jiménez Gonzalez
 - Virginia Sánchez Ramos
- Unidad de edificación y ordenación del territorio, Fundación Labein (LABEIN):
 - José Antonio Sánchez de Sancha
 - José María Campos
 - Olga Macías
- Grupo de Ingeniería Térmica de la Universidad de Cádiz (UCA):
 - Francisco Sánchez de la Flor
- REPSOL-Dirección de Tecnología:
 - Ismael Vela Morejón (Centro Tecnológico Repsol)
 - Miguel Angel Muñecas Vidal (Centro Tecnológico Repsol)
 - Ignacio Leiva Pozo (Repsol Butano)

Dicho equipo ha contado con la participación de los siguientes asesores:

- Margarita de Luxán (Universidad Politécnica de Madrid), Gloria Gómez y Emilia Román. Asesoramiento en construcción y rehabilitación
- Ramón Velázquez (Ingeniero consultor). Asesoramiento en metodología de auditorías y caracterización de instalaciones de calefacción y refrigeración.
- Alberto Viti (Ingeniero consultor). Asesoramiento en instalaciones y RITE.
- Rafael Guzmán (Universidad de Málaga). Asesoramiento en instalaciones de iluminación.

Los tres procedimientos (CE3_Viviendas, CE3_PMT y CE3_GT) han sido desarrollados siguiendo los siguientes criterios generales:

- a) Los procedimientos deben ser realistas y poderse llevar a cabo con los datos disponibles y deben por tanto proporcionar alternativas en caso de que la información disponible sea incompleta o de muy difícil y/o costosa determinación.
- b) Los esquemas pueden ser interactivos de forma que los datos de entrada y, en definitiva, la complejidad del procedimiento sean función del proceso de toma de decisiones en relación con las mejoras viables.
- c) En la medida de lo posible, se utilizarán términos y conceptos formalmente análogos a los ya implementados en los procedimientos de certificación para edificios de nueva construcción.
- d) Se pone especial énfasis en la identificación de las medidas de mejora.
- e) Los procedimientos, para asignar la clase de eficiencia de un edificio nuevo y un edificio existente, respectivamente, deben ser interconsistentes.
- f) Cuando sea factible, se utilizarán para la calificación y la identificación de las mejoras los datos obtenidos de la eventual inspección periódica de eficiencia energética de la instrucción técnica ITE-4 del RITE y del análisis de los rendimientos

de los equipos así como del asesoramiento energético al que vienen obligadas las empresas de mantenimiento autorizadas por el RITE en su instrucción técnica IT3.4 (Programa de Gestión Energética).

De forma general, los procedimientos simplificados destinados a edificios existentes desarrollados en este proyecto difieren de los desarrollados para edificios de nueva planta en dos aspectos: inclusión de medidas de mejora y bases de datos de valores orientativos que el programa carga por defecto.

Medidas de mejora

El certificado de eficiencia energética de un edificio existente lleva implícitas medidas de mejora, tal como se cita en el borrador de Real Decreto versión 28/11/2008. Textualmente, el artículo 5 dice que el certificado de eficiencia energética deberá contener un *“Documento conteniendo un listado con un número suficiente de medidas, recomendadas por el técnico calificador, clasificadas en función de su viabilidad técnica, funcional y económica, así como por su repercusión energética, que permitan, en el caso de que el propietario del edificio decida acometer voluntariamente esas medidas, que la calificación energética obtenida mejore como mínimo un nivel en la escala de calificación energética, si la calificación de partida fuera la B, o dos niveles, si la calificación de partida fuera C, D, E, F o G.”*

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo de los tres procedimientos CE3 se ha orientado a facilitar lo que se considera el objetivo fundamental de la calificación de eficiencia energética de los edificios existentes, que consiste en **promover la implementación de medidas de mejora de la eficiencia energética**. Para ello, de manera complementaria al procedimiento de calificación se ha diseñado una aplicación paralela de identificación y evaluación de las medidas de ahorro de energía cuyo objetivo es simplificar el proceso de toma de decisiones que conduzca a que el edificio mejore dos clases de eficiencia energética.

Bases de datos de valores orientativos que se cargan por defecto

En el proceso de certificación de edificios existentes, el técnico calificador puede encontrarse con diferentes situaciones a la hora de recopilar datos, tanto los relativos a la calidad de la envolvente térmica (fachadas, cubiertas, suelos, huecos, etc.) como los correspondientes a la caracterización de los sistemas que consumen energía y sus respectivos equipos auxiliares:

- a) Todas las características y variables de comportamiento son conocidas y/o se encuentran documentadas a través del proyecto del edificio.
- b) Los datos disponibles son insuficientes para caracterizar de manera precisa los cerramientos o las instalaciones, pero se tiene información cualitativa sobre los mismos.
- c) No se conoce nada sobre las características de la envolvente o de las instalaciones.

Adicionalmente, para las instalaciones puede suceder que se hayan podido determinar con medidas las prestaciones medias de los equipos activos.

Por ello, las entradas de datos de los procedimientos CE3 desarrollados se han diseñado de manera que admitan la posible coexistencia de todos estos niveles de información, habiéndose previsto además, la existencia de bases de datos de valores orientativos que se cargan por defecto, tanto constructivas como de sistemas, para cubrir las carencias de información a varios niveles.

1 Introducción y objetivos del documento

Para clarificar el nivel de simulación utilizado en los diferentes procedimientos, se utilizará la clasificación propuesta por la norma EN 15243:2009 que identifica la base de tiempo de cálculo utilizada (base horaria, mensual o estacional) para la evaluación de las demandas del edificio por un lado y del comportamiento de las instalaciones por otro.

El resultado es el siguiente:

Tabla 1.1. Nivel de simulación utilizado por el programa CE3 en los diferentes procedimientos

		Base de cálculo de las instalaciones		
		Horaria	Mensual	Estacional
Base de cálculo de la demanda	Horaria	Gran terciario	Pequeño y mediano terciario	Viviendas
	Mensual			
	Estacional			Medidas de mejora

Este manual resume los fundamentos e hipótesis realizados para desarrollar los procedimientos simplificados CE3 de certificación energética de edificios.

Para ello se estructura en cuatro secciones:

- **Desarrollo de procedimiento en base horaria para la obtención de la demanda energética de calefacción y refrigeración.** Se ha desarrollado un procedimiento multizona para determinar la demanda en base horaria. Se hace teniendo en cuenta las siguientes simplificaciones:
 - No hay acoplamiento térmico ni aerúlico entre zonas del edificio.
 - El efecto de zonas adyacentes no acondicionadas se modela mediante el coeficiente de corrección de temperatura (b) tal como se indica en la CTE-HE1.
 - El paso de ganancias a cargas y el tratamiento de las situaciones de oscilación libre se efectúa con factores de ponderación precalculados, en lugar de con los específicos de cada zona.
 - Las sombras propias del edificio, las debidas a la presencia de otros edificios u obstáculos adyacentes y las sombras producidas sobre los huecos por obstáculos de fachada tales como voladizos, retranqueos, salientes laterales, etc., se determinan mediante un conjunto de factores de sombra mensuales (uno por hueco). Se desprecia el efecto de las sombras sobre cerramientos opacos.

- **Correlaciones en base estacional para estimar la demanda energética de un edificio.** La demanda energética de calefacción y refrigeración de un edificio tras la aplicación de las medidas de mejora se obtiene mediante el uso de correlaciones, que usan como variables independientes parámetros fundamentales del edificio y datos climáticos promediados tales como grados-día y valores integrados de radiación solar.

La robustez estadística de las correlaciones obtenidas permitirá después, en el uso del procedimiento, estimar las demandas de calefacción y refrigeración de su edificio tras aplicar las medidas de mejora propuestas.

Las correlaciones presentan una serie de parámetros libres, que son ajustados tras la simulación horaria, para hacer coincidir las demandas correladas en la situación inicial, con el resultado de las demandas de calefacción y refrigeración simulado.

- **Procedimiento para la obtención de las prestaciones medias estacionales de equipos de producción de frío y calor.** Para los edificios de viviendas, la evaluación de las prestaciones medias estacionales se ha determinado utilizando el procedimiento de factor de ponderación desarrollado en el documento reconocido "Prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor en edificios de viviendas". El factor de ponderación se determina en función del tipo de equipo, grado de centralización, tipo de edificio y zona climática. Para los edificios correspondientes a pequeño y mediano terciario (equipos autónomos), las prestaciones medias estacionales para cada sistema y grado de centralización se han obtenido en forma de correlaciones que dependen del clima y de las características de uso del edificio donde está situado.
- **Desarrollo del procedimiento de simulación en base horaria para la simulación de equipos y sistemas de producción de calor y frío.** El comportamiento de los equipos y sistemas para grandes edificios terciarios se hace en base a un procedimiento de simulación simplificado en base horaria. Todos los modelos de equipos y sistemas que incluye están basados en los de CALENER-GT, aunque con ciertas simplificaciones, mencionándose a continuación las más importantes:
 - En todas las horas se supone que la demanda del edificio se cubre totalmente.
 - Se considera que cada equipo combate la carga que se le asigna de forma que, aún si no tiene capacidad suficiente, no se ven afectados el resto de los equipos.
 - No existen los circuitos. La comunicación entre equipos se realiza a través de los árboles de conexiones, que permiten el paso de potencias de unos equipos a otros sin necesidad de conocer las temperaturas que habría en cada punto del lazo hidráulico.
 - Las únicas temperaturas que entran en juego son las de las masas de aire –caudales de ventilación, de infiltración, retornos, temperaturas internas de los locales y temperatura exterior– necesarias para los cálculos psicrométricos de los secundarios de aire y para el cálculo del consumo de los ventiladores de los equipos disipados por aire.

2 Procedimiento simplificado en base horaria para la obtención de la demanda energética de un edificio

2.1 Conceptos generales de la simulación realizada para obtener las demandas de calefacción y refrigeración del edificio

Como ideas previas que ayuden a entender el problema, es necesario mencionar las siguientes:

1. La térmica del edificio se basa en el planteamiento y resolución de las ecuaciones de balance de energía (primer principio de la termodinámica) ligadas a las leyes de transmisión de calor. Estos balances se aplican a diferentes niveles: sobre cada una de las superficies de la envolvente, sobre cada una de las zonas del edificio, sobre cada uno de los componentes del sistema de acondicionamiento, etc.
2. Las incógnitas son siempre temperaturas y, una vez conocidas las mismas, se aplican de nuevo las leyes de transmisión de calor para obtener los flujos instantáneos y específicos o cualquier integral espacio-temporal de los mismos. Por ejemplo, la carga térmica es una integral del flujo de calor por convección al local desde todas las superficies del recinto.
3. El problema planteado no tiene solución analítica, debido fundamentalmente a que las solicitudes no están expresadas por medio de ecuaciones dependientes del tiempo, sino que únicamente se conoce de ellas valores discretos para intervalos de tiempo regulares o no. Esto es cierto tanto para solicitudes exteriores del tipo radiación solar o temperatura exterior como para interiores del tipo calor generado por ocupantes o iluminación.

Como consecuencia de lo anterior, tampoco dispondremos de la carga térmica del edificio de una manera continua, sino que tendremos valores de la misma espaciados de manera consistente a como lo estaban las solicitudes.

El método que se ha utilizado para estimar los valores horarios de la carga térmica del edificio es un método indirecto de resolución de las ecuaciones de transferencia.

El método indirecto se basa en la aplicación del principio de superposición de las solicitaciones y en la aplicación de leyes de convolución que ligan las solicitaciones con las respuestas.

Una hipótesis previa es que las ecuaciones deben ser lineales e invariantes (coeficientes constantes), lo cual es una hipótesis de partida del procedimiento propuesto.

La respuesta global del edificio se calcula a partir de lo que se denomina respuestas unitarias, lo cual conlleva un proceso diferido que supone las siguientes etapas:

1. Cálculo de las ganancias o pérdidas de calor del edificio frente a cada una de las solicitaciones exteriores (una a una), suponiendo que la temperatura interior es constante.
2. Cálculo de la respuesta del edificio en términos de carga térmica para cada una de las solicitaciones unitarias (Funciones de transferencia) que caracterizan las ganancias o pérdidas instantáneas.
3. Cálculo de la carga térmica a temperatura constante, aplicando los resultados de la etapa tercera a las dos primeras.
4. Cálculo de la respuesta del edificio frente a una excitación unitaria de la temperatura interior.
5. Cálculo de la carga térmica a temperatura variable (aplicando los resultados de la etapa quinta a la cuarta) y teniendo en cuenta el periodo de funcionamiento del equipo acondicionador y las consignas correspondientes.

Las características de los sistemas físicos en general y de los térmicos en particular pueden ser definidas por medio de una función que proporcione la relación existente entre una determinada excitación y la respuesta del sistema a la misma. Una función como la descrita es particularmente interesante si el sistema es lineal e invariante.

La linealidad supone que la amplitud de la respuesta es proporcional a la amplitud de la excitación. La invariabilidad significa que excitaciones idénticas aplicadas en tiempos diferentes producen siempre respuestas idénticas. Estas dos propiedades son las dos condiciones necesarias y suficientes para aplicar el principio de superposición.

Si la respuesta $R(t)$ a una excitación elemental unitaria se muestrea a intervalos de tiempos sucesivos e iguales, los valores discretos así obtenidos se denominan factores de ponderación $r_u(n\Delta t)$.

Para una solicitación cualquiera, la aplicación del método de los factores de ponderación comprende cuatro etapas:

- Descomposición de la función excitación $E(t)$ en una serie temporal de intervalo Δt .
- Aproximación de la serie anterior mediante superposición de excitaciones elementales (cualquier función $E(t)$ muestreada a intervalos Δt se aproxima linealmente mediante triángulos isósceles de base $2\Delta t$).
- Cálculo para un instante genérico t de la respuesta que provocaría cada excitación elemental $T(t-n\Delta t)$, n variando de cero hasta infinito. De acuerdo con la linealidad del problema esta respuesta sería:

$$r_t(\mathcal{T}(t-n\Delta t)) = \mathcal{T}(t-n\Delta t) \cdot r_u(n\Delta t)$$

- Adición en el instante t de las respuestas individuales producidas por cada excitación elemental. Es decir:

$$R_t = \sum_{n=0}^{\infty} r_t(\mathcal{T}(t-n\Delta t)) = \sum_{n=0}^{\infty} \mathcal{T}(t-n\Delta t) \cdot r_u(n\Delta t)$$

Los factores de ponderación pueden ser definidos, por tanto, como la respuesta de una zona frente a una excitación unitaria.

La finalidad inmediata es condensar el comportamiento térmico de la zona en un conjunto limitado de series a partir de las cuales se puede deducir la respuesta global frente a un conjunto de solicitaciones complejas simultáneas.

Puesto que en la zona existen varias solicitaciones simultáneas, la respuesta en términos generales se expresa:

$$R_t = \sum_{k=1}^{n_e} \sum_{n=0}^{\infty} E_k \mathcal{T}(t-n\Delta t) W_k(n\Delta t)$$

Siendo:

n_e : número de solicitaciones

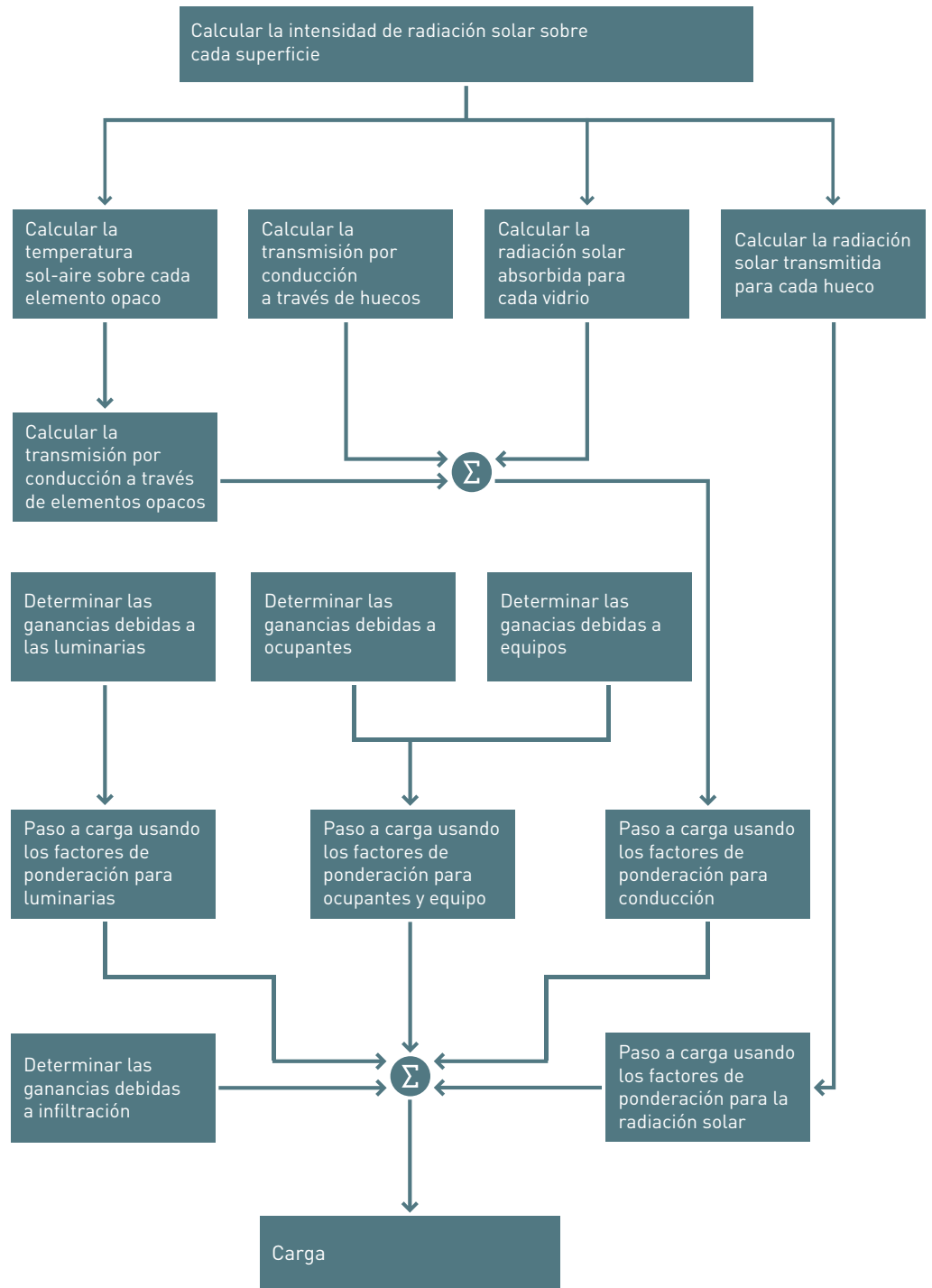
E_k : amplitud de la solicitación k.

W_k : factores de ponderación correspondientes a la solicitación k.

Los factores de ponderación tienen, a partir de uno de ellos, un comportamiento exponencial que posibilita el cálculo exacto de la respuesta con un número limitado de términos.

El procedimiento general usado se muestra en el cuadro siguiente:

Figura 2.1. Esquema del procedimiento general del cálculo



2.2 Cálculo de las demandas de calefacción y refrigeración: hipótesis, nivel de modelización y valores por defecto

Se utiliza un método de cálculo horario en régimen transitorio del comportamiento térmico del edificio, teniendo en cuenta de manera simultánea las solicitaciones exteriores e interiores y considerando los efectos de la masa térmica.

Las hipótesis y los valores por defecto son en todos los casos los incluidos en el apartado 4 del documento reconocido “*Condiciones de Aceptación de Procedimientos Alternativos. Procedimientos alternativos a LIDER y CALENER*”.

Se comentan a continuación aspectos relevantes de los modelos utilizados, poniendo énfasis en aquellos casos en los que el nivel de modelización difiere del nivel mínimo propuesto en el documento reconocido citado.

Caracterización de solicitaciones exteriores y condiciones de contorno en las superficies exteriores del edificio

Cálculo de las excitaciones exteriores primarias

A partir de los datos de los ficheros climáticos se calcula la radiación directa, difusa y reflejada sobre cada cerramiento de cada zona. También se calcula la temperatura radiante media y la temperatura sol-aire.

Cálculo de sombras

Para los obstáculos remotos, las sombras propias y los obstáculos de fachada, el efecto de obstrucción se determina en función de la posición solar. Este cálculo se realiza en preproceso utilizándose el concepto de área solar equivalente. Se detalla en el Anexo I.

Para los elementos de control solar se calcula el efecto de obstrucción mediante un valor del factor de sombra independiente de la posición solar.

Radiación solar incidente y absorbida por las superficies interiores

Se supone una fracción solar absorbida en cada superficie constante a lo largo del año con los siguientes valores:

Radiación directa

- Fracción absorbida por el suelo: 0,3.
- Fracción absorbida inicialmente por las superficies verticales: 0,33 en total. De este 0,33, a cada superficie vertical le corresponderá, a su vez, un porcentaje proporcional a su área.
- Fracción absorbida inicialmente por el techo: 0,07.
- Fracción absorbida por el mobiliario: 0,3.

De las fracciones absorbidas inicialmente por cada superficie vertical o por el techo, se supone que es rechazado al exterior el 90% de lo que le corresponde proporcionalmente a las áreas de los eventuales elementos semitransparentes contenidos en los mismos (ventanas o lucernarios, respectivamente).

Radiación difusa (incluye la difusa procedente del cielo y la reflejada por las superficies adyacentes al edificio)

La radiación difusa se absorbe proporcionalmente al área de las superficies interiores del recinto. El 50% de la radiación correspondiente al suelo se supone que es absorbida por el mobiliario.

De las fracciones absorbidas inicialmente por cada superficie vertical o por el techo, se supone que es rechazado al exterior el 90% de lo que le corresponde proporcionalmente a las áreas de los eventuales elementos semitransparentes contenidos en los mismos (ventanas o lucernarios, respectivamente).

Transmisión a través de cerramientos opacos unidimensionales

Se calcula en cada instante de cálculo el flujo de calor por conducción en régimen transitorio utilizando un modelo de funciones de transferencia específico para cada cerramiento (ver Anexo IV).

Cerramientos en contacto con el terreno

Se calcula en cada instante el flujo de calor por conducción en régimen transitorio. La multidimensionalidad de la transferencia se hace considerando régimen bidimensional. El modelo utilizado cumple las condiciones de régimen permanente (ver Anexo V).

Puentes térmicos

La transmisión de calor por conducción se supone en régimen permanente a través de las transmitancias térmicas lineales.

Transmisión en cerramientos semitransparentes

Se establece un balance en régimen permanente con p propiedades ópticas, dependientes del ángulo de incidencia de la radiación solar.

Balance en zonas

Se realiza un cálculo multizona del edificio sin acoplamiento térmico aerúlico entre las mismas.

Para zonas acondicionadas se usa el algoritmo que se detalla en el Anexo VI.

Para zonas no acondicionadas no se realiza un balance formal sino que su efecto sobre las zonas acondicionadas se tiene en cuenta a partir de los coeficientes correctores de temperatura.

2.3 Cálculo de la demanda de agua caliente sanitaria

Con carácter general, la demanda de energía correspondiente a agua caliente sanitaria en kWh/m² de un edificio residencial o terciario se obtiene a partir de la expresión:

$$D = 365 \cdot \rho \cdot C_p \cdot Q_{ACS}(T_{ref}) \cdot (T_{ref} - T_{AF}) \cdot \frac{1}{3600}$$

Donde:

ρ : densidad del agua (kg/litro) igual a la unidad.

C_p : calor específico del agua (kJ/kgK) igual a 4,18 kJ/kgK.

T_{ref} : T^a de referencia (°C) igual a 60 °C.

$Q_{ACS}(T_{ref})$ (litros/día): consumo de agua caliente sanitaria a 60 °C (T^a de referencia). Los edificios residenciales y terciarios solicitan de diferente forma este valor.

T_{AF} : T^a media anual de agua fría (°C). Se calcula como la media ponderada de las temperaturas diarias medias mensuales de agua fría de las capitales de provincia, tal y como aparecen recogidas en la tabla 3, apartado 6.4 de la norma UNE-EN 94002:2005 "Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria. Cálculo de la demanda de energía térmica".

La demanda de energía correspondiente a agua caliente sanitaria (kWh/m²) que es necesario satisfacer mediante equipos que no utilizan como fuente de energía la energía solar es:

$$D_{ACS} = 365 \cdot \rho \cdot C_p \cdot Q_{ACS}(T_{ref}) \cdot (T_{ref} - T_{AF}) \cdot \frac{1}{3600} \cdot (100 - CSM)$$

Donde:

CSM: es la contribución solar mínima. Los edificios residenciales y terciarios solicitan de diferente forma este valor.

A continuación se detallan las particularidades para edificios residenciales y terciarios.

Edificios residenciales

El consumo unitario diario medio de agua caliente sanitaria asociado a una temperatura de referencia de 60 °C es, según la tabla 3.1 del DB-HE4, de:

- 30 litros por persona y día en el caso de viviendas unifamiliares.
- 22 litros por persona y día en el caso de viviendas en bloque (multifamiliares).

Para expresar el caudal en consumo diario medio $-Q_{ACS}(T_{ref})-$ se ha considerado que el ratio de personas por metro cuadrado que ocupan una vivienda es independiente del tipo de vivienda e igual a 0,03 personas por metro cuadrado de superficie útil.

En el *edificio de referencia*, la contribución solar mínima se obtiene en función de la zona climática correspondiente a la radiación global sobre superficie horizontal establecida en el DB-HE4, haciendo uso de la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Contribución solar mínima asignada a los edificios de referencia del sector residencial

Zona climática	I	II	III	IV	V
CSM (%)	30	30	50	60	70

La zona climática se determina a partir de la tabla 3.3 del capítulo 3.1.2 de la sección HE4 del Código Técnico de la Edificación.

En el *edificio objeto* la contribución solar mínima debe ser suministrada por el usuario y debe cumplir los requerimientos mínimos establecidos en el Documento Básico del Código Técnico de la Edificación.

Edificios terciarios

El consumo unitario diario medio de agua caliente sanitaria asociado a una temperatura de referencia de 60 °C es solicitado al usuario. La tabla 3.1 del Documento Básico HE-4 del CTE recoge valores de referencia para distintos tipos de edificios terciarios.

En el *edificio de referencia*, la contribución solar mínima se calcula en función de la zona climática correspondiente a la radiación global sobre superficie horizontal establecida en el DB-HE4, haciendo uso de las siguientes tablas:

Tabla 2.2. Contribución solar mínima en porcentaje. Caso general

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-5.000	30	30	50	60	70
5.000-6.000	30	30	55	65	70
6.000-7.000	30	35	61	70	70
7.000-8.000	30	45	63	70	70
8.000-9.000	30	52	65	70	70
9.000-10.000	30	55	70	70	70
10.000-12.500	30	65	70	70	70
12.500-15.000	30	70	70	70	70
15.000-17.500	35	70	70	70	70
17.500-20.000	45	70	70	70	70
>20.000	52	70	70	70	70

Tabla 2.3. Contribución solar mínima en porcentaje. Caso efecto Jule

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-1.000	50	60	70	70	70
1.000-2.000	50	63	70	70	70
2.000-3.000	50	66	70	70	70
3.000-4.000	51	69	70	70	70
4.000-5.000	58	70	70	70	70
5.000-6.000	62	70	70	70	70
>6.000	70	70	70	70	70

En el *edificio objeto* la contribución solar debe ser suministrada por el usuario.

3 Desarrollo de correlaciones en base mensual y estacional para estimar la demanda energética de un edificio

El esquema de funcionamiento de este procedimiento simplificado se basa en el desarrollo de una serie de correlaciones que han permitido relacionar las demandas energéticas de los edificios (calefacción y refrigeración) con algunas de sus principales características geométricas y constructivas.

Para desarrollar estas correlaciones se han abordado las tareas que se resumen a continuación.

3.1 Desarrollo de las correlaciones: descripción general de la metodología seguida

Para la obtención de las correlaciones de calefacción y refrigeración se ha partido de las expresiones matemáticas que simulan el comportamiento térmico del edificio recogidas en la norma UNE-EN ISO 13790¹.

En cada caso (calefacción y refrigeración) se ha comprobado si los resultados obtenidos aplicando estas expresiones con los datos generados en la fase anterior se ajustaban a los valores de demanda.

A partir de este análisis inicial se ha ido corrigiendo el modelo, añadiendo nuevas variables con objeto de obtener el mejor ajuste posible.

La expresión propuesta, véase más adelante, se ha aplicado a un número suficiente de edificios de todas las tipologías en todas las zonas climáticas, y se ha comprobado que puede representar con suficiente aproximación las demandas de calefacción y refrigeración, en base mensual, y en base estacional, de los edificios.

¹ UNE-EN ISO 13790:2008. Eficiencia térmica de los edificios. Cálculo del consumo de energía para calefacción de espacios.

3.2 Modelos de calefacción

Según lo indicado anteriormente, la expresión matemática de la que se parte para estimar la demanda de calefacción² de un edificio (en kWh/m²) es:

Figura 3.1. Expresión para el cálculo de la demanda energética de calefacción en un edificio basada en la norma UNE-EN ISO 13790:2008

$$DC_{mes} = \left\{ \begin{aligned} & a_{mes} \cdot \left(\frac{Um}{V/At} \right) \cdot (altura) \cdot GD_{mes} \cdot \frac{24}{1000} + b_{mes} \cdot \left(\frac{Av}{Aa} \right) \cdot g \cdot ASSE \cdot Is_{mes} + \\ & + c_{mes} \cdot (ventilación) \cdot \rho \cdot Cp \cdot (altura) \cdot GD_{mes} \cdot \frac{24}{3600} + d_{mes} \end{aligned} \right\}$$

Siendo:

$$\begin{aligned} a_{mes} &= a_1 + a_2 \cdot SCI_{mes} \quad \dots \quad b_{mes} = b_1 + b_2 \cdot SCI_{mes} \quad \dots \quad c_{mes} = c_1 + c_2 \cdot SCI_{mes} \\ d_{mes} &= d_1 + d_2 \cdot SCI_{mes} \end{aligned}$$

La demanda de calefacción calculada con esta ecuación tiene un valor positivo, siendo el significado de cada término el siguiente:

- El primer término recoge la influencia del nivel de aislamiento del edificio, de su compacidad y del clima, a través de los grados-días. Tiene signo positivo porque contribuye a aumentar la demanda de calefacción.
- El segundo término recoge la influencia del nivel de acristalamiento del edificio, y del clima, a través de la radiación solar. Tiene signo negativo, es decir, contrario al de la demanda de calefacción.
- El tercer término recoge la influencia de la ventilación y/o la infiltración del edificio, y del clima, a través de los grados-días. Tiene signo positivo porque contribuye a aumentar la demanda de calefacción.
- En último lugar, se ha añadido un término independiente que recoge la influencia de todos los demás términos de los que depende la demanda de calefacción, como las fuentes internas.

Si se usa la anterior ecuación para un determinado mes, se obtendrá la demanda de calefacción de dicho mes. Para obtener la demanda para toda la estación de invierno (de octubre a mayo), se tiene:

² Se han considerado como meses de calefacción enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre.

Figura 3.2. Ajuste de la anterior expresión para el cálculo de demandas de calefacción en base estacional

$$\begin{aligned}
 DC_{INVIerno} &= \sum_{\forall \text{ meses}} DC_{mes} = \\
 &= \left\{ \sum_{\forall \text{ meses}} a_{mes} \cdot \left(\frac{Um}{V/At} \right) \cdot (altura) \cdot GD_{mes} \cdot \frac{24}{1000} + \sum_{\forall \text{ meses}} b_{mes} \cdot \left(\frac{Av}{Aa} \right) \cdot g \cdot ASSE \cdot Is_{mes} + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{\forall \text{ meses}} c_{mes} \cdot (ventilación) \cdot \rho \cdot Cp \cdot (altura) \cdot GD_{mes} \cdot \frac{24}{3600} + \sum_{\forall \text{ meses}} d_{mes} \right\} = \\
 &= \left\{ a_{INV} \cdot \left(\frac{Um}{V/At} \right) \cdot (altura) \cdot GD_{INV} \cdot \frac{24}{1000} + b_{INV} \cdot \left(\frac{Av}{Aa} \right) \cdot g \cdot ASSE \cdot Is_{INV} + \right. \\
 &\quad \left. + c_{INV} \cdot (ventilación) \cdot \rho \cdot Cp \cdot (altura) \cdot GD_{INV} \cdot \frac{24}{3600} + d_{INV} \right\}
 \end{aligned}$$

Siendo:

$$\begin{aligned}
 a_{INV} &= a_1 + a_2 \cdot SCI_{INV} \quad \dots \quad b_{INV} = b_1 + b_2 \cdot SCI_{INV} \quad \dots \quad c_{INV} = c_1 + c_2 \cdot SCI_{INV} \\
 d_{INV} &= d_1 + d_2 \cdot SCI_{INV}
 \end{aligned}$$

Para facilitar el uso de la correlación en base estacional se tiene que:

$$\begin{aligned}
 a_{2,INV} &= a_2 \cdot \frac{\sum_{\forall \text{ meses}} GD_{mes} \cdot SCI_{mes}}{GD_{INV} \cdot SCI_{INV}} \quad \dots \quad b_{2,INV} = b_2 \cdot \frac{\sum_{\forall \text{ meses}} Is_{mes} \cdot SCI_{mes}}{Is_{INV} \cdot SCI_{INV}} \\
 c_{2,INV} &= c_2 \cdot \frac{\sum_{\forall \text{ meses}} GD_{mes} \cdot SCI_{mes}}{GD_{INV} \cdot SCI_{INV}} \quad \dots \quad d_{1,INV} = 8 \cdot d_{1,mes}
 \end{aligned}$$

Siendo:

$$GD_{INV} = \sum_{\forall \text{ meses}} GD_{mes} \quad \dots \quad Is_{INV} = \sum_{\forall \text{ meses}} Is_{mes} \quad \dots \quad SCI_{INV} = \sum_{\forall \text{ meses}} SCI_{mes}$$

Sobre la ecuación anterior el programa realiza un análisis de regresión múltiple con objeto de calcular los coeficientes de correlación (coeficientes a_i , b_i , c_i , d_i) para ajustar sus resultados a las demandas calculadas por el procedimiento horario descrito en el capítulo anterior.

El significado y forma de cálculo de las variables independientes del modelo se indica a continuación:

Tabla 3.1. Expresión y significado de las variables del modelo de calefacción

(Um)	<p>(Um) Transmitancia térmica media (en W/m²K)</p> <p>Um es la transmitancia térmica media del edificio calculada a partir de las transmitancias de los elementos de la envuelta, incluidos los puentes térmicos³.</p> $Um = \frac{\sum_{\forall \text{ muros exteriores}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{ ventanas}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{ cubiertas}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{ suelos}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{ puentes térmicos}} L_i \Psi_i}{A_t}$ <p>Donde: Ψ_i (transmitancia térmica lineal del puente térmico i) y L_i (longitud)</p>
Compacidad= V/At	<p>Compacidad (en m)</p> <p>Cociente del volumen acondicionado dividido por el área de transferencia.</p> <p>El área de transferencia, se calcula:</p> $A_t = \sum_{\forall \text{ muros exteriores}} A_i + \sum_{\forall \text{ ventanas}} A_i + \sum_{\forall \text{ cubiertas}} A_i + \sum_{\forall \text{ suelos}} A_i$
(altura)	<p>Altura libre de los espacios (m)</p>
GD	<p>Grados-día de invierno en base 20 (o verano en base 25) de la localidad en el periodo considerado</p>
renh	<p>Renovaciones hora de ventilación y/o infiltración (h⁻¹)</p> <p>El Anexo II explica con mayor detalle el significado de este parámetro (ventilación/infiltración) así como las principales hipótesis consideradas en su cálculo</p>
ρ	<p>Densidad del aire</p> <p>Se toma igual a 1,2 kg/m³</p>
Cp	<p>Calor específico del aire a presión constante</p> <p>Se toma igual a 1 kJ/kg K</p>
(g)	<p>Factor solar medio de las ventanas (adimensional)</p>
(Av/Aa)	<p>Área de ventanas equivalente al sur dividida por el área acondicionada (adimensional)</p>
(ASSE)	<p>Área solar sur equivalente (adimensional)</p> <p>Es la relación entre la radiación que reciben las ventanas en sus correspondientes orientaciones y con las sombras propias y/o lejanas que tengan, y la radiación que recibirían si estuvieran orientadas al sur sin ningún tipo de sombra.</p> <p>El Anexo I explica con mayor detalle el significado de este parámetro (área solar) así como las principales hipótesis consideradas en su cálculo</p>

³ El Anexo III incluye una explicación de cómo se han caracterizado los puentes térmicos para su uso en las correlaciones.

(Continuación)

I_s	Radiación global acumulada sobre superficie vertical con orientación sur en el periodo considerado (en kWh/m ²)
$\left(\frac{Ac}{Aa}\right)$	Área de cubierta dividida por el área acondicionada (adimensional)
SCI_{mes}	Severidad climática de invierno para el mes considerado

3.3 Modelos de refrigeración

Para la estimación de la demanda de refrigeración se ha optado por el desarrollo de una correlación que permite obtener la demanda para toda la vivienda en cada uno de los meses de verano por separado (junio, julio, agosto y septiembre).

Se ha seguido un procedimiento análogo al de la demanda de calefacción, para llegar al cálculo de la demanda estacional.

La ecuación que se propone para el cálculo de la demanda de refrigeración es la siguiente:

Figura 3.3. Expresión para el cálculo de la demanda de refrigeración en un edificio según la norma UNE-EN-ISO 13790:2008

$$DR_{mes} = \left\{ \begin{array}{l} a_{mes} \cdot \left(\frac{Um_{sin_cubierta}}{V/At} \right) \cdot (altura) \cdot GD_{mes} \cdot \frac{24}{1000} + \\ + b_{mes} \cdot (U_{cubierta}) \cdot \left(\frac{Acubierta}{Aacondicionada} \right) \cdot GD_{mod_cub_{mes}} \cdot \frac{24}{1000} + \\ + c_{mes} \cdot (ventilación) \cdot \rho \cdot Cp \cdot (altura) \cdot GD_{mes} \cdot \frac{24}{3600} + \\ + d_{mes} \cdot (ventilación_noche) \cdot \rho \cdot Cp \cdot (altura) \cdot GD_{noche_{mes}} \cdot \frac{24}{3600} + \\ + e_{mes} \cdot \left(\frac{Av}{Aa} \right) \cdot g \cdot ASSE \cdot I_{s_{mes}} + f_{mes} \end{array} \right.$$

Siendo:

$$\begin{array}{llll} a_{mes} = a_1 + a_2 \cdot SCV_{mes} & \cdots & b_{mes} = b_1 + b_2 \cdot SCV_{mes} & \cdots & c_{mes} = c_1 + c_2 \cdot SCV_{mes} \\ d_{mes} = d_1 + d_2 \cdot SCV_{mes} & \cdots & e_{mes} = e_1 + e_2 \cdot SCV_{mes} & \cdots & f_{mes} = f_1 + f_2 \cdot SCV_{mes} \end{array}$$

Para facilitar el uso de la correlación en base estacional se tiene que:

Figura 3.4. Ajuste de la anterior expresión para el cálculo de la demanda de refrigeración en base estacional.

$$\begin{aligned}
 a_{2,VER} &= a_2 \cdot \frac{\sum_{\forall \text{ meses}} GD_{mes} \cdot SCV_{mes}}{GD_{VER} \cdot SCV_{VER}} \quad \dots \quad b_{2,VER} = b_2 \cdot \frac{\sum_{\forall \text{ meses}} GD_{mod_cub_mes} \cdot SCV_{mes}}{GD_{mod_cub_VER} \cdot SCV_{VER}} \\
 c_{2,VER} &= c_2 \cdot \frac{\sum_{\forall \text{ meses}} GD_{mes} \cdot SCV_{mes}}{GD_{VER} \cdot SCV_{VER}} \quad \dots \quad d_{2,VER} = d_2 \cdot \frac{\sum_{\forall \text{ meses}} GD_{noche_mes} \cdot SCV_{mes}}{GD_{noche_VER} \cdot SCV_{VER}} \\
 e_{2,VER} &= e_2 \cdot \frac{\sum_{\forall \text{ meses}} Is_{mes} \cdot SCV_{mes}}{IS_{VER} \cdot SCV_{VER}} \quad \dots \quad f_{1,VER} = 4 \cdot f_{1,mes}
 \end{aligned}$$

Siendo:

$$\begin{aligned}
 GD_{VER} &= \sum_{\forall \text{ meses}} GD_{mes} \quad \dots \quad GD_{mod_cub_VER} = \sum_{\forall \text{ meses}} GD_{mod_cub_mes} \\
 GD_{noche_VER} &= \sum_{\forall \text{ meses}} GD_{noche_mes} \quad \dots \quad IS_{VER} = \sum_{\forall \text{ meses}} Is_{mes} \quad \dots \quad SCV_{VER} = \sum_{\forall \text{ meses}} SCV_{mes}
 \end{aligned}$$

La demanda de refrigeración calculada con esta ecuación tiene un valor positivo, siendo el significado de cada término el siguiente:

- El primer término recoge la influencia del nivel de aislamiento del edificio, sin contar la cubierta, de su compacidad y del clima, a través de los grados-días. Tiene signo negativo porque contribuye a disminuir la demanda de refrigeración, aunque se observa que su influencia es muy pequeña.
- El segundo término recoge la influencia del nivel de aislamiento de la cubierta del edificio, y del clima, a través de los grados-días modificados. Tiene signo positivo porque contribuye a aumentar la demanda de refrigeración.
- El tercer término recoge la influencia de la ventilación y/o la infiltración del edificio durante las horas diurnas, y del clima, a través de los grados-días. Según la localidad puede tener signo positivo o negativo, pero en ambos casos su influencia es pequeña.
- El cuarto término recoge la influencia de la ventilación y/o la infiltración del edificio durante las horas nocturnas, y del clima, a través de los grados-días-noche. Tiene signo negativo porque contribuye a disminuir la demanda de refrigeración.
- El quinto término recoge la influencia del nivel de acristalamiento del edificio, y del clima, a través de la radiación solar. Tiene signo positivo porque contribuye a aumentar la demanda de refrigeración.
- En último lugar, se ha añadido un término independiente que recoge la influencia de todos los demás términos de los que depende la demanda de refrigeración, como las fuentes internas.

Análogamente al caso de calefacción, el programa realiza un análisis de regresión múltiple sobre la ecuación anterior con objeto de calcular los coeficientes de correlación (coeficientes $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$) y ajustar sus resultados a las demandas

calculadas por el procedimiento horario descrito en el capítulo anterior.

Para la realización del análisis regresivo multivariante se han realizado los siguientes supuestos:

- De conformidad con lo indicado en el documento reconocido: “Condiciones de Aceptación de Procedimientos Alternativos a LIDER y CALENER”, todas las demandas mensuales de refrigeración inferiores a 1,5 kWh/m² se han considerado nulas. Por ello, en el procedimiento de ajuste de los parámetros del modelo de demanda de refrigeración, se han desestimado los casos con demandas de refrigeración inferiores a 6 kWh/m². Este valor, 6 kWh/m², se ha calculado como el producto de los 4 meses para los que existe demanda de refrigeración por el umbral mínimo a considerar, 1,5 kWh/m².
- De igual manera, según lo indicado en el Anexo I del documento reconocido de escala de calificación energética para edificios de nueva construcción, las demandas de refrigeración para las zonas climáticas C1, D1 y E1, se han considerado nulas.

El significado y forma de cálculo de las variables independientes del modelo se indica a continuación:

Tabla 3.2. Expresión y significado de las variables del modelo de refrigeración

<p>(Um sin cubierta)</p>	<p>Transmitancia térmica media dividida por la compacidad (en W/m³K)</p> <p>Um es la transmitancia térmica media del edificio calculada a partir de las transmitancias de los elementos de la envuelta, incluidos puentes térmicos⁴.</p> $Um = \frac{\sum_{\forall \text{muros exteriores}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{ventanas}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{suelos}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{puentes térmicos}} L_i \Psi_i}{A_t}$ <p>Siendo: Ψ_i (transmitancia térmica lineal de puente térmico i) y L_i (longitud)</p> <p>El área de transferencia, se calcula:</p> $A_t = \sum_{\forall \text{muros exteriores}} A_i + \sum_{\forall \text{ventanas}} A_i + \sum_{\forall \text{cubiertas}} A_i + \sum_{\forall \text{suelos}} A_i$
<p>Compacidad = V/A_t</p>	<p>Compacidad (en m)</p> <p>Cociente del volumen acondicionado dividido por el área de transferencia</p>
<p>(altura)</p>	<p>Altura libre de los espacios (m)</p>

⁴ El anexo III incluye una explicación de cómo se han caracterizado los puentes térmicos para su uso en las correlaciones.

GD	Grados-día de invierno en base 20 (o verano en base 25) de la localidad en el periodo considerado
U_c	Transmitancia térmica de la cubierta
$\left(\frac{A_c}{A_a}\right)$	Área de cubierta dividida por el área acondicionada (adimensional)
GD_{mod}	Grados-día modificados de verano de la localidad calculados en base 25 Esta modificación consiste en el cálculo de los grados-día a partir de las temperaturas sol-aire sobre cubierta en vez de a partir de la temperatura de aire
$renh$ y $renhoche$	Renovaciones hora de ventilación y/o infiltración (h^{-1}) El Anexo II explica con mayor detalle el significado de estos parámetros así como las principales hipótesis consideradas en su cálculo
ρ	Densidad del aire Se toma igual a $1,2 \text{ kg/m}^3$
C_p	Calor específico del aire a presión constante Se toma igual a 1 kJ/kg K
GD_{noche}	Grados-día de verano de la localidad durante la noche (de 1h a 8h) calculados en base 25
$\left(\frac{A_v}{A_a}\right)$	Área de ventanas equivalente al sur dividida por el área acondicionada (adimensional)
(g)	Factor solar medio de las ventanas (adimensional)
(AS)	Área solar Radiación que reciben las ventanas en sus correspondientes orientaciones y con las sombras propias y/o lejanas que tengan. El Anexo I explica con mayor detalle el significado de este parámetro (área solar) así como las principales hipótesis consideradas en su cálculo
I_s	Radiación global acumulada sobre superficie vertical con orientación sur en el periodo considerado en kWh/m^2

4 Procedimiento para la obtención de las prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor

4.1 Introducción y metodología

Las prestaciones medias estacionales de un sistema térmico no dependen exclusivamente de sí mismo (tipo y prestaciones nominales), sino que son función además del:

- Clima.
- Edificio donde está instalado (que condiciona la carga parcial).
- Dimensionado (o más bien sobredimensionado) de su potencia.

Puesto que estos tres elementos condicionan las prestaciones medias estacionales, su tipificación debe hacerse en principio para una familia de edificios concreta (tales como las viviendas unifamiliares, los bloques de viviendas o edificios de uso terciario), para cada clima concreto y bajo unos escenarios concretos de dimensionado de la potencia punta.

Las prestaciones a las que se hace referencia en el documento son típicamente rendimientos cuando se trata de calderas, COP cuando se habla de bombas de calor funcionando en modo calefacción y EER para los equipos de producción de frío.

El presente apartado contiene un procedimiento para determinar las prestaciones medias estacionales de los equipos y sistemas de calefacción, refrigeración y producción de agua caliente sanitaria en edificios de viviendas y pequeños y medianos terciarios.

Este procedimiento ha sido aplicado a los equipos y sistemas que actualmente forman parte del programa de referencia CALENER-VYP y para las condiciones en que dichos equipos se contemplan en el estándar de cálculo del mencionado programa, con objeto de determinar sus prestaciones medias estacionales y así poder utilizarlas directamente en el procedimiento simplificado de certificación energética de viviendas existentes.

4.1.1 Metodología para edificios de vivienda

De forma general para el caso de edificios de vivienda, tanto en viviendas unifamiliares como en bloque, las prestaciones medias estacionales de un equipo o sistema se han calculado multiplicando sus prestaciones nominales por un factor denominado factor de ponderación representativo.

En el apartado 4.2 se describirá la metodología seguida para la obtención de dicho factor de ponderación. En el apartado 4.3 se describirá la integración de los factores de ponderación y su utilización en el procedimiento simplificado para certificación de eficiencia energética de edificios existentes de viviendas. De los resultados recopilados en este apartado se deduce que el factor de ponderación dependerá exclusivamente del tipo de sistema y de la zona climática.

4.1.2 Metodología para edificios del subsector pequeño y mediano terciario

En el caso de edificios del subsector pequeño y mediano terciario se define, análogamente al caso de viviendas, un factor de ponderación que multiplicado por el rendimiento nominal proporcione el rendimiento medio estacional. Las particularidades de este factor de ponderación frente a aquel se resumen a continuación:

- Depende de la localidad, a través de la severidad climática de invierno y de verano.
- Depende del sobredimensionado del sistema frente a la demanda punta o máxima a satisfacer por el mismo.
- Depende del horario de uso del edificio: 8, 12, 16 o 24 horas.
- Depende de la intensidad de las fuentes internas: alta, media o baja.
- No es un valor único, sino una función que expresa su dependencia con los parámetros anteriores.

En el apartado 4.2 se describirá la metodología seguida para la obtención de dicho factor de ponderación. En el apartado 4.4 se describirá la metodología del cálculo del rendimiento medio estacional a partir del nominal en edificios terciarios. De los resultados recopilados en este apartado se deduce que el factor de ponderación dependerá exclusivamente del tipo de sistema y de la zona climática.

4.2 Obtención de factores de ponderación

4.2.1 Definición del sistema o equipo en CALENER-VYP

Se definen los equipos o sistemas cuyo factor de ponderación se desea obtener sobre una muestra de edificios representativos del subsector correspondiente. La representatividad de la muestra de edificios se ha basado en aquellos parámetros que determinan el diseño de los sistemas tales como la superficie útil y el tamaño de los espacios. En el caso de viviendas dicha muestra está formada por 6 edificios, de los cuales 3 son edificios de viviendas unifamiliares y 3 correspondientes a bloques de viviendas. En el caso de edificios terciarios la muestra de edificios representativos está formada por 7 edificios, entre los que se encuentran edificios de oficinas y de otros servicios.

Las características constructivas de dichos edificios se han modificado para que se correspondan con los siguientes supuestos:

1. Aplicación estricta de las exigencias del documento básico CTE-HE1 para cada zona climática.
2. Aplicación estricta de las exigencias de la NBE-CT 79 para cada zona climática.

4.2.2 Selección de localidades

Los comportamientos del edificio y del sistema se han evaluado realizando las simulaciones de CALENER-VYP en las localidades que se indican en la tabla siguiente:

Tabla 4.1. Localidades para las que se ha evaluado el comportamiento del edificio

		Zona climática de verano			
		1	2	3	4
Zona climática de invierno	A			Cádiz	Almería
	B			Valencia Castellón	Sevilla Córdoba
	C	Bilbao	Barcelona	Granada	Toledo Jaén
	D	Vitoria	Segovia Zamora	Madrid Guadalajara Ciudad Real	
	E	Burgos			

4.2.3 Dimensionado del equipo o sistema

La potencia de los equipos o sistemas se calculará de acuerdo con los siguientes criterios:

- Calderas de combustión (centralizadas por vivienda): 25 kW.
- Calderas de combustión (centralizadas por bloque): sobredimensionado del 0% y del 42% a partir de los valores de carga punta que presenten los valores horarios de demanda obtenidos mediante LIDER.
- Sistemas de calefacción por bombas de calor aire-aire (equipos centralizados por vivienda), según la siguiente tabla (en W/m² en condiciones EUROVENT):

Tabla 4.2. Dimensionado de sistemas de calefacción por bombas de calor aire-aire (W/m²)

	Zona climática				
	A	B	C	D	E
Viviendas unifamiliares	70	80 y 100		120 y 140	
Viviendas en bloque	60	70		100	

- Sistemas de calefacción por bombas de calor aire-aire (equipos individuales tipo split): los mismos criterios que los equipos centralizados con una potencia mínima en condiciones EUROVENT de 2,0 kW.
- Sistemas de refrigeración: se calculará la potencia nominal en condiciones EUROVENT multiplicando por 0,87 las potencias de calefacción citadas anteriormente y suponiendo que el ratio potencia sensible frente a potencia total es 0,70.

4.2.4 Generación de base de datos de factores de ponderación

De los resultados del programa CALENER-VYP se han obtenido las demandas y los consumos en energía final de calefacción, refrigeración y ACS (según corresponda).

Las prestaciones medias estacionales se calcularán como el cociente entre las demandas y los consumos en energía final obtenidos de los ficheros de resultados *Obj.dat.

El factor de ponderación se define finalmente como el cociente entre la prestación media estacional y la prestación en condiciones nominales. Se hace notar en este punto que el factor de ponderación es independiente de la calidad del equipo en condiciones nominales, es decir, el factor de ponderación es el mismo si, por ejemplo, el COP nominal de una bomba de calor es 2,5 o 4.

En el caso particular de edificios terciarios se calcula un factor de ponderación específico para cada mes y se estudia su dependencia de los parámetros enumerados en el apartado 4.2.1.

Se obtendrán las distribuciones de los factores de ponderación para los siguientes casos:

1. Agrupación del documento reconocido “Prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor” para el procedimiento simplificado de edificios de nueva planta CE2.

Tabla 4.3. Dimensionado de calderas y por bombas de calor aire-aire (I)

Tipo de edificio	Unifamiliares	Bloques																				
Localidades	Todas (18)																					
Calidad constructiva	CTE-HE1																					
Dimensionado calderas	25 kW	0% y 42% respecto a punta (CTE-HE1)																				
Dimensionado bombas de calor	<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> <td>D</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>70</td> <td>80-100</td> <td colspan="3">120-140</td> </tr> </table> Split mín. 2 kW	A	B	C	D	E	70	80-100	120-140			<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> <td>D</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>70</td> <td colspan="3">100</td> </tr> </table>	A	B	C	D	E	60	70	100		
A	B	C	D	E																		
70	80-100	120-140																				
A	B	C	D	E																		
60	70	100																				

2. Construcción CT-79 e infra-dimensionado de equipos.

Tabla 4.4. Dimensionado de calderas y por bombas de calor aire-aire (II)

Tipo de edificio	Unifamiliares	Bloques																				
Localidades	A3, B4 (Sevilla), C2, D3 (Madrid), E1 (5)																					
Calidad constructiva	NBE-CT79																					
Dimensionado calderas	25 kW	0% y 42% respecto a punta (CTE-HE1)																				
Dimensionado bombas de calor	<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> <td>D</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>70</td> <td>80-100</td> <td colspan="3">120-140</td> </tr> </table> Split mín. 2 kW	A	B	C	D	E	70	80-100	120-140			<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> <td>D</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>70</td> <td colspan="3">100</td> </tr> </table>	A	B	C	D	E	60	70	100		
A	B	C	D	E																		
70	80-100	120-140																				
A	B	C	D	E																		
60	70	100																				

3. Construcción CT-79 y dimensionado de equipos acorde.

Tabla 4.5. Dimensionado de calderas y por bombas de calor aire-aire (III)

Tipo de edificio	Unifamiliares	Bloques																				
Localidades	A3, B4 (Sevilla), C2, D3 (Madrid), E1 (5)																					
Calidad constructiva	NBE-CT79																					
Dimensionado calderas	25 kW	0% y 42% respecto a punta (NBE-CT79)																				
Dimensionado bombas de calor	<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> <td>D</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>80</td> <td>95-120</td> <td colspan="3">135-160</td> </tr> </table> Split mín. 2 kW	A	B	C	D	E	80	95-120	135-160			<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> <td>D</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>70</td> <td>80</td> <td colspan="3">120</td> </tr> </table>	A	B	C	D	E	70	80	120		
A	B	C	D	E																		
80	95-120	135-160																				
A	B	C	D	E																		
70	80	120																				

4.2.5 Selección del factor de ponderación aplicable en el procedimiento simplificado para edificios de viviendas

Para seleccionar los valores que finalmente se habrán de utilizar en el “**Procedimiento simplificado para Certificación de Eficiencia Energética de Edificios de Viviendas**” se elegirá de la muestra el valor que se corresponde con el 50% de los casos.

La muestra es obviamente discreta por lo que la elección del percentil del 50% no es trivial en muchos casos.

Para obviar esta dificultad se propone un ajuste de la muestra mediante una función de Weibull a partir de la cual la obtención del percentil es inmediata.

Para ilustrar esto último se incluye a continuación una de las muestras obtenidas para la aplicación del procedimiento (figura 4.1) y el proceso de obtención del factor de ponderación que se retiene para el procedimiento simplificado de certificación de viviendas (figura 4.2 y figura 4.3).

Este procedimiento se aplicará a los tres casos descritos en el apartado precedente, analizándose a posteriori la dispersión obtenida en cada caso y proponiéndose un valor final a utilizar.

Figura 4.1. Distribución en frecuencias de la muestra

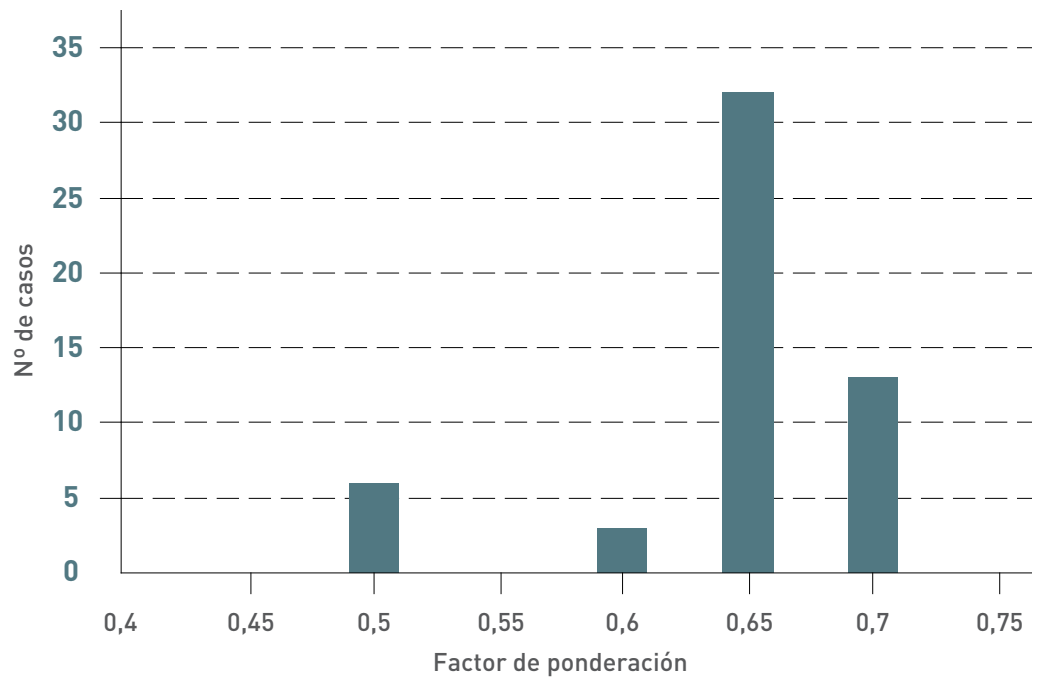


Figura 4.2. Ajuste de la muestra

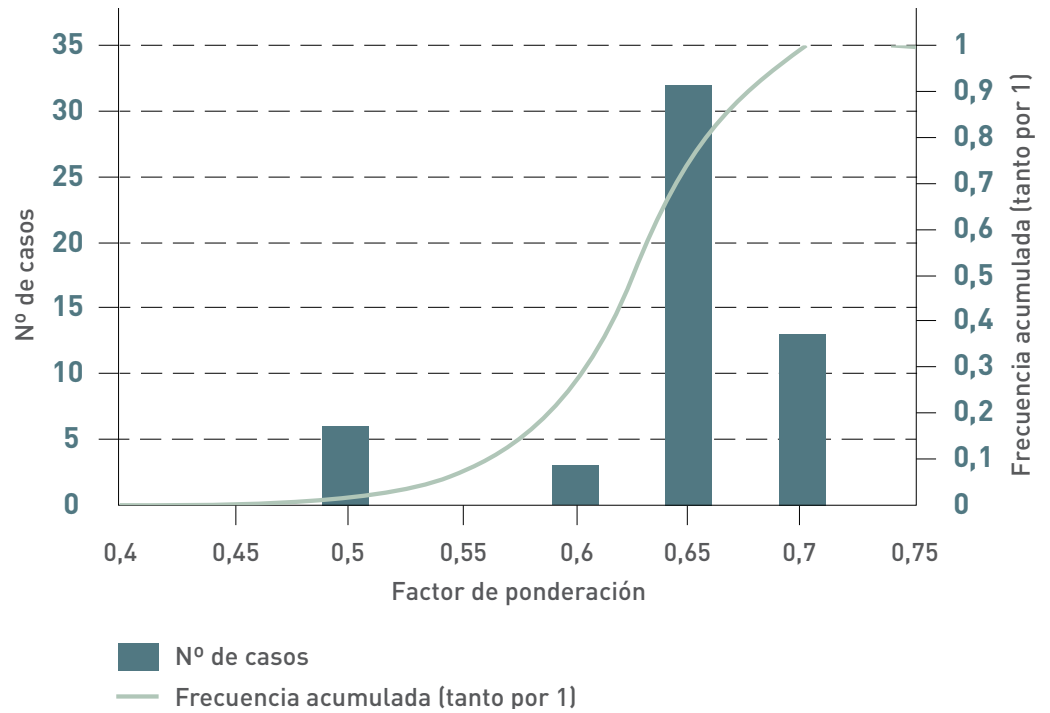
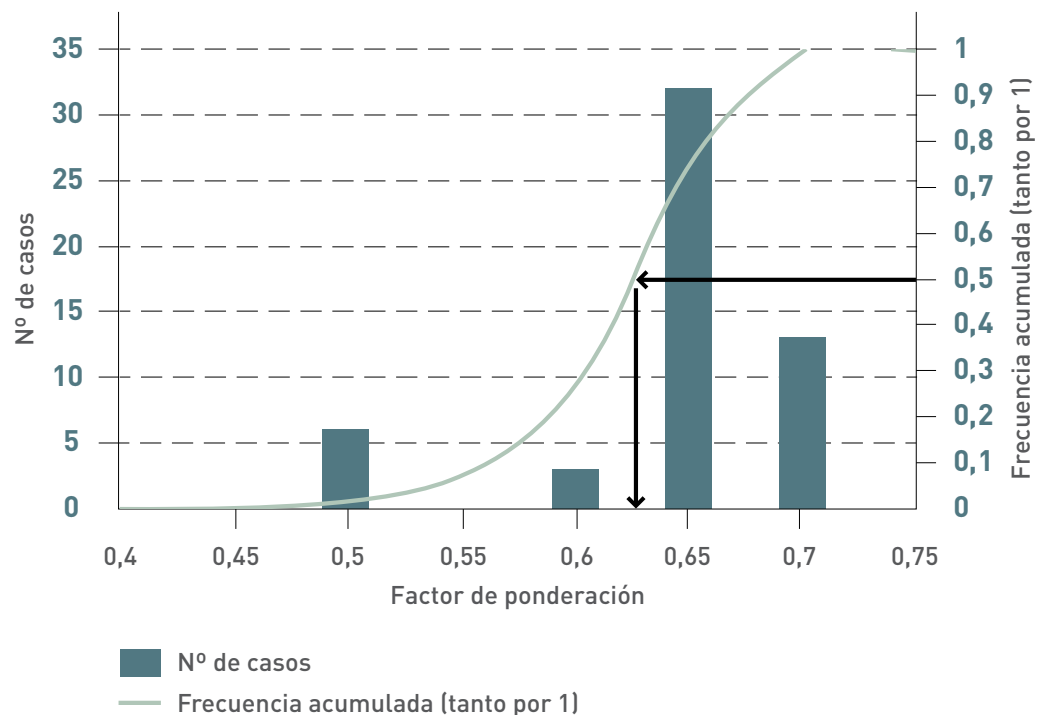


Figura 4.3. Selección del factor de ponderación aplicable (0,63 en este caso)



Hay que añadir que el número de casos a considerar para construir la muestra depende obviamente de la estabilidad del factor de ponderación buscado frente al clima, al edificio y al dimensionado del equipo. En muchos casos de equipos muy estables (por ejemplo, algunas calderas), basta una muestra pequeña, por ejemplo 2 edificios en 3 climas para asegurar que el factor de ponderación elegido tiene precisión técnica suficiente.

4.3 Integración de los factores de ponderación y su utilización en el procedimiento simplificado para certificación de eficiencia energética de edificios existentes de viviendas

Las tablas de factores de ponderación a usar en el procedimiento para viviendas existentes que cumplan con las exigencias del CTE-HE1 son las siguientes:

Tabla 4.6. Factores de ponderación para sistemas de calefacción y mixtos basados en calderas de combustión

Caldera calefacción combustión estándar	0,97
Caldera calefacción combustión baja temperatura	1,00
Caldera calefacción combustión de condensación	1,08
Caldera calefacción combustión de biomasa	0,74
Caldera mixta combustión estándar	0,98
Caldera mixta combustión baja temperatura	1,00
Caldera mixta combustión de condensación	1,06
Caldera mixta combustión de biomasa	0,76

Tabla 4.7. Factores de ponderación para sistemas de ACS y mixtos basados en calderas de combustión

Caldera ACS combustión estándar	0,93
Caldera ACS eléctrica	1,00
Caldera mixta combustión estándar	0,98
Caldera mixta combustión baja temperatura	1,00
Caldera mixta combustión de condensación	1,06
Caldera mixta combustión de biomasa	0,76

Tabla 4.8. Factores de ponderación para sistemas de calefacción por bomba de calor

	Zona climática				
	A	B	C	D	E
Equipos centralizados (viviendas unifamiliares)	0,80	0,72		0,68	
Equipos centralizados (viviendas en bloque)	0,80	0,79		0,69	
Equipos individuales tipo split (viviendas individuales y viviendas en bloque)	0,65	0,65		0,63	

Tabla 4.9. Factores de ponderación para sistemas de refrigeración por bomba de calor

	Zona climática		
	2	3	4
Equipos centralizados (viviendas unifamiliares)	0,89	0,85	0,79
Equipos centralizados (viviendas en bloque)	0,97	0,94	0,89
Equipos individuales tipo split (viviendas individuales y viviendas en bloque)	0,69	0,72	0,77

En el caso de viviendas construidas con anterioridad a la entrada en vigor del CTE se usarían los mismos valores con las siguientes excepciones:

- En el caso de *equipos centralizados de calefacción*, los factores de ponderación se multiplicarán por un factor de **1,075**.
- En el caso de *equipos centralizados de refrigeración en viviendas unifamiliares*, los factores de ponderación se multiplicarán por un factor de **1,04**.

4.3.1 Dominio de aplicación

Los valores anteriores son válidos para los sistemas explícitamente mencionados en las tablas y para buenas prácticas de dimensionado de los equipos.

4.4 Integración de los factores de ponderación y su utilización en el procedimiento simplificado para certificación de eficiencia energética de edificios terciarios

En edificios terciarios el rendimiento medio estacional se obtiene en base mensual siguiendo un procedimiento análogo al empleado por el estándar 550/590 de la ARI⁵ para el cálculo de la IPLV (Integrated Part-Load Value) en el caso de enfriadoras de agua, o el procedimiento descrito en el proyecto SAVE “Annual Efficiency Calculation Method for Domestic Boiler”⁶ que después sirvió de base para el programa BOILSIM⁷.

La metodología completa se describe en el Anexo VII. Básicamente la ecuación utilizada es la siguiente:

$$\eta_{\text{mensual}} = \frac{1}{\alpha \frac{a}{\eta_{25\%}} + \beta \frac{b}{\eta_{50\%}} + \gamma \frac{c}{\eta_{75\%}} + \delta \frac{d}{\eta_{100\%}}}$$

Donde:

a: % grados hora mes con carga inferior al 25%/grados hora año (nota: % normalizado excluyendo horas a carga=0).

α: corrección al % de grados hora (0-25%) normalizados.

b: % grados hora mes con carga superior al 25% e inferior al 50%/grados hora año (nota: % normalizado excluyendo horas a carga=0).

β: corrección al % de grados hora (25-50%) normalizados.

c: % grados hora mes con carga superior al 50% e inferior al 75%/grados hora año (nota: % normalizado excluyendo horas a carga=0).

γ: corrección al % de grados hora (50-75%) normalizados.

d: % grados hora mes con carga superior al 75% e inferior al 100%/grados hora año (nota: % normalizado excluyendo horas a carga=0).

δ: corrección al % de grados hora (75-100%) normalizados.

η₂₅, η₅₀, η₇₅, η₁₀₀: rendimiento del equipo al 25%, 50%, 75% y 100% de carga.

Los valores a, b, c y d se calculan de la simulación horaria de la demanda.

Los rendimientos del equipo a carga parcial dependen del tipo de sistema.

Los factores α, β, γ, δ son correctores que a raíz de las simulaciones realizadas en los edificios terciarios se ha determinado que son iguales a la unidad para las calderas. En el caso de sistemas de expansión directa, la dependencia funcional del factor de ponderación con respecto al nivel de fuentes internas, uso, clima y dimensionado se materializa en la dependencia de estos factores con dichas variables.

⁵ 2003 Standard for Performance Rating of Water-Chilling Packages Using the Vapor Compression Cycle. Air-Conditioning & Refrigeration Institute (ARI).

⁶ Contract No. XVII/4.1031/93-008. Funded by the European Union, SAVE programme. Directorate General for Energy.

⁷ www.boilsim.com

4.4.1 Validación del procedimiento

La validación del procedimiento descrito en el presente capítulo se hace comparando los rendimientos medios estacionales obtenidos según la metodología descrita con los rendimientos medios estacionales según el programa CALENER-VYP.

En el caso de viviendas, la propia metodología hace que el rendimiento medio estacional de todos los casos coincida con el rendimiento medio calculado por la definición de los factores de ponderación.

Como validación se tabularán los rangos de variación del factor de ponderación obtenidos según CALENER-VYP y se compararán con el valor fijo dado por el procedimiento.

Cabe indicar que sólo se escriben los rangos de variación del programa cuando son significativos.

La siguiente tabla resume la comparación en el caso de sistemas de calefacción:

Tabla 4.10. Comparación de factores de ponderación para sistemas de calefacción

	CALENER-VYP	CE3
Caldera combustión estándar	0,97	0,97
Caldera combustión baja temperatura	1,00	1,00
Caldera combustión condensación	1,08	1,08
Caldera mixta combustión estándar	0,98	0,98
Caldera mixta combustión baja temperatura	1,00	1,00
Caldera mixta combustión condensación	1,06	1,06
Bombas de calor por conductos (viviendas unifamiliares)	A 0,61 - 0,82	A 0,80
	B,C 0,62 - 0,77	B,C 0,72
	D 0,62 - 0,74	D 0,68
	E 0,61 - 0,71	E 0,68
Bombas de calor por conductos (viviendas en bloque)	A 0,71 - 0,82	A 0,80
	B 0,74 - 0,80	B,C 0,79
	C 0,70 - 0,80	D 0,69
	D 0,68 - 0,75	E 0,69
	E 0,68 - 0,72	
Bombas de calor individuales tipo split (viviendas unifamiliares y viviendas en bloque)	A 0,60 - 0,67	A 0,65
	B,C 0,62 - 0,67	B,C 0,65
	D 0,59 - 0,65	D 0,63
	E 0,58 - 0,65	E 0,63

La siguiente tabla resume los casos de comparación para refrigeración:

Tabla 4.11. Comparación de factores de ponderación para sistemas de refrigeración

	CALENER-VYP		CE3	
Bombas de calor por conductos (viviendas unifamiliares)	2	0,67 - 0,94	2	0,89
	3	0,66 - 0,95	3	0,85
	4	0,78 - 0,90	4	0,79
Bombas de calor por conductos (viviendas en bloque)	2	0,82 - 0,99	2	0,97
	3	0,80 - 0,99	3	0,94
	4	0,88 - 0,92	4	0,89
Bombas de calor individuales tipo split (viviendas unifamiliares y viviendas en bloque)	2	0,54 - 0,72	2	0,69
	3	0,66 - 0,75	3	0,72
	4	0,75 - 0,78	4	0,77

En el caso de edificios terciarios, la validación anterior tiene sentido ya que se trata de comprobar la validez de la dependencia funcional del factor de ponderación con la severidad climática, el nivel de fuentes internas, el uso y el dimensionado de los sistemas.

Las siguientes gráficas muestran la comparación de los rendimientos medios estacionales de los sistemas de calefacción mediante equipos de expansión directa (bomba de calor aire-aire):

Figura 4.4. Comparación de los rendimientos medios estacionales calculados y obtenidos a partir del procedimiento descrito para sistemas de calefacción mediante equipos de expansión directa (Madrid)

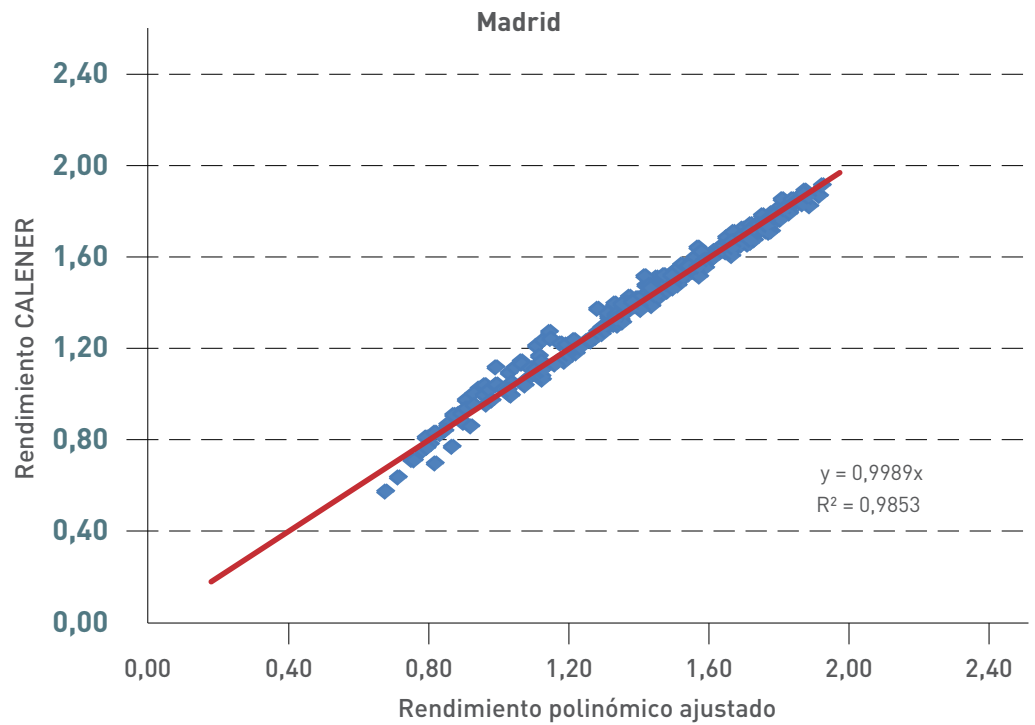


Figura 4.5. Comparación de los rendimientos medios estacionales calculados y obtenidos a partir del procedimiento descrito para sistemas de calefacción mediante equipos de expansión directa (Sevilla)

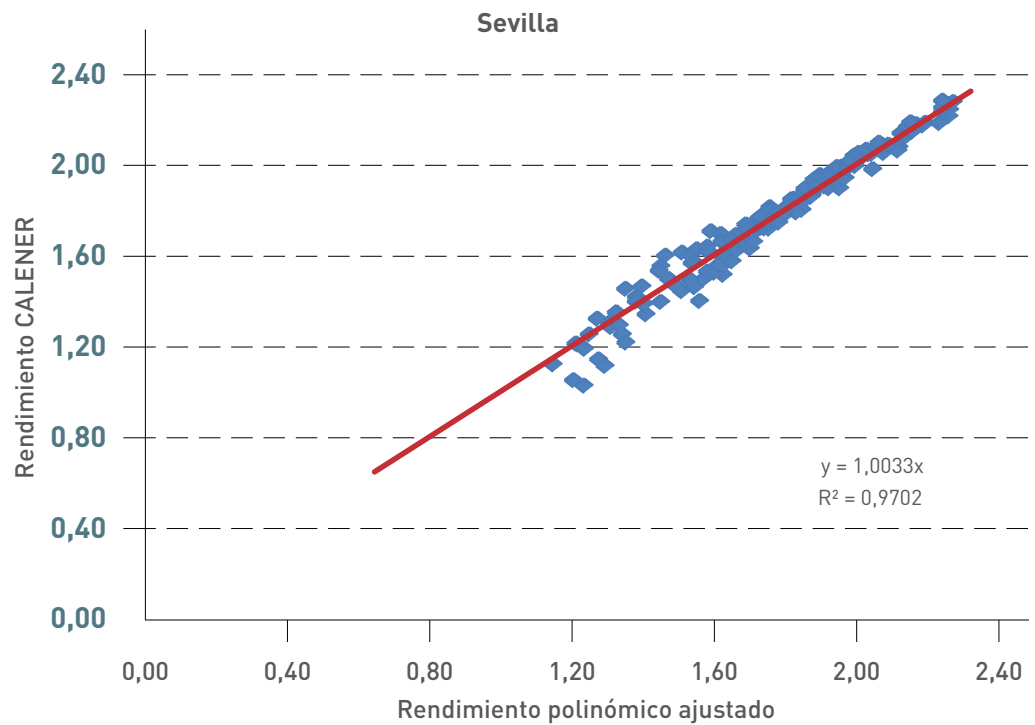
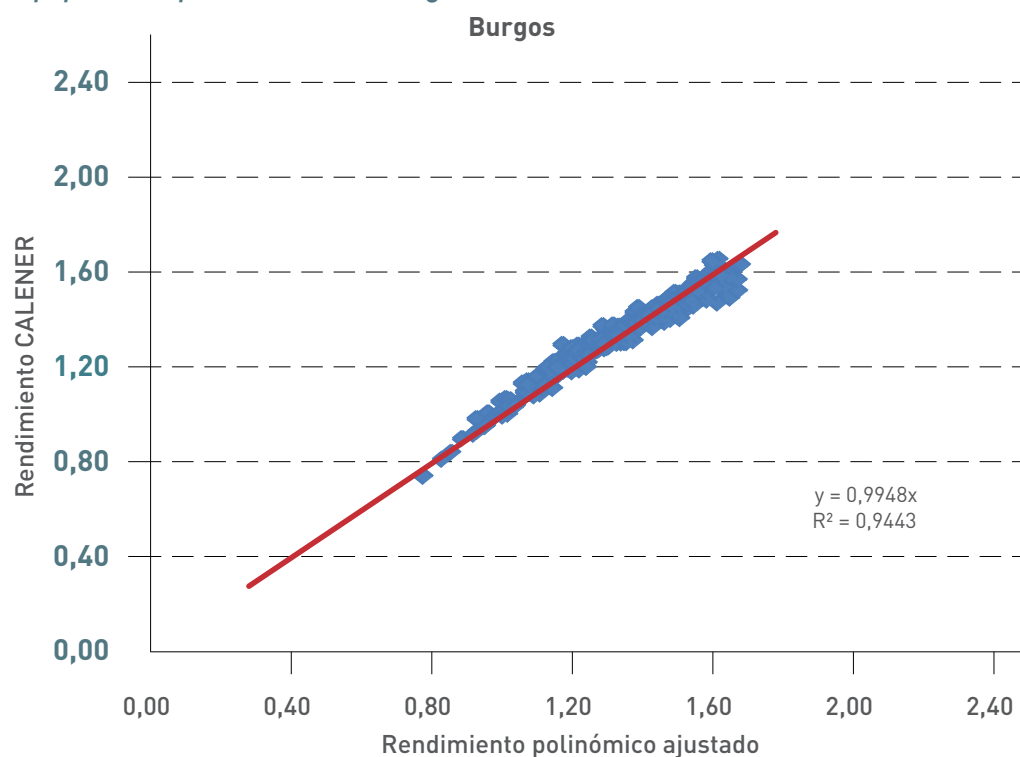


Figura 4.6. Comparación de los rendimientos medios estacionales calculados y obtenidos a partir del procedimiento descrito para sistemas de calefacción mediante equipos de expansión directa (Burgos)



Las siguientes gráficas muestran la comparación de los rendimientos medios estacionales de los sistemas de refrigeración mediante equipos de expansión directa (bomba de calor aire-aire):

Figura 4.7. Comparación de los rendimientos medios estacionales calculados y obtenidos a partir del procedimiento descrito para sistemas de refrigeración mediante equipos de expansión directa (Madrid)

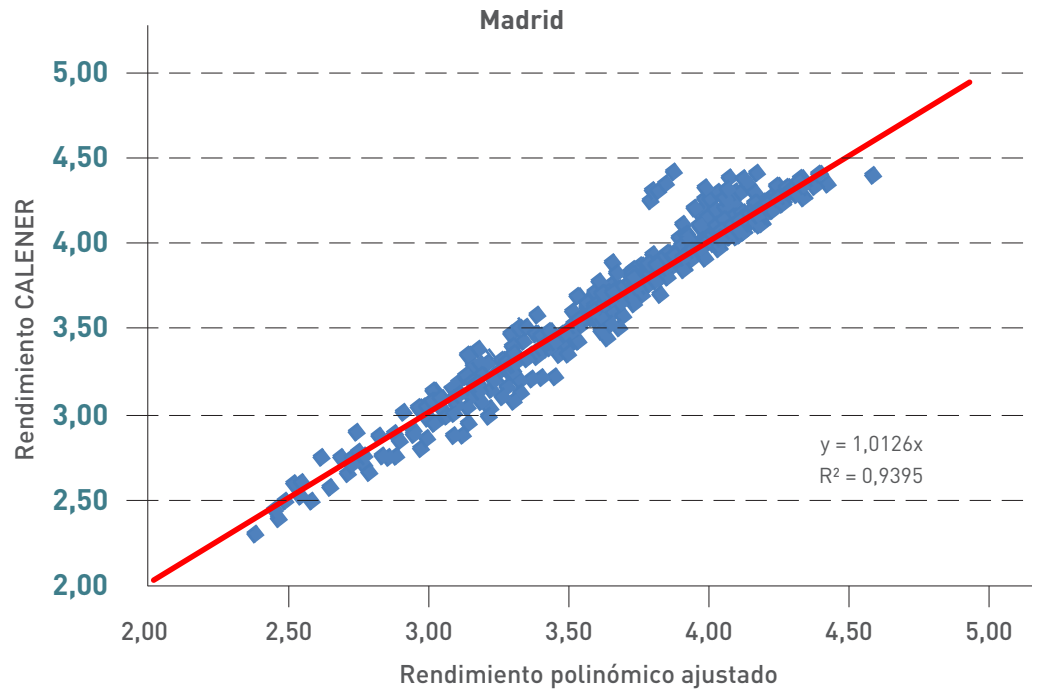
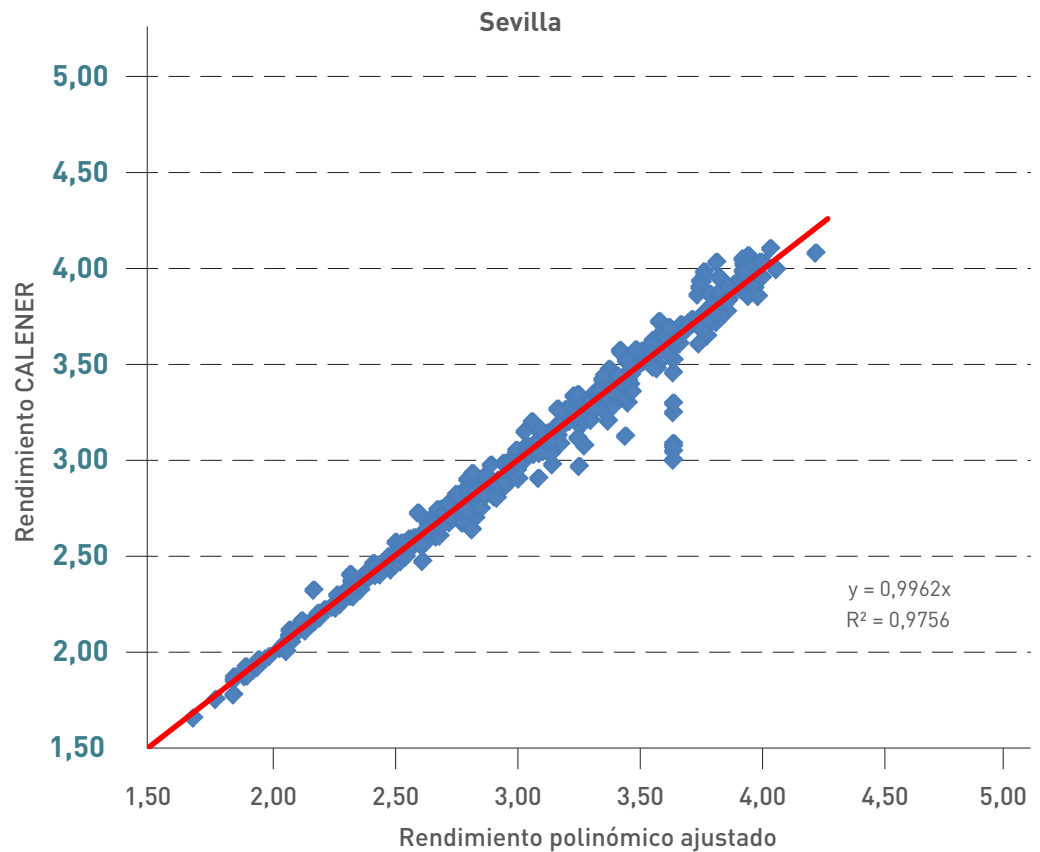


Figura 4.8. Comparación de los rendimientos medios estacionales calculados y obtenidos a partir del procedimiento descrito para sistemas de refrigeración mediante equipos de expansión directa (Sevilla)



5 Procedimiento para la simulación horaria de equipos y sistemas de producción de calor y frío

5.1 Conceptos globales de la simulación

El cálculo de los consumos de todos los sistemas de un gran terciario (GT) se realiza mediante un procedimiento horario simplificado. Todos los modelos de los sistemas que incluye están basados en los de CALENER-GT, aunque con ciertas simplificaciones que se expondrán en el apartado de hipótesis generales.

La secuencia de funcionamiento del programa comprende los siguientes apartados:

A. Entrada de los datos de definición del sistema

A través de las diferentes lengüetas de la pantalla de definición de sistemas de acondicionamiento se introducen todos los datos necesarios para la simulación de éste, así como los necesarios para los sistemas de iluminación.

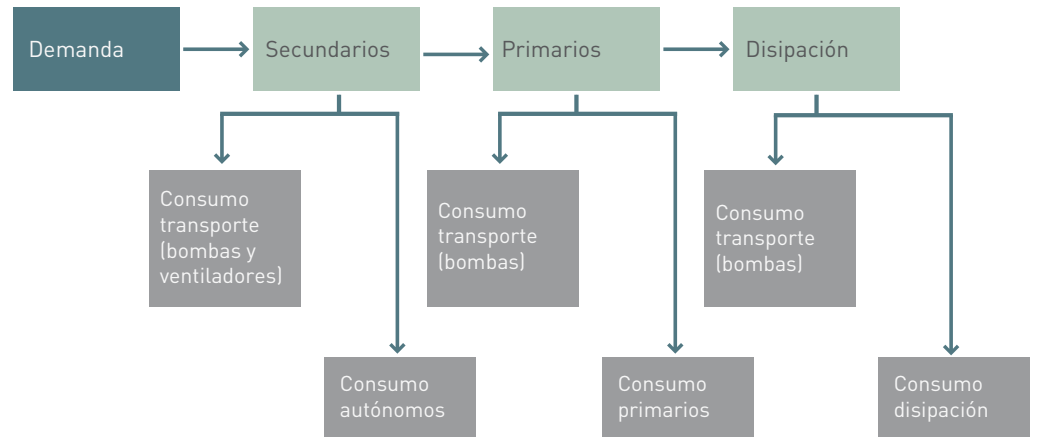
B. Ciclo de simulación

El ciclo de simulación parte de los datos de demanda calculados y realiza hora a hora los siguientes pasos:

1. La demanda sensible y latente y las condiciones de temperatura y humedad de cada local se transmiten al secundario que la combate, así como los caudales de ventilación e infiltración y las condiciones de temperatura y humedad exteriores.
2. Cada secundario, según del tipo que sea, cubre toda la carga sensible y latente o solo la sensible y calcula el consumo correspondiente en el transporte de aire o agua.
3. En el caso de autónomos, se calcula el consumo necesario para cubrir toda la carga posible según su capacidad. En caso de no poder cubrirla toda, la hora en que eso ha ocurrido queda registrada en un fichero de errores y el programa continúa sin que la carga del edificio o el resto de los equipos se vean afectados.
4. En caso de secundarios no autónomos, éstos transmiten a los primarios toda la demanda de las baterías, tenga capacidad suficiente el secundario en cuestión o no.

5. Los primarios calculan el consumo en transporte de agua y el suyo propio debido a la demanda recibida. En caso de no poder cubrir toda la demanda por falta de capacidad, esa hora queda registrada en el fichero de errores y el programa continúa sin afectar a los demás equipos.
6. Por último, en caso de que algún primario esté condensado por agua, la energía a disipar durante esa hora se pasa al sistema de disipación al que esté conectado el primario y éste calcula su consumo y el del transporte del agua.

Figura 5.1. Esquema del ciclo de simulación de sistemas para GT



Cada hora se acumulan los resultados de consumos energéticos de cada equipo según la demanda a la que esté asociado: calefacción, refrigeración o ACS.

Finalmente, para obtener el consumo total, hay que añadir al consumo de climatización el consumo de iluminación. Éste se expresa matemáticamente como:

$$C_{ILUM} = Pot \cdot S \cdot nh$$

Siendo:

Pot: potencia instalada en cada zona en W/m².

S: superficie de la zona.

Nh: número de horas de funcionamiento según el horario de uso del edificio.

C. Presentación de resultados

Una vez calculadas todas las horas, los resultados acumulados son recogidos, analizados y finalmente presentados en pantalla de forma resumida en el informe de calificación.

5.2 Alcance e hipótesis generales

5.2.1 Componentes de consumo incluidos

Los tipos de energía disponibles en CE3-GT, al igual que en CALENER-GT son:

- Carbón.
- GLP (gases licuados del petróleo).
- Gasóleo.
- Fueloil.
- Gas natural.
- Biomasa.
- Electricidad.

También se encuentran incluidos los captadores solares como apoyo a las calderas y que deben ser definidos junto a éstas.

No se encuentran incluidos los sistemas de generación de electricidad sin emisión de CO₂ que sí pueden definirse en CALENER-GT.

5.2.2 Iluminación

Las luminarias incluidas son:

- Fluorescente suspendida.
- Fluorescente empotrada no ventilada.
- Fluorescente empotrada ventilada hacia aire de retorno.
- Fluorescente empotrada ventilada hacia aire de impulsión.
- Incandescente o halógena.

5.2.3 Subsistemas primarios incluidos

Se entienden por subsistemas primarios todos aquellos equipos y dispositivos encargados de la generación de la energía térmica, calorífica y frigorífica, así como de su transporte y distribución desde los equipos generadores hasta los consumidores.

De acuerdo con la definición anterior los subsistemas primarios incluidos en CE3-GT son:

- Bombas.
- Tuberías.
- Plantas enfriadoras.
- Bomba de calor de 2 tubos.
- Bomba de calor de 4 tubos.
- Calderas.
- Equipos de cogeneración.
- Torres de refrigeración.
- Sistemas de agua perdida.

5.2.4 Subsistemas secundarios incluidos

La clasificación de los subsistemas secundarios tiene en cuenta tanto la aplicabilidad de la herramienta a sistemas existentes como la variada terminología empleada en el sector de la climatización. Los subsistemas secundarios en CE3-GT se clasifican según el fluido que llega a los locales:

- Todo aire: solo llega aire.
- Todo agua: solo llega agua.
- Todo refrigerante: solo llega refrigerante.
- Mixtos: agua-aire o refrigerante-aire.

Así pues, se incluyen los siguientes equipos y dispositivos:

- Todo aire-climatizadora:
 - Caudal constante.
 - Caudal variable.
 - Climatizadora de aire primario.
 - Sólo ventilación.
 - Solo calefacción.
 - Recalentamiento terminal.
 - Enfriamiento evaporativo.
 - Doble conducto.
- Todo refrigerante/mixtos refrigerante-aire-autónomo:
 - Caudal constante de aire.
 - Caudal variable de aire.
- Todo agua:
 - Fan-coil.
 - Radiador de agua.
 - Radiador eléctrico.
 - Suelo radiante.
 - Hilo radiante.

No se incluye ningún equipo mixto.

5.2.5 Combinaciones posibles de los sistemas

En CE3-GT los equipos primarios y de disipación no se definen individualmente sino agrupados de manera que cada secundario puede ir unido a un único conjunto de primarios, aunque cada conjunto de primarios puede alimentar a varios secundarios. Y cada equipo primario que requiera disipación por agua, sólo puede unirse a un único conjunto de sistemas de condensación.

Los conjuntos de primarios gestionan las llamadas a estos equipos para combatir la carga requerida por los secundarios unidos a él.

Hay tres tipos de conjuntos de primarios incluidos en CE3-GT:

- Conjuntos de primarios para calefacción y ACS, que pueden combatir únicamente demanda de calor. Estos conjuntos admiten la conexión de:
 - Calderas.
 - Equipos de cogeneración.
 - Bombas de calor de 2 tubos.
- Conjuntos de primarios para refrigeración, que pueden combatir únicamente demanda de frío. Estos conjuntos admiten la conexión de:
 - Enfriadoras.
 - Bombas de calor de 2 tubos.
- Conjuntos generales de primarios, que pueden combatir cualquier demanda, calefacción, refrigeración y ACS. Estos conjuntos admiten la conexión de:
 - Calderas.
 - Equipos de cogeneración.
 - Enfriadoras.
 - Bombas de calor de 2 tubos.
 - Bombas de calor de 4 tubos.

Los conjuntos de sistemas de condensación gestionan las llamadas a torres de condensación y sistemas de agua perdida para disipar la energía de los equipos primarios unidos a ellos.

Debido a la gran variedad de subsistemas secundarios, la exposición de las distintas combinaciones se realizará según la siguiente clasificación:

- Secundarios sólo calefacción alimentados por agua:
 - Climatizadoras sólo calefacción unizona y multizona.
 - Radiador de agua.
 - Suelo radiante.
 - Demanda de agua caliente sanitaria (ACS). Pese a no ser un subsistema secundario real, el programa lo trata como tal y por eso se incluye aquí.
- Secundarios sólo calefacción eléctricos:
 - Radiador eléctrico.
 - Hilo radiante.
- Secundarios de calefacción o refrigeración alimentados por agua:
 - Fan coil 2 tubos.
- Secundarios de calefacción y refrigeración simultáneamente alimentados por agua:
 - Climatizadoras caudal constante y variable unizona y multizona.
 - Equipos de doble conducto unizona y multizona.
 - Fan coil 4 tubos.
- Secundarios de calefacción y/o refrigeración eléctricos:
 - Autónomos de caudal constante y variable unizona y multizona.

- Elementos especiales:
 - Climatizadoras con frío evaporativo.
 - Climatizadoras sólo ventilación.
 - Recalentamientos terminales.
 - Climatizadoras de Aire Primario (CAP).

Así pues, la combinación de los subsistemas primarios y secundarios permite simular los siguientes sistemas en CE3-GT:

- Secundarios sólo calefacción alimentados por agua unidos a conjuntos de primarios para calefacción.
- Secundarios sólo calefacción eléctricos.
- Secundarios de calefacción o refrigeración alimentados por agua unidos a conjuntos generales de primarios que permitan inversión sucesiva y estacional.
- Secundarios de calefacción y refrigeración simultáneamente alimentados por agua unidos a conjuntos generales de primarios que permitan inversión simultánea.
- Secundarios de calefacción y/o refrigeración eléctricos.
- Climatizadoras con frío evaporativo unidas a conjuntos de primarios para calefacción.
- Climatizadoras sólo ventilación.

Además:

- Todos los subsistemas secundarios de aire pueden recibir el aire pretratado por una CAP.
- Una zona puede estar acondicionada por un subsistema secundario de agua y recibir aire neutro de ventilación a través de una CAP.
- Todos los equipos multizona alimentados por agua pueden tener recalentamientos terminales a nivel de zona.
- Todos los equipos multizona tiene la posibilidad de seleccionar una de ellas como zona de control.

5.2.6 Hipótesis generales

Las hipótesis generales en las que se basa el cálculo del CE3-GT y que lo diferencia de CALENER-GT son las siguientes:

- En todas las horas se supone la demanda del edificio cubierta totalmente, así puede desacoplarse el cálculo de demanda del edificio del cálculo de los consumos de los equipos.
- Se considera que cada equipo combate la carga que se le asigna de forma que, aún si no tiene capacidad suficiente, no se ven afectados el resto de los equipos. Se consigue así desacoplar también el cálculo de los equipos entre sí.
- No existen los circuitos. La comunicación entre equipos se realiza a través de los árboles de conexiones, que permiten el paso de potencias de unos equipos a otros sin necesidad de conocer las temperaturas que habría en cada punto del lazo hidráulico.

- Las únicas temperaturas que entran en juego son las de las masas de aire –caudales de ventilación, de infiltración, retornos, temperaturas internas de los locales y temperatura exterior– necesarias para los cálculos psicrométricos de los secundarios de aire y para el cálculo del consumo de los ventiladores de los equipos disipados por aire.
- La cuantificación de las pérdidas en circuitos y conductos se hace a través de un porcentaje de la potencia transportada tal y como se define en la Instrucción Técnica IT.1 Diseño y dimensionado del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Las pérdidas en conductos se traducen de esta manera en un aumento de la carga sensible de la zona y las pérdidas en tuberías como un aumento de la potencia demandada del secundario al primario o del primario al sistema de condensación.
- Dado que no se conocen las temperaturas de los lazos hidráulicos, se supone que las temperaturas de funcionamiento de todos los equipos son las correspondientes nominales, salvo pequeñas excepciones que se comentarán en el apartado de hipótesis específicas de los equipos.

5.3 Proceso de simulación

En este apartado se explica el proceso de cálculo desde la entrada de datos hasta la visualización de resultados como guía para el fácil entendimiento del funcionamiento interno del programa.

Debido a las hipótesis generales que permiten la simplificación del cálculo y el funcionamiento del programa, tanto los subsistemas primarios como los secundarios requieren la aceptación de una serie de hipótesis que permite su acoplamiento a la estructura general del programa.

5.3.1 Hipótesis específicas de los primarios

- Los generadores de ACS definidos en CALENER-GT se definen en CE3-GT como calderas.
- Los equipos primarios se rigen por el mismo comportamiento que en CALENER-GT utilizando las mismas curvas de comportamiento en los casos que proceda:
 - Todos los equipos se ven afectados por las curvas de funcionamiento a carga parcial.
 - Sólo los equipos condensados por aire se ven afectados por las curvas de corrección según la temperatura en condensador.
 - Sólo las enfriadoras y las bombas de calor de 2 y 4 tubos se ven afectadas por las curvas de corrección según la temperatura de impulsión de agua fría y caliente.
 - Al contrario que en CALENER-GT, en CE3-GT no se utiliza la electricidad generada por los equipos de cogeneración para combatir parte de las necesidades de iluminación. Por contra, la energía necesaria para generar esa electricidad y la energía térmica correspondiente, que sí se utiliza, no se computa.

5.3.2 Hipótesis específicas de los sistemas de condensación

- Los sistemas de agua perdida se consideran disipadores perfectos de frío y calor no consumidores de energía.
- Las torres de refrigeración se rigen por el mismo comportamiento que en CALENER-GT utilizando las mismas curvas de comportamiento excepto que sus ventiladores se consideran de caudal constante y, por tanto, no hay corrección debido al caudal que circule o la velocidad de giro.

5.3.3 Hipótesis específicas de los secundarios de aire

- Los secundarios de aire, al igual que el resto de los sistemas en CE3-GT, se relacionan a partir de lazos energéticos, así cada secundario recibe la carga de la zona o zonas que climatiza, salvo en el caso de control por zona determinada. En este caso, el secundario calcula la temperatura de impulsión de aire necesaria para combatir la carga de la zona de control e impulsa todo el aire a esa temperatura.
- El caudal de aire exterior/primario que cada máquina trata, es el definido por el usuario para cada zona del edificio.
- La simplificación de los ventiladores da lugar a dos comentarios: si el motor está en mitad de la corriente de aire se dice que toda la potencia eléctrica que consume se disipa en forma de calor; y el funcionamiento en modo ventilación se hace siempre que la carga sensible de la zona es nula y la máquina está operativa.
- En el caso de existir recuperador de energía del aire de expulsión y se aplique free-cooling, se hace un bypass del recuperador. A su vez, el recuperador dinámico tiene un consumo constante y fijado por el usuario.
- En cuanto al módulo de frío, existen dos valores por defecto: el factor de bypass que toma un valor de 0,3 en batería de frío, de ahí que solo se requiera un parámetro a introducir por el usuario (potencia total de la unidad) para definirla; y en el módulo evaporativo cuando se instala directo e indirecto, primero actúa el directo.
- Los sistemas consumidores de electricidad, en el caso de exceder su capacidad, se contabiliza que consumen el máximo de su capacidad, pero se informará de no haber satisfecho su función.
- Las unidades de tratamiento de aire primario funcionarán a caudal constante con temperatura de impulsión constante en cada uno de los dos regímenes
- Las climatizadoras de doble conducto son consideradas para el cálculo como climatizadoras de caudal constante, variando cada vez la proporción de aire que pasa por cada una de las baterías (de calor y de frío) según las necesidades de los locales en cada instante.
- Es importante destacar el criterio de reparto de los consumos de energía en los sistemas secundarios según el régimen de funcionamiento (calefacción o refrigeración):
 1. Si la unidad responde a un horario de funcionamiento, éste fija el reparto.
 2. Según el signo de la carga sensible a combatir por la unidad (+ refrigeración/ – calefacción).
 3. En el caso de que la carga sensible que recibe como entrada sea nula, y la máquina tenga funcionamiento en modo solo ventilación, recibiendo además como entrada activa que se combate carga de refrigeración y calefacción, el reparto de consumos se hace al 50% para cada régimen.

Anexos

Anexo I.

Cálculo del área solar

El área solar de una ventana se calcula multiplicando la superficie acristalada de la misma por el factor solar del vidrio (g) y por el factor de sombra global de la fachada donde dicha ventana se localiza.

Dado que en la correlación esta área se multiplica por la radiación vertical al sur, todas las áreas solares se multiplican previamente por un factor corrector que es el ratio entre la radiación recibida por la fachada en la orientación real de la misma y la radiación de dicha fachada orientada al sur.

El factor de sombra global de una fachada es un parámetro que permite calcular el efecto que tiene sobre la radiación de cualquier tipo –directa, difusa o reflejada– que incide sobre una fachada, la presencia de obstáculos remotos, el propio edificio o bien los elementos de control solar instalados sobre la propia fachada del edificio. En los siguientes subapartados se expondrá la metodología de cálculo de los factores de sombra para la radiación directa por una parte, y para la difusa y reflejada por otra. A continuación expondremos cómo evaluar el factor de sombra global a partir de los parámetros anteriores. Usaremos la siguiente nomenclatura para dichos parámetros:

f_{D1} : Factor de sombra de radiación directa para obstáculos remotos.

f_{D2} : Factor de sombra de radiación directa para obstáculos cercanos.

f_{D3} : Factor de sombra de radiación difusa para obstáculos remotos y cercanos.

f_{D4} : Factor de sombra de radiación reflejada para obstáculos remotos y cercanos.

Recordemos aquí que en el caso de radiación directa se tienen en cuenta por separado los factores solares correspondientes a obstáculos remotos y próximos, mientras que para la difusa y la reflejada los factores solares correspondientes reúnen en un mismo valor los efectos de los obstáculos cercanos y remotos. Destacar por tanto que, tal y como aparece en la metodología de cálculo de estos últimos, es posible calcular el factor de sombra debido a la presencia de obstáculos remotos más un obstáculo de fachada, no siendo posible el cálculo de dicho factor para dos obstáculos de fachada distintos simultáneamente. En el caso de que existiesen dos obstáculos cercanos de forma simultánea sólo se podría calcular el factor de sombra debido a los obstáculos remotos más uno de los dos.

Por factor de sombra global queremos hacer referencia a un parámetro cuyo valor englobe los efectos de todos los factores solares anteriormente mencionados en una fachada determinada.

Para ello es necesario realizar la siguiente operación:

$$F_s = \frac{D}{R_T} \times f_{D1} \times f_{D2} + \frac{d}{R_T} \times f_{D3} + \frac{r}{R_T} \times f_{D4}$$

Donde:

F_s: es el factor de sombra global.

D: es la radiación directa en la orientación propia de la fachada considerada.

d: es la radiación difusa en la orientación propia de la fachada considerada.

r: es la radiación reflejada en la orientación propia de la fachada considerada.

R_T: es la radiación total en la orientación propia de la fachada considerada.

Como de los cálculos necesarios para estimar la demanda de calefacción es necesario conocer D, d y r, únicamente es necesario aplicar la ecuación anterior para calcular el factor de sombra global en una fachada con una orientación determinada.

Factor de sombra de radiación directa

Obstáculos de fachada. Obtención del factor f_{D1}

En el proyecto Passys se desarrollaron correlaciones para la obtención de este factor ante diversos obstáculos de fachada, siendo los obstáculos considerados el propio retranqueo de la ventana respecto de la fachada exterior, los salientes laterales y los voladizos.

1. Retranqueo

Los parámetros geométricos de la ventana son:

$$P_1 = \frac{R}{W} \quad P_2 = \frac{R}{H}$$

Siendo R la dimensión del retranqueo, H la altura de la ventana y W su ancho

La correlación para obtener el factor de sombra es la siguiente:

$$f_{D1} = \exp\left[\left(A_1 + B_1(\varphi - \delta)\right)P_1 + \left(A_2 + B_2(\varphi - \delta)\right)P_2\right]$$

Donde: δ es la declinación solar y φ es la latitud.

Los coeficientes A y B se indican en la siguiente tabla en función de la orientación de la ventana:

Orientación	A ₁	B ₁	A ₂	B ₂
S	-5,695	0,081	-1,342	0,009
SE-SW	-2,418	0,032	-1,479	0,017
E-W	-0,868	0,009	0,232	-0,022
NE-NW	0,336	-0,013	-0,320	-0,074
N	-1,193	0,036	-1,825	-0,163

2. Salientes laterales

Los parámetros geométricos de la ventana son:

$$P_1 = \frac{L}{W} \quad P_2 = \frac{D}{W}$$

Siendo L la profundidad de la aleta, D su distancia horizontal a la ventana y W el ancho de la ventana.

La correlación para obtener el factor de sombra es la siguiente:

$$f_{D1} = 1 + \left[\left(A_1 + B_1(\varphi - \delta) \right) P_1 + \left(A_2 + B_2(\varphi - \delta) \right) P_1 P_2 \right]$$

Donde: δ es la declinación solar y φ es la latitud.

Los coeficientes A y B se indican en la siguiente tabla en función de la orientación de la ventana:

Orientación	A ₁	B ₁	A ₂	B ₂
S	-1,175	0,012	0,860	-0,008
SE-SW	-0,799	0,009	0,684	-0,006
E-W	0,118	-0,014	0,005	0,010
NE-NW	0,155	-0,041	-0,680	0,009
N	0,275	-0,133	0,641	0,039

3. Voladizos

Los parámetros geométricos en este caso son:

$$P_1 = \frac{L}{H} \quad P_2 = \frac{D}{H}$$

Siendo L la profundidad del voladizo, H la altura de la ventana y D la distancia vertical entre el dintel de la ventana y la base del voladizo.

La correlación para obtener el factor de sombra es la siguiente:

$$f_{D1} = 1 + \left[\left(A_1 + B_1(\varphi - \delta) \right) P_1 + \left(A_2 + B_2(\varphi - \delta) \right) P_1 P_2 \right]$$

Donde: δ es la declinación solar y φ es la latitud.

Los coeficientes A y B se indican en la siguiente tabla en función de la orientación de la ventana:

Orientación	A ₁	B ₁	A ₂	B ₂
S	-3,023	0,045	1,285	-0,006
SE-SW	-1,255	0,015	0,905	-0,008
E-W	-0,684	0,005	0,610	-0,004
NE-NW	-0,654	0,006	0,616	-0,006
N	-0,726	0,007	0,616	-0,007

Obstáculos remotos. Obtención del factor f_{D2}

Existen varias posibilidades de cálculo de este factor. En el proyecto Passys se proponía un método basado en las alturas solares y las alturas de los obstáculos remotos, resultando un valor puramente geométrico. En este caso se ha perfeccionado el método anterior ya que la radiación que llega a una superficie depende de la posición solar, es decir, no llega la misma radiación en todos los ángulos y el método Passys hace esta suposición de forma implícita.

Para hacer el proceso de cálculo útil para un modelo simplificado se han supuesto cuatro sectores en cada orientación, de tal forma que en una fachada orientada al Este dichos sectores serían los siguientes, el primero iría de N a NE, el segundo de NE a E, el tercero de E a SE y el cuarto de SE a S. El algoritmo para calcular la radiación total que llega a una orientación sería:

Desde el cuadrante 1 al 4 se calcula este factor mediante la ecuación que se indica a continuación y se multiplica por el porcentaje de radiación que llega por el sector actual:

$$1 - \frac{h}{H_1}$$

Se pasa a realizar el cálculo anterior para el siguiente cuadrante teniendo la precaución de acumular los valores que se van obteniendo como resultado de la operación anterior.

$$1 - \frac{h}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} + \frac{D}{H_1} * \tan(\alpha)$$

Siendo:

h: altura de la fachada sobre la que se realizan los cálculos que quedan en sombra –no es necesario calcularla de forma explícita-.

H₁: altura de la fachada del edificio sobre la que se realizan los cálculos.

H₂: altura del obstáculo remoto en el sector correspondiente.

D: distancia al obstáculo remoto en el sector correspondiente.

α : ángulo de la altura solar en el sector correspondiente.

Con las restricciones siguientes:

$$\tan(\alpha) \leq 1, y$$

$$0 \leq 1 - \frac{h}{H_1} \leq 1$$

De tal forma que si la ecuación anterior arroja un resultado superior a 1 o inferior a 0 debemos igualar estos valores a los límites superior e inferior, respectivamente.

A continuación aparecen las tablas de la fracción de radiación por cada sector en invierno y verano válida para todas las localidades:

Invierno	Sector 1 (%)	Sector 2 (%)	Sector 3 (%)	Sector 4 (%)
N	0	0	0	0
NE	0	0	0	100
E	0	0	31	69
SE	0	14	58	28
S	6	40	47	7
SO	22	63	15	0
O	70	30	0	0
NO	100	0	0	0

Verano	Sector 1 (%)	Sector 2 (%)	Sector 3 (%)	Sector 4 (%)
N	0	0	0	100
NE	0	0	62	38
E	0	48	48	4
SE	33	53	10	3
S	30	20	21	29
SO	3	11	52	34
O	4	47	49	0
NO	37	63	0	0

Y las correspondientes alturas solares

Invierno	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4
N	-	-	-	-
NE	-	-	-	7,6
E	-	-	9,0	20,8
SE	-	9,2	22,2	24,0
S	9,4	22,8	22,6	9,7
SO	24,2	22,0	9,6	-
O	20,6	9,5	-	-
NO	8,7	-	-	-

Verano	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4
N	-	-	-	17,4
NE	-	-	20,9	50,2
E	-	21,8	52,5	74,4
SE	23,2	54,0	74,4	74,4
S	60,5	74,4	74,4	60,7
SO	74,4	74,4	54,2	23,1
O	74,4	52,7	21,8	-
NO	50,3	20,9	-	-

Factor de sombra de radiación difusa y reflejada f_{D3} , f_{D4}

Este factor de sombra engloba los efectos de los obstáculos remotos y de fachada. El factor de sombra de radiación difusa será el denominado f_{D3} y el de reflejada será el f_{D4} . Ambos se calculan en función del factor de forma entre la ventana y el obstáculo de fachada y la ventana y el cielo.

1. Retranqueo y obstáculos remotos

$$f_{D3} = \frac{(1 - F_{w-r}) \cdot F_{w-sky}}{1 + \cos \beta}$$

$$f_{D4} = \frac{(1 - F_{w-r}) \cdot (1 - F_{w-sky})}{1 - \cos \beta}$$

2. Salientes laterales y obstáculos remotos

$$f_{D3} = \frac{(1 - F_{w-s}) \cdot F_{w-sky}}{1 + \cos \beta}$$

$$f_{D4} = \frac{(1 - F_{w-s}) \cdot (1 - F_{w-sky})}{1 - \cos \beta}$$

3. Voladizo y obstáculos remotos

$$f_{D3} = \frac{F_{w-sky} - F_{w-o}}{1 + \cos \beta}$$

$$f_{D4} = \frac{(1 - F_{w-sky})}{1 - \cos \beta}$$

Los factores de forma incluidos en estas ecuaciones se han calculado en el proyecto Passys utilizando un método detallado basado en la semiesfera de radio unidad de Nusselt.

$$F_{w-r} = 1 - \exp\left[-0.8632 \cdot (P_1 + P_2)\right]$$

$$F_{w-s} = 0.6514 \left(1 - \frac{P_2}{\sqrt{P_1^2 + P_2^2}}\right)$$

$$F_{w-o} = 0.3282 \left(1 - \frac{P_2}{\sqrt{P_1^2 + P_2^2}}\right)$$

Tomando una elevación promedio “ α ” del obstáculo remoto y un ángulo de inclinación de la fachada β , el factor de forma con el cielo es:

$$F_{w-sky} = \frac{1 - \text{sen}(\alpha + \beta - 90)}{2}$$

Anexo II.

Cálculo de caudales de ventilación/infiltración

La infiltración se define como la entrada involuntaria de aire del exterior que penetra en el edificio debido a la presión dinámica del viento.

Las actuaciones más efectivas para reducir la infiltración son:

- Sellado de grietas y rendijas en ventanas y puertas.
- Sellado de grietas y rendijas de la fachada.
- Colocación de burletes de estanqueidad en ventanas practicables y en puertas.
- Sustitución completa de la ventana, incluyendo la carpintería.

Los dispositivos de sombra exterior del tipo salientes laterales, contraventanas o celosías pueden actuar como deflectores del viento y, por tanto, pueden contribuir a reducir las infiltraciones.

La rehabilitación de la fachada mediante aislamiento colocado por la cara exterior de esta reduce la permeabilidad de la misma debido a que se sellan las grietas que eventualmente pudieran aparecer.

La norma UNE-EN 13465:2004 proporciona un método de cálculo para la obtención de los caudales de aire en viviendas. En este documento analizaremos dicho método de cálculo para deducir a partir de él el valor de las infiltraciones en un edificio.

La norma anterior propone un balance unizona en el cual se determina la presión interior; una vez obtenida dicha presión es posible evaluar los caudales de aire que entran y salen de la vivienda. Dichos caudales pueden ser de dos tipos:

- Ventilación: provocados de forma voluntaria por el usuario de la vivienda para mantener un buen nivel de calidad de aire interior.
- Infiltración: caudales de aire involuntarios.

Esta es la ecuación de balance resultante:

$$\left(\sum \text{todas las fugas } q_{\text{leak } i}\right) + \left(\sum \text{todas las entradas de aire } q_{\text{vent } i}\right) + q_{\text{v supply}} - q_{\text{v extra}} = 0$$

La norma requiere realizar el cálculo anterior para 2 velocidades de viento diferentes, en concreto, velocidad de viento nula y velocidad igual a 4 m/s. el resultado final será el caudal medio de las dos condiciones anteriores.

A efectos de este cálculo simplificado consideraremos que el edificio presenta la mitad de su superficie exterior expuesta al viento y la otra mitad protegida del viento, es decir, a sotavento.

Dado que estamos tratando el caso de viviendas existentes y para evitar perjuicios comparativos con las viviendas de nueva planta, se considerará que éstas tienen unos requerimientos de ventilación iguales entre sí, estableciéndose las diferencias únicamente en términos de la permeabilidad. Por tanto, para hacer los cálculos normativos se supondrá que las viviendas existentes tienen unas rejillas virtuales que garanticen el nivel de ventilación requerido por el Código Técnico de la Edificación en su Documento básico HS-3. Para hacer esto se calculará el caudal de ventilación en la vivienda con las siguientes hipótesis:

- La permeabilidad de las ventanas se habrá modificado a tipo A1 (50m³/h a 100 Pa).
- La velocidad de aire exterior se hará igual a 0 m/s.

Posteriormente se calculará la vivienda real (con la permeabilidad real de las ventanas) con velocidad de aire exterior igual a 0 m/s y se calcularán las rejillas necesarias para que se tenga la misma ventilación calculada anteriormente.

Con lo anterior quedan definidas las entradas de aire o rejillas.

Para calcular el caudal de fugas se utilizará la siguiente expresión dada en la norma:

$$q_{leak\ i} = C_{leaki} \cdot \left(\frac{|\Delta p_{leaki}|}{4} \right)^{0.67} \cdot signo(\Delta p_{leaki})$$

Siendo:

$$\Delta p_{leaki} = Cp_i \cdot 0.5 \cdot 1.2 \cdot v^2 - p_{int}$$

Donde:

C_{leaki}: es el caudal de infiltraciones por la fachada “i” para un salto de presiones de 4 Pa.

Δp_{leaki}: es la diferencia de presiones entre la cara exterior e interior de la fachada “i”.

Cp_i: es el coeficiente de presión de la fachada “i”.

v: es la velocidad del viento.

Dentro de la metodología global, se debe calcular el caudal medio de infiltraciones tanto en la situación inicial como en las posibles situaciones resultantes tras la aplicación de las medidas de mejora. A continuación se detallan los métodos de cálculo del C_{leak} (m³/h) que es necesario para evaluar el caudal de fugas en ambas situaciones:

Situación inicial, caben dos posibilidades:

Si las ventanas no se han rehabilitado no se dice nada sobre su permeabilidad, y el coeficiente de infiltraciones se tomaría de la tabla siguiente en función de la antigüedad de la construcción.

Viviendas unifamiliares	
Año de construcción	C_{leak} (m ³ /h)
-1960	7,4 · V
1961-1975	5,5 · V
1976-1988	3,6 · V
1989-	2,2 · V

Bloques de viviendas	
Año de construcción	C_{leak} (m ³ /h)
-1960	5,5 · V
1961-1975	3,6 · V
1976-	2,2 · V

Siendo V el volumen total del edificio.

Si las ventanas se han rehabilitado tras la construcción, el usuario proporciona su permeabilidad y el coeficiente de infiltraciones se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_{leak} = \left(P_{edif} + P_{ventana} \cdot 0.116 \cdot S_{acristalada} \right)$$

Donde:

P_{edif} : es la permeabilidad de la parte opaca del edificio tomada de la siguiente tabla.

$P_{ventana}$: es la permeabilidad de la superficie acristalada, dada por el usuario en el formulario, en m³/hm², a una diferencia de presiones de 100 Pa.

$S_{acristalada}$: es el área total de la superficie acristalada.

Viviendas unifamiliares	
Año de construcción	P_{edif} (m ³ /h)
-1960	5,6 · V
1961-1975	4,1 · V
1976-1988	2,7 · V
1989-	1,7 · V

Bloques de viviendas	
Año de construcción	P_{edif} (m ³ /h)
-1960	4,1 · V
1961-1975	2,7 · V
1976-	1,7 · V

Siendo V el volumen total del edificio

Situación mejorada, sólo hay que calcular las nuevas infiltraciones si se aísla la fachada con un aislante colocado por el exterior o si se mejoran las ventanas; si se cumple alguno de estos supuestos por separado o los dos de forma simultánea, el coeficiente de infiltraciones se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_{leak} = \left(P_{edif} + P_{ventana} \cdot 0.116 \cdot S_{acristalada} \right)$$

Donde:

P_{edif} : es la permeabilidad de la parte opaca del edificio, tomada de la siguiente tabla.

$S_{acristalada}$: es el área total de la superficie acristalada.

Viviendas unifamiliares	
Año de construcción	P_{edif} (m ³ /h)
-1960	$5,6 \cdot V$
1961-1975	$4,1 \cdot V$
1976-1988	$2,7 \cdot V$
1989- o fachadas aisladas por el exterior	$1,7 \cdot V$

Bloques de viviendas	
Año de construcción	P_{edif} (m ³ /h)
-1960	$4,1 \cdot V$
1961-1975	$2,7 \cdot V$
1976- o fachadas aisladas por el exterior	$1,7 \cdot V$

Siendo V el volumen total del edificio.

$P_{ventana}$ es el promedio de las permeabilidades de las superficies acristaladas de las distintas fachadas ponderado por su superficie; dichos valores se darán por el usuario para cada fachada en las propuestas de mejora. En caso de que en alguna orientación no se mejoren las ventanas, el valor por defecto que se considerará para la permeabilidad será el dado por la siguiente tabla:

Viviendas unifamiliares	
Año de construcción	Valor por defecto: $P_{ventana}$ (m ³ /hm ²) a 100 Pa
-1960	250
1961-1975	200
1976-1988	130
1989-	80

Bloques de viviendas	
Año de construcción	Valor por defecto: P_{ventana} (m^3/hm^2) a 100 Pa
-1960	200
1961-1975	130
1976-	80

Finalmente cabe comentar que la norma UNE EN 13829:2001 permite calcular la permeabilidad de la vivienda mediante un ensayo establecido a tal efecto. Como resultado de aplicar el método B descrito en dicha norma se obtendría el valor C_{leak} a la presión a la cual se realice el ensayo (normalmente 50 o 100Pa); para usar ese valor en el procedimiento descrito es necesario previamente convertir el valor a una diferencia de presiones de 4 Pa.

Anexo III.

Caracterización de puentes térmicos

Los puentes térmicos se caracterizan mediante su transmitancia térmica lineal ψ (W/m K). Este valor depende de la calidad constructiva de los cerramientos que forman el puente térmico (básicamente de la posición del aislamiento y de su resistencia térmica) así como de la calidad del diseño de la solución constructiva, es decir, si el detalle se ha diseñado para minimizar el efecto de puente térmico o no.

En las correlaciones para el cálculo de la demanda el efecto de los puentes térmicos aparece implícitamente en el término correspondiente al coeficiente global de transferencia de los cerramientos. Dicho coeficiente es igual a la suma ponderada por el área de los coeficientes globales de muros, cubiertas y suelos; con las siguientes particularidades:

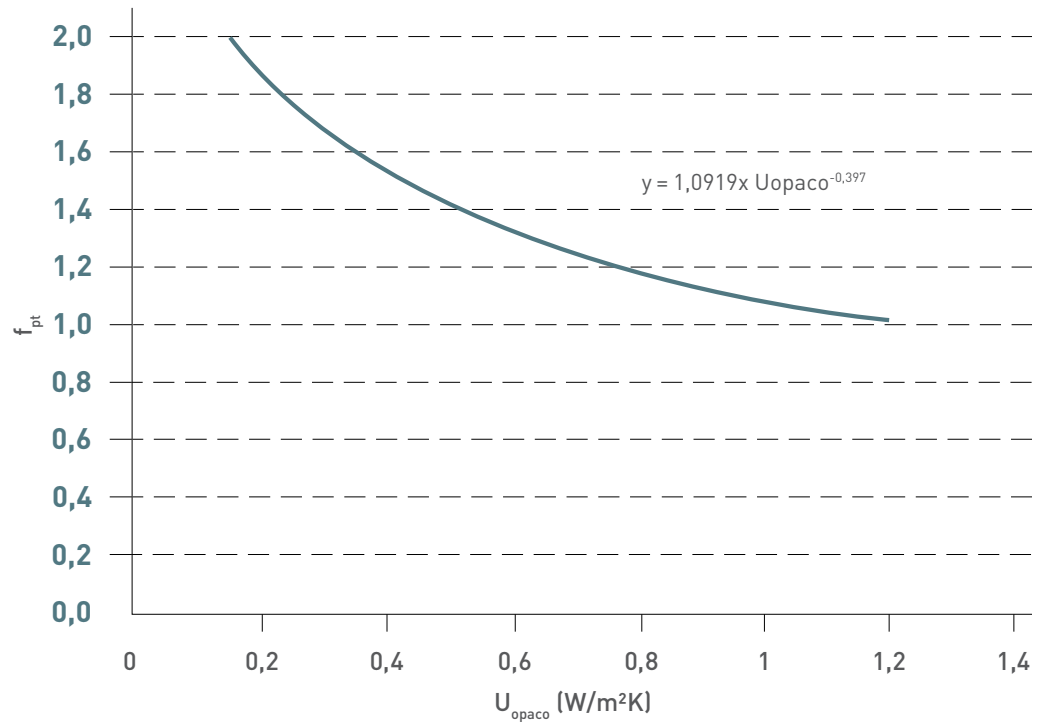
No se incluyen las ventanas, es por tanto un valor del coeficiente global de transferencia de los cerramientos opacos (U_{opaco}).

Este coeficiente incluye el efecto de los puentes térmicos integrados como son los contornos de huecos (jambas, alféizar y dintel), los pilares integrados en fachada y las cajas de persiana.

El procedimiento a seguir para el cálculo de los puentes térmicos es el siguiente:

Si el usuario no aporta información sobre la transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos, cuando defina el edificio completamente se calculará el U_{opaco} como transmitancia térmica promedio de muros, cubiertas y suelos (incluyendo suelos en contacto con el terreno), el área de transferencia (muros –incluyendo ventanas–, cubiertas y suelos) y la longitud total de puentes térmicos.

Con el valor de U_{opaco} el programa obtiene el factor corrector de puentes térmicos, f_{pt} mediante la siguiente curva:



Dicha curva se ha obtenido a partir de una regresión basada en 9 edificios unifamiliares y 7 bloques situados en 5 localidades (1 por zona climática de invierno).

A continuación, usando la definición del f_{pt} , se despejará el valor de la transmitancia térmica lineal media que hará que el factor corrector de puentes térmicos sea igual al obtenido:

$$f_{pt} = \frac{UA|_{opaco} + \psi L}{UA|_{opaco}} \tag{1}$$

$$\psi = \frac{(f_{pt} \cdot UA|_{opaco}) - UA|_{opaco}}{L} \tag{2}$$

La transmitancia térmica lineal media así obtenida se asigna al conjunto de los puentes térmicos del edificio y se realiza la simulación para conocer la situación inicial de demanda energética del edificio.

Por el contrario, si el usuario conoce el factor corrector de puentes térmicos, el programa, tras evaluar la U de opacos y la longitud total de puentes térmicos, obtendrá la transmitancia térmica lineal a partir de la ecuación (2).

Una vez obtenida la calificación energética, y de cara a las medidas de mejora, el usuario conocerá el f_{pt} resultante de la primera simulación y podrá modificarlo a la baja –justificando los puentes térmicos que utilizará– para mejorar la calificación energética. En este caso al nuevo f_{pt} le corresponderá una nueva TTL media que se asignará de nuevo a todos los tipos de puentes térmicos, tal y como se hizo anteriormente.

Este procedimiento es de aplicación para viviendas unifamiliares, bloques, pequeños y medianos terciarios y gran terciario.

La siguiente tabla proporciona un valor orientativo de la transmitancia térmica lineal de algunos tipos de puentes térmicos:

Tipo de puente térmico		Transmitancia térmica lineal Ψ (W/mK)
Encuentro de forjado de suelo con cerramiento de fachada	Sobre el terreno, para una vivienda anterior a 1979	2,0
	Sobre el terreno, para una vivienda posterior a 1979	1,4
	Con vacío técnico o cámara de aire	1,0
Encuentro de forjado intermedio con cerramiento de fachada		0,60
Encuentro de forjado de cubierta con cerramiento de fachada		0,44
Encuentro de forjado de suelo en contacto con el aire exterior con cerramiento de fachada		0,54
Jambas		0,50
Dintel		0,80
Alféizar		0,50

Anexo IV.

Transmisión de calor a través de cerramientos opacos unidimensionales

IV.1 Algoritmos de cálculo

En este apartado se describen los algoritmos para el cálculo de la ganancia por conducción a través de un cerramiento opaco.

Inicialmente se describe el algoritmo de obtención de la función de transferencia de un muro opaco a partir del concepto de la transformada Z de una función. Se puede relacionar en el dominio de Laplace la temperatura exterior y flujo exterior de calor con la temperatura interior y el flujo de calor interior, a través de la matriz de transmisión, que se obtiene mediante el producto de las matrices de transmisión de las diversas capas según el orden en el que aparecen en el muro:

Matriz de transmisión del cerramiento completo:

$$\begin{vmatrix} \theta_e \\ Q_e^* \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \theta_i \\ Q_i^* \end{vmatrix}$$

Siendo:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \prod_{i=1}^n \begin{vmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{vmatrix}$$

Matriz de transmisión de una capa:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos h\sqrt{\tau s}, & \frac{R \sinh h\sqrt{\tau s}}{\sqrt{\tau s}} \\ \frac{\sqrt{\tau s} \sinh h\sqrt{\tau s}}{R}, & \cos h\sqrt{\tau s} \end{vmatrix}$$

La función de transferencia en Z correspondiente a cualquiera de las funciones de transferencia en transformada de Laplace antes mencionadas, puede ser expresada

como la relación entre 2 polinomios finitos $N(z)/D(z)$. El denominador $D(z)$ es el mismo para todas aquellas funciones cuya transformada de Laplace presente el mismo denominador (en nuestro caso B).

Este procedimiento permite caracterizar la respuesta de los elementos ante excitaciones en temperatura superficial, a partir de series finitas de coeficientes que se aplicarán de forma directa para la obtención de los flujos de calor horarios (ganancias en la zona) a través de los cerramientos opacos.

$$q_1(t) = \sum_{j=0}^{n_a} a_j T_{s1}(t-j) + \sum_{j=0}^{n_b} b_j T_{s2}(t-j) - \sum_{j=1}^{n_d} d_j q_1(t-j)$$

$$q_2(t) = \sum_{j=0}^{n_a} b_j T_{s1}(t-j) + \sum_{j=0}^{n_b} c_j T_{s2}(t-j) - \sum_{j=1}^{n_d} d_j q_2(t-j)$$

Además, cada elemento de éste tipo es responsable de calcular la temperatura sol-aire para las superficies externas del cerramiento, que se van a utilizar como condiciones de contorno exterior e interior para el cálculo de la ganancia, a partir de las excitaciones exteriores calculadas por otro módulo del programa de cálculo de la demanda.

Este cálculo se ha incluido en el segundo algoritmo, presentado a continuación, de cálculo de las condiciones de contorno.

$$q_1(t) = h_{cr,1}(t) \cdot (T_{s,1}(t) - T_{sa,1}(t))$$

$$q_2(t) = h_{cr,2}(t) \cdot (T_{s,2}(t) - T_{sa,2}(t))$$

El tercer algoritmo es el de cálculo de las temperaturas superficiales, a partir de la imposición de las condiciones de contorno anteriormente calculadas, y las expresiones de los flujos de calor a través de las superficies dadas por la función de transferencia calculada en el algoritmo primero. Antes de ello, es necesario obtener una formulación del flujo de calor por conducción a través de las superficies del cerramiento a partir de la expresión de la función de transferencia, en forma de la suma de dos términos, uno que depende de la temperatura superficial en el instante actual y otro que recoge la historia en los instantes anteriores.

$$q_1(t) = A_{11} T_{s1}(t) + A_{12} T_{s2}(t) + P_1(t)$$

$$q_2(t) = A_{21} T_{s1}(t) + A_{22} T_{s2}(t) + P_2(t)$$

Finalmente, el cuarto algoritmo obtiene los flujos de calor a través de ambas superficies extremas del cerramiento, a partir de las temperaturas superficiales de éstas calculadas anteriormente y la función de transferencia. Estos flujos de calor representan las ganancias o pérdidas de calor en cada uno de los recintos adyacentes a las superficies respectivas, lo que constituye el objetivo final del tratamiento de los muros unidimensionales.

IV.2 Secuencia de cálculo del algoritmo 1: cálculo de la función de transferencia en régimen transitorio para un cerramiento unidimensional opaco

Si el único dato conocido es el coeficiente global de transferencia, U , el muro está en régimen permanente.

Se asignan los coeficientes de la función de transferencia según las expresiones siguientes, teniendo en cuenta que tendremos un único denominador y que las series de numeradores sólo tienen un término.

$$N_{coef} = 1$$

$$a_0 = -U$$

$$b_0 = +U$$

$$c_0 = -U$$

$$d_0 = 1$$

Si se conocen las propiedades de cada capa, o bien el grupo $k_i, c_{pi}, \rho_i, \Delta L_i$ (conductividad, calor específico densidad y espesor), o bien la resistencia térmica, R_i , se obtendrá el polinomio $B(s)$ correspondiente a la matriz de transmisión del muro en el dominio de Laplace, a partir de las propiedades de las capas del cerramiento, c_p, k_i, ρ_i y ΔL_i , o bien R_i .

Se determinan los polos de la transformada de Laplace asociada, es decir, encontrar las raíces (β_n) de la función $B(s) = 0$. La búsqueda de dichos polos requiere un tratamiento numérico, habiéndose empleado un método de bipartición modificado.

1. Evaluar el producto:

$$D(z) = \prod_{n=1}^{\infty} (1 - e^{-\beta_n} z^{-1})$$

Las raíces β_n se desarrollan a lo largo del eje real negativo, por lo que el producto expresado en la ecuación anterior puede truncarse en un número finito de términos, función de las dimensiones, características termofísicas de las capas y, lógicamente, del nivel de precisión requerido.

2. Obtener la respuesta $O(z)$ ante la excitación rampa unitaria, a partir de los residuos de las funciones de transferencia en los polos previamente determinados.
3. Evaluar los numeradores, para lo cual se elige primeramente una función excitación cuyas transformadas de Laplace y z sean conocidas (en nuestro caso la rampa unitaria. El numerador $N(z)$ se obtiene entonces mediante la expresión:

$$N(z) = \frac{D(z) \cdot O(z)}{I(z)}$$

Siendo $I(z)$ la transformada Z de la función rampa unitaria:

$$I(z) = \frac{1}{z(1-z^{-1})^2}$$

IV.3 Secuencia de cálculo del algoritmo 2: cálculo de las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se obtienen a partir de las solicitaciones exteriores e interiores. Son datos conocidos del muro a este nivel todas las solicitaciones exteriores, temperatura del aire exterior, radiación directa y difusa de corta longitud de onda, temperatura radiante media (intercambio radiante de larga longitud de onda), y coeficientes de película convectivo y radiante, así como las solicitaciones interiores, la temperatura de aire interior, radiación directa y difusa de corta longitud de onda absorbida en la superficie interior, y temperatura radiante media interior.

Estas excitaciones se expresan mediante temperaturas ficticias o equivalentes en ambas caras del cerramiento, que contienen toda la información de las excitaciones. Así en las superficies exteriores se aplica la llamada temperatura sol-aire, que se define según la expresión:

$$T_{sa,1}(t) = \frac{h_{c,1}(t) \cdot T_{a,1}(t) + h_{r,1}(t) \cdot T_{rad,1}(t)}{h_{c,1}(t) + h_{r,1}(t)} + \frac{\alpha_1 \cdot (R_{D,1} + R_{d,1})}{h_{c,1} + h_{r,1}} \quad (1)$$

Donde:

$T_{sa,1}(t)$: temperatura sol-aire exterior (°C).

$T_{rad,1}(t)$: temperatura radiante media exterior (°C).

$T_{a,1}(t)$: temperatura del aire exterior (°C).

$h_{r,1}(t)$: coeficiente de película radiante (W/m²K).

$h_{c,1}(t)$: coeficiente de película convectivo (W/m²K).

α_1 : absortividad de la superficie.

$R_{D,1}$: radiación directa de corta longitud de onda (W/m²).

$R_{d,1}$: radiación difusa de corta longitud de onda (W/m²).

En la cara interior, se define la temperatura equivalente de la siguiente manera:

$$T_{eq,2}(t) = \frac{h_{c,2}(t) \cdot T_{a,2}(t) + h_{r,2}(t) \cdot T_{rad,2}(t)}{h_{c,2}(t) + h_{r,2}(t)} + \frac{I_2}{h_{c,2} + h_{r,2}} \quad (2)$$

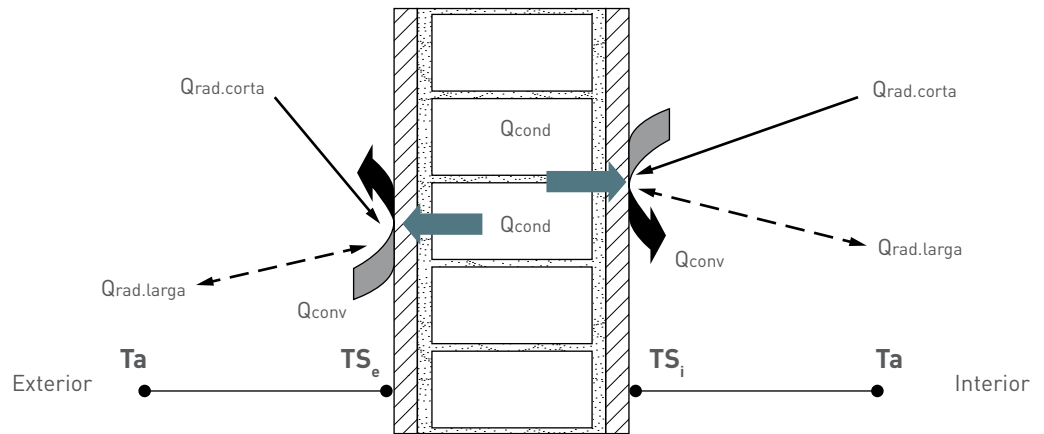
Donde:

$T_{eq,2}(t)$: temperatura equivalente de aire interior (°C).

I_2 : radiación solar absorbida en la superficie interior del cerramiento (W/m²).

La condición de contorno en cada superficie se impone realizando el balance de flujos de calor, toda vez que una superficie no almacena energía.

$$\begin{aligned} q_1(t) &= h_{cr,1}(t) \cdot (T_{s,1}(t) - T_{sa,1}(t)) \\ q_2(t) &= h_{cr,2}(t) \cdot (T_{s,2}(t) - T_{eq,2}(t)) \end{aligned} \quad (W/m^2) \quad (3)$$

Condiciones de contorno en las superficies del cerramiento

El algoritmo se realiza en las siguientes etapas:

Recibir del módulo de cálculo de la excitación exterior y/o del módulo de cálculo de la excitación interior los coeficientes de película convectivo y radiante para las superficies extremas del cerramiento para cada paso de tiempo, $h_c(t)$ y $h_r(t)$.

Cálculo del coeficiente de película convectivo radiante para cada superficie y paso de tiempo:

$$h_{cr,1}(t) = h_{c,1}(t) + h_{r,1}(t)$$

$$h_{cr,2}(t) = h_{c,2}(t) + h_{r,2}(t)$$

Obtención de la temperatura equivalente en la superficie exterior del cerramiento, llamada temperatura sol-aire, a partir de la temperatura del aire exterior adyacente y de las temperatura radiante media exterior, la radiación directa y difusa de onda corta, para cada paso de tiempo; datos proporcionados por los módulos de cálculo de las excitaciones exteriores.

$$T_{sa,1}(t) = \frac{h_{c,1}(t) \cdot T_{a,1}(t) + h_{r,1}(t) \cdot T_{rad,1}(t)}{h_{c,1}(t) + h_{r,1}(t)} + \frac{\alpha_1 \cdot (R_{D,1} + R_{d,1})}{h_{c,1} + h_{r,1}}$$

Obtención de la temperatura equivalente en la superficie interior del cerramiento, a partir de la temperatura de aire de la zona adyacente, de la temperatura radiante media interior y de la radiación de onda larga absorbida por la superficie del cerramiento; datos proporcionados por el módulo de cálculo de las excitaciones interiores.

$$T_{eq,2}(t) = \frac{h_{c,2}(t) \cdot T_{a,2}(t) + h_{r,2}(t) \cdot T_{rad,2}(t)}{h_{c,2}(t)} + \frac{I_{abs,2}}{h_{cr,2}}$$

Obtención de la ecuación de la condición de contorno en cada superficie, planteando balance de flujos de calor en cada una de ellas.

$$q_1(t) = h_{cr,1}(t) \cdot (T_{s,1}(t) - T_{sa,1}(t))$$

$$q_2(t) = h_{cr,2}(t) \cdot (T_{s,2}(t) - T_{sa,2}(t))$$

IV.4 Secuencia de cálculo del algoritmo 3: cálculo de las temperaturas superficiales

Cálculo de los términos constantes de la expresión del calor de conducción a través de las superficies del cerramiento a partir de la expresión de la función de transferencia:

$$A_{11} = a_0$$

$$A_{21} = b_0$$

$$A_{22} = c_0$$

Para cada paso de tiempo

Actualización de los términos dependientes de la historia anterior del cerramiento de la formulación del flujo de calor por conducción del cerramiento:

$$P_1(t) = \sum_{j=1}^{n_a} a_j T_{s1}(t-j) + \sum_{j=1}^{n_b} b_j T_{s2}(t-j) - \sum_{j=1}^{n_d} d_j q_1(t-j)$$

$$P_2(t) = \sum_{j=1}^{n_a} b_j T_{s1}(t-j) + \sum_{j=1}^{n_b} c_j T_{s2}(t-j) - \sum_{j=1}^{n_d} d_j q_2(t-j)$$

Resolver el sistema de ecuaciones resultante de la igualdad de flujo por conducción con la condición de contorno en cada superficie del cerramiento

$$h_{cr,1}(t) \cdot (T_{s,1}(t) - T_{sa,1}(t)) = A_{11} T_{s1}(t) + A_{12} T_{s2}(t) + P_1(t)$$

$$h_{cr,2}(t) \cdot (T_{s,2}(t) - T_{sa,2}(t)) = A_{21} T_{s1}(t) + A_{22} T_{s2}(t) + P_2(t)$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,1}(t) \\ T_{s,2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} - h_{cr,1}(t) & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} - h_{cr,2}(t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -P_1(t) - T_{sa,1}(t) h_{cr,1}(t) \\ -P_2(t) - T_{sa,2}(t) h_{cr,2}(t) \end{bmatrix}$$

$$\Delta = (h_{cr,1}(t) - a_0)(h_{cr,2}(t) - c_0) - (-b_0)^2$$

$$A = \frac{(h_{cr,1}(t) - a_0)}{\Delta}$$

$$B = \frac{-b_0}{\Delta}$$

$$C = \frac{(h_{cr,2}(t) - c_0)}{\Delta}$$

$$V_1(t) = -P_1(t) - T_{sa,1}(t)h_{cr,1}(t)$$

$$V_2(t) = -P_2(t) - T_{sa,2}(t)h_{cr,2}(t)$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,1}(t) \\ T_{s,2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix}$$

IV.5 Secuencia de cálculo del algoritmo 4: cálculo de la ganancia a través de un cerramiento opaco

Para cada paso de tiempo

Obtención del flujo de calor a través de las superficies del cerramiento mediante la expresión de la respuesta interior del método de la función de transferencia, en función de las temperaturas superficiales exterior e interior, calculadas en el paso anterior.

$$q_1(t) = \sum_{j=0}^{n_a} a_j T_{s1}(t-j) + \sum_{j=0}^{n_b} b_j T_{s2}(t-j) - \sum_{j=1}^{n_d} d_j q_1(t-j)$$

$$q_2(t) = \sum_{j=0}^{n_a} b_j T_{s1}(t-j) + \sum_{j=0}^{n_b} c_j T_{s2}(t-j) - \sum_{j=1}^{n_d} d_j q_2(t-j)$$

Si la superficie 1 es interior, el flujo de calor calculado $q_1(t)$ se devuelve como ganancia para la zona adyacente a esa superficie.

$$q_1(t) = G_1(t)$$

Si la superficie 2 es exterior, el flujo de calor calculado $q_2(t)$ se devuelve como ganancia para la zona adyacente a esa superficie.

$$q_2(t) = G_2(t)$$

Fin del bucle para cada paso de tiempo.

Anexo V.

Transmisión de calor a través de cerramientos en contacto con el terreno

V.1 Introducción

La determinación de las ganancias a través de los cerramientos en contacto con el terreno se resuelve a través de la aplicación de la superposición, descomponiendo el problema en tres, que se evalúan de forma independiente. Las tres componentes a evaluar son las siguientes:

1. Una componente de la ganancia se calcula en régimen multidimensional permanente con condiciones de contorno de las temperaturas medias.
2. Componente de la ganancia en régimen periódico multidimensional establecido, tomando las excitaciones exterior e interior variando de forma periódica anual, para tener en cuenta la amplitud de la variación de las excitaciones en el tiempo. Esta componente permite obtener la componente estacional del flujo de calor.
3. Una componente adicional que tiene en cuenta el menor tiempo característico de respuesta ante las excitaciones interiores, que permite tratar el problema en régimen periódico sin realizar ninguna hipótesis sobre el comportamiento de la ganancia con el tiempo al contrario que en las dos componentes anteriores. Esta componente se calcula en régimen unidimensional según indica la norma UNE-EN ISO 13370.

La expresión que se utilizará para el cálculo de la ganancia será la siguiente:

$$G(t) = L_s (\bar{T}_{ext} - \bar{T}_{int}) + L_{pext} \hat{f}_{ext} \cos\left(2\pi \frac{m - \tau - \beta}{12}\right) - L_{pint} \hat{f}_{int} \cos\left(2\pi \frac{m - \tau + \alpha}{12}\right) + Q^{(3)}(t)$$

Donde:

LS: coeficiente de acoplamiento térmico de régimen permanente en W/K.

Lpi: coeficiente de acoplamiento térmico interior de régimen transitorio periódico establecido en W/K.

Lpe: coeficiente de acoplamiento térmico exterior de régimen transitorio periódico establecido en W/K.

α : desfase (positivo) entre el flujo de calor para un período y la temperatura interior, en meses.

β : desfase (positivo) entre el flujo de calor para un período y la temperatura exterior, en meses.

τ : mes en el que se supone que ocurre la temperatura mínima exterior. La norma UNE-EN ISO 13370 recomienda que se use $t = 1$ en el Hemisferio Norte, lo que significa que se da la temperatura mínima exterior en enero y la máxima en julio.

\bar{T}_i : temperatura media interior anual (°C).

T_e : temperatura media exterior anual (°C).

\hat{T}_i : variación de la temperatura media interior anual (°C).

\hat{T}_e : amplitud de la variación de la temperatura media exterior anual (°C).

$Q_i^{(3)}(t)$: ganancia del problema en régimen transitorio.

El orden de magnitud del tiempo de respuesta en la superficie interior frente a las dos diferentes excitaciones, interior y exterior, es muy diferente, debido fundamentalmente a la diferente naturaleza de ambas excitaciones (UNE-EN ISO 14683). Es posible tener en cuenta sólo la primera oscilación de período anual en primera aproximación, sin cometer grandes errores. Sin embargo, la excitación interior tiene mayor contenido en frecuencia para períodos cortos. Esto hace que para un período anual, la influencia de la oscilación anual de la excitación interior sobre la ganancia sea despreciable respecto del efecto de la variación de la excitación exterior.

En cualquier caso, los términos de variación periódica tanto exterior como interior han sido despreciados en ambos casos, frente a los términos en régimen permanente y en régimen transitorio en la respuesta interior. De este modo, la expresión anterior se ve modificada a la siguiente:

$$G(t) = L_s (\bar{T}_{ext} - \bar{T}_{int}) + Q^{(3)}(t)$$

El cálculo de la respuesta interior en régimen transitorio ante sollicitaciones interiores se realiza modelando un metro de suelo junto con la propia construcción, considerándose el conjunto como muro **unidimensional** a partir del cual se obtienen los factores de respuesta, con los que se obtiene su función de transferencia. La expresión de los flujos de calor según esta función de transferencia resulta (3), (UNE-EN ISO 6946/UNE 92051, UNE-EN ISO 13789, UNE-EN ISO 13788), utilizándose como excitación de temperatura interior la variación de ésta respecto del valor medio.

$$Q_i^{(3)}(t) = - \sum_{j=0}^{j=nc} a_{k,i} \tilde{T}_i(t - k\Delta t) - \sum_{j=1}^{j=nd} d_{k,i} Q_i^{(3)}(t - k\Delta t)$$

Donde $\tilde{T}_i(t)$ es la variación de la temperatura interior respecto de la medida para cada paso de tiempo.

Para calcular los coeficientes $a_{k,i}$ y $d_{k,i}$ el modelo que se considera es la norma europea UNE-EN ISO 13370, consiste en una pared unidimensional con la estructura

del forjado y de la pared enterrada que conformen la construcción enterrada, y un metro adicional de terreno, considerando la condición de contorno de suelo profundo adiabática. La obtención de estos coeficientes de la función de transferencia se realizará utilizando el mismo algoritmo que en el caso de los muros unidimensionales.

V.2 Algoritmos de cálculo

El cálculo de estos elementos se descompone entre un valor de régimen permanente y un valor de régimen transitorio. Inicialmente se describe el algoritmo de preparación del sistema para el cálculo de la ganancia, modificando las propiedades para tener en cuenta que hay que incluir la inercia térmica del terreno para representar adecuadamente el contacto, así como el algoritmo de cálculo de la ganancia en régimen permanente.

Posteriormente se describe la obtención de la función de transferencia para el cálculo en régimen transitorio. La función de transferencia en este caso se obtiene de dos maneras posibles, seleccionándose una u otra en función de la inercia térmica del conjunto terreno-construcción del cerramiento.

Además del método de obtención de la función de transferencia a partir del concepto de la transformada Z, se determina ésta a partir de un modelo de diferencias finitas que permite obtener los autovalores (constantes de tiempo) del sistema en régimen transitorio, así como las respuestas en flujo de calor ante excitaciones unitarias en temperatura (series infinitas), lo que se describe en el quinto algoritmo. Dado que el procedimiento de cálculo de la función de transferencia por transformada Z es idéntico al propuesto en el caso de muros opacos, se refiere al lector al apartado correspondiente en cerramientos opacos unidimensionales.

Estos dos procedimientos permiten caracterizar la respuesta de los elementos ante excitaciones en temperatura superficial a partir de series finitas de coeficientes que se aplicarán de forma directa para la obtención de los flujos de calor horarios (ganancias en la zona) a través de los cerramientos opacos.

$$\delta q_1(t) = \sum_{j=0}^{n_a} a_j \delta T_{s1}(t-j) + \sum_{j=0}^{n_b} b_j \delta T_{s2}(t-j) - \sum_{j=1}^{n_d} d_j \delta q_1(t-j)$$

$$\delta q_2(t) = \sum_{j=0}^{n_a} a_j \delta T_{s1}(t-j) + \sum_{j=0}^{n_b} b_j \delta T_{s2}(t-j) - \sum_{j=1}^{n_d} d_j \delta q_2(t-j)$$

El cálculo en régimen transitorio se hace hora a hora como un valor corrector del régimen permanente, teniendo en cuenta que la condición de contorno en temperatura es la diferencia entre el valor de temperatura de aire horario y un valor medio de la temperatura interior anual.

El último algoritmo es el de cálculo de la diferencia de temperatura superficial interior respecto del valor medio anual, a partir de la imposición de las condiciones de contorno correspondientes, y las expresiones de los flujos de calor a través de las superficies dadas por la función de transferencia calculada en el algoritmo primero.

Antes de ello, es necesario obtener una formulación del flujo de calor por conducción a través de las superficies del cerramiento a partir de la expresión de la función de transferencia, en forma de la suma de dos términos, uno que depende de la temperatura superficial en el instante actual y otro que recoge la historia en los instantes anteriores. Nótese que el procedimiento de cálculo requiere que el flujo de calor en la superficie exterior del conjunto terreno-cerramiento sea nulo (condición adiabática):

$$\begin{aligned} \delta q_1(t) &= A_{11} \delta T_{s1}(t) + A_{12} \delta T_{s2}(t) + P_1(t) \\ \delta q_2(t) &= A_{21} \delta T_{s1}(t) + A_{22} \delta T_{s2}(t) + P_2(t) = 0 \end{aligned}$$

V.3 Secuencia de cálculo del algoritmo 1: determinación de las propiedades

Todos los cerramientos en contacto con el terreno se calculan en régimen transitorio, de tal manera que aunque las propiedades del cerramiento sean dadas en forma de transmitancia térmica, se les incluye una inercia para el cálculo.

Para todos los cerramientos en contacto con el terreno:

Si el cerramiento está definido a través de una construcción de tipos “capas”, se transforma el vector de capas:

$$K_i = k_{i-1} \quad C_{\rho_i} = C_{\rho_{i-1}} \quad \rho_i = \rho_{i-1} \quad \Delta L_i = \Delta L_{i-1} \quad R_i = R_{i-1}$$

y se incluye como primera capa una de propiedades:

$$K_0 = 2 \quad C_{p0} = 1000 \quad \rho_0 = 2000 \quad \Delta L_0 = 1$$

Si el cerramiento está definido a través de un valor de transmitancia en régimen permanente, U, se crea un vector de capas con las propiedades:

$$K_1 = 0 \quad C_{p1} = 0 \quad \rho_1 = 0 \quad \Delta L_1 = 0 \quad R_1 = 1/U$$

y se incluye como primera capa una de propiedades:

$$K_0 = 2 \quad C_{p0} = 1000 \quad \rho_0 = 2000 \quad \Delta L_0 = 1$$

V.4 Secuencia de cálculo del algoritmo 2: cálculo de las pérdidas en régimen permanente

- 1) Determinar la posición o el tipo de cerramiento enterrado que estamos calculando a partir de la definición geométrica.
- 2) Determinar el valor de la profundidad y la altura del cerramiento
 - a. Tomar el valor de la profundidad de la definición geométrica y si no hay profundidad, se toma igual al opuesto de la cota de la planta.
 - b. Tomar el valor de la altura del cerramiento de la definición geométrica y si no existe tomar la altura de la planta.
- 3) Utilizar las expresiones de cálculo descritas anteriormente en función de cada tipo de cerramiento para obtener el valor de la transmitancia térmica del conjunto.

- 4) Obtener la temperatura de aire exterior e interior media anual. La temperatura de aire interior media anual se considerará igual a la temperatura de referencia interior.
- 5) Evaluar el producto de la transmitancia térmica y de la diferencia de temperaturas medias como el valor de las pérdidas/ganancias a través del contacto con el terreno en régimen permanente.

V.5 Secuencia de cálculo del algoritmo 3: cálculo de la función de transferencia. Decisión del método de cálculo

1. Se determina la constante de tiempo máxima del cerramiento. Para ello se supone que todo el cerramiento está construido del material de menor difusividad térmica $\alpha_i = K_i/\rho_i c_{pi}$ utilizando la expresión para sistema homogéneo.

$$\tau = L^2 / \pi^2 \alpha$$

2. Si la constante de tiempo máxima estimada es mayor de 540.000 s se calcula la función de transferencia a partir del método de diferencias finitas, y si es menor de 540.000 s se calcula a través de la transformada Z.

V.6 Secuencia de cálculo del algoritmo 4: cálculo de la función de transferencia en régimen transitorio para un cerramiento unidimensional opaco por el método de la transformada Z

Véase el correspondiente apartado en los cerramientos opacos unidimensionales.

V.7 Secuencia de cálculo del algoritmo 5: cálculo de la función de transferencia en régimen transitorio para un cerramiento unidimensional opaco por medio de diferencias finitas

1. Discretizar las capas del cerramiento en nodos elementales en los cuales se cumple la ecuación de balance de energía, en función de la inercia de cada capa:
 - Para cada nodo del elemento.
 - Obtener las matrices de comportamiento que responden a la ecuación de balance de energía en cada elemento.
 - Fin.
2. Obtener los autovalores del sistema, que se corresponden con los autovalores de la matriz del modelo.
3. Determinar las matrices E y F dependiente de los autovalores y del paso de tiempo, Δt .

$$e(j) = \frac{l(j) \cdot \Delta t \cdot e^{l(j) \cdot \Delta t} + 1 - e^{l(j) \cdot \Delta t}}{l(j)^2 \cdot \Delta t}$$

$$f(j) = \frac{-l(j) \cdot \Delta t - 1 + e^{l(j) \cdot \Delta t}}{l(j)^2 \cdot \Delta t}$$

4. Determinar las matrices que determinan la ganancia en función del paso de tiempo y de las temperaturas superficiales.

$$G(t + \Delta t) = C \cdot T_n(t + \Delta t) + D \cdot T_{sup}(t + \Delta t)$$

$$G(t + \Delta t) = VP(t + \Delta t) + [MA] \cdot \{T_{sup}(t + \Delta t)\}$$

$$VP(t + \Delta t) = [C][P][e^{\lambda(\Delta t)}][P]^{-1} \{T_n(t)\} + [C][P][E][P]^{-1}[B] \{T_{cc}(t)\}$$

$$[MA] = [C][P][F][P]^{-1} + [D]$$

5. Determinar los flujos de calor ante excitaciones unitarias triangulares en temperatura superficial. Estos flujos de calor son los factores de respuesta (serie infinita) a partir de los cuales se caracteriza el comportamiento del sistema.

$$T_{sup} = (1, 0, 0, 0, 0, \dots, 0)$$

6. Calcular los factores de respuesta a partir de los autovalores.

$$CR(j) = e^{-l(j) \Delta t}$$

7. Calcular los denominadores a partir de los factores de respuesta de la misma manera que en el método de transformada Z.

$$D(z) = \prod_{n=1}^{\infty} (1 - CR(j) \cdot z^{-1})$$

Calcular los numeradores a partir de la serie infinita y los denominadores de la misma manera que en el método de la transformada Z pero utilizando la función excitación unitaria triángulo.

V.8 Secuencia de cálculo del algoritmo 6: cálculo de la diferencia de temperatura superficial interior respecto del valor medio anual y de los flujos de calor

A partir de la expresión de la función de transferencia y para cada paso de tiempo:

1. Actualización de los términos dependientes de la historia anterior del cerramiento de la formulación del flujo de calor por conducción del cerramiento.
2. Resolver el sistema de ecuaciones resultante de la igualdad de flujo por conducción con la condición de contorno en cada superficie del cerramiento, obteniendo la diferencia de temperatura superficial interior respecto del valor medio.

$$\begin{aligned}
 h_{cr,1}(t) \cdot (\delta T_{s,1}(t) - \delta T_{sa,1}(t)) &= A_{11} \delta T_{s,1}(t) + A_{12} \delta T_{s,2}(t) + P_1(t) \\
 0 &= A_{21} \delta T_{s,1}(t) + A_{22} \delta T_{s,2}(t) + P_2(t) \\
 \begin{bmatrix} \delta T_{s,1}(t) \\ \delta T_{s,2}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} - h_{cr,1}(t) & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -P_1(t) - T_{sa,1}(t) h_{cr,1}(t) \\ -P_2(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3. Calcular la variación del flujo de calor debido a la excitación interior, a partir de la temperatura superficial interior y de la expresión de la función de transferencia.

Anexo VI.

Balance de energía en un espacio

VI.1 Introducción

Los objetivos del espacio son, por una parte establecer las excitaciones sobre los elementos que lo componen para el cálculo de la ganancia a través de ellos, según sean sus caras exteriores o interiores, y por otra parte el cálculo de la carga, la extracción de calor y la temperatura real del espacio, variables que sí están directamente ligadas a éste. Tanto para el paso de ganancia a carga a temperatura constante, como para el cálculo de la extracción de calor y de la temperatura real del espacio, se usan funciones de transferencia (factores de ponderación) como se explica más adelante.

La secuencia completa de cálculo de un espacio puede resumirse en los siguientes pasos: en primer lugar, debe calcularse la ganancia a través de cada uno de los elementos muros, ventanas, etc. que lo componen, así como la ganancia de origen interno, todas ellas debidas a las excitaciones exteriores, y suponiendo una temperatura interior del aire del espacio constante.

Debido a la inercia térmica de los elementos constructivos y del mobiliario del espacio, existe un amortiguamiento y un desfase de las ganancias ya calculadas, al convertirse en carga sobre el aire del espacio. El paso de ganancia a carga no es único para todas ellas, sino que por el contrario depende del tipo de ganancia (conducción, solar, etc.) y del propio espacio. Así, esta conversión puede hacerse usando unos coeficientes o factores de ponderación específicos de cada espacio, y que por lo tanto hay que calcular para cada uno de ellos, o con factores de ponderación precalculados. En este método simplificado utilizaremos los factores de ponderación precalculados.

Una vez calculadas todas las cargas térmicas sobre el aire interior supuesto a temperatura constante se suman, dando lugar a la carga total sobre el aire del espacio a temperatura constante.

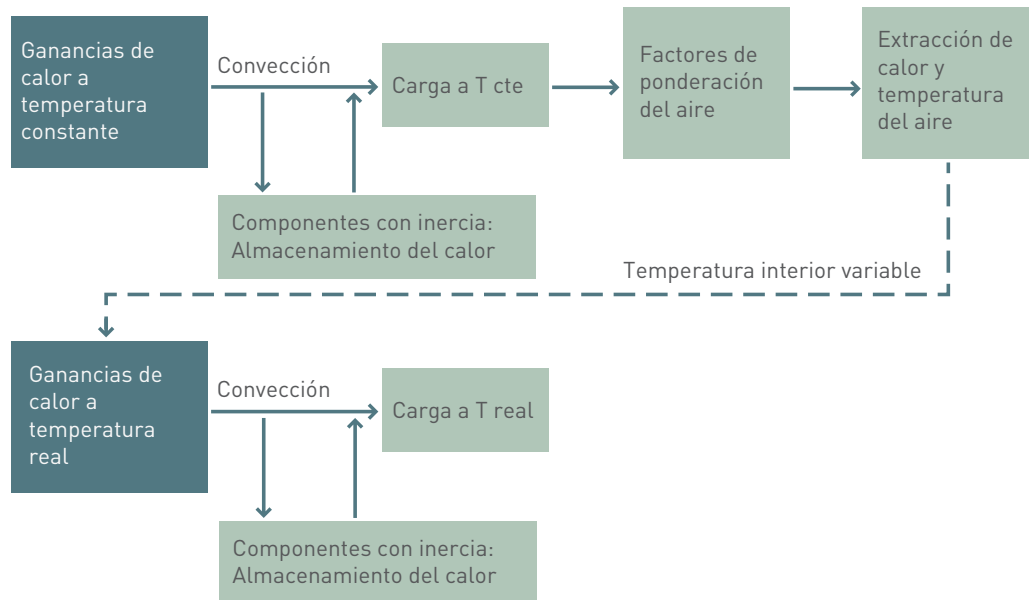
Y por último, suponiendo un sistema ideal con dos temperaturas de consigna, y potencias de calefacción y refrigeración suficientemente grandes como para asegurar que la temperatura del aire del espacio se encuentra siempre entre ellas, se calcula dicha temperatura variable del espacio, y el calor de extracción necesario ligado a él. En este cálculo se hace uso nuevamente de funciones de transferencia o factores de ponderación para la temperatura del aire, y nuevamente pueden ser específicos o precalculados, utilizándose los primeros para el edificio objeto, y los segundos para el de referencia.

Adicionalmente, las mismas rutinas de cálculo de ganancias pertenecientes a los elementos constructivos se usan para calcular, en este caso, las ganancias reales ya con la temperatura real del espacio a calcular y de los adyacentes a éste, así como las cargas reales debidas a ellos.

Debido a que el método de resolución elegido es un método indirecto de cálculo, inicialmente se calculan las ganancias suponiendo que los espacios se encuentran a temperatura interior constante, lo cual afecta a la carga por ventilación/infiltración, y por transmisión a través de cerramientos semitransparentes y opacos exteriores.

El método indirecto exige que posteriormente se calcule el aumento o disminución de la carga hora a hora debido a que la temperatura del espacio puede no ser constante, encontrándose por lo tanto en oscilación libre, o serlo pero a una temperatura distinta a la supuesta inicialmente.

Esquema general del procedimiento de cálculo



En los apartados siguientes se explican en orden secuencial los cálculos que se efectúan desde las excitaciones sobre un espacio, hasta la carga sobre él, y su temperatura de aire.

VI.2 Secuencia de cálculo del algoritmo 1: selección de los factores de ponderación precalculados

Como se ha indicado, el paso de ganancia a carga y posteriormente el cálculo de la extracción de calor y de la temperatura real del espacio, requieren de una serie de coeficientes que los calculen a partir de las ganancias para las primeras y de la carga a temperatura constante para las últimas.

Estos coeficientes recogen la influencia que la inercia térmica tiene sobre el desfase y amortiguamiento de la carga, y se llaman factores de ponderación. La opción elegida para este método simplificado se basa en el uso de unos factores de ponderación

precalculados y que están tabulados en función del peso de la estructura (ligero, medio o pesado). Para esta opción basta con extraer los factores de ponderación de una tabla entrando con el peso de la estructura o tipo del edificio (tomados de ASHRAE Fundamentals).

VI.3 Algoritmo 2: cálculo de las ganancias sobre un espacio

Se suman y se agrupan las ganancias y pérdidas instantáneas, tanto las exteriores como las debidas a las fuentes internas de calor.

VI.4 Secuencia de cálculo del algoritmo 3: cálculo de la carga a temperatura constante

Las ganancias de calor calculadas para los elementos que componen un espacio, se transforman en cargas térmicas usando funciones de transferencia (factores de ponderación), suponiendo una temperatura de aire del espacio constante, y posteriormente la carga total a temperatura constante de dicho espacio se transforma en extracción de calor al tiempo que se calcula la temperatura real de éste, también mediante el uso de unas nuevas funciones de transferencia (factores de ponderación de temperatura de aire).

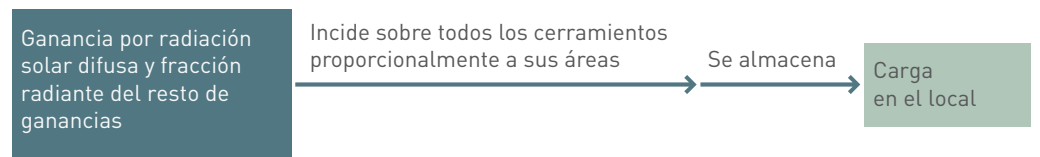
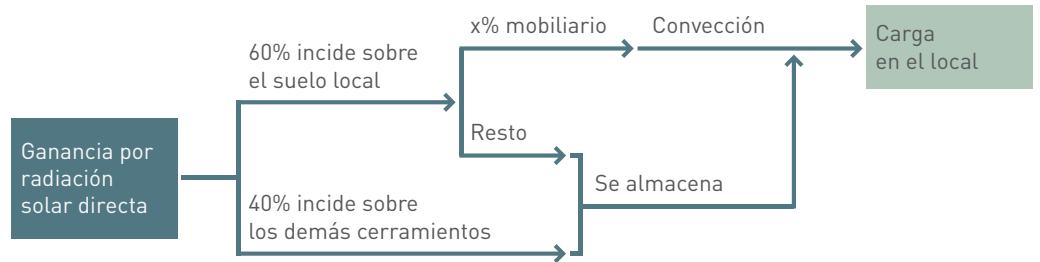
La energía que entra al sistema no se manifiesta inmediata y totalmente en el aire, sino que una parte se almacena en los cerramientos y posteriormente es devuelta al aire mediante un mecanismo convectivo. De manera general podemos decir que todas las ganancias en un local tienen un porcentaje convectivo, y que por tanto se manifiesta inmediatamente en el aire, y otro porcentaje radiante, que se almacena en los elementos del espacio con inercia, es decir, en los cerramientos opacos. En realidad, tendremos excitaciones que provoquen una ganancia cien por cien convectiva, como las fuentes internas, y otras como la radiación solar transmitida por cerramientos semitransparentes que son cien por cien radiantes.

El paso de ganancia a carga lo haremos mediante el uso de los llamados factores de ponderación.

Para la radiación solar directa se identifican dos series diferentes, dependiendo de dónde incide interiormente. De acuerdo con el estándar de cálculo, hay una parte de radiación que incide sobre el mobiliario. Para esta fracción no se considera sin inercia y por lo tanto al no poder almacenar energía, ésta se manifiesta inmediatamente en el aire.

Para la radiación solar difusa transmitida por los cerramientos semitransparentes, y para la fracción radiante del resto de ganancias en el espacio, se calcula otro grupo de factores de ponderación por cada espacio, suponiendo en este caso que la radiación se distribuye entre los cerramientos del mismo proporcionalmente a sus áreas.

En las siguientes figuras se esquematiza lo explicado anteriormente:



El paso de ganancia a carga de un espacio depende de los elementos que lo componen y de la naturaleza de la ganancia. Así, hay que hacer por separado el paso de ganancia a carga, para ganancia por conducción, ganancia solar...

Para cada una de ellas se usa la siguiente expresión con distintos coeficientes vk:

$$C(t) = \sum_{k=0} v_k G(t - k\Delta t) - \sum_{k=1} w_k C(t - k\Delta t)$$

Donde:

C(t): es la carga en el instante de tiempo t.

G(t): es la ganancia en el instante de tiempo t.

vk, wk: son los coeficientes de la función de transferencia para el paso de ganancia a carga.

Una vez calculadas las cargas a través de todos los elementos que componen el espacio, a las cuales hay que añadir las cargas de origen interno, y para todos los tipos de ganancias existentes, la carga total a temperatura constante sobre el espacio resulta de la suma de todas las anteriores.

$$CTC(t) = \sum C(t) \quad \forall \text{elementos y cargas internas}$$

Donde:

CTC(t): es la carga total a temperatura constante sobre el espacio en el instante de tiempo t.

La parte de la ganancia de calor que es estrictamente convectiva se convierte en carga en el mismo instante en el que aparece, mientras que la parte radiante de la ganancia sufre un desfase y un amortiguamiento que son directamente atribuibles a la inercia térmica de los elementos que componen el espacio y será tanto mayor cuanto mayor sea esta última.

VI.5 Secuencia de cálculo del algoritmo 4: cálculo de la extracción de calor y de la temperatura real

Sumando las cargas calculadas hasta este punto para cada espacio, tenemos la carga total a temperatura constante. En este primer paso del método indirecto se ha supuesto que todos los espacios se encuentran a la misma temperatura constante, lo cual implica, como ya se ha explicado anteriormente, que no aparecen cargas entre cerramientos interiores, esto es, que no existe conexión térmica alguna entre las diferentes zonas o espacios del edificio.

Sin embargo, cada espacio puede tener temperaturas de consigna diferentes, así como un horario diferente de funcionamiento de equipo, lo que hace que las temperaturas de cada espacio oscilen de diferente manera. Esta variación de la temperatura interior de cada espacio hace variar las cargas ya calculadas por ventilación/infiltración, por transmisión de cerramientos semitransparentes y opacos exteriores. Aparecen también de esta forma el comportamiento multizona del edificio, es decir, el acoplamiento entre los diferentes espacios en contacto a través de sus muros interiores, para los que en este segundo paso del método indirecto se calculan sus cargas térmicas.

Haciendo un balance de energía en el espacio tratado, se tiene que el calor de extracción del equipo acondicionador se obtiene a partir de la carga a temperatura constante ya calculada y del incremento de la carga producido por mantener dicha temperatura constante.

$$CTC - \Delta Q + Q_{EA} = 0$$

Donde:

CTC: es la carga total a temperatura constante sobre el espacio.

ΔQ : es el incremento de la carga debido a que la temperatura no es constante.

Q_{EA} : es el calor de extracción del equipo acondicionador.

El cálculo de la extracción o adición de calor cuando el equipo de aire acondicionado está funcionando, y el de la temperatura real del aire del espacio cuando está parado, se realiza mediante el uso de una función de transferencia o factores de ponderación de temperatura de aire.

Para el cálculo de la extracción de calor se usa la función de transferencia ante una excitación unidad en aire interior, (RAWF: Room Air Weighting Factors), cuyos coeficientes son los g_i , p_i de las siguientes ecuaciones.

$$\Delta Q(t) = \sum_{i=0}^N g_i \Delta T(t-i) - \sum_{i=1}^N p_i \Delta Q(t-i) \quad (1)$$

$$\Delta T(t) = \frac{1}{g_0} \left(\sum_{i=0}^N p_i \Delta Q(t-i) - \sum_{i=1}^N g_i \Delta T(t-i) \right) \quad (2)$$

Donde:

g_k , p_k : son los coeficientes de la función de transferencia para el cálculo de la extracción de calor.

Si en un espacio la única excitación es del aire interior e igual a un triángulo unidad durante una hora, el aumento de la carga térmica en él en dicha hora y las sucesivas, es el efecto que en la carga del espacio tiene una variación de temperatura interior. El mismo proceso nos sirve para medir el efecto contrario, es decir, el que sobre la temperatura interior del espacio tiene un aumento en la carga térmica sobre dicho espacio. De esta forma podemos calcular los factores de ponderación de temperatura de aire específicos que se utilizan en el edificio objeto. En el edificio de referencia usaremos los precalculados, para los que no es necesario hacer cálculo alguno, y como el resto de factores de ponderación precalculados, dependen de la inercia supuesta al espacio.

Cuando se impone un valor a la temperatura, se tiene que ΔT es conocido, siendo la incógnita ΔQ , en este caso se usa la ecuación 1. Por el contrario, cuando el equipo de aire acondicionado está parado o a plena carga y por tanto ésta es conocida, el dato es ΔQ , y ΔT es la incógnita, usándose entonces la ecuación 2.

Finalmente se tiene que la temperatura real y la extracción de calor en el espacio son:

$$T_{real} = TAR + \Delta T$$

$$Q_{Extracción} = CTC - \Delta Q$$

El proceso de cálculo de la extracción de calor y de la variación de la temperatura respecto a la de referencia tiene como datos de entrada la carga a temperatura constante (CTC), y dicha temperatura constante (TAR), y aplica los factores de ponderación (RAWF) precalculados o bien los específicos del espacio tratado. Por otra parte, se necesita información relativa al comportamiento del equipo de aire acondicionado, que en el caso de equipo ideal, será la potencia máxima de calefacción y de refrigeración, y las temperaturas de consigna para ambos regímenes. En el caso de equipo ideal, se supone que éste es capaz de suministrar tanta potencia como le sea requerida y de manera instantánea.

Teniendo esto en cuenta, la casuística que pueda aparecer en el cálculo de la extracción de calor y temperatura real de un espacio es la siguiente:

1. Si estamos fuera del horario de funcionamiento del equipo, éste no puede funcionar, su carga es cero, y se calcula la temperatura real del espacio.
 $\Delta Q = 0$ y $\Delta T =$ (ecuación 2).
 El calor de extracción es igual a la carga a temperatura constante, y la temperatura oscila libremente sin ningún límite.
2. Si estamos dentro del horario de funcionamiento del equipo:
 - 1º) Suponemos que no funciona, entonces su carga es cero y se calcula la temperatura real del espacio. $\Delta Q = 0$ y $\Delta T =$ (ecuación 2).
 - 2º) Si la temperatura real está entre las temperaturas de consigna, entonces es cierto que el equipo no funciona y por lo tanto la temperatura calculada es la real del espacio y la carga es cero.

3º) Si la temperatura real es menor que la temperatura de consigna mínima, el equipo funciona en régimen de calefacción. En este caso la temperatura real será igual a la temperatura de consigna mínima y se calcula la carga térmica o adición de calor. $T = T_{\text{mínimaConsigna}}$ y $\Delta Q =$ (ecuación 1).

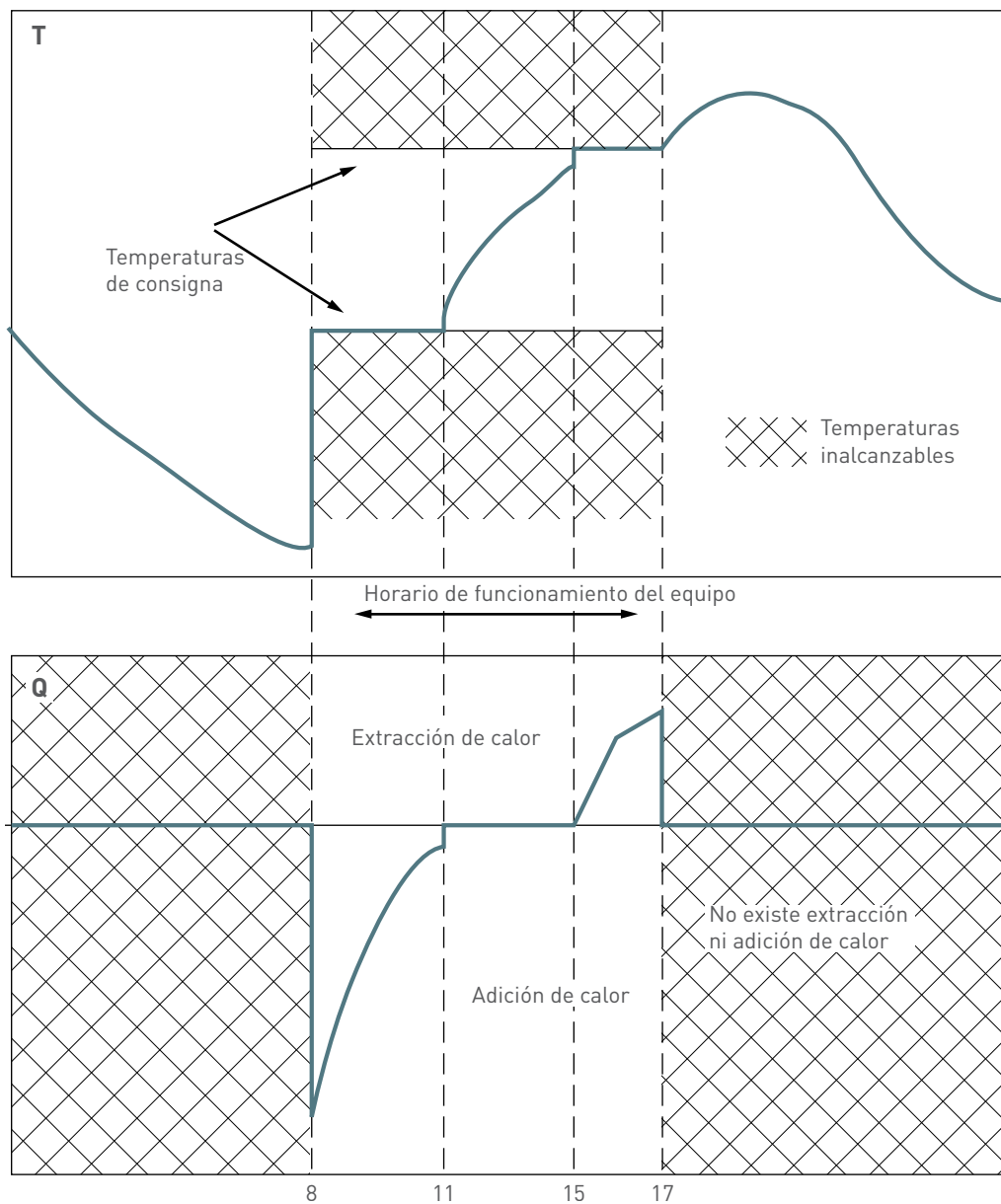
4º) Si la temperatura real es mayor que la temperatura de consigna máxima, el equipo funciona en régimen de refrigeración. En este caso la temperatura real será igual a la temperatura de consigna máxima y se calcula la carga térmica o extracción de calor. $T = T_{\text{máximaConsigna}}$ y $\Delta Q =$ (ecuación 1).

Para ilustrar lo anteriormente expuesto se ha representado en las dos gráficas siguientes un ejemplo en el que se dan todas las situaciones anteriores. La primera gráfica muestra la evolución de la temperatura interior del espacio, y la segunda de la carga térmica en el mismo en un período de 24 horas. En este período el espacio está sometido a inversión térmica sucesiva, es decir, el equipo de aire acondicionado cambia de régimen de calefacción a refrigeración.

El periodo de funcionamiento del equipo en el ejemplo es de 8 a 16h, lo que implica que fuera de este intervalo no puede funcionar en ningún caso y que por lo tanto las temperaturas oscilarían libremente.

Por otra parte, dentro del intervalo de funcionamiento, el equipo funciona únicamente si la temperatura del espacio alcanza alguna de las dos temperaturas de consigna.

En el ejemplo puede verse que de 8 a 10h la temperatura del espacio es igual a la de consigna mínima y durante estas horas el equipo funciona en régimen de calefacción, en este caso se calcula la adición de calor. De 11 a 14h el equipo está parado ya que la temperatura oscila entre las dos de consigna, en este caso la incógnita es la propia temperatura, y la carga del equipo es nula. Finalmente, de 15 a 16h la temperatura iguala a la de consigna máxima y durante estas horas el equipo funciona en régimen de refrigeración, en este caso se calcula la extracción de calor.



En el procedimiento anterior no se considera el efecto cruzado entre espacios contiguos que comparten algún cerramiento interior. Se está calculando por lo tanto un edificio multizona desacoplado.

Anexo VII.

Implementación del cálculo del rendimiento medio estacional en edificios terciarios

1. Paso 1: cálculo de las demandas (P(t))

Para el cálculo de la demanda de calefacción (y refrigeración) se ha optado por un método simplificado horario que se basa en el uso de los Weighting Factors precalculados de ASHRAE para un edificio multizona desacoplado aerúlico y térmicamente.

El resultado del cálculo es la potencia demandada en cada hora P(t), calculándose la demanda como la suma de dichas potencias para el intervalo de tiempo considerado.

$$Demanda(kWh) = \sum_{\substack{\text{periodo} \\ \text{considerado}}} P(t) / 1000$$

2. Paso 2: cálculo del factor de carga parcial (FCP(t))

Se define el FCP como la relación entre la potencia demandada en una hora dada y la capacidad de calefacción a dicha hora.

$$FCP = P(t) / Cap.Cal(t)$$

Paso 2.1: cálculo de la capacidad de calefacción (Cap.Cal(t))

Por su parte, la capacidad de calefacción se calcula en función de las temperaturas de operación para los distintos sistemas que pueden aparecer en pequeño y mediano terciario.

Sistemas de expansión directa aire/aire

Modo calefacción

- **capCal** (kW): capacidad de calefacción

$$capCal = capCalNom \cdot capCal_T(T_{int}, T_{h,ext})$$

Donde:

$$capCal_T(T_{int}, T_{h,ext}) = 0,8147414872 + 0,030682602 T_{h,ext} + 0,0000323028 T_{h,ext}^2$$

Modo refrigeración

- **capTotRef** (kW): capacidad total de refrigeración

$$capTotRef = capTotRefNom \cdot capTotRef_T(T_{h,int}, T_{ext})$$

Donde:

$$capTotRef_T(T_{h,int}, T_{ext}) = 0,880784506 + 0,014247648 T_{h,int} + 0,000554364 T_{h,int}^2 - 0,007558056 T_{ext} + 0,0000329832 T_{ext}^2 - 0,000191711 T_{h,int} T_{ext}$$

Sistemas de expansión directa aire/agua

Modo calefacción

- **cap** (W): capacidad calorífica

$$cap = capNom \cdot cap_T(T_{imp}, T_{h,ext})$$

Donde:

$$cap_T(T_{imp}, T_{h,ext}) = 0,8232 + 0,0281 T_{h,ext} + 0,0002 T_{h,ext}^2$$

Calderas eléctricas o de combustible

- **cap** (W): capacidad calorífica

$$cap = capNom \cdot cap_T(T_{imp})$$

Donde:

$$cap_T(T_{imp}) = 1,0$$

Para todas las calderas.

3. Paso 3: cálculo del rendimiento medio mensual

Fórmula simplificada para el cálculo de rendimiento estacional mes a mes.

$$\eta_{\text{mensual}} = \frac{1}{\alpha \frac{a}{\eta_{25\%}} + \beta \frac{b}{\eta_{50\%}} + \gamma \frac{c}{\eta_{75\%}} + \delta \frac{d}{\eta_{100\%}}}$$

Donde:

a: % grados hora mes con carga inferior al 25%/grados hora año (nota: % normalizado excluyendo horas a carga=0)

α : corrección al % de grados hora (0-25%) normalizados

b: % grados hora mes con carga superior al 25% e inferior al 50%/grados hora año (nota: % normalizado excluyendo horas a carga=0).

β : corrección al % de grados hora (25-50%) normalizados.

c: % grados hora mes con carga superior al 50% e inferior al 75%/grados hora año (nota: % normalizado excluyendo horas a carga=0).

γ : corrección al % de grados hora (50-75%) normalizados.

d: % grados hora mes con carga superior al 75% e inferior al 100%/grados hora año (nota: % normalizado excluyendo horas a carga=0).

δ : corrección al % de grados hora (75-100%) normalizados.

η_{25} , η_{50} , η_{75} , η_{100} : rendimiento del equipo al 25%, 50%, 75% y 100% de carga.

Paso 3.1: cálculo de los grados hora y coeficientes a, b, c, d

Los coeficientes a, b, c, d requieren del cálculo de los grados hora de la temperatura exterior en base 20.

Para una hora determinada, t, se calcula como:

$$GH(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } T_{\text{ext}}(t) \geq 20 \\ 20 - T_{\text{ext}}(t) & \text{si } T_{\text{ext}}(t) < 20 \end{cases}$$

A partir de estos GH(t) y del FCP(t) se calculan los coeficientes a, b, c, d de la siguiente forma:

$$a = \frac{\sum_{\substack{\text{si } 0 < FCP(t) \leq 0.25 \\ \text{y para el periodo considerado}}} GH(t)}{\sum_{\text{para el periodo considerado excluyendo horas con FCP=0}} GH(t)} \quad b = \frac{\sum_{\substack{\text{si } 0.25 < FCP(t) \leq 0.50 \\ \text{y para el periodo considerado}}} GH(t)}{\sum_{\text{para el periodo considerado excluyendo horas con FCP=0}} GH(t)}$$

$$c = \frac{\sum_{\substack{\text{si } 0.50 < FCP(t) \leq 0.75 \\ \text{y para el periodo considerado}}} GH(t)}{\sum_{\text{para el periodo considerado excluyendo horas con FCP=0}} GH(t)} \qquad d = \frac{\sum_{\substack{\text{si } 0.75 < FCP(t) \leq 1 \\ \text{y para el periodo considerado}}} GH(t)}{\sum_{\text{para el periodo considerado excluyendo horas con FCP=0}} GH(t)}$$

Método aproximado de cálculo de los coeficientes a, b, c, d

Para el método de cálculo anterior de los coeficientes a, b, c, d es necesario conocer el FCP para cada hora, y a su vez, el cálculo de este último requiere el conocimiento de la capacidad de calefacción del sistema elegido, al mismo tiempo que la potencia demandada.

En el método de cálculo propuesto se calcula la demanda (y potencia demandada) en un primer programa, y el consumo en uno posterior, y por ese motivo no puede calcularse el FCP y los coeficientes a, b, c, d tal como se han definido previamente.

A la vista de lo anterior se propone:

1. En el programa de cálculo de demanda se considerará que el sobredimensionado es 0, y con ello se calcula unos coeficientes a*, b*, c*, d*.
2. Al programa de cálculo de consumo se le pasan estos coeficientes y las potencias correspondientes.
3. A continuación, en el programa de cálculo de consumo se calculan los coeficientes a, b, c, d interpolando entre los anteriores conocido el grado de sobredimensionado:

$$\text{Grado Sobredimensionado} = \frac{\text{Potencia Nominal}}{\text{Potencia Máxima Demandada}}$$

FCP*	0,25	0,50	0,75	1,00
Coeficiente	a*	b*	c*	d*

Ejemplo:

Supongamos que el grado de sobredimensionado es 1,25, entonces la tabla anterior se rehace de la siguiente forma:

FCP	0,25/1,25=0,20	0,50/1,25=0,40	0,75/1,25=0,60	1,00/1,25=0,80
Coeficiente	a*	b*	c*	d*

Interpolando tenemos que:

$$a = a^* + (b^* - a^*) \cdot \frac{(0,25 - 0,20)}{(0,40 - 0,20)} \qquad b = b^* + (c^* - b^*) \cdot \frac{(0,50 - 0,40)}{(0,60 - 0,40)}$$

$$c = c^* + (d^* - c^*) \cdot \frac{(0,75 - 0,60)}{(0,80 - 0,60)}$$

4. Finalmente, se ajustan los coeficientes a, b, c, d para que sumen 1.

a. Se calcula:

$$d = 1 - a - b - c$$

b. Si:

$$d < 0 \Rightarrow \begin{cases} d = 0 \\ c = 1 - a - b \end{cases}$$

c. Si:

$$c < 0 \Rightarrow \begin{cases} d = 0 \quad \therefore \quad c = 0 \\ b = 1 - a \end{cases}$$

d. Si:

$$b < 0 \Rightarrow \begin{cases} d = 0 \quad \therefore \quad c = 0 \quad \therefore \quad b = 0 \\ a = 1 \end{cases}$$

Paso 3.2: Ley de parametrización múltiple y coeficientes α , β , γ , δ

$$\begin{aligned} \alpha = & \alpha_0 + \alpha_1 \cdot SC/ + \alpha_2 \cdot \begin{Bmatrix} \text{Tipo} \\ \text{Carga} \\ \text{Interna} \end{Bmatrix} + \alpha_3 \cdot \{\text{Uso}\} + \alpha_4 \cdot \{\text{Dimensionado}\} + \alpha_5 \cdot \{\text{Uso}\}^2 + \\ & + \alpha_6 \cdot \{\text{Dimensionado}\}^2 + \alpha_7 \cdot \begin{Bmatrix} \text{Tipo} \\ \text{Carga} \\ \text{Interna} \end{Bmatrix} \cdot \{\text{Uso}\} + \alpha_8 \cdot SC/ \cdot \{\text{Dimensionado}\} + \alpha_9 \cdot SC/ ^2 \\ & + \alpha_{10} \cdot SC/ \cdot \begin{Bmatrix} \text{Tipo} \\ \text{Carga} \\ \text{Interna} \end{Bmatrix} \\ \\ \beta = & \beta_0 + \beta_1 \cdot SC/ + \beta_2 \cdot \begin{Bmatrix} \text{Tipo} \\ \text{Carga} \\ \text{Interna} \end{Bmatrix} + \beta_3 \cdot \{\text{Uso}\} + \beta_4 \cdot \{\text{Dimensionado}\} + \\ & + \beta_5 \cdot \{\text{Dimensionado}\}^2 + \beta_6 \cdot SC/ \cdot \{\text{Dimensionado}\} + \beta_7 \cdot SC/ \cdot \{\text{Uso}\} + \beta_8 \cdot \{\text{Uso}\}^2 \end{aligned}$$

Se han calculado a partir de simulaciones con CALENER, eligiendo los parámetros de ajuste mediante regresión lineal múltiple (mejor valor del coeficiente de correlación).

Rango de parámetros:

Severidad: Sevilla = 0,31; Madrid = 1; Burgos = 1,85.

Carga interna: alta = 1; media = 2; baja = 3.

Uso: 24, 16, 12, 8 (horas).

Dimensionado: 1; 1,2; 1,4; 1,6.

Criterio de utilización

α : valor de la fórmula si fracción grados-hora normalizados 0-25% > 5%.

$\alpha = 1$, si fracción grados-hora normalizados 0-25% \leq 5%.

β : valor de la fórmula si fracción grados-hora normalizados 0-25% > 5%.

$\beta = 1$, si fracción grados-hora normalizados 0-25% \leq 5%.

Paso 3.3: cálculo de los rendimientos al 25%, 50%, 75% y 100%

Los rendimientos al 25%, 50%, 75% y 100% se calculan multiplicando el rendimiento nominal por un multiplicador que depende del tipo de sistema y de dicho porcentaje.

$$\eta_{25\%} = \eta_{nom.} \cdot Multiplicador(25\%); \quad \eta_{50\%} = \eta_{nom.} \cdot Multiplicador(50\%)$$

$$\eta_{75\%} = \eta_{nom.} \cdot Multiplicador(75\%); \quad \eta_{100\%} = \eta_{nom.} \cdot Multiplicador(100\%)$$

Expansión directa aire/aire

Modo calefacción		Modo refrigeración	
fcp	Multiplicador	fcp	Multiplicador
0,25	0,802769555	0,25	0,839493995
0,5	0,944956296	0,5	0,937800389
0,75	0,995070256	0,75	0,934876139
1	0,99990001	1	1

Expansión directa aire/agua

Modo calefacción	
fcp	Multiplicador
0,25	0,802769555
0,5	0,944956296
0,75	0,995070256
1	0,99990001

Calderas eléctricas

Calefacción		ACS	
fcp	Multiplicador	fcp	Multiplicador
0,25	0,952225	0,25	1
0,5	0,96815	0,5	1
0,75	0,984075	0,75	1
1	1	1	1

Calderas convencionales

Calefacción		ACS	
fcp	Multiplicador	fcp	Multiplicador
0,25	0,9775	0,25	0,948475
0,5	0,985	0,5	0,96565
0,75	0,9925	0,75	0,982825
1	1	1	1

Calderas baja temperatura

Calefacción	
fcp	Multiplicador
0,25	1
0,5	1
0,75	1
1	1

Calderas condensación

Calefacción	
fcp	Multiplicador
0,25	1,06855
0,5	1,0457
0,75	1,02285
1	1

Calderas biomasa

Calefacción	
fcp	Multiplicador
0,25	0,786925
0,5	0,85795
0,75	0,928975
1	1

Los multiplicadores anteriores se han obtenido mediante las siguientes curvas dadas en el fichero “BDTablasyEquipos.xml”.

Expansión directa aire/aire

Modo calefacción

$$multiplicador(FC) = \frac{capCal_T(T^{\circ}bh\ ext)}{conCal_T(T^{\circ}bh\ ext) \cdot conCal_FCP(FC)}$$

En la expresión anterior se debe sustituir T°bh ext = 6 °C, que son las condiciones EUROVENT; de esta forma lo anterior se simplifica a:

$$multiplicador(FC) = \frac{1}{1 \cdot conCal_FCP(FC)}$$

Donde FC vale 0,25 para el rendimiento del 25%, 0,5 para el 50% y así sucesivamente.

A continuación se da la expresión de conCal_FCP(FC):

$$\text{conCal_FCP}(fcp_{cal}) = 0,08565215 + 0,93881371 fcp_{cal} - 0,1834361 fcp_{cal}^2 + 0,15897022 fcp_{cal}^3$$

Los coeficientes de esta expresión se pueden leer directamente del fichero anteriormente mencionado.

Modo refrigeración

$$\text{multiplicador}(FC) = \frac{1}{1 \cdot \text{conRef_FCP}(FC)}$$

Donde FC vale 0,25 para el rendimiento del 25%, 0,5 para el 50% y así sucesivamente.

A continuación se da la expresión de conRef_FCP(FC):

$$\text{conRef_FCP}(fcp_{ref}) = 0,20123007 - 0,0312175 fcp_{ref} + 1,9504979 fcp_{ref}^2 - 1,1205104 fcp_{ref}^3$$

Los coeficientes de esta expresión se pueden leer directamente del fichero anteriormente mencionado.

Expansión directa aire/agua

Modo calefacción

$$\text{multiplicador}(FC) = \frac{1}{1 \cdot \text{con_FCP}(FC)}$$

Donde FC vale 0,25 para el rendimiento del 25%, 0,5 para el 50% y así sucesivamente.

A continuación se da la expresión de con_FCP(FC):

$$\text{con_FCP}(fcp) = 0,08565216 + 0,93881381 fcp - 0,18343613 fcp^2 + 0,15897022 fcp^3$$

Los coeficientes de esta expresión se pueden leer directamente del fichero anteriormente mencionado.

Calderas

En general, para todas las calderas se aplica lo siguiente:

$$\text{multiplicador}(FC) = \text{ren_FCP_Potencia}(FC)$$

Donde la expresión ren_FCP_Potencia varía dependiendo del tipo de caldera. En los siguientes apartados se recogen para su localización correcta en el fichero xml.

Calderas eléctricas

$$\text{ren_FCP_Potencia}(fcp_p) = 0,93663 + 0,0637 fcp_p$$

Calderas convencionales

$$ren_FCP_Potencia(fcp_p) = 0,97 + 0,03 fcp_p$$

Calderas baja temperatura

$$ren_FCP_Potencia(fcp_p) = 1,0$$

Calderas condensación

$$ren_FCP_Potencia(fcp_p) = 1,0914 - 0,0914 fcp_p$$

Calderas biomasa

$$ren_FCP_Potencia(fcp_p) = 0,7159 + 0,2841 fcp_p$$

Para las calderas de ACS, tanto las convencionales como las eléctricas, su $ren_FCP_Potencia$ es siempre igual a la unidad.

Anexo VIII.

Valores por defecto: rendimientos nominales de bombas de calor

La Instrucción Técnica complementaria IT.IC 04 sobre exigencias de rendimiento y ahorro de energía aprobada por el BOE de 13 de agosto de 1981, establecía los siguientes valores del rendimiento (COP) para instalaciones de equipos autónomos con bomba de calor: tabla 4.3. Valores mínimos del COP.

Tipo de bomba de calor	Instalación posterior a enero de 1983	Instalación posterior a enero de 1986
Aire-aire condición b ^(*)	2,2	2,7
Aire-aire condición c ^(*)	1,2	1,6
Agua-aire	2,5	3,0

(*) Condiciones definidas en Tabla 11 de IT.IC.11. b: condiciones de funcionamiento de alta temperatura ($T^{\text{a ext. seca}} = 8^{\circ}\text{C}$), c: condiciones de funcionamiento de baja temperatura ($T^{\text{a ext. seca}} = -8^{\circ}\text{C}$).

Debido a que la media de las mínimas de las temperaturas secas de todas las localidades españolas es superior a -8°C , se han tomado los valores correspondientes a las condiciones de funcionamiento de alta temperatura en todas las zonas climáticas. Los valores del COP tampoco dependerán del tipo de sistema (split o centralizado) sino únicamente de la fecha de instalación del mismo según la siguiente tabla:

Bomba de calor: modo calefacción	Instalación anterior a enero de 1983	Instalación entre enero de 1986 y enero 1986	Instalación posterior a enero de 1986
COP	2,0	2,2	2,7

Donde se ha considerado una reducción del rendimiento del 10% en equipos instalados con anterioridad a la entrada en vigor de la reglamentación. Por otro lado,

para equipos instalados con posterioridad al año 1987 se ha mantenido la exigencia, ya que las actualizaciones del Reglamento de los años 1998 y 2007 no establecen requisitos mínimos explícitos sobre los rendimientos de los equipos.

Para el mismo tipo de equipos (bombas de calor aire-aire) funcionando en régimen de refrigeración no existen datos en la instrucción técnica mencionada, por lo tanto, para dar un valor por defecto de su rendimiento (EER) se han multiplicado los COP's anteriores por un factor de 0,90-0,92. Dicho valor se ha obtenido dividiendo los EER entre los COP de la escala de eficiencia energética de equipos autónomos publicada en el Real Decreto 142/2003, de 7 de febrero, por el que se regula el etiquetado energético de los acondicionadores de aire de uso doméstico, resultando los valores de la siguiente tabla:

Bomba de calor: modo refrigeración	Instalación anterior a enero de 1983	Instalación entre enero de 1986 y enero 1986	Instalación posterior a enero de 1986
EER	1,8	2,0	2,5

Anexo IX.

Ejemplos de desarrollo del proceso de simulación

IX.1 Ejemplo 1: autónomo multizona

IX.1.1 Definición del ejemplo y datos de entrada

Se define un gran edificio terciario en Huelva por superficies y orientaciones.

El edificio consta de seis espacios:

- 2 interiores de 80 m².
- 3 exteriores de 80 m² orientados uno al norte, otro al este y otro al oeste.
- 1 exterior de 100 m² orientado al sur.
- Todos los materiales y definición constructiva de los cerramientos y huecos son los definidos por defecto en el programa.
- Todos los espacios tienen la misma condición operacional, intensidad alta-8h.

Se define un autónomo de caudal variable al que se le asignan todos los espacios. Ninguno de ellos se considera zona de control.

Las características del autónomo son las siguientes:

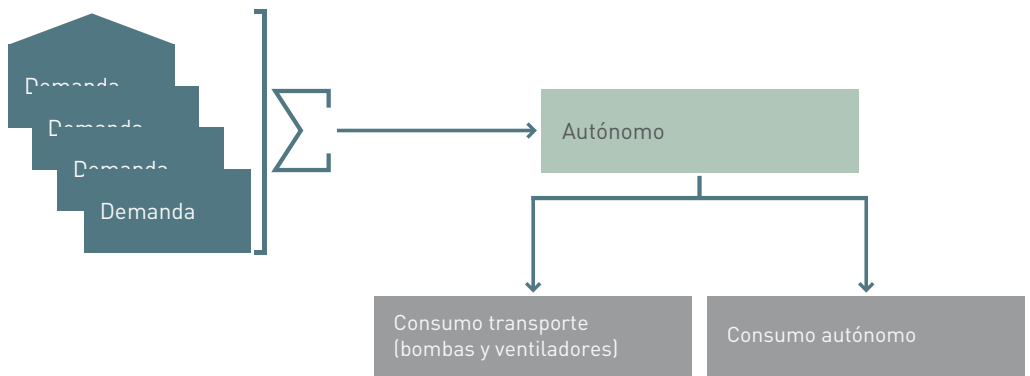
- Ventilación:
 - Ventiladores de impulsión de 120.000 m³/h.
 - Recirculación de aire.
 - 5% de pérdidas en conductos.
- Refrigeración:
 - 300 kW de potencia total.
 - Consumo eléctrico de 100 kW incluyendo ventiladores.
- Calefacción:
 - Bomba de calor de 400 kW de potencia total.
 - Consumo eléctrico de 250 kW incluyendo ventiladores.
- Recuperación:
 - No tiene ningún tipo de recuperación.

- Control:
 - Temperaturas de impulsión de calefacción y refrigeración de 30 y 18 °C respectivamente.
 - No tiene control de impulsión.

Todo el edificio requiere una iluminancia media de 200 lux y el VEEL de referencia es igual a 1.

IX.1.2 Proceso de cálculo

Esquema del ciclo de simulación del CE3-GT para un autónomo multizona



Hora a hora, el proceso de cálculo es el siguiente:

1. Se comprueba que al menos uno de los locales esté en horario de funcionamiento de frío o calor. En este caso, al tener todos los locales el mismo horario, todos están funcionando o parados a la vez. En caso de haber definido distintos horarios, con que el de un solo local estuviese en horario de funcionamiento, el secundario funcionaría.
2. Se calcula la humedad de cada local resultante del funcionamiento de los equipos, las cargas internas y las infiltraciones en la hora anterior.
3. Se suman todas las cargas de las zonas.
4. Se calcula la temperatura promedio de todas las zonas.
5. Se calcula la humedad promedio de todas las zonas.
6. Se le pasan los datos calculados al autónomo, así como la temperatura y humedad exteriores.
7. El autónomo calcula su consumo en calefacción o refrigeración según sea, debido a las entradas recibidas, así como el consumo de los ventiladores de impulsión.
8. En caso de que la capacidad del autónomo no haya sido suficiente, se registra la incidencia en un archivo de errores.
9. Por último, se acumulan tanto las demandas de calefacción y refrigeración como los consumos eléctricos del autónomo y de los ventiladores, además de la masa de aire total que ha sido impulsada por los ventiladores.

Una vez finalizado el cálculo del año completo, los resultados acumulados se pasan al programa PUC que los analiza, compara con el edificio de referencia, añade los resultados de la iluminación y muestra en pantalla en el informe de calificación.

IX.2 Ejemplo 2: CAP y UTA de caudal constante unizona

IX.2.1 Definición del ejemplo y datos de entrada

Se define un gran edificio terciario en Almería por superficies y orientaciones.

El edificio consta de dos espacios:

- 2 exteriores de 450 m² cada uno, orientados uno al norte, "e2" y otro al sur, "e1".
- Todos los materiales y definición constructiva de los cerramientos y huecos son los definidos por defecto en el programa.
- El espacio orientado al sur tiene como condición operacional intensidad alta-8h.
- El espacio orientado al norte tiene como condición operacional intensidad baja-12h.

Se define una climatizadora de aire primario (CAP) a la que se le asigna el espacio "e2", y de la que cuelga una climatizadora de caudal constante unizona (UTA) a la que se le asigna el otro espacio, "e1".

Las características de la CAP son las siguientes:

- Ventilación:
 - Ventiladores de impulsión de 5.000 m³/h con un consumo específico de 0,3 W/(m³/h).
 - Modo sólo ventilación.
 - 1% de pérdidas en conductos.
- Refrigeración:
 - 50 kW de potencia total.
 - Caudal nominal de 9.000 m³/h con un consumo específico de 0,1 W/(m³/h).
 - Con válvula de 3 vías.
 - 1% de pérdidas en conductos.
- Calefacción:
 - 60 kW de potencia total.
 - Caudal nominal de 10.800 m³/h con un consumo específico de 0,1 W/(m³/h).
 - Con válvula de 3 vías.
 - 1% de pérdidas en conductos.
- Recuperación:
 - Tiene un recuperador de energía estático con una eficiencia del 80% y sin consumo eléctrico.
- Control:
 - Temperaturas de impulsión de calefacción y refrigeración de 30 y 18 °C respectivamente.
 - No tiene control de impulsión.
 - Comienza el modo calefacción el 1 de noviembre y el modo refrigeración el 1 de mayo.

Las características de la UTA son las siguientes:

- Ventilación:
 - Ventiladores de impulsión de 135.000 m³/h con un consumo específico de 0,15 W/(m³/h).
 - Recirculación de aire.
 - 1% de pérdidas en conductos.
- Refrigeración:
 - 450 kW de potencia total.
 - Caudal nominal de 77.550 m³/h con un consumo específico de 0,1 W/(m³/h).
 - Con válvula de 3 vías.
 - 1% de pérdidas en conductos.
- Calefacción:
 - 530 kW de potencia total.
 - Caudal nominal de 91.337 m³/h con un consumo específico de 0,1 W/(m³/h).
 - Con válvula de 3 vías.
 - 1% de pérdidas en conductos.
- Recuperación:
 - No tiene ningún tipo de recuperación.
- Control:
 - No se define ningún tipo de control.

Se define un grupo general de primarios compuesto por una caldera y una enfriadora. Las características del grupo son las siguientes:

- Cada equipo perteneciente al grupo tiene su propia bomba.
- Tiene capacidad de inversión simultánea.
- Funciona todo el año según demanda.
- Se desprecian las pérdidas en tuberías.

Las características de la caldera son:

- Caldera de combustible convencional con gas natural como combustible.
- 590 kW de potencia nominal.
- Rendimiento de 0,85.
- Sin depósito ni paneles solares.
- Bomba de 33.900 l/h y un consumo de 0,01 W/(l/h).

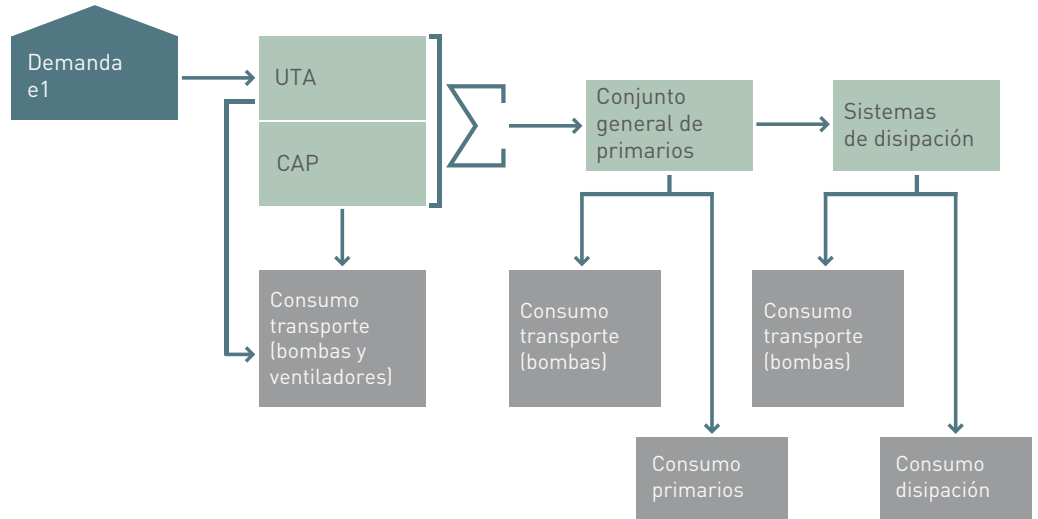
Las características de la enfriadora son:

- Enfriadora con compresor eléctrico.
- Condensada por aire.
- 500 kW de potencia nominal.
- EER eléctrico de 4,0.
- Temperatura de impulsión de agua de 7 °C.
- Bomba de 86.000 l/h y un consumo de 0,01 W/(l/h).

Todo el edificio requiere una iluminancia media de 500 lux y el VEEL de referencia es igual a 4,5.

IX.2.2 Proceso de cálculo

Esquema del ciclo de simulación del CE3-GT del ejemplo 2



Hora a hora, el proceso de cálculo es el siguiente:

1. Se comprueba que al menos uno de los locales esté en horario de funcionamiento de frío o calor. Dado que el horario de “e1” está incluido dentro del horario de “e2”, la UTA funcionará siempre que el horario de “e1” lo requiera, y la CAP siempre que el de “e2” lo diga.
2. Se calcula la humedad de cada local resultante del funcionamiento de los equipos, las cargas internas y las infiltraciones en la hora anterior.
3. Como no hay corriente de retorno, no se calcula la temperatura y humedad del aire de entrada a la CAP, sino que se asignan directamente las condiciones del aire exterior.
4. En cada hora de funcionamiento que marca la “e2”, la CAP devuelve las condiciones del aire de impulsión (entrada a la UTA), el consumo de los ventiladores de impulsión y las potencias de frío o calor necesarias para conseguir esa temperatura.
5. En las horas en las que además funciona la UTA, se calcula el consumo de los ventiladores y la potencia de calor o frío necesaria para acondicionar el aire de impulsión según las condiciones de entrada de éste y las del aire del local.
6. La suma de las potencias de frío por un lado y de calor por otro de ambos equipos se pasan al grupo de primarios. Éste asigna las necesidades de calor a la caldera y las de frío a la enfriadora en cada instante de cálculo, ya que tiene capacidad de inversión simultánea.
7. Tanto la caldera como la enfriadora calculan sus consumos para la potencia requerida y el consumo de las bombas.

8. En caso de que la capacidad total del grupo de primarios no haya sido suficiente, se registra en el archivo de errores.
9. Por último, se acumulan tanto las demandas de calefacción y refrigeración como los consumos eléctricos de los secundarios, de los ventiladores, las bombas y la enfriadora, así como el consumo de gas natural de la caldera, además de la masa de aire total que ha sido impulsada por los ventiladores y el volumen total que ha sido impulsado por las bombas.

Una vez finalizado el cálculo del año completo, los resultados acumulados se pasan al programa PUC que los analiza, compara con el edificio de referencia, añade los resultados de la iluminación y muestra en pantalla en el Informe de Calificación.

IDAE: Calle Madera 8, 28004, Madrid, Telf.: 91 456 49 00
Fax: 91 523 04 14, mail: comunicacion@idae.es, www.idae.es

