



Optimización energética de la operación de los sistemas de climatización por agua helada en hoteles

Reineris Montero Laurencio

ISMMM, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Av. Calixto García Iñiguez, No. 15, CP: 83 330, Reparto Caribe, Moa, Holguín, Cuba.

rmontero@ismm.edu.cu

Abstract: La explotación hotelera, sin dejar de satisfacer a los clientes, necesita disminuir los requerimientos de energía eléctrica como principal portador energético. Resolver la problemática de la ocupación de un hotel de manera integral, tomando como centro de atención la climatización, la cual provoca los mayores consumos de electricidad, resulta una tarea compleja. Para resolver el problema se implementó un procedimiento para la optimización energética de la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua. El procedimiento integra, un modelo energético con una estrategia de ocupación bajo criterios energéticos y de fundamento combinatorio-evolutivo. Para la clasificación de la información, la formulación de las tareas y la síntesis de las soluciones, se emplea la metodología de Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería. El modelo energético considera la variabilidad de la climatología local y la ocupación de las habitaciones seleccionadas, e incluye: el modelo térmico de la edificación obtenido mediante redes neuronales artificiales, el modelo hidráulico y el modelo del trabajo de compresión. Estos elementos permiten la búsqueda de la variable de decisión ocupación, realizando cálculos intermedios de la velocidad de rotación en la bomba centrífuga y la temperatura de salida del agua del enfriador, minimizando los requerimientos de potencia eléctrica en la climatización centralizada. Para evaluar los estados del sistema se utiliza una optimización combinatoria que emplea los métodos: exhaustivo simple, exhaustivo escalonado o algoritmo genético según la cantidad de variantes de ocupación. Todas las tareas de cálculo y algoritmos del procedimiento se automatizaron mediante una aplicación informática.

Keywords: chilled water systems, energetic optimization, combinatorial-evolutionary optimization, hotels, artificial neural networks

Introducción

La problemática de la ocupación de un hotel puede describirse así: el hotel tiene T habitaciones de las cuales D están disponibles para ser ocupadas (o sea, tienen disponibles todos sus servicios y están sin ocupar). Si se solicitan por los clientes un total de HAO habitaciones para ocupar, cuyo número debe ser menor o igual que D , entonces se tiene que decidir cuales habitaciones son asignadas[1].

Una estrategia de ocupación del hotel debe describir cuáles son los principios, reglas y procedimientos para la toma de decisiones durante la asignación de habitaciones a partir del cumplimiento de ciertos objetivos relacionados con el confort de los clientes y con la disminución de los costos, en especial los relacionados con la energía.

La ocupación de las habitaciones puede ser entendida como un problema de optimización matemática. Específicamente, a partir de una solicitud de habitaciones, se escoge una “ocupación” que sujeta a las restricciones definidas por la ocupación actual del hotel, minimice una función objetivo, relacionada con el consumo energético. Una ventaja de esta vía es que solo se necesita caracterizar un modelo energético del hotel y no se precisan grandes inversiones materiales para su implementación. Este enfoque queda definido como una Estrategia de Ocupación bajo Criterios Energéticos (EOCE).

Si se asume que el procedimiento de ocupación de un hotel, consiste en encontrar el valor mínimo de la potencia eléctrica que requiere el sistema de climatización centralizado todo-agua o agua helada (SCCAH) cuando

se evalúan las posibles ocupaciones, entonces para encontrar las mejores variantes de ocupación es necesario disponer de un modelo matemático que permita determinar la potencia eléctrica del sistema termo-hidráulico, considerando las características de la instalación, la manera de ocupar las habitaciones y las características de la climatología local para el día en cuestión[2, 3].

Generalidades del procedimiento de optimización propuesto

A partir de los criterios planteados en la introducción y la revisión bibliográfica realizada, se declara la inexistencia de un procedimiento, que bajo un enfoque sistémico y considerando la ocupación del hotel como variable de decisión, optimice energéticamente la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua a flujo variable en hoteles. Para resolver esta situación, se establece un procedimiento que a partir de una función objetivo en la que se relacionan sistémicamente la variabilidad del comportamiento de: la climatología local, las características constructivas de la edificación, las redes hidráulicas, la velocidad de rotación de la bomba centrífuga, el ciclo de refrigeración por compresión mecánica del vapor, la temperatura de salida del agua de la enfriadora y la ocupación de las habitaciones, se realiza la búsqueda de mejores ocupaciones en hoteles[1]. La búsqueda tiene un carácter combinatorio-evolutivo, que al ser aplicada a la función objetivo, permite definir los parámetros de operación del sistema que minimizan el consumo de energía eléctrica.

El procedimiento está sustentado en los siguientes pasos:

1. Determinación de las cargas térmicas de enfriamiento de la edificación para un año característico mediante simulación térmica[1-3].
2. Modelación de la carga térmica de enfriamiento de cada habitación y otros locales mediante modelos predictivos basados en redes neuronales artificiales (RNA)[2].
3. Modelación de la red hidráulica del circuito secundario de agua fría (CSAF) mediante el Método del Gradiente[1, 4, 5].
4. Establecimiento de las expresiones de cálculo del trabajo de compresión a partir de la interacción entre los modelos térmicos e hidráulicos del sistema.
5. Generación de códigos variables que activen los componentes del modelo termo-hidráulico de la climatización, de acuerdo a una determinada ocupación de las habitaciones del hotel[1].
6. Optimización combinatoria mediante los algoritmos de búsqueda: exhaustivo simple, exhaustivo escalonado o algoritmo genético según la cantidad de variantes de ocupación a analizar.
7. Proceso de toma de decisiones de la ocupación bajo criterios formalizables y no formalizables sustentando una Estrategia de Ocupación bajo Criterios Energéticos.
8. Selección de la ocupación y ajuste de los valores de consigna de la presión en el CSAF y la temperatura de salida del agua del equipo enfriador.

Para la constitución de la función objetivo, así como para la automatización de los cálculos mediante una optimización combinatoria y su sistematización en una aplicación informática, se generaron un conjunto de resultados intermedios consistentes en:

- La implementación de un Sistema Automático de Medición para favorecer la definición de las variables de decisión y otras que forman parte del análisis y síntesis del sistema de ingeniería (ASSI)[4, 6].
- La determinación de la carga térmica de enfriamiento de los locales de una edificación, mediante el simulador térmico desarrollado por la Universidad Autónoma de Baja California, adaptando el simulador a las condiciones climatológicas de la localidad y abarcando todo un año característico. El simulador se sustenta en la Metodología ASHRAE y emplea el Método de las Funciones de Transferencia[2].
- La aplicación informática desarrollada en Matlab que a partir de los resultados de la simulación térmica y de forma automatizada, entrena y valida las redes neuronales artificiales (RNA) que modelan para cualquier día del año y cualquier temperatura, la carga térmica de enfriamiento de cada habitación.
- La aplicación CAD que utiliza el Método del Gradiente para la modelación hidráulica de los CSAF e inserta de forma adecuada las características de las unidades terminales y las válvulas de equilibrado. La aplicación sirve para propósitos de diseño, facilitando una información visual oportuna y la capacidad de realizar múltiples pruebas operacionales del sistema. Los resultados son exportables y comprobables en la aplicación líder EPANET, validándose de esta forma toda la información de la red hidráulica en análisis[5].
- Los algoritmos dentro de la modelación hidráulica que generaliza los resultados del procedimiento en cuanto a poder evaluar cada topología de la red en función de la ocupación. Esta modelación hidráulica selecciona el valor de consigna de la presión de envío en un CSAF, a partir de un algoritmo que determina la velocidad de rotación de la bomba centrífuga que garantiza los requerimientos mínimos de potencia eléctrica. Se consideran todas las restricciones operacionales de presiones, caudales y velocidades.
- Se implementó un procedimiento para el cálculo de la potencia eléctrica que requiere el compresor de una enfriadora en un SCCAH, en función de las cargas térmicas de enfriamiento parciales. El procedimiento.

incluye: la racionalización de la temperatura de salida del agua del evaporador y las propiedades del refrigerante sistematizadas en un modelo spline cúbico

- El algoritmo sustentado en el Método de Integración de Variables en Sistemas de Ingeniería y que permite generar variantes de ocupación de un hotel a partir de un código variable de solución. El código variable está restringido con respecto a la relación entre los locales disponibles y a ocupar[1].

La integración de los resultados anteriores permite evaluar los estados del sistema mediante una optimización combinatoria según el algoritmo de la figura 1.a y el diagrama de bloques del ASSI de la figura1.b.

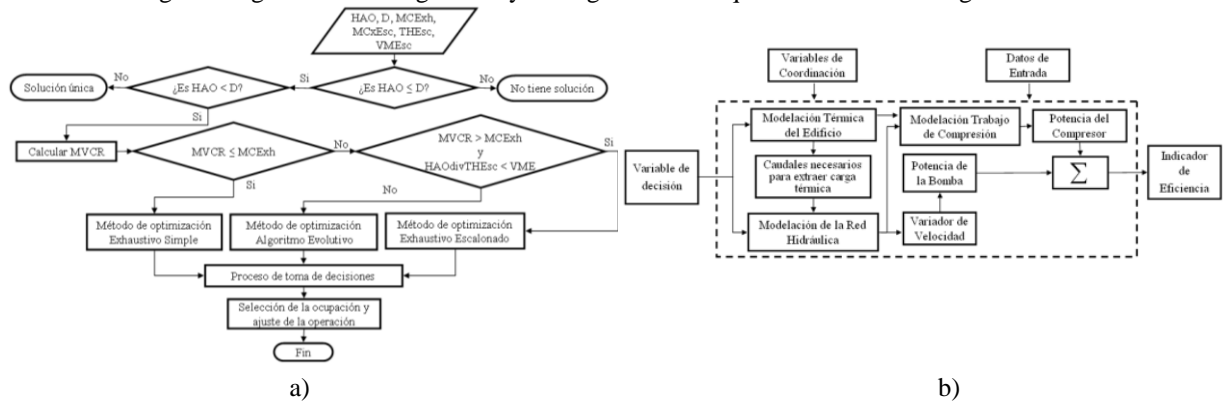


Figura 1. Algoritmo general del procedimiento para la operación eficiente de los CSAF en SCCAH a flujo variable y diagrama de bloques para la descripción del proceso.

En la figura 1.a, MCEExh, es la máxima combinatoria exhaustiva; MCxEsc, máxima combinatoria por escalón; THEsc, total de habitaciones por escalón y VME, la máxima cantidad de escalones. La definición de estos valores, de conjunto con T, D y HAO definen la cantidad de variantes de operación y el método de optimización a utilizar.

Particularidades del uso de las redes neuronales artificiales

La formalización de la carga de enfriamiento de cada habitación se realiza a través del empleo de las RNA. Esto permite predecir comportamientos, sistematizando las particularidades térmicas del edificio partiendo de las variables climatológicas más incidentes.

Se obtiene para cada habitación $i=1, \dots, n$ una tabla de valores $(d_j; h_j; CTE_{ij})$ donde $j=1, \dots, 8760$ (ya que $d=1, \dots, 365$ y $h=1, \dots, 24$). En este caso d son los días del año base, h las horas del día y CTE la carga térmica de enfriamiento. El simulador calcula cada CTE_{ij} teniendo en cuenta los parámetros de la habitación i y la climatología del día d_j y de la hora h_j . Es obvio que para otros años varíen en alguna medida las mediciones climatológicas, por lo cual se necesita un modelo formal y explícito que permita calcular la CTE para cada habitación i en función del día, la hora y la climatología. La temperatura ambiente es pronosticada por el Instituto de Meteorología, lo cual la convierte en un instrumento útil para pronosticar la CTE de cada habitación en los próximos días. Para ello se hace necesario obtener para cada habitación una expresión de la forma $CTE = y(d, h, tamb)$. Esta función (y) se propone como un modelo basado en RNA.

Para identificar los modelos se realizaron los pasos siguientes: adquisición y procesamiento de datos, diseño de la red neuronal, implementación de la red, simulación y validación.

Teniendo en cuenta los elementos del aprendizaje automático, se elaboró una aplicación en el software Matlab R2008b que realiza las operaciones para obtener los modelos. Las estructuras de las RNA se obtienen de un proceso complejo de aprendizaje que incluye: la selección de diferentes porcentajes de los datos mediante un cambio progresivo del tamaño de la muestra, el cambio de las funciones de transferencia de las capas de neurona inicial e intermedia, el cambio de la función de aprendizaje, y el incremento progresivo de la cantidad de neuronas en la capa intermedia. Todos estos pasos se repiten para cada modelo a obtener, según la cantidad de habitaciones que participen en el análisis y la cantidad de entrenamientos que se decida utilizar, inicializándose siempre los pesos para cada variante.

Al terminar la aplicación se han realizado: todos los entrenamientos, simulaciones, cálculo de los errores de los modelos y los cálculos de los coeficientes de correlación (R) entre los datos reales y los predichos por la RNA. La selección del mejor modelo se basa en agrupar en un criterio a R y la cantidad de neuronas en la capa intermedia. El mejor modelo será el de mayor R y menor cantidad de neuronas en la capa intermedia.

Se modeló la carga térmica en RNA de las 59 habitaciones del edificio escogido. La estructura de RNA que mejor se adaptó en todos los casos fue la Feedforward Backpropagation. Se realizaron 100 entrenamientos para cada variante y el número máximo de neuronas en la capa intermedia para el aprendizaje se estableció en 50, utilizándose un paso de una neurona en cada prueba. La variación del porcentaje de los datos para el

entrenamiento se realizó desde el 20 % hasta el 50 %. Los mejores resultados se obtuvieron con el 20 %. Fue necesario, escoger los datos de forma distribuida a lo largo de todo el año con intervalos iguales, lo cual garantizó una adecuada representación de las estacionalidades. La validación se realizó con el 100 % de los datos.

La mejor función de entrenamiento, válida para todos los modelos fue *trainlm*. Las estructuras de las RNA coincidieron en una capa de entrada con función de transferencia *tansig*, una capa intermedia *tansig* y una capa de salida *purelin*. La cantidad de neuronas en la capa de entrada en todos los casos fue de tres y en la capa intermedia varió entre 4 y 30 obteniéndose coeficientes de correlación entre los valores reales y los predichos superiores a 0.9 en todos los casos.

Una vez conocidas las cargas térmicas de enfriamiento parciales para el año base, la forma más adecuada de insertar estos datos a la modelación hidráulica es comprobar que el caudal de agua que circule por cada unidad terminal esté en correspondencia con la cantidad de calor a extraer

Conclusiones

- Mediante la aplicación de la metodología de Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería, se define como variable de decisión del sistema, la ocupación de las habitaciones y como variables intermedias de relevancia, la velocidad de rotación de la bomba del CSAF y la temperatura de salida del agua del enfriador. También fue posible definir la función objetivo, compuesta por la sumatoria de los requerimientos de potencia eléctrica por bombeo y por trabajo de compresión, lo cual determina el valor del indicador de eficiencia del sistema.
- Se identificaron los modelos matemáticos de las cargas térmicas de enfriamiento anual de las habitaciones, utilizando las Redes Neuronales Artificiales y teniendo en cuenta la variabilidad de la climatología local.
- Se estableció la modelación hidráulica de los CSAF a flujo variable para determinar la velocidad de rotación que minimiza la potencia eléctrica en la bomba. La modelación permite: evaluar cada topología de la red en función de la ocupación; considerar todas las restricciones operacionales, la selección de la presión de envío y la incorporación de las características de las unidades terminales y de las válvulas de equilibrio.
- Se fundamentó un procedimiento para el cálculo de la potencia eléctrica que requiere el compresor de una enfriadora para realizar el trabajo de compresión en un SCCAH. El procedimiento incluye: la racionalización de la temperatura de salida del agua en función de las condiciones de las cargas térmicas de enfriamiento.
- Se estableció un procedimiento para la optimización energética de la operación de los SCCAH con CSAF a flujo variable, que integra en una función objetivo termo-hidráulica y los efectos de la variabilidad de: la climatología local; las características constructivas de la edificación; la velocidad de rotación de la bomba; el ciclo de refrigeración por compresión mecánica del vapor; la temperatura de salida del agua de la enfriadora y la ocupación de las habitaciones. Esta optimización de carácter combinatorio-evolutivo incluye los métodos, exhaustivo simple, exhaustivo escalonado y algoritmo genético en función de la cantidad de variantes de ocupación.

Agradecimientos

Eterno agradecimiento a mis tutores, Arístides Alejandro Legrá Lobaina, Jesús Rafael Hechavarría Hernández y Anibal Enrique Borroto Nordelo.

Referencias

- [1] R. Montero Laurencio, J. R. Hechavarría Hernández, A. A. Legrá Lobaina, A. Borroto Nordelo, and R. Santos González, "Análisis y síntesis de la operación de circuitos secundarios de agua fría en climatización centralizada" *Ingeniería Mecánica*, vol. 15, pp. 83-94, 2012.
- [2] R. Montero Laurencio, J. R. Hechavarría Hernández, and A. Borroto Nordelo, "Carga térmica y consumo energético en edificación turística con climatización centralizada a flujo variable," *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 15, pp. 196-202, 2011.
- [3] R. Montero Laurencio, E. Gongora Leyva, Y. Valdivia Nodal, and C. Pérez Tello, "Caudal variable en la climatización centralizada de hoteles (parte 1)," *Retos Turísticos*, vol. 9, pp. 38-45, 2010.
- [4] R. Montero Laurencio and J. R. Hechavarría Hernández, "Aspectos relacionados con el control del flujo secundario de agua en climatización centralizada," *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XIII, pp. 307-313, julio-septiembre, 2012
- [5] J. R. Hechavarría Hernández, "Optimización del diseño de redes hidráulicas bajo criterios técnicos - económicos," Tesis Doctoral, Centro de Estudio CAD/CAM, Universidad de Holguín, Holguín, 2009.
- [6] R. Montero Laurencio and I. Romero Rueda, "Caudal variable en la climatización centralizada de hoteles (parte 2)," *Retos Turísticos*, vol. 11, pp. 12-16, 2012.