

Modelo para la Predicción Energética de una Instalación Hotelera

Adriana V. Acosta^{a,1}, Ana I. González^b, Jesús M. Zamarreño^c, Víctor Álvarez^d

^{a,b} Departamento de Automática y Computación, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.

^c Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, c/ Dr. Mergelina s/n, 47011 Valladolid, España.

^d Hotel Meliá Habana, La Habana, Cuba

Resumen

Este artículo describe la obtención y validación de un modelo de predicción energética para el hotel Meliá Habana de la ciudad Habana en Cuba. El modelo obtenido emplea el método de series de tiempo radiantes para la determinación de la carga térmica de los bloques habitacionales de la instalación. El modelo es implementado en el lenguaje de programación MatLab[®]. La validación experimental del modelo se realiza con mediciones reales del consumo energético diario del hotel. El valor de uso del modelo obtenido es apreciable para estudios de comportamiento energético y para la implementación de estrategias avanzadas de control. Copyright © 2011 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave:

Modelado, Control de la Energía, Coeficientes de Temperatura, Validación.

1. Introducción

Las edificaciones destinadas a los hoteles poseen características propias que las diferencian de otro tipo de edificios. Son instalaciones con un uso permanente a lo largo de cada año y donde su principal objetivo reside en garantizar confort y calidad para los huéspedes en todos sus servicios (González, 1996), (Castilla *et al.*, 2010).

En las instalaciones hoteleras predomina el movimiento de los ocupantes desde la habitación hacia las áreas exteriores, la presencia de cristales, la diversidad entre habitaciones, así como el amplio uso del sistema de aire acondicionado durante todo el día. Estos factores inciden decisivamente en los altos niveles de carga térmica.

Inmersos en la situación energética global, el sector hotelero en todos los países se impone objetivos relacionados con el control de la demanda y el ahorro de energía. En las

instalaciones de este sector existe un gran potencial para el ahorro energético.

Un sistema de climatización con gran flexibilidad para satisfacer las condiciones de confort de los ocupantes durante las 24 horas se hace un requisito imprescindible. La apertura frecuente de las ventanas y puertas requiere de un método flexible que proporcione un control individual de la temperatura de confort para cada huésped independientemente de la temperatura en el resto de las habitaciones. Según la ASHRAE (siglas en inglés de American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineer) este control le permite ventilar, refrescar y calentar la habitación como lo desee el inquilino (ASHRAE, 2007).

La demanda de energía y de consumo de combustible de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado tiene un impacto directo en el costo de la operación de un edificio y un impacto indirecto en el medio ambiente (ASHRAE, 2005a).

¹ Autor en correspondencia.
Correos electrónicos: anita@electronica.cujae.edu.cu
(Adriana V. Acosta, Ana I. González),
jesusm@autom.uva.es (Jesús M. Zamarreño)

Según algunas fuentes bibliográficas, el impacto directo del funcionamiento de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado en el consumo energético de una edificación alcanzan hasta el 60%; de ahí la importancia de prestar especial atención a esta temática (Trott y Welch, 2000).

La gestión adecuada de la demanda de energía eléctrica de un edificio, ha sido un gran anhelo de los gerentes de operación de los mismos, desde que comenzó la crisis energética y el aumento del precio del petróleo. El uso correcto de la energía en la edificación posibilita bajar los costos de operación en dos sentidos. El primer aspecto está relacionado con el uso final de la energía a través del alumbrado, la climatización y los equipos eléctricos, e implementar las acciones necesarias para reducir la cantidad de energía a consumir. El segundo aspecto está relacionado con las tarifas impuestas por las compañías suministradoras de electricidad, cuando la demanda excede los límites convenidos para la edificación en cuestión. Si se pudiera pronosticar el consumo eléctrico o la demanda energética, se adoptarían las medidas necesarias para disminuir ambos y por consiguiente reducir los costos de operación del edificio.

Muchas investigaciones han desarrollado estudios de modelado y de simulación del comportamiento del consumo energético de los edificios, como herramienta predictiva que facilita el conocimiento detallado del sistema y la toma de decisiones acertadas con el objetivo de ahorrar energía.

La literatura consultada afin a este trabajo, puede clasificarse en tres grupos principales: la que aborda el desarrollo de modelos, la que propone metodologías y la que muestra el desarrollo de programas de simulación.

En el grupo de *desarrollo de modelos* se encuentran varios ejemplos.

En (Yik et al., 2001) se modeló el consumo energético en 23 edificios comerciales y 16 hoteles. Su investigación incluyó una valoración de varios parámetros como el área del piso, el tipo de sistema de aire acondicionado, la categoría de los hoteles, el año en que se construyó el edificio, entre otros. Para la tarea de simulación fueron utilizados tres programas: uno para la determinación de la carga, otro para la transferencia de calor en el edificio y el último para la simulación del sistema de aire acondicionado.

Chirarattananon y Taveekun probaron un modelo de predicción del consumo energético basado en el valor global de la transferencia térmica (OTTV, por sus siglas en idioma inglés, Overall Thermal Transfer Value). El OTTV fue probado para diferentes edificaciones, tales como comercios, oficinas, hoteles, hospitales y otros y también para diferentes épocas del año. Para la comparación del modelo propuesto se utilizó el programa de simulación DOE-2 (York and Cappiello, 1982). El modelo reproduce correctamente el comportamiento del consumo energético pero tiene pobre predicción en algunos casos como son los hoteles y los hospitales y buena predicción en el caso de las tiendas por departamentos y los edificios comerciales, (Chirarattananon and Taveekun, 2004).

Gugliermetti, Passerini y Bisegna demostraron que los aspectos climatológicos juegan un papel importante en el pronóstico del consumo energético de los edificios de oficinas.

Estos autores mostraron que utilizar un día típico de un mes en lugar de los datos del clima anual provoca la subestimación o sobrestimación del consumo energético del edificio, (Gugliermetti et al., 2004).

Aktacir, Büyükalaca, Bulut, y Yılmaz investigaron la influencia de las diferentes condiciones externas de diseño sobre los sistemas de aire acondicionado del edificio. Con este propósito la carga térmica y la capacidad de los equipos de aire acondicionado de un edificio situado en Adana, Turquía, son calculadas empleando diferentes condiciones externas de diseño, recomendadas por la ASHRAE. Ellos comprobaron que la selección de las condiciones externas de diseño constituye un paso muy crítico en el cálculo de la carga térmica y de la capacidad de los equipos de aire acondicionado (Aktacir et al., 2008).

Li, Lam, Chan y Mak emplearon el método RTS (siglas en inglés de Radiant Times Series) para determinar la demanda energética pico de la ganancia de calor producto de la iluminación solar o el alumbrado eléctrico, que simplifica el método de balance de calor. La ASHRAE documenta este método en (ASHRAE, 2005a). En estos estudios fue evaluado el análisis del costo de operación de los módulos fotovoltaicos semitransparentes en la producción de energía limpia e iluminación natural en los edificios, (Li et al., 2009).

Chen y Cui han estudiado los inconvenientes de aplicar el método RTS a los sistemas de aire acondicionado en edificios no residenciales, debido a la intermitencia de la operación de estas instalaciones. Por ello desarrollaron un nuevo método, basado en el existente método RTS y en el método de balance de calor. En principio, la primera parte del nuevo método coincide con el método RTS conocido. Ellos determinan la carga térmica adicional a causa de la operación intermitente. El nuevo método ha sido validado por simulaciones realizadas con el programa EnergyPlus. La desviación media cuadrática entre los valores de la carga térmica adicional relativa obtenidas por ambos métodos fue de 1.8%. El estudio reflejado en (Cui and Chen 2009) demuestra además que la carga térmica depende de la orientación del edificio, el régimen de operación y las dimensiones de las ventanas, entre otros.

En el grupo de las *metodologías* se encuentran varios estudios.

Pedrini, Westphal, y Lamberts describieron una metodología para analizar el comportamiento energético de un edificio y la aplicaron a 15 edificios comerciales. Según los autores la calibración del modelo se realizó visitando el lugar, estudiando la planta del edificio y observando el comportamiento de la demanda energética del edificio. (Pedrini et al., 2002).

Pantelis, Botsaris y Prebezas presentaron una metodología para auditar el consumo energético de los edificios basados en los índices de la carga térmica y el de la disposición energética. Estos índices pueden ser utilizados para auditar el consumo energético del edificio y para certificaciones, (Pantelis et al., 2004).

Westphal y Lamberts establecieron una metodología para la calibración de modelos de simulación de edificios, a través de la definición de los parámetros que más afectan el consumo

eléctrico final, (Westphal and Lamberts, 2005). En la metodología los autores proponen seis etapas para la calibración del modelo. Un caso de estudio es presentado en el cual los valores del consumo energético resultan 1% por debajo de los calculados con el programa EnergyPlus.

Fangting, Yi, Anne y Jean-Jacques elaboraron una nueva metodología para el análisis de los datos del consumo eléctrico de edificios comerciales a gran escala. Esta metodología presentada en (Fangting *et al.*, 2007) reúne el análisis de la estructura del consumo eléctrico, un conjunto de modelos indexados según el uso final de la energía eléctrica y un grupo de modelos para estimar la carga térmica. La metodología fue aplicada exitosamente en cuatro edificios, dos en China y dos en Francia.

Finalmente en el grupo de programas de simulación se ubican otras investigaciones.

Hernández y Sanzovo evaluaron la utilización del EnergyPlus como herramienta para auditar y determinar el consumo energético de un edificio. El caso de estudio es el edificio de la administración de la universidad de Sao Paulo. Se realizó en el estudio un análisis sensitivo del modelo de simulación EnergyPlus para conocer la influencia de diferentes factores como la ocupación (Hernández and Sanzovo, 2007).

Sakurai y otros confeccionaron una herramienta de simulación, denominada Faces, para seleccionar el sistema correcto de calefacción, durante las tempranas etapas de diseño de una edificación. La herramienta Faces da solución al conflicto existente entre la poca disponibilidad de datos de entrada y la cantidad de datos de salida necesarios para realizar la selección adecuada. Posee una fácil operación y exactitud en los resultados. (Sakurai *et al.*, 2007).

1.1 La predicción del consumo energético basado en modelo

Los procedimientos para estimar el consumo energético varían considerablemente en dependencia del grado de complejidad del modelo empleado y poseen generalmente tres elementos comunes (Acosta *et al.*, 2008a), (Acosta *et al.*, 2008b):

- el cálculo de la carga térmica,
- la carga del equipamiento secundario y
- el consumo energético del equipamiento primario.

La carga térmica está definida como la cantidad de energía calórica que por convección se transmite por el aire de la zona objeto de estudio, a un punto dado en la unidad de tiempo. El cálculo de esta carga es complicado debido a la variación del intercambio de radiación entre las superficies, el mobiliario, las divisiones y otras masas en la zona.

Han sido diferentes los procedimientos que se han descrito para determinar la carga térmica de un espacio específico. Algunos asumen que este valor depende solamente de las variaciones de la temperatura exterior al espacio en cuestión. Otros métodos más complejos tienen en cuenta que la carga es una función de múltiples variables como son: la intensidad de la radiación solar, las ganancias de calor internas en el espacio, el almacenaje térmico de las paredes, el ambiente del edificio y la infiltración (ASHRAE, 2005b).

Entre las acciones que pueden ser adoptadas para disminuir el consumo energético, se encuentra la selección de una

adecuada estrategia de control que optimice la operación de los sistemas de aire acondicionado. Las estrategias de control para lograr una mejor gestión del sistema de aire acondicionado han sido variadas. Un requerimiento para todas estas estrategias ha sido ahorrar una cantidad considerable del consumo eléctrico, sin comprometer las condiciones de confort necesarias (Budaiwi, 2003).

Un modelo de predicción energética, que permita conocer con antelación el comportamiento del consumo energético de una instalación hotelera, en dependencia del comportamiento de la carga térmica de las habitaciones del hotel, es una herramienta fundamental en la época actual, donde el agotamiento de los combustibles fósiles es una realidad.

El objetivo principal de este trabajo lo constituye la obtención y validación de un modelo de predicción del consumo energético del sistema centralizado de climatización que ventila las habitaciones de un hotel; utilizando el método RTS, como base de cálculo para determinar la carga térmica de todas las habitaciones del hotel.

Como se aprecia en la literatura consultada el método RTS fue desarrollado en respuesta al deseo del Comité Técnico de la ASHRAE de diseñar un método de cálculo de cargas térmicas que fuera riguroso pero no iterativo. En este trabajo se desarrolla un modelo para el cálculo de la carga térmica de una instalación hotelera utilizando dicho método pero teniendo en cuenta además diferentes épocas del año, la orientación geográfica, las estructuras del inmueble y la intermitencia de la ocupación.

Los resultados obtenidos logran un modelo de predicción para un hotel de más de 400 habitaciones en un país tropical con ocupación de turistas durante todo el año basado en un método riguroso de cálculo de la carga térmica no muy empleado para ese fin y preestableciendo una metodología que se puede generalizar para hoteles con similares características.

El artículo consta de cinco epígrafes: introducción, descripción de la instalación hotelera, obtención del modelo, validación y conclusiones. En la descripción se caracteriza la instalación hotelera que es objeto de estudio. En la obtención del modelo se conceptualiza el método utilizado para calcular la carga térmica de las habitaciones pero además se formaliza el modelo basado en el método RTS y se aborda la resolución del modelo obtenido. En el cuarto epígrafe se relacionan cinco experimentos realizados con el objetivo de validar el modelo presentado con anterioridad.

2. Descripción de la instalación hotelera

La instalación hotelera empleada para la obtención del modelo es el hotel Meliá Habana, que se encuentra situado al noroeste de la Habana en Cuba. El hotel seleccionado es una edificación con cierto nivel de automatización y con un personal dedicado al control del consumo energético del hotel que posee un registro histórico de datos de un valor apreciable.

El edificio tiene dos bloques habitacionales y un total de 413 habitaciones. El primer bloque cuenta con 9 pisos y 297 habitaciones. El segundo bloque cuenta con 4 pisos y 116 habitaciones. En aras de mejorar el confort de los huéspedes, algunas habitaciones ocupan doble espacio.

Las habitaciones del hotel se clasifican en tres tipos: A, B y C en dependencia de sus dimensiones y posición. Del tipo A existen 347 habitaciones. Del tipo B y del tipo C existen 33 habitaciones respectivamente.

En el interior de cada habitación se encuentra una secadora de pelo en el baño, una cafetera, un televisor, iluminación moderada y un pequeño refrigerador. El mobiliario es abundante. Se considera que la mayor fuente de ganancia de calor es la puerta de cristal que separa a la habitación del balcón. Esta puerta se encuentra recubierta con doble cortinas. La cortina que da al exterior es de color claro para incidir en la reflexión de los rayos solares.

El sistema de climatización del hotel es mixto pues combina el sistema individual de aire acondicionado con el sistema centralizado. El objeto de estudio de la investigación es el sistema centralizado, que climatiza a todas las habitaciones del hotel. El líquido refrigerante empleado en este sistema es el agua fría. Para un uso óptimo del sistema centralizado, existen 7 circuitos de agua de enfriamiento, con sus respectivas bombas de impulsión. Los circuitos son representados en la Figura 1.

De la Figura 1, el segundo circuito alimenta las habitaciones de los pisos del 1 al 5 del primer bloque. El tercer circuito alimenta a su vez, a los pisos del 6 al 9 del primer bloque. El cuarto circuito alimenta los cuatro pisos del segundo bloque de habitaciones del hotel. El resto de los circuitos están destinados a otras áreas de la instalación.

El sistema de climatización del hotel Meliá Habana se compone básicamente por 4 máquinas enfriadoras del agua de 208 ton de refrigeración o 730 kW de carga frigorífica para un total de 2.92 MW de capacidad frigorífica instalada. Este sistema se complementa además con el empleo de bombas que impulsan el agua hacia los lugares de consumo, a través de sistemas de tuberías y de manejadoras, climatizadoras y unidades de ventiladores y serpentines. De esta manera, el gasto energético del hotel, por concepto de climatización, se utiliza en enfriar el agua, transportarla, transformarla en aire frío e impulsar este aire a su destino.

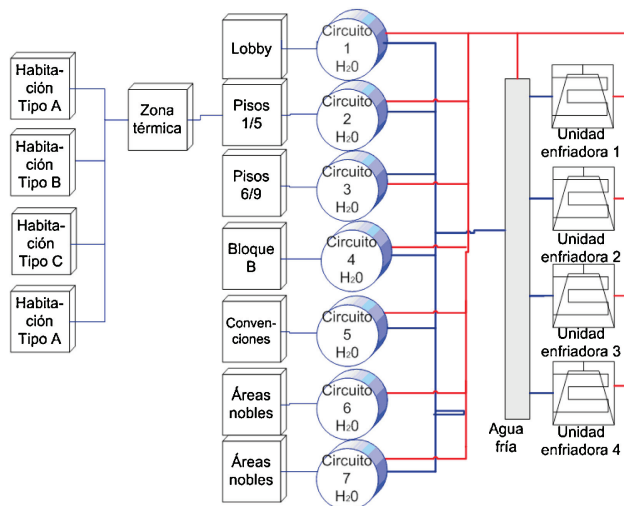


Figura 1: Circuitos de agua fría del sistema centralizado de climatización del hotel.

Los gastos por concepto de climatización se dividen en tres categorías: gastos fijos, gastos de salones de eventos y gastos de habitaciones.

Los gastos fijos no dependen de la ocupación del hotel y están asociados con el funcionamiento básico de la instalación, independientemente de la afluencia de turistas. Comprende las áreas de uso general como son el recibidor, el centro de negocios, los restaurantes, las oficinas, los almacenes, la planta real, la cocina central, los locales tecnológicos y otros.

Los gastos de salones de eventos dependen del uso que se les dé a los mismos y de la programación del hotel.

Los gastos de las habitaciones están estrechamente relacionados con la cantidad de turistas hospedados aunque en valoraciones recientes del gasto de las habitaciones, por parte del personal energético del hotel, se ha podido comprobar que aún estando desocupadas por turistas, las habitaciones consumen electricidad (asociada a la climatización mantenida por personal de servicio irresponsable).

En el hotel Meliá Habana de la capital cubana el comportamiento de los principales consumidores de energía eléctrica es como se representa en la Figura 2. Según los datos de la carga eléctrica instalada a partir de los valores nominales de cada equipo los sistemas de climatización ocupan el 61% del consumo total de la instalación.

En el hotel existen dos subestaciones eléctricas y un grupo electrógeno. Las cargas eléctricas se encuentran distribuidas entre ambas subestaciones. La carga eléctrica asociada a la climatización de las habitaciones se encuentra conectada, en su mayoría, a la subestación número 2. Por esta razón cualquier cálculo del consumo energético de la climatización de las habitaciones siempre se compara con los registros de consumo de la subestación número 2 o también nombrada T2. No se encuentran conectados a esta subestación los motores de los ventiladores de las unidades de enfriamiento (conjunto ventilador-serpentin conocido por su traducción en idioma inglés como fan coil) de las habitaciones del segundo bloque del hotel.

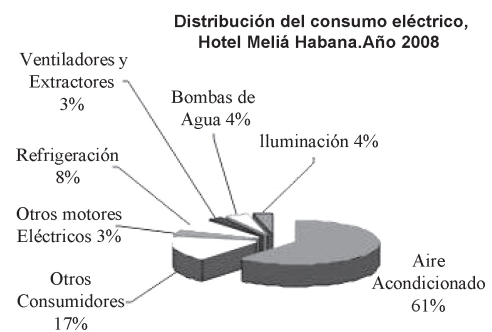


Figura 2: Distribución del consumo eléctrico según la carga instalada. Fuente: Base de datos. Año 2008. Grupo energético del hotel.

3. Obtención del modelo

3.1 Conceptualización. Generalidades del método RTS.

Un modelo matemático es la descripción del comportamiento de un sistema. Se compone de varios

elementos: variables de entrada, estructura del sistema, parámetros y variable de salida, (Ljung, 1999).

En este trabajo, el modelo de predicción energética a obtener calcula el gasto de las habitaciones ocupadas del hotel y para ello tiene en cuenta la temporada del año, los niveles de ocupación, las condiciones climáticas y las características constructivas de las habitaciones, prestandole especial atención a su ubicación geográfica.

El modelo es del tipo directo, es decir, su objetivo es predecir las variables de salida, a partir del conocimiento de la estructura y de los parámetros del sistema, si éste es sometido a determinadas condiciones de las variables de entrada (ASHRAE, 2005b). Este tipo de modelo es ampliamente utilizado en los programas de simulación desarrollados para el análisis del consumo energético de edificios que emplea un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado como: “BLAST” (U.S. Army, 1979), “DOE-2” (York and Cappiello, 1982) y “EnergyPlus” (Crowley et al, 2001).

La estructura básica del modelo de predicción del consumo eléctrico del sistema de aire acondicionado se representa en la Figura 3. El primer paso para calcular el consumo energético es determinar la carga térmica.



Figura 3: Diagrama en bloques de la estructura del modelo del consumo eléctrico del sistema de aire acondicionado.

El procedimiento de cálculo de la carga térmica seleccionado en este caso es el método RTS (ASHRAE, 2005a).

El método de series de tiempo radiantes se deriva directamente del método de balance de calor (Quiston and Spitler, 1992), para cálculos de la carga térmica de operación. Este método permite cuantificar la contribución de cada componente a la carga térmica total, lo cual es muy deseado para poder examinar y comparar el comportamiento de las diferentes construcciones y distintos tipos de zona. El método se diferencia de otros anteriores en los siguientes aspectos: el cálculo de la ganancia de calor por conducción, la división de la ganancia de calor en fracciones por radiación y por convección y la conversión de las ganancias de calor por radiación en carga térmica.

El método RTS calcula la ganancia de calor para cada fuente, y luego considera el retardo de los procesos de conducción y de radiación. Para ello utiliza los llamados factores de tiempo radiantes (RTFs), y los factores de tiempo de conducción (CTFs), que no son más que los coeficientes de una serie de tiempo que distribuyen las ganancias de calor de forma efectiva a través del tiempo.

El uso de estos factores en el método RTS, convierte las ganancias de calor en cargas térmicas, y elimina la necesidad de solucionar los sistemas de ecuaciones para la zona térmica y para las superficies.

Como las ganancias de calor se calculan cada una hora, la serie de tiempo está formada por 24 factores y por definición, cada serie de tiempo radiante o de conducción debe totalizar el 100% (ASHRAE, 2005a).

El procedimiento general para hacer cálculos de la carga térmica para cada fuente interna de calor (por ejemplo, la iluminación, las personas, las paredes, el techo, los exteriores, el piso, las ventanas, los equipos, entre otros) con el método RTS es como se muestra en la Figura 4.

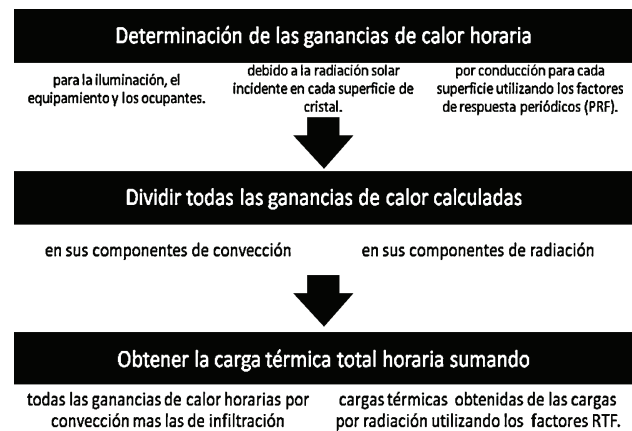


Figura 4: Procedimiento general del método de series de tiempo radiante.

La división de la ganancia de calor en fracciones por radiación y por convección simplifica el cálculo del intercambio de radiación entre las superficies interiores del local. El método RTS desacopla estos dos procesos de transferencia de calor, dividiendo las ganancias de calor en fracciones por convección y por radiación y emplea valores recomendados establecidos por tablas (Spitler and Fisher, 1999).

Después que las ganancias de calor se fraccionan, la porción por convección es una contribución directa a la carga térmica instantánea, mientras que la porción por radiación es absorbida por los elementos constructivos y se distribuye nuevamente por convección hacia la zona térmica.

3.2 Formalización del modelo basado en el método RTS.

3.2.1 Temperatura sol-aire.

La temperatura sol-aire es la temperatura del aire exterior equivalente a la combinación de todas las fuentes de energía por radiación y convección existente en el exterior de la zona. Esta temperatura se calcula a partir de la expresión del balance de calor de una superficie iluminada por el sol. Este balance de calor es representado a través de la relación que se expresa en (1) donde q es el flujo de calor (W). A es el área de la superficie (m^2), α es el coeficiente de absorción de la radiación solar por la superficie, E_t es la radiación solar que incide sobre la superficie ($W/(m^2 \cdot K)$), h_0 es el coeficiente de transferencia

de calor por radiaciones de larga longitud de ondas y por convección de la superficie exterior ($W/(m^2 \cdot K)$), t_0 es la temperatura del aire exterior ($^{\circ}C$), t_s es la temperatura de la superficie ($^{\circ}C$), ε es la emisividad hemisférica de la superficie y ΔR es la diferencia entre las radiaciones de larga longitud de ondas que inciden en la superficie desde el cielo y sus alrededores y las emitidas por un cuerpo negro a la temperatura del aire exterior (W/m^2).

$$\frac{q}{A} = \alpha E_t + h_0(t_0 - t_s) - \varepsilon \Delta R \quad (1)$$

De igual forma el balance de calor puede ser expresado en función de la temperatura sol-aire (t_e en $^{\circ}C$) como se representa en (2).

$$\frac{q}{A} = h_0(t_e - t_s) \quad (2)$$

Igualando las ecuaciones (1) y (2) se despeja la temperatura sol-aire que se expresa en (3).

$$t_e = t_0 + \frac{\alpha E_t}{h_0} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_0} \quad (3)$$

Como se observa de este balance y como se formalizó en el procedimiento general se debe calcular la carga térmica horaria para poder estimar el consumo eléctrico del hotel.

3.2.2 Carga de calor por conducción.

En el método RTS, la entrada del calor por conducción a las paredes y al techo desde el exterior se define por las ecuaciones (4) y (5) donde se utiliza la serie de conducción CTS.

$$q_{i,\theta-n} = UA(t_{e,\theta-n} - t_{rc}) \quad (4)$$

$$q_{\theta} = c_0 q_{i,\theta} + c_1 q_{i,\theta-1} + c_2 q_{i,\theta-2} + c_3 q_{i,\theta-3} + \dots + c_{23} q_{i,\theta-23} \quad (5)$$

En la expresión (4) $q_{i,\theta-n}$ es la entrada de calor por conducción para la superficie n horas antes (W), U es el coeficiente de transferencia de calor para la superficie ($W/(m^2 \cdot K)$), A es el área de la superficie (m^2), $t_{e,\theta-n}$ es la temperatura sol-aire n horas antes ($^{\circ}C$) y, t_{rc} es la temperatura de la habitación presumiblemente constante ($^{\circ}C$).

La entrada de calor por conducción para cada hora se expresa en (5) donde q_{θ} es la ganancia de calor por conducción para la superficie para cada hora (W), $q_{i,\theta}$ es la entrada de calor para la hora actual (W), $q_{i,\theta-n}$ es la entrada de calor por conducción para la superficie n horas antes (W) y c_0, c_1, \dots, c_{23} son los factores de tiempo de conducción (CTS).

Los factores de tiempo de conducción son derivados del cálculo del método de funciones de transferencia (utilizado para el cálculo de la carga térmica, empleando el principio de superposición y los cálculos iterativos (ASHRAE, 1997)), para cada tipo de pared y de techo en dependencia de sus materiales de construcción teniendo en cuenta las premisas de estado periódico estable y de sistema adiabático (McQuiston and Spitler, 1992). Los factores periódicos de respuesta fueron simplificados dividiéndolos por el coeficiente total de transferencia de calor y de esta forma se obtiene la serie de tiempo de conducción CTS (Spitler and Fisher, 1999).

3.2.3 Carga de calor por radiación.

El método de serie de tiempo radiante convierte la porción radiante de la ganancia de calor en carga, utilizando los factores de tiempo radiantes, es decir, los coeficientes RTF. La serie de tiempo radiante para una zona particular da la respuesta dependiente en el tiempo de la zona para un pulso de energía radiante. La serie muestra la porción del pulso radiante que es convertida por el aire de la zona cada hora. Así, r_0 representa el fragmento del pulso radiante convertido por el aire de la zona en la hora actual, r_1 en la hora anterior, etc. La serie temporal radiante así generada se usa para convertir la porción radiante de ganancias de calor de cada hora en las cargas horarias según la expresión (6) donde $Q_{r,\theta}$ es la carga por radiación para la hora actual (W), $q_{r,\theta}$ es la ganancia de calor por radiación para la hora actual (W), $q_{r,\theta-n}$ es la ganancia de calor por radiación para n horas atrás (W) y r_0, r_1, \dots, r_{23} son los factores de tiempo radiantes.

$$Q_{r,\theta} = r_0 q_{r,\theta} + r_1 q_{r,\theta-1} + r_2 q_{r,\theta-2} + r_3 q_{r,\theta-3} + \dots + r_{23} q_{r,\theta-23} \quad (6)$$

La ganancia de calor por radiación $q_{r,\theta}$, para cada fuente se obtiene a partir de la ganancia por conducción, a esa hora, multiplicada por la fracción de radiación correspondiente a la fuente en cuestión. Por ejemplo para una pared la fracción de radiación es 63%.

Los factores de tiempo radiante se pueden obtener de dos formas. Una es la que se deriva de los factores de peso utilizados en el método de funciones de transferencia. El número de factores se encuentran disponibles en la base de datos del ASHRAE (Spitler y Fisher, 1999). Sin embargo, el número de tipos de zonas y de construcciones es limitado. Según las premisas asumidas para el método, los factores de tiempo radiante también pueden ser obtenidos por el método de balance de calor. Teóricamente cada zona requiere de diferentes factores de tiempo radiantes. Para aplicaciones comunes, la variación de RTS depende primordialmente de la masa global de la construcción y de la respuesta térmica de las superficies a las ganancias del calor que irradian.

Se utilizan dos series diferentes de factores de tiempo radiantes, una para la ganancia de calor solar transmitida directamente y otra la no solar. Los RTS no solares se aplican para las ganancias de calor radiante de personas, luces, aparatos, paredes, techos y pisos. También, por difusión, la ganancia de calor solar puede transmitirse durante la fenestración (disposición, dimensión y diseño de las ventanas, puertas y tragaluces, (ASHRAE, 2009)), donde hay objetos de sombra. El efecto de asumir la distribución de la radiación solar es referido por (Hittle, 1999).

3.3 Parametrización del modelo basado en el método RTS.

De la formalización del modelo se demuestra la necesidad de generar las series de coeficientes que sustentan al mismo. Estos coeficientes dependen de las características constructivas del edificio. En el trabajo, los coeficientes de las series de tiempo fueron generados con la ayuda de un programa desarrollado por Iu, Pisen (Calvin, 2004) de la facultad de Mecánica y de Ingeniería del Espacio Aéreo de la Universidad Estatal de Oklahoma, conocido como "PRF/RTF

Generator”. Este programa facilitó la instrumentación del método RTS.

Al programa se le introducen todos los detalles constructivos de la zona térmica a estudiar, seleccionando los tipos de materiales a partir de una base de datos creada por (Sowell, 1988) y publicada en el manual del ASHRAE (ASHRAE, 2005a).

Para el cálculo de los coeficientes PRF, el programa generador de coeficientes, necesita el nombre de la construcción, la cantidad de superficies que componen a dicha construcción, el tipo de cada superficie constructiva, su grosor, su densidad, los materiales empleados en la misma, su calor específico, así como su termoconductividad.

Como resultado de la ejecución del programa se obtiene un fichero Excel donde se muestran los tipos de superficie, sus coeficientes de transferencia de calor U, la cantidad de capas que conforman la superficie, así como los coeficientes CTS. Como salida del programa generador se grafican las diferentes series de coeficientes de conducción térmica correspondiente a cada superficie de la zona térmica en estudio.

Si se observa la Figura 5, se podrá reconocer que a cada superficie le corresponde una serie de coeficientes, que estarán predeterminados por las características de los materiales empleados en las capas de cada superficie constructiva. Estos coeficientes representan a su vez la respuesta en el tiempo del proceso de conducción térmica de las superficies. Las series están formadas por 24 coeficientes y la suma de cada serie es igual a 100%.

En el caso de la generación de las series de coeficientes RTF, el programa necesita además de los datos mencionados con anterioridad en el caso de los CTS, los siguientes datos de entrada: el área, la emisividad, y el número de capas de la superficie, así como el tipo de la misma; si es una pared, una ventana, el piso o el techo.

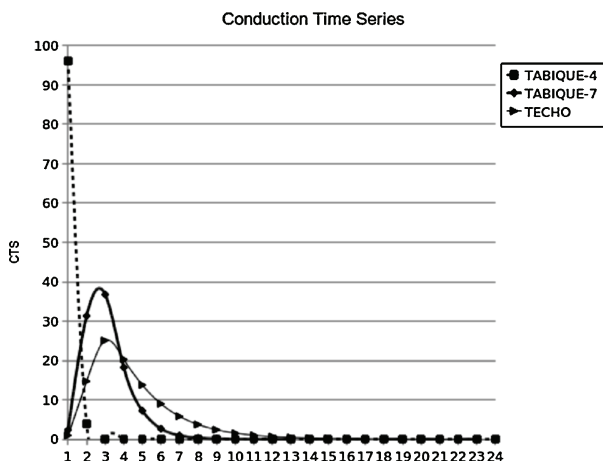


Figura 5: Gráfico de la serie de coeficientes de conducción térmica para 3 de las 14 superficies que conforman la zona térmica en cuestión.

Como resultado de la ejecución de este caso el programa genera también un fichero Excel, donde además de los datos generales de cada superficie se representan las series de

coeficientes RTS correspondientes a las radiaciones de tipo solar y a las radiaciones emitidas por las diferentes fuentes internas presentes en la zona térmica.

Otro de los resultados obtenidos es el gráfico representado en la Figura 6, donde se caracterizan a través de los factores de tiempo radiante a la respuesta de la zona térmica y su retardo en el tiempo.

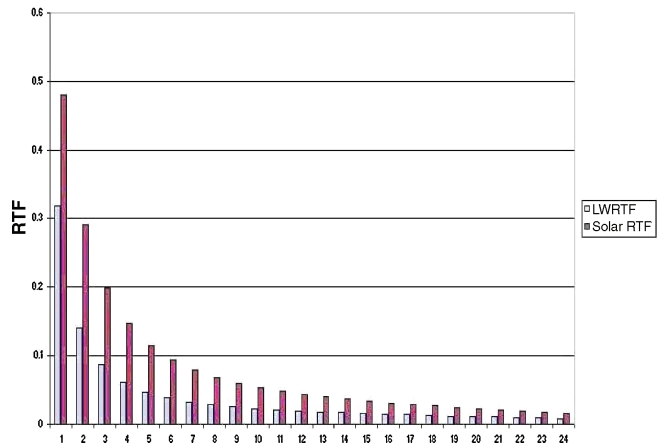


Figura 6: Gráfico de la serie de factores de tiempo radiante, obtenidos para la zona térmica.

3.4 Resolución del modelo

Para la implementación del método RTS a la aplicación real fue utilizado el ambiente de programación MatLab® (MathWorks, 2007).

Para este estudio se realizaron mediciones en una habitación del hotel, la 9109, durante 20 días seguidos del mes de mayo del 2008. El comportamiento de la temperatura se correspondió con las de un mes fresco, no muy lluvioso. Las mediciones se realizaron con un termómetro calibrado de la firma “Hanna Instruments”, de cuatro canales. Se midieron las temperaturas en el balcón de la habitación, a la sombra y en el interior de la misma.

Estas mediciones se compararon con el registro histórico de mediciones de temperatura con las que cuenta el grupo energético del hotel. Las mediciones del registro se realizan en la azotea del edificio a la sombra. A partir de la similitud del comportamiento de las mediciones de la temperatura exterior, se decidió emplear los datos existentes en los registros históricos del hotel y obtener un modelo global de la carga térmica.

La carga térmica total de las habitaciones del hotel se determina como la sumatoria de todas las cargas calculadas para cada habitación ocupada de la instalación. Como ya se comentó en el apartado 2 todas las habitaciones del hotel son clasificadas como tipo A, B o C, según sus parámetros constructivos.

Para la mejor gestión de los datos, estos fueron ordenados matricialmente. En una matriz se relacionan todas las habitaciones por número y se describen los diferentes tipos de superficies presentes en la construcción de la habitación así como la orientación geográfica de cada una.

Además, para cada tipo de habitación se dispone de la serie de coeficientes CTS, la serie de coeficientes RTS y el área de la superficie y los coeficientes de transferencia de calor U.

Cada hora, como variables de entrada, se miden los valores de la temperatura exterior y de la temperatura en el interior de las habitaciones y se actualiza el vector de habitaciones ocupadas del hotel. Con todos estos datos se calcula la carga térmica de cada habitación, determinando las diferentes ganancias de calor correspondientes. Luego se suman todas las cargas y se totaliza el resultado para el hotel. La estructura del modelo aplicado se representa en la Figura 7.



Figura 7: Estructura general del modelo aplicado.

4. Validación del modelo obtenido

Con el modelo obtenido se realizaron varios experimentos. El objetivo de los experimentos fue mostrar la validez del modelo obtenido para la instalación hotelera.

El primer experimento estuvo relacionado con demostrar la influencia de la ubicación geográfica en la determinación de la carga térmica en habitaciones del mismo tipo constructivo.

El segundo experimento mostró la incidencia de las características constructivas en el cálculo de la carga. El tercer experimento fue auxiliar y se realizó para demostrar la validez del uso de la temperatura exterior, medida en un lugar del hotel y en los laterales del mismo. Tuvo como objetivo observar la relación existente entre la variación de la temperatura exterior medida en dos lugares diferentes sobre el valor de la carga térmica determinada.

En el cuarto experimento se totalizaron los resultados de la carga térmica para cada zona, en dependencia de los circuitos de distribución de agua fría.

El quinto experimento estuvo destinado al cálculo de la carga térmica total para todas las habitaciones ocupadas del hotel durante los primeros 20 días del mes de mayo del año 2008. Este experimento fue el más importante. En el mismo se demostró la dependencia del valor total de la carga de las habitaciones con el horario del día y con la temperatura; así como la dependencia de la carga con la temperatura y con la ocupación. A continuación se muestran los resultados más sobresalientes.

4.1 Dependencia de la carga térmica de cada habitación con su ubicación geográfica.

Para el primer experimento fueron seleccionadas 4 habitaciones del tipo A, ubicadas en diferentes alas del hotel. La habitación 9109 está ubicada en el ala este del noveno piso; la habitación 7138 en el ala oeste del séptimo piso; la habitación 8104 en el ala sur del octavo piso y la habitación 9126 en el ala norte del noveno piso. Todas las habitaciones

seleccionadas pertenecen al primer bloque del hotel. Las mediciones de temperatura se realizaron el primero de mayo del 2008.

Los resultados de la carga térmica para cada habitación, se representan en la Figura 8. Dichos resultados demuestran que la ubicación geográfica influye en el horario de ocurrencia de la máxima carga. Las habitaciones situadas en las alas este y oeste poseen mayores valores de carga térmica que las situadas en las alas norte y sur.

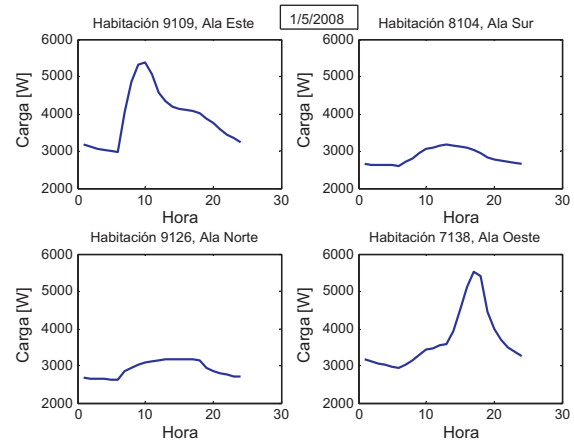


Figura 8: Resultados de la carga térmica determinada para habitaciones situadas en distintas ubicaciones geográficas.

4.2 Dependencia de la carga térmica con el tipo de habitación.

Para este experimento se utilizaron habitaciones del primer bloque del hotel, 9 habitaciones pertenecían a la planta real del noveno piso y tres correspondientes al ala sur ubicadas en el octavo piso. En el ala sur del noveno piso se encuentra situado un restaurante y no hay habitaciones. Las habitaciones empleadas se muestran relacionadas en la Tabla 1 acorde a su ubicación y tipo.

En la Tabla 2, se encuentran para cada habitación los valores de las cargas máximas, las cargas mínimas y las cargas promedio, así como las horas de ocurrencia.

Tabla 1: Clasificación de las habitaciones utilizadas en el segundo experimento por tipo y ubicación geográfica.

| Ubicación geográfica | TIPO | | |
|----------------------|------|------|------|
| | A | B | C |
| Sur | 8104 | 8105 | 8106 |
| Norte | 9126 | 9127 | 9128 |
| Este | 9118 | 9119 | 9120 |
| Oeste | 9131 | 9130 | 9129 |

Las habitaciones con mayor valor de carga térmica en una misma ubicación geográfica son las de tipo C, luego le siguen

las de tipo B y las de menor carga son las de tipo A. Esto se debe a que las habitaciones de tipo C, son las que mayor área de ventana de cristal poseen, equivalente al doble del área del resto de las habitaciones. En el caso de las habitaciones de tipo B se debe a la disposición del baño y al tipo de materiales de la pared que lo rodea.

Las habitaciones situadas en las alas oeste y este son las de mayor valor de carga térmica. La hora de ocurrencia de los valores de máxima carga, depende de la ubicación geográfica y de la incidencia de la radiación solar. En el ala este ocurre en la mañana. En las alas norte y sur ocurren en el horario del mediodía. En el ala oeste ocurre en el horario de la tarde. Observar la Figura 9 para corroborar lo anterior.

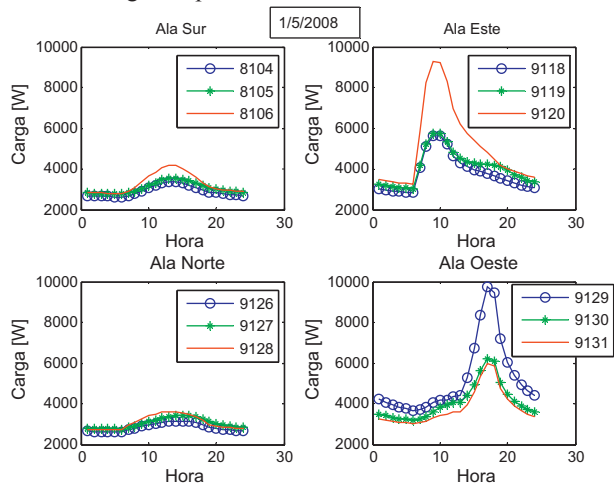


Figura 9: Valores de las cargas térmicas calculadas para diferentes habitaciones a partir de las mediciones de temperatura realizadas el 1 de mayo del 2008.

Además en este experimento, como parte de la validación del modelo, se compararon los valores de carga térmica obtenidos con las cargas nominales instaladas correspondientes a las unidades de enfriamiento en las habitaciones. En dependencia del volumen de cada habitación fueron seleccionados diferentes fan coil de acuerdo a sus capacidades frigoríficas.

Tabla 2: Valores de la carga térmica para habitaciones de diferentes tipo y ubicación.

| No. Hab y Tipo | Hora de carga máxima | Carga máxima [kW] | Hora de carga mínima | Carga mínima [kW] | Carga Promedio [kW] |
|----------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| 8104(A) | 13:00 | 3.3676 | 6:00 | 2.6231 | 2.9034 |
| 8105(B) | 14:00 | 3.5552 | 6:00 | 2.7575 | 3.0733 |
| 8106(C) | 13:00 | 4.1875 | 6:00 | 2.7711 | 3.2777 |
| 9118(A) | 9:00 | 5.6256 | 6:00 | 2.8373 | 3.7933 |
| 9119(B) | 10:00 | 5.7328 | 6:00 | 3.0288 | 4.0734 |
| 9120(C) | 9:00 | 9.2769 | 6:00 | 3.2327 | 5.1185 |
| 9126(A) | 14:00 | 3.1481 | 6:00 | 2.6034 | 2.8401 |
| 9127(B) | 15:00 | 3.4415 | 6:00 | 2.7445 | 3.0405 |

| | | | | | |
|---------|-------|--------|------|--------|--------|
| 9128(C) | 13:00 | 3.5840 | 6:00 | 2.7061 | 3.0804 |
| 9129(C) | 17:00 | 9.7264 | 6:00 | 3.6547 | 5.1723 |
| 9130(B) | 17:00 | 6.2146 | 6:00 | 3.1780 | 4.0813 |
| 9131(A) | 17:00 | 5.9568 | 6:00 | 3.0051 | 3.8103 |

En el caso de las habitaciones del hotel se emplean 4 modelos diferentes de fan coil: BH-6, BH-8, BH-12 y LBA-3. En las habitaciones tipo A se utilizan los modelos BH-8 y BH-12. En las habitaciones tipo B se utilizan los modelos BH-6, BH-8 y BH-12. En las habitaciones tipo C se emplea el modelo LBA-3. La capacidad frigorífica de cada tipo de unidad de enfriamiento es como se muestra en la Tabla 3.

En la Tabla 4 se relacionan los valores obtenidos de carga máxima para cada tipo de habitación ubicada en los diferentes laterales del edificio y la carga instalada, en dependencia del modelo del fan coil, que se encuentra en cada local.

Tabla 3: Capacidad frigorífica de los fan coil, instalados en las habitaciones del hotel.

| Modelo | Capacidad Frigorífica [kWh] |
|--------|-----------------------------|
| BH-6 | 5.28 |
| BH-8 | 7.03 |
| BH-12 | 11.5 |
| LBA-3 | 10.5 |

Observando con detenimiento los datos de la Tabla 4, se puede comprobar que en el caso de las habitaciones de tipo B, ubicadas en el oeste y el este, los valores de carga máxima se encuentran por encima de la carga instalada. Esto implica que en el momento de ocurrencia de la carga máxima, el fan coil, trabajando a plena capacidad de enfriamiento, no puede satisfacer las condiciones de confort necesarias.

Gracias a este experimento, se detectó este error de montaje en 22 habitaciones del hotel.

Se sugirió a los gerentes técnicos del hotel verificar la capacidad térmica nominal de las unidades fan coils instaladas en las habitaciones tipo B de las secciones este y oeste del hotel, para que en caso que se correspondan con el modelo BH-6, realizar los cambios pertinentes por el modelo BH-8. También se sugirió consultar las quejas de los clientes por insatisfacciones del confort en estas habitaciones.

Tabla 4. Comparación de los resultados determinados de carga máxima para cada habitación y los valores de carga frigorífica instalada, según modelo de fan coil en cada local.

| No. Hab y Tipo | Ubicación geográfica | Carga máxima [kWh] | Carga frigorífica del fancoil instalado [kWh] |
|----------------|----------------------|--------------------|-----------------------------------------------|
| 8104(A) | Sur | 3.3676 | 7.03 |
| 8105(B) | Sur | 3.5552 | 5.28 |
| 8106(C) | Sur | 4.1875 | 10.5 |
| 9118(A) | Este | 5.6256 | 7.03 |
| 9119(B) | Este | 5.7328 | 5.28 |
| 9120(C) | Este | 9.2769 | 10.5 |

| | | | |
|---------|-------|--------|------|
| 9126(A) | Norte | 3.1481 | 11.5 |
| 9127(B) | Norte | 3.4415 | 7.03 |
| 9128(C) | Norte | 3.5840 | 10.5 |
| 9129(C) | Oeste | 5.9568 | 7.03 |
| 9130(B) | Oeste | 6.2146 | 5.28 |
| 9131(A) | Oeste | 9.7264 | 10.5 |

4.3 Dependencia de la carga térmica con la temperatura medida en la azotea y la medida en el balcón de la habitación.

En este experimento se tomaron 4 habitaciones en las diferentes ubicaciones geográficas. Las habitaciones fueron la 1230 que corresponde al ala sur, la 4206 que corresponde al ala norte, la 7138 que corresponde al ala oeste y la 9109 que se encuentra en el ala este.

Con las mediciones de temperatura realizadas en dichas habitaciones y en la azotea del hotel, en la misma fecha y utilizando el modelo obtenido, se determinó la carga térmica tanto para la temperatura exterior medida en el balcón de la habitación como para la temperatura medida en la azotea.

En la Tabla 5 se expresan los principales resultados que fueron objeto de comparación, tales como: la temperatura promedio y la carga térmica diaria para cada habitación, a partir de la temperatura del balcón y de la azotea.

Tabla 5: Resultados comparativos de las mediciones de temperatura realizadas en el balcón de las habitaciones y en la azotea del edificio.

| Hab. | Temp Prom balcón [°C] | Temp Prom azotea [°C] | ΔT [°C] | Carga térmica diaria, Balcón [kWh] | Carga térmica diaria azotea [kWh] | Diferencia entre las cargas en [kWh] y % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| 1230 Sur | 29.51 | 29.55 | 0.04 | 79870 | 79937 | -67 (0.08) % |
| 4206 Norte | 26.05 | 27.00 | -0.95 | 70123 | 71438 | -1315 (1.87) % |
| 7138 Oeste | 26.92 | 26.91 | 0.01 | 94088 | 94071 | 17 (0.02) % |
| 9109 Este | 25.27 | 25.47 | -0.20 | 94234 | 93840 | 394 (0.41) % |

La mayor diferencia entre las cargas térmicas diarias se corresponde con la mayor diferencia entre las temperaturas promedio, correspondiente a la habitación 4206, ubicada en el área norte del segundo bloque.

A pesar de que la mayor diferencia entre los valores promedio de temperatura alcanza alrededor de un grado Celsius, la diferencia entre las cargas térmicas calculadas, no sobrepasa el 2% del valor absoluto.

La medición de temperatura ambiente puede estar afectada por otros fenómenos climatológicos como son la velocidad del viento, la incidencia de la radiación solar y la lluvia. De ahí que para determinadas circunstancias las diferencias de temperatura puedan ser mayores que las que resultaron de este estudio. Por esta razón, se recomendó que para emplear el modelo de predicción de consumo energético propuesto, se realicen, al menos, mediciones de temperatura en cada sección lateral del hotel, lo que redundaría en un modelo más preciso.

En el caso de que las condiciones climatológicas se hayan comportado de manera estable durante el día se podrán utilizar como referencia para todo el hotel las mediciones realizadas en una de las habitaciones.

4.4 Modelo de carga térmica total por circuito de agua fría

En este experimento se determinaron las cargas térmicas totales por circuito de agua fría (Figura 1). Los valores de carga obtenida por circuitos a lo largo de un día se muestran en la Figura 10.

En los gráficos correspondientes a los circuitos de los pisos 1-5 y 6-9 del primer bloque se aprecia la ocurrencia de dos picos de carga, uno en el horario de la mañana y otro en la tarde. Estos picos están determinados por las cargas térmicas de las habitaciones situadas en el este y en el oeste respectivamente.

Las diferencias de los resultados de la carga térmica total del circuito correspondiente al bloque 2, con respecto a los otros circuitos, se deben a que en este bloque del hotel, no existen habitaciones ubicadas en el ala este del edificio; como se puede observar en la Tabla 6.

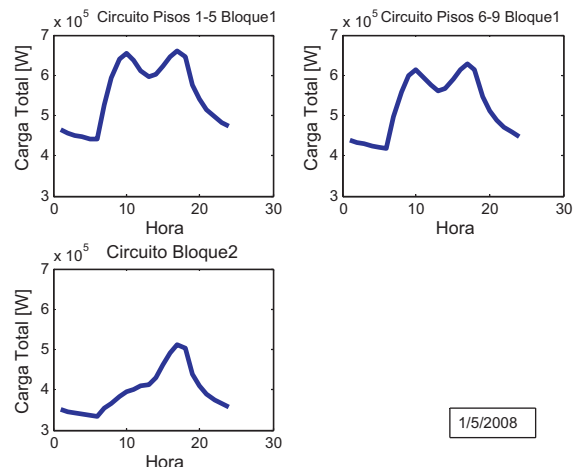


Figura 10: Determinación de la carga térmica total de las habitaciones por circuitos de distribución del agua de enfriamiento.

Tabla 6: Distribución de las habitaciones por circuitos y por ubicación geográfica

| Ubicación geográfica | Circuito de agua fría | | |
|----------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| | Circuito 2 | Circuito 1-5 | Circuito 6-9 |
| Norte | 48 | 40 | 32 |
| Sur | 24 | 12 | 16 |
| Este | - | 55 | 51 |
| Oeste | 44 | 45 | 46 |

4.5 Modelo de carga térmica total

En este experimento se obtienen los valores de la carga térmica total de las habitaciones ocupadas del hotel, a partir de

los resultados de las mediciones de temperatura realizadas durante los primeros 20 días del mes de mayo del año 2008.

4.5.1 Influencia de la temperatura exterior y de la ocupación del hotel en la carga total.

En el gráfico inferior de la Figura 11 se observan los valores diarios de la carga total de las habitaciones ocupadas del hotel calculada a partir de las mediciones de temperatura, que también se han representado en la figura, en el gráfico superior. Los datos fueron registrados para cada hora.

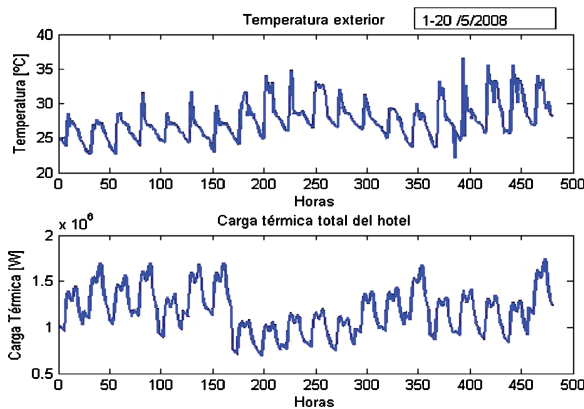


Figura 11: Valores de la carga térmica total calculada para todas las habitaciones ocupadas del hotel

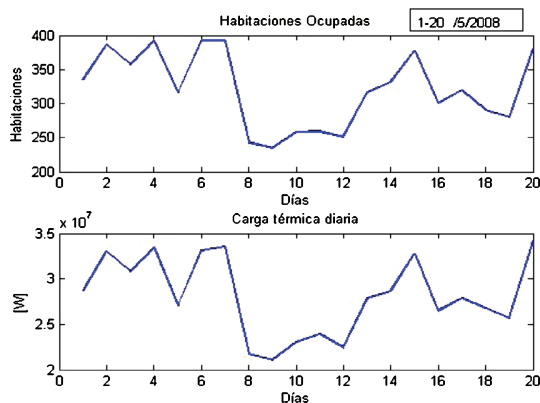


Figura 12: Valores de la carga térmica diaria calculada en dependencia de las habitaciones ocupadas cada día.

En la Figura 12 se pueden observar los resultados del cálculo de la carga térmica total de las habitaciones ocupadas del hotel, y la variación de la ocupación. Los cálculos se realizaron para las mediciones de temperatura representadas en la Figura 11, gráfico superior.

En la Tabla del Apéndice A se expresan los resultados de las cargas térmicas totales del hotel y la cantidad de habitaciones ocupadas cada día de medición. En la primera columna (1) se detallan los días de mediciones. En la segunda columna (2) se muestran la cantidad de habitaciones ocupadas por día. La tercera columna (3) representa el porcentaje de ocupación del hotel. La cuarta columna (4) relaciona el promedio por día de los 24 valores de temperatura exterior, medidos cada hora. La carga frigorífica en kWh, de la quinta

columna (5) de la Tabla del apéndice, se corresponde con la carga total de las habitaciones ocupadas del hotel.

4.5.1.1 Análisis de la dependencia existente entre la carga térmica, la temperatura y la ocupación.

Si se analiza la dependencia entre los valores obtenidos de la carga térmica total (columna 5 de la Tabla del apéndice), con las variaciones de la temperatura y con la ocupación se observa una estrecha correspondencia entre las tres variables, reafirmando lo expresado en la literatura consultada. La dependencia de la carga térmica de las habitaciones del hotel con la temperatura y con la ocupación se representa en la Figura 13.

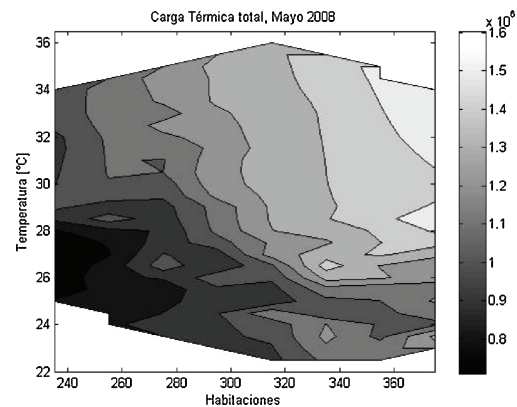


Figura 13: Dependencia de la carga térmica con la temperatura y con la ocupación.

Para el intervalo de temperaturas exteriores de 28 a 34 °C y la cantidad de habitaciones ocupadas entre 300 y 340 se obtiene un valor similar de carga térmica total de 1.3 MW. De igual modo, se obtiene la misma carga térmica para una temperatura de 32°C y un total de 250 habitaciones, que para 25°C y 340 habitaciones ocupadas.

4.5.1.2 Análisis de la dependencia existente entre la carga térmica, el horario del día y la temperatura.

Otro de los aspectos que debe considerarse en el comportamiento de la carga térmica total del hotel es el horario del día. La temperatura ambiente varía periódicamente en función de la hora del día. La dependencia de la carga térmica de las habitaciones del hotel con la temperatura y con la hora se representa en la Figura 14. Los valores máximos de temperatura se alcanzan durante el día y también dependen de la incidencia de la radiación solar en las superficies. A ello se debe la variabilidad en el comportamiento del gráfico representado. Los máximos valores de carga térmica se obtienen en el horario comprendido entre 10:00 a.m. y 7:00 p.m.

4.5.2 Estimación del consumo eléctrico del aire acondicionado.

En la sexta columna (6), de la Tabla del apéndice A, aparecen los valores de la potencia eléctrica absorbida en kWh, para satisfacer la carga térmica o frigorífica de la columna anterior.

Para realizar este cálculo se emplea el coeficiente de eficiencia de las unidades enfriadoras. Este coeficiente conocido como COP, por sus siglas en idioma inglés (coefficient of performance), revela la relación existente entre la potencia frigorífica y la potencia eléctrica absorbida. El COP varía en dependencia de la temperatura de salida del agua fría de la enfriadora, la temperatura del aire a la entrada del condensador y el régimen de operación de la unidad enfriadora. Para las enfriadoras del fabricante FrioClima, del modelo CHAW-2404, se empleará el valor de 2.27, que se corresponde con las condiciones más adversas del régimen de operación de estas máquinas.

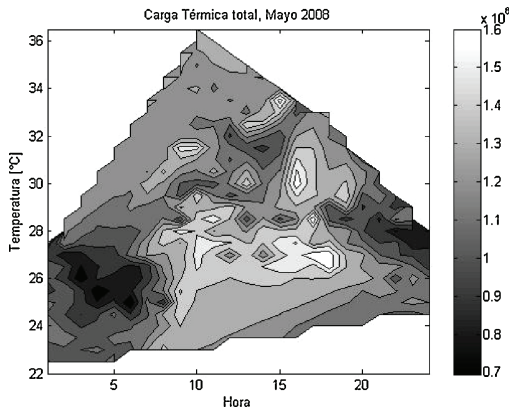


Figura 14: Dependencia de la carga térmica con la temperatura exterior y con la hora del día.

El esquema de los circuitos hidráulicos de alimentación de agua fría, utilizado en el sistema de aire acondicionado centralizado del hotel, se corresponde con una configuración empleada con frecuencia donde el circuito secundario es de mayor caudal que el circuito primario correspondiente a las unidades enfriadoras, posibilitando un ahorro de energía. El caudal del circuito primario, que se bombea hacia las enfriadoras es impulsado por cuatro bombas de 125 m³/h, cada una. Lo que totaliza un caudal de 500 m³/h. La temperatura del agua de retorno es de 14°C. La demanda del caudal necesario para satisfacer la capacidad nominal de climatización instalada en los fancoil del edificio es de 706 m³/h. Esta demanda se satisface combinando el agua procedente del circuito primario (enfriadoras), con un caudal de 500 m³/h y 206 m³/h procedentes del agua de retorno. La temperatura del agua a la salida del circuito primario es de 8°C. Realizando un balance de caudal másico para el circuito secundario se obtiene que la temperatura del agua de alimentación es de 9.75°C. Esto trae consigo una disminución de la capacidad frigorífica nominal de los fan coils. Para tener en cuenta este efecto se utiliza un coeficiente de relación entre la temperatura del circuito primario y la temperatura en el circuito secundario, $FC = 8^{\circ}\text{C}/9.75^{\circ}\text{C} = 0.8205$.

De esta forma, resulta que la potencia eléctrica absorbida, por concepto de climatización de las habitaciones ocupadas, se calcula multiplicando los valores de la carga frigorífica o térmica por el inverso del COP y por el FC como se expresa en (7).

$$Pot_{abs} = Pot_{ter} \frac{1}{COP} FC \quad (7)$$

Debido a la necesidad de mezclar el agua de enfriamiento del circuito primario con el agua que retorna del circuito secundario se sugiere realizar la medición de temperatura del agua fría en el colector donde se produce la mezcla y no en el colector del circuito primario, como sucede ahora.

4.5.3 Comparación del consumo eléctrico estimado con el real consumido por el hotel.

En la séptima columna (7) de la Tabla del apéndice A se encuentran los registros medidos del consumo eléctrico de la subestación T2 los días del estudio. En la octava columna (8) se muestra el por ciento que representa el consumo de la climatización de las habitaciones, columna (6), con relación al consumo eléctrico de T2. Finalmente, las dos últimas columnas (9) y (10) refieren la misma operación, sólo que ésta vez con relación al consumo eléctrico total del hotel, al considerar la suma de los consumos eléctricos de las dos subestaciones.

Promediando, a su vez, los resultados de la última columna (10), se obtendrá un valor de 39.7 por ciento. Esto significa que el gasto de consumo eléctrico de la climatización de las habitaciones ocupadas del hotel representa alrededor de un 40 por ciento del consumo eléctrico total de la instalación hotelera; lo que refrenda lo expresado en la literatura (Trott and Welch, 2000) al considerar que no se han tenido en cuenta los gastos fijos de clima del hotel y los gastos de los salones de eventos y restaurantes.

4.5.4 Otros resultados.

La capacidad nominal instalada de todos los fan coils de las habitaciones es de 81945 kW h diaria. Normalmente durante la operación del edificio no se alcanza este valor. Esta capacidad sólo debe alcanzarse en días de mucho calor, cuando se alcanza la máxima carga térmica en las habitaciones. Si se compara este valor con los resultados de la carga frigorífica (5), calculada a través del modelo, objeto de estudio, se observa que en ningún momento se supera el valor nominal.

Para realizar pronósticos del gasto energético, durante la operación del hotel en la actualidad, se emplea un factor de utilización (FU) de valor igual a 0.3. Este valor ha sido seleccionado, basado en el criterio de los expertos. La carga nominal del fan coil se emplea solamente en casos máximos cuando se inicia el enfriamiento de la habitación. Posteriormente se utiliza solamente una parte de dicha capacidad de enfriamiento para mantener la temperatura de referencia. Teniendo en cuenta esta corrección de la carga nominal, el valor de la carga frigorífica total alcanza los 24583.5 kW h, según estimados energéticos del hotel.

En el caso del modelo estudiado, si se promedian los resultados de la carga frigorífica calculada, columna (5) de la Tabla del apéndice, se obtiene una carga promedio de 28102.7 kW h y un FU igual a 0.343; comparándola, con la carga nominal instalada de 81945 kW h. Este resultado es válido, conociendo que la intermitencia de operación del edificio se

corresponde con el comportamiento impredecible de un turista.

5. Conclusión

El modelo obtenido confirma que el resultado de la carga térmica, determinada para cada habitación del hotel, está influenciado por la distribución geográfica de la misma en la instalación hotelera y sus características constructivas.

La comparación de los resultados de las mediciones de la temperatura en la azotea y en el balcón de las habitaciones confirma que las diferencias entre ambas no son significativas.

Los resultados de carga térmica obtenidos mediante el modelo para los 20 días de mediciones del mes de Mayo del 2008 fueron comparados con el consumo eléctrico del hotel, confirmando que el gasto energético, solamente por concepto de climatización de las habitaciones alcanza un 40% del total del consumo eléctrico de la instalación hotelera. Esto ratifica lo que se cita en la literatura con relación a que el consumo eléctrico total del aire acondicionado ocupa alrededor del 60% del consumo total de un edificio.

El modelo obtenido de la carga térmica total del hotel es una importante herramienta para la predicción del consumo eléctrico, en la edificación. Es un modelo de predicción que considera la influencia de las variaciones de la temperatura y de las fluctuaciones de la ocupación. El disponer de ésta herramienta, posibilita adoptar estrategias de control de las variables, más precisas, que consigan un efectivo ahorro energético, sin descuidar las condiciones de confort necesarias para los huéspedes y utilizar estrategias de reacomodo de cargas eléctricas sin afectar la satisfacción de los clientes.

English Summary

A Hotel Building Model for Energy Prediction.

Abstract

This paper shows the development and validation of an energy prediction model for Meliá Havana hotel located at Havana (Cuba). The model is based on the Radiant Time Series for obtaining the thermal load in room blocks of the building. The model has been implemented in Matlab[®]. Experimental validation of the model is performed based on real measurements for the daily energy consumption of the hotel. The model is valuable for studying the energy behaviour and for implementing advanced control strategies.

Keywords:

Modeling, Energy control, Temperature coefficients, Validation.

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda del personal de la instalación hotelera que facilitó las mediciones

en las habitaciones y los registros históricos de consumo energético.

Referencias

- Acosta C. A., and A. I. González, 2007. Primera aproximación a un modelo de predicciones energéticas de habitación hotelera. Simposio CIE 2007. Santa Clara, Cuba.
- Acosta C.A., A. I. González and V. Castelló, 2008a Obtención de un modelo de predicciones energéticas de habitación hotelera. Conferencia FIE2008. Santiago de Cuba, Cuba.
- Acosta C. A., A. I. González, J.M. Zamarreño and V. Castelló, 2008b. A model for energy predictions of a hotel room. 20th European Modeling and Simulation Symposium. (Simulation in Industry). Briatico, Italy
- ASHRAE, 1997. *ASHRAE Handbook*. Chapter 28, Nonresidential cooling and heating load calculation procedures. ASHRAE Handbook Editor.
- ASHRAE, 2005a. *ASHRAE Handbook*. Chapter 30, Nonresidential cooling and heating load calculation procedures. ASHRAE Handbook Editor.
- ASHRAE, 2005b. *ASHRAE Handbook*. Chapter 32, Energy Estimating and modeling methods. ASHRAE Handbook Editor.
- ASHRAE. 2007. *ASHRAE Handbook*. Chapter 5, Hotels, Motels, and Dormitories. ASHRAE Handbook Editor.
- ASHRAE. 2009. *ASHRAE Handbook*. Chapter 15, Fenestration. ASHRAE Handbook Editor.
- Budaiwi I.M., 2003. Air conditioning system operation strategies for intermittent occupancy building in a hot -sumid climate. King Fahd University of petroleum and minerals architectural, Engineering Department. *Proceedings: Building Simulation 2007*.
- Castilla, M.M., J. D. Alvarez, M. Berenguel, M. Pérez, F. Rodríguez and J.L. Guzmán. 2010. Técnicas de control del confort en edificios. *RIAI*, Vol. 7, No. 3, pp 5-24.
- Crawley D.B., L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y. Joe Huang, C.O. Pedersen, R.K. Strand, R.J. Liesen, D.E. Fisher, M.J. Witte, and J. Glazer., 2001. EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings* 33(4):319-331.
- D. Li, T. Lam, W. Chan and A. Mak , 2009. Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings. *Applied Energy*, 19, pp 722–729.
- F. Gugliemetti, G. Passerini and F. Bisegna, 2004. Climate models for the assessment of office buildings energy performance. *Building and Environment*, Vol. 39, pp 39-50.
- Fangting Song, Yi Jiang, Anne Le Mouel and Jean-Jacques Roux, 2007. Development of a data model for energy consumption analysis and prediction of large-scale commercial buildings. *Proceedings: Building Simulation 2007*, pp 1601.
- Fumio Sakurai, Dr. Tatsuo Inooka, Dr. Ryuji Yanagihara , Etsuo Higashizawa, Junya Hamane, Tatsuo Fujii, Hisashi Nishihata, Hideto Hayashi, Fumihito Arizumi, Hiroshi Ninomiya, Kazusa Koike and Naoko Shinohara, 2007. FACES (Forecast of air-conditioning system's energy, environmental, and economical, performance by simulation). *Proceedings: Building Simulation 2007*. Japan.
- González Santos A. I. , 1996. Sistema de regulación automático para controlar el índice de confort en ambientes climatizados. Tesis de Maestría en Automática, ISPJAE. Cuba.
- Hernández N. A., Sanzovo Fiorelli F. A., 2007 Use of simulation tools for managing buildings energy demand. *Proceedings: Building Simulation Conference 2007*, pp 1883.
- Hittle, D.C., 1999. The effect of beam solar radiation on peak cooling loads. *ASHRAE Transactions*, 105(2):510-13.
- Ip Seng Iu., 2002. Experimental validation of the radiant time series method for cooling load calculations. Thesis of the Degree of Master of Science. Oklahoma State University
- Iu, Pisen Calvin, 2004. PRF/RTF Generator Software. www.hvac.okstate.edu.
- Ljung and Lennart, 1999. *System Identification theory for the user*. Prentice Hall 2nd edition.

- M. A. Aktacir, O. Büyükalaca, H. Bulut and T. Yılmaz, 2008. Influence of different outdoor design conditions on design cooling load and design capacities of air conditioning equipments. *Energy Conversion and Management*, **49**, 6, pp. 1766-1773.
- MathWorks, 2007. Matlab 7.4.0. Ayuda de la herramienta, versión 7.0.
- McQuiston, F.C. and J.D. Spitler, 1992. *Cooling and heating load calculation manual*. 2nd ed. ASHRAE.
- Mingxian Cui and Tingyao Chen., 2009. A revised radiant time series (RTS) method for intermittent cooling load calculation *Eleventh International IBPSA Conference*. Glasgow, Scotland.
- Pantelis N. Botsaris and Spyridon Prebezanos., 2004. A methodology for a thermal energy building audit. *Building and Environment*, **Vol. 39**, pp 195 – 199.
- Pedrini, F.S. Westphal and R. Lamberts, 2002. A methodology for building energy modeling and calibration in warm climates. *Building and Environment*, **Vol. 37**, pp 903 – 912.
- S. Chirattananon and J. Taveekun., 2004. An OTTV-based energy estimation model for commercial buildings in Thailand. *Energy and Buildings*, **Vol. 36**, Issue 7, July, pp 680-689.
- Sowell E.F. ,1988. Cross-check and modification of the DOE-2 program for calculation of zone weighting factors. *ASHRAE Transactions*, 94 (2):737-53.
- Spitler J.D. and D.E. Fisher. 1999. Development of periodic response factors for use with the radiant time series method. *ASHRAE Transactions*, 105(2).
- T. Chen and M. Cui, 2010. A RTS-based method for direct and consistent calculating intermittent peak cooling loads. *Energy Conversion and Management*, **51**, 6, pp. 1170-1178.
- Trott A. R. and Welch T, 2000. *Refrigeration and air-conditioning* . Third edition by Butterworth-Heinemann.
- U.S. Army,1979. BLAST, the building loads analysis and system thermodynamics program—Users manual. *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory Report E-153.1*
- US Department of Energy, 2005. ENERGYPLUSTM, Input Output Reference.
- Westphal F.S. and R. Lamberts., 2005. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. 9th International IBPSA Conference, August.
- Y. Pan, Z. Huang, G. Wu and C. Chen.,2006. The application of building energy simulation and calibration in two high rise commercial buildings in Shanghai. *Proceedings: Building Simulation Conference 2007*, pp 1889.
- Yik F.W.H., J. Burnett and I. Prescott, 2001. Predicting air-conditioning energy consumption of a group of buildings using different heat rejection methods. *Energy and Buildings*, **Vol. 33**, pp 151-166.
- York D.A. and C.C. Cappiello, eds, 1982. *DOE-2 engineers manual*. Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-11353 (LA-8520-M, DE83004575). National Technical Information Services, Springfield, VA.

Apéndice A. Comparación de los valores de potencia eléctrica absorbida por la carga térmica de las habitaciones con el consumo eléctrico en el hotel.

| Fecha 2008 | Habitaciones ocupadas | % de ocupación | Temperatura Exterior Promedio [°C] | Carga Frigorífica Diaria [kWh] | Potencia Absorbida [kWh] | Consumo T2 [kWh] | % del consumo eléctrico de habitaciones climatizadas en T2 | Consumo T1+T2 [kWh] | % del consumo eléctrico de habitaciones climatizadas en T1+T2 |
|------------|-----------------------|----------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------|------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) |
| 1/5 | 335 | 81.1 | 25.7 | 28710 | 10363 | 15081 | 68.7 | 23744 | 43.6 |
| 2/5 | 386 | 93.5 | 25.3 | 32983 | 11905 | 14110 | 84.4 | 22650 | 52.6 |
| 3/5 | 357 | 86.4 | 25.8 | 30833 | 11129 | 14090 | 79.0 | 22280 | 50.0 |
| 4/5 | 392 | 94.9 | 26.3 | 33444 | 12071 | 15537 | 77.7 | 23845 | 50.6 |
| 5/5 | 316 | 76.5 | 26.2 | 27046 | 9762 | 14851 | 65.7 | 23071 | 42.3 |
| 6/5 | 392 | 94.9 | 26.2 | 33101 | 11948 | 17088 | 69.9 | 26004 | 45.9 |
| 7/5 | 392 | 94.9 | 26.1 | 33527 | 12101 | 15958 | 75.8 | 24686 | 49.0 |
| 8/5 | 243 | 58.8 | 27.8 | 21705 | 7834 | 17391 | 45.0 | 25756 | 30.4 |
| 9/5 | 235 | 56.9 | 28.6 | 21040 | 7594 | 17914 | 42.4 | 26474 | 28.7 |
| 10/5 | 258 | 62.5 | 28.4 | 23052 | 8320 | 19434 | 42.8 | 27777 | 30.0 |
| 11/5 | 259 | 62.7 | 29.8 | 23928 | 8636 | 18624 | 46.4 | 26723 | 32.3 |
| 12/5 | 251 | 60.8 | 28.3 | 22454 | 8105 | 19281 | 42.0 | 27740 | 29.2 |
| 13/5 | 317 | 76.8 | 27.7 | 27863 | 10057 | 18927 | 53.1 | 26515 | 37.9 |
| 14/5 | 332 | 80.4 | 27.2 | 28670 | 10348 | 17703 | 58.5 | 26345 | 39.3 |
| 15/5 | 377 | 91.3 | 26.6 | 32703 | 11804 | 17647 | 66.9 | 26460 | 44.6 |
| 16/5 | 301 | 72.9 | 27.4 | 26488 | 9561 | 18026 | 53.0 | 26794 | 35.7 |
| 17/5 | 319 | 77.2 | 27.7 | 27890 | 10066 | 19044 | 52.9 | 27595 | 36.5 |
| 18/5 | 290 | 70.2 | 29.8 | 26734 | 9649 | 18679 | 51.7 | 27129 | 35.6 |
| 19/5 | 280 | 67.8 | 29.8 | 25714 | 9281 | 17573 | 52.8 | 25868 | 35.9 |
| 20/5 | 380 | 92.0 | 29.6 | 34169 | 12333 | 19718 | 62.5 | 28379 | 43.5 |