

CARGA TÉRMICA Y CONSUMO ENERGÉTICO EN EDIFICACIÓN TURÍSTICA CON CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADA A FLUJO VARIABLE

Montero Laurencio Reineris⁽¹⁾, Hechavarría Hernández Jesús⁽²⁾ y Borroto Nordelo Aníbal⁽³⁾

^(1,2)Instituto Superior Minero Metalúrgico. Universidad de Holguín

⁽³⁾Universidad de Cienfuegos.

Reparto Pastorita. Cuba,

rmontero@ismm.edu.cu; aborroto@ucf.edu.cu.

Resumen: En el presente trabajo se determina la carga térmica de una edificación que cuenta con un Sistema de Climatización Centralizada por Agua Helada (SCCAH) a flujo variable. Los cálculos se realizaron para todo un año característico para definir: los horarios de mayor carga térmica de cada habitación, la distribución de las ganancias de calor, las curvas de carga térmica máxima y el comportamiento al aplicar una estrategia ocupacional. Se presenta la estructura de un modelo basado en Redes Neuronales Artificiales de la carga térmica del edificio y los resultados generales de una modelación similar para cada habitación. Los modelos permiten sustituir al simulador de carga térmica y facilitan la predicción del consumo de energía. Se compara la potencia eléctrica necesaria en la bomba para una ocupación promedio y una ocupación con estrategia ocupacional basada en utilizar primero las habitaciones de menor carga térmica, apreciándose un ahorro promedio de un 18 %.

Palabras clave: Ahorro de Energía/ Carga Térmica/ Climatización Centralizada/ Estrategia Ocupacional/ Flujo Variable/ Redes Neuronales Artificiales.

Abstract: In this paper the thermal load of a building which has a centralized air conditioning system for variable flow is determined. The calculations were carried out for an entire characteristic year to define: the schedules of bigger thermal load of each room, the distribution of the earnings of heat, the curves of load thermal maxim and the behavior when applying an occupational strategy. It is presented the structure of a model based on Artificial Neural Network of the thermal load of the building and the general results of a similar modeling for each room. The models allow to substituting the load thermal simulation and make easy the energy consumption prediction. The necessary electric power is compared in the bomb for an occupation average and an occupation with occupational strategy based on using the rooms of smaller thermal load first, being appreciated a saving average of 18%.

Keywords: Energy Saving/ Thermal Load/ Centralized air Conditioning System/ Occupational Strategy/ Variable Flow/ Artificial Neural Network.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta un estudio de los factores que influyen en el comportamiento energético de hoteles donde el sistema de climatización tiene una incidencia fundamental. Se muestra la importancia del conocimiento de la carga térmica regida por las condiciones climatológicas, el tipo o sistema de climatización y los niveles de ocupación. Estos elementos definen los regimenes de explotación del edificio y se tienen en cuenta con el objetivo de determinar la potencia eléctrica que garantiza el confort y facilita la toma de decisiones que contribuyan al ahorro energético.

La simulación térmica de edificios es una valiosa y poderosa herramienta que permite tomar decisiones, evaluar alternativas

técnica y económicamente. Además permite predecir resultados de forma rápida con posibles cambios en los sistemas constructivos y combinaciones de eficiencia energética, planificación y administración de la energía y la demanda. En la actualidad el uso de los programas automatizados para la simulación del comportamiento térmico de las edificaciones no es una novedad [1], sin embargo, en Cuba su aplicación se puede considerar incipiente. Los requisitos de cálculo de cargas térmicas en el sector hotelero cubano se rigen por la Norma NC-45-6 [2].

Existen programas para la simulación térmica de edificaciones, tales como el TRNSYS, el DOE-2, el ENERGY PLUS, el COOL PACK, etc. Los precios de estos paquetes oscilan entre 3000,00 y 10000,00 USD sin contar el pago por

importaciones, entrenamientos y las actualizaciones. Estos paquetes posibilitan simular el comportamiento térmico del edificio y determinar la carga térmica de enfriamiento. Sin embargo, en algunos casos sólo tienen incorporada la información meteorológica de algunas localidades, y en general no permiten el cambio de algunas variables que influyen en el cálculo de cargas térmicas.

Tomando en consideración estos aspectos, el simulador desarrollado por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) es el más empleado en Cuba en investigaciones conducentes a obtener grados científicos [1], [3]. Esta aplicación informática constituye una herramienta de gran utilidad, pues permite analizar un elevado número de variantes, importantes en la toma de decisiones durante el diseño o en la operación [4].

Las consideraciones de diseño que se deben tener en cuenta para disminuir el consumo energético en Hoteles de Sol y Playa en Cuba fueron definidas por Rueda en el 2003 [5]. Este autor clasifica la contribución al ahorro energético según el rango en que pueden variar la carga térmica acumulada de acuerdo a decisiones de diseño y económicas.

Las variables de diseño pueden clasificarse en tres grupos: las que pueden permitir reducciones superiores a 13 kWh diarios por habitación (orientación y uso de elementos de protección solar), las que producen ahorros entre 5 y 13 kWh diarios por habitación (tipología, dimensiones y materiales de las paredes exteriores, materiales de las ventanas y color de la superficie exterior de la cubiertas), las que ocasionan reducciones inferiores 5 kWh diarios por habitación (desplazamientos de los volúmenes de las habitaciones, proporciones y ubicación de las ventanas, formas, orientación y materiales de la cubierta) [5]

Otro elemento indisolublemente ligado a la carga térmica de una edificación con climatización centralizada por agua helada, constituye el comportamiento energético de las unidades enfriadoras y de la estación de bombeo. Durante la explotación de estos sistemas, no siempre se analizan las variantes de operación del edificio, en la que se incluye el comportamiento de la ocupación. Este aspecto de la ocupación se resalta aun más, cuando se emplean Circuitos Secundarios de Agua Fría (CSAF) a flujo variable para hacer llegar el agua a las unidades terminales.

Una estrategia ocupacional constituye una vía factible para el ahorro de energía en alojamientos turísticos. Al realizar el ordenamiento de las habitaciones de forma ascendente en función de la carga térmica y con ello definir una estrategia ocupacional, permite el ahorro de energía. En un hotel, habitaciones similares en categoría y confort, pueden tener diferentes cargas de climatización, dependiendo de su ubicación, su orientación y características de la edificación

[6]. Cuando la estrategia de ocupación se realiza en un Sistema de Climatización Centralizado por Agua Helada (SCCAH) a flujo constante el consumo de energía es más dependiente de la carga térmica. En los SCCAH a flujo variable no solo incide la carga térmica sino que además la ocupación cobra mayor relevancia.

Como esencia de la metodología empleada en la investigación se realiza la sistematización del cálculo de la carga térmica de una edificación que cuenta con climatización centralizada a flujo variable. Para resolver el problema del engorroso cálculo térmico, se obtiene el modelo basado en RNA de la edificación y de cada local, lo que garantiza la predicción de las cargas y de la energía necesaria para el bombeo en el CSAF. Los resultados tienen en cuenta los distintos niveles de ocupación y las condiciones climatológicas.

II. DESARROLLO

La simulación térmica permite obtener y/o estudiar el comportamiento de la demanda de enfriamiento de las edificaciones y establecer estrategias de ocupación acordes con la necesidad del uso racional de la energía. Las condiciones de clima tropical conducen a realizar estudios preliminares de carga térmica con la mayor calidad posible para lograr una inversión exitosa en el equipamiento de climatización. Este equipamiento causa alrededor del 60% del consumo de electricidad en los hoteles con SCCAH. A continuación se presentan los resultados fundamentales de la investigación.

1. Materiales y métodos

El cálculo de cargas térmicas de enfriamiento adquiere sus particularidades en dependencia de las características constructivas de la edificación, su régimen operacional y las condiciones climatológicas de la región. Estos tres componentes constituyen la base para todo el cálculo, mediante las exigencias de la metodología aplicada. En el caso de estudio se seleccionó una edificación de un hotel turístico con SCCAH y CSAF a caudal variable.

Se definieron un conjunto de pasos que integran los diferentes factores para el cálculo térmico basado en la metodología de la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), implícita en el simulador de cargas térmicas de edificios, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UABC. Los cálculos se realizaron para todo un año promedio según las exigencias de las técnicas actuales de la modelación energética de edificios [7].

A continuación se comentan los pasos del procedimiento empleado en la investigación:

1. Captura y sistematización de datos climatológicos de la región.
2. Selección de la zona que será objeto de evaluación del comportamiento térmico.
3. Captura y análisis de las informaciones del edificio relacionadas con: estructura constructiva, las condiciones ambientales y la ocupación de los espacios térmicos.
4. Determinación de la carga térmica de enfriamiento para un año promedio de cada local y del edificio.
5. Propuesta de estrategia ocupacional basada en las individualidades de la carga térmica de enfriamiento de cada local.
6. Sistematización de los datos para la modelación de la carga térmica de enfriamiento mediante RNA.
7. Entrenamiento y validación de la estructura de RNA del edificio y las de cada local.
8. Estimación de la demanda de energía eléctrica para cada situación de la carga térmica de enfriamiento referida a la bomba del CSAF.

Los datos climatológicos se obtuvieron de la estación climatológica más cercana y se tuvo en cuenta además la localización geográfica del edificio para los cálculos de los parámetros solares. La zona escogida fue un edificio de 59 habitaciones distribuidas en tres plantas.

Las condiciones generales para el análisis de los CSAF se definen sobre la base de un sistema en operación real, flujo variable y régimen de control a presión constante. El sistema tiene la capacidad de asegurar mediante la acción modulante del trabajo de un variador de velocidad, la presión de envío respetando el criterio de diseño de la instalación. Se conocen además las características técnicas de las unidades terminales ventiloconvectoras (fan-coil) que climatizan los locales, pero no sus efectividades térmicas.

Para los cálculos energéticos se considera de manera general la temperatura de envío del agua en 9 grados Celsius y 13 grados de salida, cercanos a los valores recomendados para la explotación y verificados en el sistema real. El análisis individual del CSAF es factible debido a la no iteración con el Circuito Primario de Agua Fría al existir un colector común entre ambos circuitos.

La variable a controlar es la presión de envío del sistema y la red hidráulica es mallada, con sistema de tuberías con retorno directo y unidades terminales conectadas verticalmente. Las válvulas empleadas en los fancoil son motorizadas de dos vías y se considera equilibrado el sistema hidráulico.

Se plantea una estrategia ocupacional basada en los resultados del cálculo de la carga térmica de cada local y tomando como referencia la ocupación de un año promedio. El resultado que se presenta tiene en cuenta ocupar primero los locales de menor carga térmica.

En el caso de la modelación de la carga térmica mediante el empleo de RNA se realiza con el objetivo de sustituir al simulador por modelos que recogen las individualidades de los locales y el modelo para el edificio. Para el caso del modelo del edificio se tomaron en cuenta como variables independientes las Habitaciones Días Ocupadas (HDO) y las temperaturas máximas y mínimas de cada día. La variable dependiente se define como la sumatoria de los valores máximos de carga térmica de cada habitación ocupada. Para el modelo en RNA de cada local, se utilizaron como entradas la temperatura ambiente y la hora del día. Toda la modelación se realizó mediante prueba y error con un entrenamiento supervisado. Se empleó la herramienta de RNA del Matlab 7.7.1.

Con los datos de carga térmica se determina el flujo de agua necesario para extraer el calor mediante la siguiente expresión:

$$Q = m C_p \Delta t \quad (1)$$

Donde:

- Q → Cantidad de calor.
- m → flujo másico.
- C_p → calor específico del agua.
- Δt → diferencia de temperatura entre el envío y el retorno de la zona

Con el apoyo del software STATGRAPHICS Plus 5.1 se determinó el modelo de la bomba trabajado a flujo variable a una presión constante de 500 kPa. Una vez calculada la potencia eléctrica necesaria para impulsar el agua fría en cada situación de la carga térmica se presenta el resultado energético del sistema. Para obtener la potencia necesaria en el motor se consideraron los parámetros siguientes: calor específico del agua (4,194 KJ/kg oC); la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²); el volumen específico del agua (0,001 m³/kg); la eficiencia de la bomba de 75%; la densidad del agua (999,145 kg/m³) y el coeficiente de seguridad de 1,3 para el cálculo de la potencia necesaria en el motor.

La bomba centrífuga en el CSAF es de eje vertical con las bocas de aspiración e impulsión en línea, y motor normalizado con un caudal de 42 m³/h y una altura de carga de 60 m. El fluido se succiona desde un colector al cual llega toda el agua del retorno de las diferentes zonas habitacionales. El motor de la bomba es de una potencia nominal de 12,5 kW y el variador de velocidad es de la firma TELEMECANIQUE (Altivar 31) de 15 kW.

La red hidráulica está compuesta por una compleja red de tuberías de PVC que viaja a través de interiores y las azoteas de los edificios. Las líneas de envío y de retorno miden aproximadamente unos 260 m con un diámetro de 3 pulgadas.

2. Resultados

La zona habitacional es una de las más alejadas de la Sala de Máquinas de la climatización centralizada. El edificio está compuesto por tres niveles habitacionales, y cada uno de ellos cuenta con el siguiente número de habitaciones; nivel 1: 19 habitaciones; nivel 2: 22 habitaciones y nivel 3: 18 habitaciones. En la Figura 1 se muestra una vista parcial de la edificación.



Figura 1. Edificio escogido para la simulación térmica.

El comportamiento energético debido a la climatización exhibe una tendencia extremadamente marcada a la dependencia con la temperatura ambiente, sin embargo, la temperatura varía a lo largo del día y el rango de oscilación

diurna depende de diversos factores entre los que se encuentran la zona geográfica, la cercanía al mar, la velocidad y dirección de los vientos predominantes, y la época del año. De los estudios realizados y reportados hasta la fecha, es concluyente que el efecto de la temperatura ambiente en instalaciones climatizadas es quien controla en mayor medida su comportamiento energético. El conocimiento de esta variable y su variación para cada zona climática es entonces de vital importancia en el análisis térmicoenergético de cualquier instalación hotelera.

Los valores de temperatura ambiente utilizados en la investigación corresponden al promedio de los valores de los años 2007 y 2008. La temperatura ambiente promedio se encuentra entre 25°C y 28°C. Esto indica una variación promedio relativamente pequeña (tres grados en promedio). A pesar de que las variaciones son pequeñas, el sistema de climatización varía sus regímenes de operación con respecto a estas temperaturas adaptándose además a las cargas parciales. En la Figura 2 se presenta gráficamente el comportamiento de la temperatura ambiente durante todo el año, con el fin de tener una mejor idea de su variabilidad. Los meses con temperatura ambiente más alta son los comprendidos entre mayo y octubre.

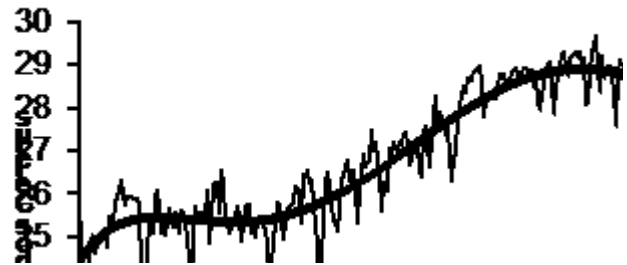


Figura 2. Comportamiento de la temperatura ambiente para un año promedio.

Otro parámetro clave en el cálculo de la carga térmica lo constituye la intensidad de radiación solar. La temperatura de las superficies exteriores es función de la variación en la intensidad de radiación solar en el espacio y en el tiempo, y las condiciones en que la misma es absorbida y emitida. A pesar que la mayor incidencia de la radiación solar en el edificio se efectúa por el techo, sólo el 34% de los locales reciben esta radiación.

El equipamiento tecnológico y la operación del hotel en las temporadas turísticas constituyen otros factores relacionados con la carga térmica. En Cuba los periodos de baja ocupación coinciden con los de mayor temperatura ambiente. Esto obliga a que la climatización opere para satisfacer una ocupación menor pero con cargas térmicas más apreciables. En la Figura 3 se presenta la ocupación promedio del edificio, tomando como referencia cuatro años de explotación. Se conocen

además cuales fueron las habitaciones ocupadas, lo que permitió obtener una línea base para comparar los resultados de mejoras. En los CSAF a caudal variable las HDO es la variable que más incide en la energética de la instalación. En el caso de estudio, el 80% del año las HDO oscilan entre 32 y 59 habitaciones ocupadas.

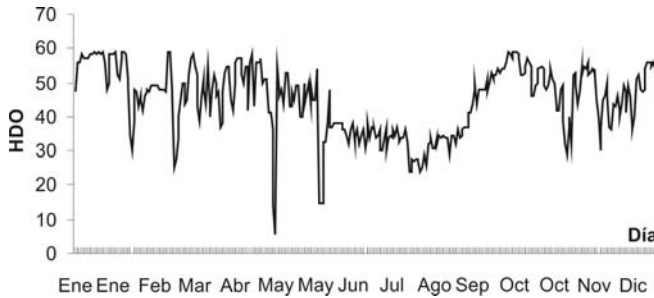


Figura 3. Ocupación promedio para todo un año característico.

Carga térmica de la edificación

Los resultados generales indican a partir del los valores máximos de carga térmica de cada habitación que existe un 63% de las habitaciones adecuadas para los fan-coil de tres filas de la firma AERMEC, FCX 32 con 2210 kcal de capacidad y un 37% para fan-coil FCX 42 de 3400 kcal. Estos fan-coil son los que se emplean en la zona y no en todas las habitaciones coincide la carga térmica con el equipo instalado. En la Figura 4 se presentan los valores máximos de carga térmica de las habitaciones.

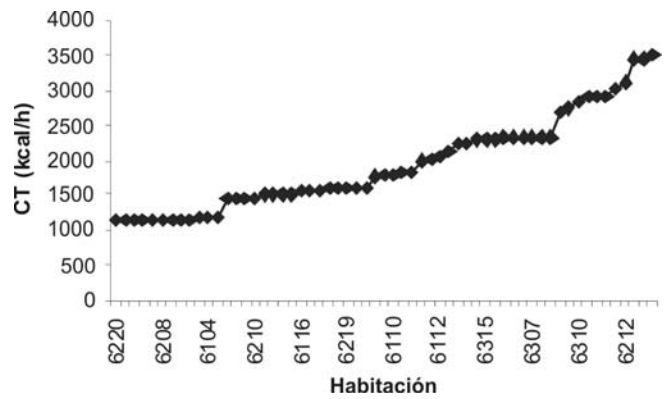


Figura 4. Valores de carga térmica máxima de cada habitación para un año promedio

Una representación mas detallada de la carga térmica del edificio, significa el gráfico para las condiciones máximas con todas las habitaciones ocupadas. Esta situación casi nunca se presenta, esto hace que existan cargas parciales dependientes de la ocupación diaria y del régimen de uso del espacio térmico. En la Figura 5 se presenta el gráfico de la carga térmica máxima para la ocupación total, ocupación promedio, para ocupación basada en estrategia ocupacional y el gráfico que representa la diferencia de carga térmica entre estas dos últimas variantes. La estrategia ocupacional puede ser utilizada por el personal de recepción, con el objetivo de ubicar a los clientes en las habitaciones de menor carga térmica. La ocupación entonces se plantea bajo criterios termoenergéticos con un menor consumo de energía eléctrica en los CSAF.

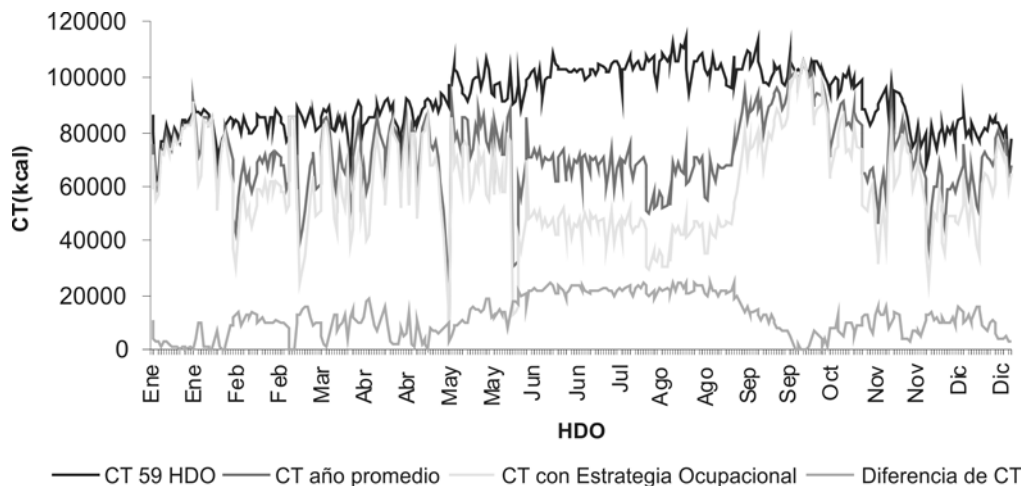


Figura 5. Representación de la carga térmica de enfriamiento durante un año para diferentes condiciones de ocupación.

A partir de aplicar estrategia ocupacional puede existir una diferencia entre las cargas de térmicas de enfriamiento máximas para un año promedio de un 17 %. Si se realiza un gráfico de correlación lineal entre la ocupación y los valores de carga de enfriamiento anual promedio, se obtiene un coeficiente de determinación de 0,57. En el caso que se emplee estrategia ocupacional el coeficiente de determinación se incrementa hasta 0,83. Esto explica que cuando se utiliza estrategia ocupacional la carga térmica es más dependiente de la ocupación, independientemente de las condiciones ambientales. En la Figura 6 se aprecian estos resultados.

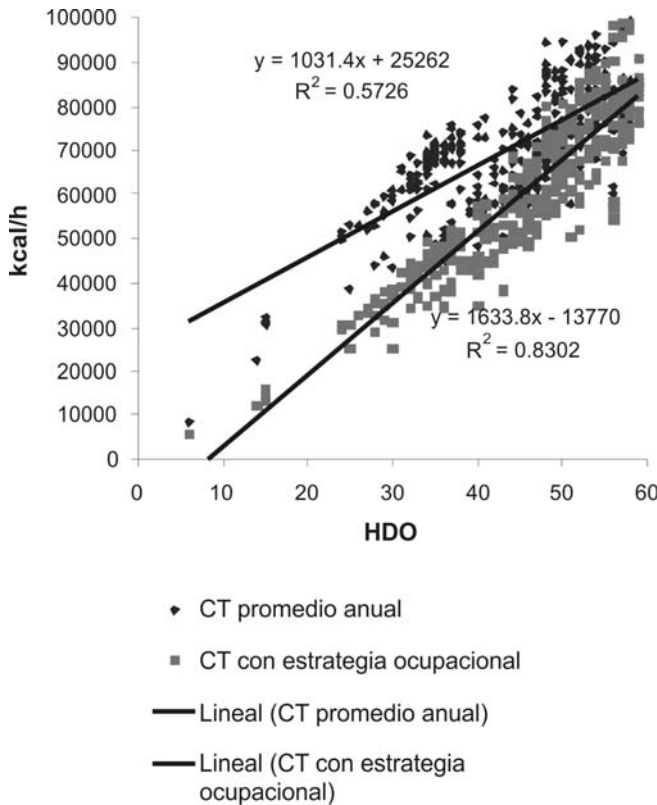


Figura 6. Correlación lineal entre HDO y las cargas térmicas (CT)

Luego de los resultados finales de las ganancias de calor del edificio, se puede tener una idea de en cual aspecto de la carga térmica se debe incidir para disminuirla o conocer el orden de importancia de los factores que afectan el confort. La estructura de las ganancias de calor del edificio para condiciones máximas de ocupación indica que el 80% depende de las ganancias por infiltración, ganancias por ventanas y puertas, y por la ocupación.

Un estudio de los horarios en que se manifiestan las cargas térmicas máximas de cada habitación refleja el efecto que tiene la orientación solar. Estos horarios definen el momento crítico del bombeo de agua fría, es decir cuando se debe garantizar el máximo valor del caudal en dependencia de las habitaciones que se estén ocupando. Unas 27 habitaciones tienen carga térmica máximas a las 17 horas, 7 habitaciones a las 11 horas y en el resto de las 25 habitaciones ocurre indistintamente a las 7, 11 o las 17 horas.

Modelos en RNA

A partir del método de prueba y error se fue buscando la mejor estructura de la Red Neuronal Artificial que predice la carga térmica de enfriamiento del edificio con el menor error posible. Los datos primeramente fueron filtrados y luego normalizados. La función de aprendizaje escogida para esta red fue trainlm y se empleó el método de los mínimos cuadrados. Luego de múltiples pruebas se define que utilizando una RNA Feedforward Backpropagation es la que mejor se adapta a los datos. Se emplearon tres capas de neuronas. La primera capa cuenta con tres neuronas, con la función de transferencia tansig (tangencial sigmoideal). La capa intermedia es de 9 neuronas con la misma función tansig y la última capa es de una neurona con la función de transferencia pureline. Para este aprendizaje sólo se necesitó de 11 iteraciones, con un error de validación de 7,3 .10-4. Los resultados de las matrices de los pesos y las polarizaciones aparecen en el Anexo 1. Según el manual de RNA del Matlab la notación simplificada de una red de tres capas se puede expresar según la expresión (2):

$$a^3=f^3(LW_{3,2}f^2(LW_{2,1}f^1(IW_{1,1}p+b^1)+b^2)+b^3=Y \tag{2}$$

Esta expresión adaptada al modelo de carga térmica sería:

$$Qt = pureline(LW_{3,2}*tansig(LW_{2,1}*tansig(IW_{1,1}*entrada+b^1)+b^2)+b^3 \tag{3}$$

Donde:

Qt: Carga térmica de enfriamiento.

LW_{3,2}, LW_{2,1}, IW_{1,1}: matrices de pesos

b¹, b², b³: polarizaciones

Pureline y Tansig: funciones de transferencias de las capas

Anexo 1.

Datos de los pesos y las polarizaciones del modelo en RNA para predecir la carga térmica de la dificación en función de las temperaturas máximas y mínimas del día y la ocupación.

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{IW}_{1,1} \begin{bmatrix} 0.73775 & 0.079555 & -1.4086 \\ -0.39893 & -0.1751 & -0.89941 \\ -1.2104 & 1.1364 & -0.58183 \end{bmatrix} & \mathbf{b}^1 \begin{bmatrix} -1.979 \\ 0.034307 \\ -2.5675 \end{bmatrix} \\
 \\
 & \mathbf{LW}_{2,1} \begin{bmatrix} 1.3265 & -1.8625 & 1.8036 \\ 0.2451 & -2.8347 & 1.079 \\ 1.5399 & -1.917 & 1.5504 \\ -2.5219 & 1.6078 & 0.11344 \\ 1.2797 & -2.2723 & 0.74717 \\ 0.50485 & 2.3662 & -1.1799 \\ -2.0445 & -1.6306 & 0.030848 \\ 0.88374 & -1.8698 & -.0062 \\ 1.94 & 1.2043 & -1.7917 \end{bmatrix} & \mathbf{b}^2 \begin{bmatrix} -2.9128 & 0.77775 & -1.5008 \\ -2.0313 & 0.029495 & 2.2993 \\ -1.4418 & 0.59084 & 2.9341 \end{bmatrix} \\
 \\
 & \mathbf{LW}_{3,2} \begin{bmatrix} -0.60364 & 0.69141 & 0.41585 \\ 0.54449 & 0.72625 & 0.43917 \\ 0.52017 & -0.0051595 & -0.077216 \end{bmatrix} & \mathbf{b}^3 [-0.06176]
 \end{aligned}$$

El coeficiente de correlación lineal entre los datos de la carga de enfriamiento y estos mismos valores predichos por la red es de 0,94 para los datos de entrenamiento, prueba y validación. En la Figura 8 se observan estos resultados.

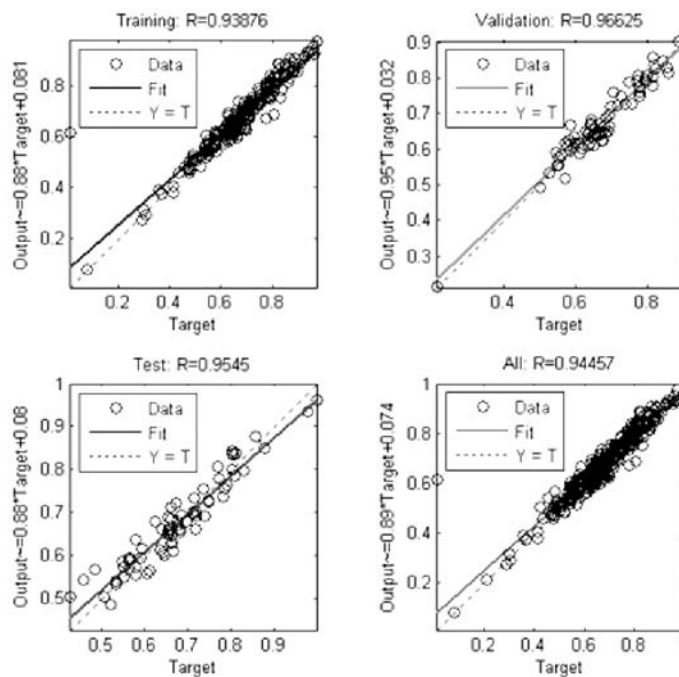


Figura 8. Resultados del proceso entrenamiento, pruebas y validación de la RNA para predecir los valores máximos de carga térmica del edificio correspondiente a la ocupación promedio.

En busca de una variante que permita la predicción de la carga de enfriamiento de cada local se procede a identificar los modelos en RNA correspondientes a las 59 habitaciones del edificio. Los modelos están compuestos por la estructura de red Feedforward Backpropagation. La función de aprendizaje escogida para las redes fue trainlm y se empleó el método de los mínimos cuadrados. En la mayoría de los casos la RNA son de tres capas de neuronas. Tres modelos tienen ocho neuronas en la capa intermedia, 51 modelos poseen cuatro

neuronas y cinco modelos no tienen capa intermedia. Las funciones de transferencia de la primera y segunda capa son tansig y de la última capa pureline. En el anexo 2 se muestra una tabla con las generalidades de las estructuras de los modelos. Para que se tenga una idea de la precisión, se presenta el gráfico de la Figura 9, donde se aprecia la correlación entre el ajuste de los modelos y el error. A medida que aumenta el ajuste entre los valores predichos por la red y los datos, disminuye el error.

Anexo 2.

Tabla. 1 Resultados generales de los modelos en RNA de las 59 habitaciones.

Habitación	Neuronas capa intermedia	Ajuste	ECM	Habitación	Neuronas capa intermedia	Ajuste	ECM
6101	4	0.95	0.0034	6212	4	0.94	0.0036
6102	8	0.95	0.003	6214	4	0.96	0.0028
6103	4	0.93	0.0042	6215	4	0.95	0.0036
6104	4	0.89	0.0045	6216	4	0.904	0.0038
6105	4	0.95	0.0031	6217	4	0.84	0.0088
6106	4	0.9	0.0048	6218	4	0.86	0.0067
6107	4	0.855	0.0068	6219	4	0.86	0.0067
6108	4	0.89	0.00445	6220	4	0.88	0.006
6109	4	0.87	0.0059	6221	4	0.88	0.006
6110	4	0.85	0.0063	6222	4	0.9	0.0044
6111	4	0.89	0.006	6223	4	0.88	0.0052
6112	8	0.89	0.0048	6301	4	0.91	0.005
6114	4	0.89	0.0054	6302	4	0.93	0.0039
6115	4	0.85	0.00706	6303	0	0.94	0.0038
6116	4	0.905	0.0043	6304	0	0.94	0.0038
6117	4	0.89	0.00497	6305	4	0.93	0.0038
6118	4	0.89	0.00566	6306	4	0.93	0.0038
6119	4	0.89	0.00416	6307	0	0.94	0.0038
6120	4	0.884	0.0054	6308	0	0.94	0.0038
6201	4	0.904	0.0056	6309	0	0.94	0.0038
6202	4	0.95	0.0038	6310	4	0.94	0.0039
6203	4	0.89	0.0053	6311	4	0.96	0.0031
6204	4	0.89	0.0056	6312	4	0.96	0.0024
6205	4	0.95	0.003	6314	4	0.94	0.0034
6206	4	0.95	0.003	6315	4	0.94	0.0034
6207	4	0.9	0.0119	6316	4	0.96	0.0034
6208	4	0.9	0.0119	6317	4	0.96	0.0034
6209	4	0.95	0.003	6318	4	0.94	0.0034
6210	8	0.95	0.0026	6319	4	0.93	0.0045
6211	4	0.91	0.0067				

La estructura de los modelos de carga térmica de todas las habitaciones es del tipo Feedforward Backpropagation. Las primeras capas de neuronas poseen dos neuronas y las últimas capas de neuronas son de una neurona.

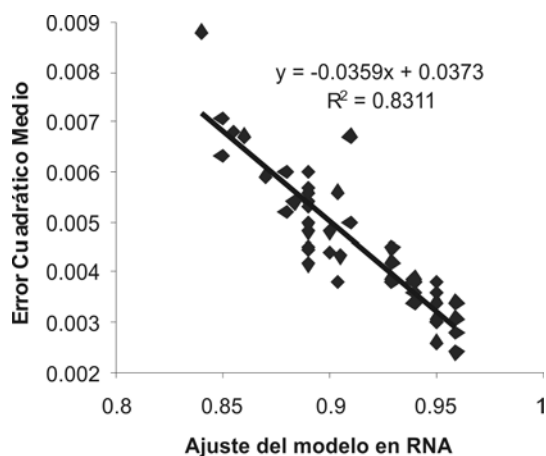


Figura 9. Correlación lineal entre ajuste y error de los modelos en RNA de las habitaciones.

Los valores máximo y mínimo del error de los modelos son de $8,8 \cdot 10^{-3}$ y $2,4 \cdot 10^{-3}$ respectivamente. En valor promedio del ajuste de todos los modelos es de 0,91 para el conjunto de datos de entrenamiento, prueba y validación.

Cálculo de potencia eléctrica necesaria

Considerando que el edificio constituye un gran intercambiador de calor se utiliza la ecuación número (1). Asignando la cantidad de calor que es necesario extraer del edificio a Q y teniendo en cuenta una diferencia de temperatura entre envío y retorno del agua para enfriamiento se puede despejar y encontrar el flujo másico necesario. Posteriormente se calcula la potencia eléctrica necesaria para cada flujo con las ecuaciones tradicionales de las bombas centrífugas.

Con los resultados obtenidos tanto para la ocupación promedio del edificio y para la ocupación mediante estrategia ocupacional se obtienen los resultados de la Figura 10 en donde se interpreta que: a medida que disminuye la ocupación y se aplica estrategia ocupacional, aumenta la posibilidad de ahorro de energía eléctrica. El valor promedio de este ahorro es de un 18 %.

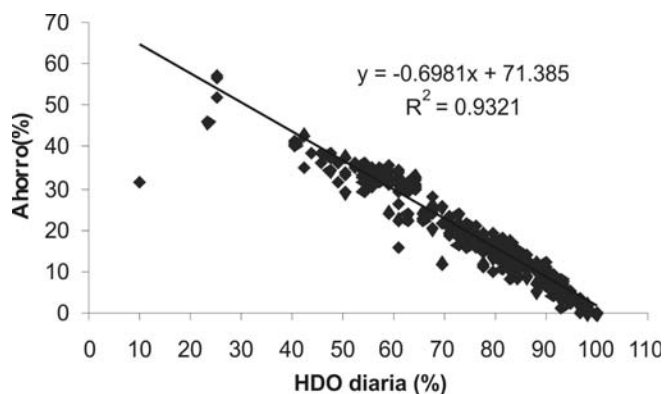


Figura 10. Correlación lineal entre la ocupación y el ahorro de energía

3. Discusión de los resultados

El conocimiento detallado de la carga térmica de una edificación ya sea para el diseño o para la explotación permite establecer estrategias de ocupación en función de los resultados individuales de cada local a climatizar.

Con las potencialidades de los accionamientos electromecánicos en particular el uso de los variadores de velocidad y a partir de conocer las diferencias de los niveles de carga térmica, la programación de los valores de consigna puede ser variable. Esta operación repercute en un ahorro de energía más dinámico.

Los procesos térmicos complejos en la operación de un edificio con climatización centralizada a flujo variable indican que el conjunto cálculos basados en modelos determinísticos es complejo. En los CSAF se unen para su trabajo varios elementos como bombas, motores, redes hidráulicas, cargas térmicas y otros elementos. La inserción de los modelos basados en RNA resuelve determinadas incertidumbres del sistema.

Se enfatiza que las estrategias ocupacionales son compatibles con el ahorro de energía eléctrica. Sucede que como generalmente se diseña para situaciones máximas, todos los efectos de las cargas térmicas parciales no se tienen en cuenta. Conocer las individualidades de cada local, permite la asignación del caudal de agua necesario en las unidades terminales para extraer el calor y la base para una modelación hidráulica.

Los estudios de estrategias ocupacionales que se han realizado en Cuba [1], [6] se concentran en hoteles con SCCAH a caudal constante, los resultados se derivan de ocupar primero los locales o grupo de locales con menor carga térmica. En estos sistemas el fluido debe transportarse por toda la red hidráulica de distribución independientemente si se emplean o no, todas las unidades terminales. Con la misma estrategia ocupacional pero en SCCAH a caudal variable se aprecian ahorros de energía eléctrica de un 18% como promedio a diferencia del 5% que se manifiesta en los SCCAH a caudal constante.

III. CONCLUSIONES

1. El conocimiento detallado de la carga térmica mediante un análisis integral permite definir acciones de operación y de diseño que contribuyen al ahorro energético.
2. El uso de las RNA para modelar el comportamiento de la carga térmica de una edificación constituye una herramienta de gran utilidad, con la capacidad de sustituir los simuladores térmicos que brindan la información inicial para el aprendizaje.
3. A partir de los resultados obtenidos es posible diseñar una

estrategia ocupacional del hotel basada en ocupar las habitaciones de menor carga térmica, lo cual, para la edificación caso de estudio produce ahorros de energía eléctrica de un 18 % como promedio en el bombeo del agua fría.

IV. REFERENCIAS

1. Montelier S, Reducción del consumo de energía en instalaciones con sistemas de climatización centralizadas todo agua a flujo, tesis doctoral. Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2008, 105 p.
2. Norma Cubana NC: 45-6, Bases para el diseño y construcción de inversiones turísticas parte 6: requisitos de mecánica, 1999, 98 p.
3. Armas J, Procedimiento para la optimización de sistemas de Climatización Centralizados por Agua Helada desde la etapa de diseño conceptual, tesis doctoral. Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2008, 99 p.
4. Pérez C y Campbell H, Comportamiento Térmico de Edificios, Instituto de Ingeniería Universidad Autónoma de Baja California, México, 2003, 129 p.
5. Ruedas J, Consideraciones de diseño para disminuir el consumo energético en Hoteles de Sol y Playa en Cuba. 2003. 15 p.
6. Monteagudo Y, Borroto A, Pérez C, Campbell H, Estrategia ocupacional: Una vía para el ahorro de energía en instalaciones turísticas, revista Montaje e Instalaciones, Año XXXVII No. 412, 2007, 5 p.
7. McQuiston F, Parker J, Spitler J, Calefacción Ventilación y Aire Acondicionado: Análisis y diseño, LIMUSA, México. 2008. 622 p.