

Optimización operacional de redes hidráulicas para climatización centralizada de hoteles

Reineris Montero Laurencio e-mail: rmontero@ismm.edu.cu
Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.

Aristides Alejandro Legrá Lobaina e-mail: alegra@ismm.edu.cu
Departamento de Matemáticas.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.

Jesús Rafael Hechavarría Hernández e-mail: jesusr2h@gmail.com
Docente investigador, Universidad de Guayaquil, Ecuador.

RESUMEN

Se presenta una aplicación CAD que modela las redes hidráulicas empleadas en la climatización centralizada a flujo variable. Se toman los datos validados de la red de la aplicación CAD para insertarlos en otra aplicación informática desarrollada en Delphi y de manera similar se realiza la modelación hidráulica. En la aplicación Delphi se desarrolló un algoritmo que genera los códigos variables que facilitan la automatización del cambio de la topología de la red. De esta forma se pueden evaluar los efectos cambiantes de la ocupación del hotel en la potencia eléctrica requerida por la bomba. También se incorporó un algoritmo para determinar la velocidad de rotación más racional y una optimización combinatoria que incluye los métodos: exhaustivo simple, exhaustivo escalonado y algoritmo genético según la cantidad de variantes de ocupación.

Palabras clave: climatización centralizada, flujo variable, hoteles, optimización operacional, redes hidráulicas.

Operational optimization of centralized air conditioned hydraulic networks in hotels

ABSTRACT

A CAD application modeling the centralized air conditioned hydraulic network, with variable flow is presented. It takes the validated data from the net in the mentioned application and inserts it in another application, developed in Delphi software, to run the hydraulic model in a similar way. In the created Delphi application mentioned before, an algorithm was developed which generates the variable codes, facilitating the automation of the topology change of the hydraulic network. This way the changing effects of the hotel occupation on the electric power required by the pump can be evaluated. Also an algorithm is included to determine the more rational rotation speed and a combinatorial optimization which includes the methods: exhaustive simple, exhaustive staggered and genetic algorithm according to the number of occupation variants.

Keywords: centralized air conditioning, variable flow, hotels, operacional optimization, water networks.

INTRODUCCIÓN

Aproximadamente en el 95 % de los hoteles cubanos de cuatro y cinco estrellas el acondicionamiento del aire se realiza mediante sistemas de climatización centralizados por agua helada (SCCAH). A pesar de que estos sistemas son eficientes, aún constituyen uno de los grandes consumidores de energía eléctrica, aproximadamente el 60 % del total. Para enviar el agua hacia las unidades terminales (fan-coil), encargadas de climatizar los locales, se utilizan los circuitos secundarios de agua fría (CSAF). Los CSAF son complejas redes hidráulicas malladas con retorno directo. Este transporte del agua se realiza durante los 365 días del año, las 24 horas del día.

Al ocupar las habitaciones de un hotel con CSAF a flujo variable, se produce la apertura de las válvulas de dos vías que dan paso al agua en las unidades terminales correspondientes y se produce un cambio de la topología de la red hidráulica. Al desocuparse la habitación, también ocurren cambios topológicos en la red, pues se cierra la válvula de dos vías. Estos cambios son asimilados por un variador de velocidad que trabaja de conjunto con la bomba centrífuga, de manera que se garantice el valor de consigna de la variable controlada, presión de envío en el CSAF. En la figura 1 se aprecian los componentes de un CSAF en el contexto de un SCCAH.

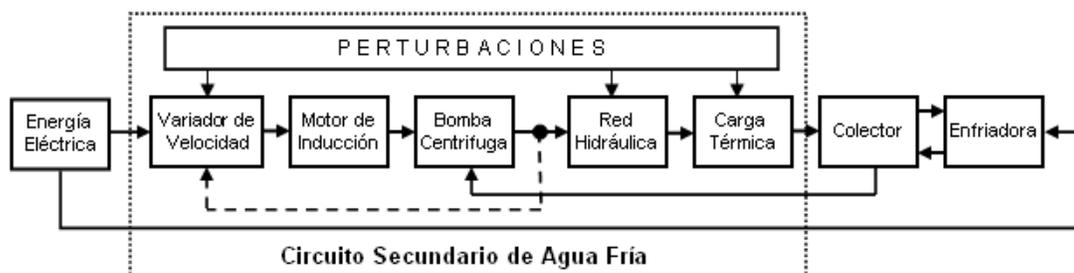


Figura 1. Diagrama en bloques del bombeo a flujo variable empleado en los CSAF

Por otra parte, la problemática de 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 los clientes solicitan HAO habitaciones (HAO debe ser menor o igual que D) entonces se tiene que decidir cuáles habitaciones son asignadas. 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 y con la disminución de los costos, en especial los energéticos.

La ocupación de las habitaciones puede ser entendida como un problema de optimización matemática donde, 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. La ventaja de esta vía está dada en que solo se necesita caracterizar un modelo energético del hotel y no se precisan grandes inversiones materiales para su implementación. Este caso queda definido como una estrategia de ocupación bajo criterios energéticos (EOCE).

La mayoría de los análisis de optimización energética en la climatización centralizada se centran en los sistemas a flujo constante, y se le presta mayor atención a mejorar la eficiencia energética en el lazo de producción de frío que a la distribución del agua. El procedimiento actual para la operación de los CSAF a flujo variable en SCCAH prevalece la operación del

sistema en valores de consignas referidos a las condiciones críticas, no incluyéndose adecuadamente en el análisis el trabajo a cargas parciales del sistema.

Diferentes autores demuestran la importancia de la modelación de las redes hidráulicas para facilitar la decisiones operacionales tanto en la redes de distribución como en los sistemas de climatización centralizados (Coad 2000), (Beecmans y De Lara 2003), (Hechavarría 2009), (Zhenjun and Wang 2009).

Un aspecto que reduce el consumo de energía eléctrica en las redes malladas resulta un adecuado equilibrado hidráulico, lo cual permite ahorros entre el 15-20 % (Beecmans y De Lara 2003). También se ha demostrado empíricamente que el CSAF puede trabajar a menor valor de consigna de la presión (de 500 kPa a 450 kPa) para una misma ocupación (92 %) en condiciones del clima similares, demandando un 35 % menos de potencia eléctrica manteniendo el confort (Sierra 2009).

La utilización del variador de velocidad en las bombas centrífugas, permite la reducción del consumo de energía en las condiciones de cargas parciales al circular menos agua por el sistema. Los ahorros de energía reportados pueden llegar hasta un 30 % con respecto al consumo de un sistema con flujo constante (Coad 2000), (Pérez et al. 2002), (Gopalakrishnan et al. 2015), (Ma et al. 2015). Los CSAF han logrado entre el 12 - 32 % del ahorro para determinadas estrategias de operación a flujo variable basándose en una adecuada modelación de la distribución del agua y un alto grado de automatización (Zhenjun and Wang 2009). Por su parte las normas cubanas NC-45 y NC-220 expresan la necesidad de implementar tecnologías energéticamente eficientes que permitan una mejor operación de los SCCAH (ejemplo el uso de los variadores de velocidad), pero no expresan como implementar estas mejoras. En estas normas no se aborda el tema de la ocupación de los hoteles bajo criterios energéticos.

A partir de los criterios expuestos, la presente investigación tiene como objetivo proponer una variante de optimización para mejorar energéticamente la operación de las redes hidráulicas en la climatización centralizada. Se adoptará como modelo energético el del SCCAH a flujo variable y función objetivo para determinar la ocupación óptima. Por razones de espacio se hará énfasis en la componente hidráulica del modelo termo-hidráulico, que incluye además, el modelo térmico de la edificación y el modelo de trabajo de compresión de la enfriadora.

DESARROLLO

Modelación matemática de la red hidráulica para el cálculo de la potencia de bombeo

La modelación hidráulica facilita la determinación de la presión mínima que requiere el sistema y el caudal correspondiente para cumplir con los requisitos de las unidades terminales. Uno de los procesos que garantiza físicamente estos caudales es el equilibrado de la red. La modelación permite verificar si se cumplen los requisitos del sistema sin la necesidad de repetidos experimentos invasivos los cuales son muy difíciles y costosos de realizar en la práctica. A continuación se exponen los pasos que se tuvieron en cuenta para la modelación hidráulica de los CSAF:

1. Caracterización del agua mediante sus propiedades físicas adaptadas al proceso.
2. Obtener los datos de la red de distribución y sistematizar su configuración.
3. Modelación matemática de la bomba.
4. Modelación matemática de las pérdidas de las unidades terminales de cada local.
5. Sistematización de las características de los componentes para el equilibrado hidráulico.

6. Trazado espacial de la red de distribución y sus componentes.
7. Asignación de los caudales necesarios a cada unidad terminal para extraer el calor.
8. Obtener el modelo matemático de la red hidráulica que responda favorablemente a los cambios operacionales posibles del CSAF, definiendo los valores de caudal y presión para el cálculo de la potencia eléctrica requerida por la bomba centrífuga.

Los SCCAH de forma general envían el agua fría del evaporador hacia la succión de las bombas del CSAF a la temperatura prefijada en el valor de consigna de $7 \pm 0,3$ °C (Coad 2000). No obstante, la configuración general de los sistemas en los que se emplean los CSAF a flujo variable, poseen un colector común en el que confluye el agua que no se envía a las unidades terminales debido a las cargas parciales y el agua que retorna del intercambio térmico del edificio, todo a través de la red hidráulica. La figura 2 permite comprender esta configuración.

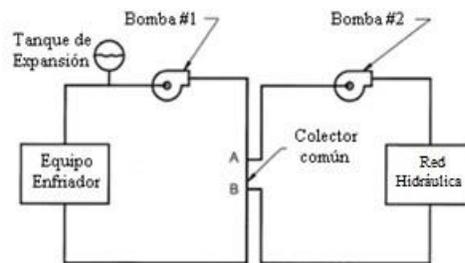


Figura 2. Configuración de los SCCAH a flujo variable en relación con los CSAF

El procedimiento de operación que se propone para la optimización de la operación de la red hidráulica, determina la potencia eléctrica necesaria en el bombeo para cada variante de ocupación. La determinación de la potencia es una consecuencia de evaluar en la ecuación (1) (Martínez et al. 2007), el caudal total y la carga hidráulica requerida por el sistema para garantizar el confort en cada variante de ocupación.

$$P_{eb} = \frac{\rho g H Q}{1000 \eta_b \eta_m} \quad (1)$$

donde:

- P_{eb} - potencia eléctrica de bombeo; kW
- ρ - densidad del agua; kg/m^3 .
- g - aceleración de la gravedad; m/s^2 .
- H - carga hidráulica requerida en el CSAF; m.
- Q - caudal de agua requerido en el CSAF; m^3/s .
- η_b - eficiencia de la bomba del CSAF; adimensional.
- η_m - eficiencia del motor del CSAF; adimensional.

Mediante las leyes de proporcionalidad, se puede determinar la velocidad de rotación requerida en la bomba.

En el caso de las unidades terminales se brindan en catálogos la relación entre el flujo de agua y las pérdidas de carga, así como otras características. La modelación de la red hidráulica se realiza a partir de los caudales que requieren las unidades terminales que están siendo utilizadas.

Cada componente que interviene en el equilibrado hidráulico (válvulas de equilibrado, control, compensación y controladoras de presión) realizan funciones específicas de acuerdo con su posición en la red. La propiedad más importante de estas válvulas es la capacidad de variar la

pérdida de carga para lograr los caudales y presiones necesarias. Las válvulas más utilizadas son las de equilibrado y se caracterizan por la ecuación (2) que relaciona el coeficiente de variación de flujo K_v , el caudal (q) en L/h y las pérdidas de carga (Δp) en kPa (Petitjean 2000).

$$K_v = \frac{0,01 \cdot q}{\sqrt{\Delta p}} \quad (2)$$

En esta investigación, para el cálculo hidráulico, se seleccionó el método del gradiente por sus conocidas bondades algorítmicas y considerando que en el nodo de retorno (donde concluye la red y coincide con la posición donde se encuentra la válvula de compensación) se tiene un caudal equivalente a la suma de los caudales que circulan por cada unidad terminal en uso.

La circulación del caudal por la red hidráulica está relacionada con la energía que el accionamiento electromecánico de la bomba le entregue al fluido. Para controlar este accionamiento, al variador de velocidad se le asigna un valor de consigna de la presión a mantener en cierta zona del CSAF, que inicialmente corresponde al valor sugerido durante el diseño, y este valor de consigna puede ser ajustado en cualquier momento. El valor de la presión se garantiza con el correspondiente valor de la velocidad del accionamiento y el proceso de ajuste se realiza mediante un algoritmo de control PI incorporado.

Para cada posible ocupación del hotel se tiene una topología de la red hidráulica a la cual corresponde una curva $H = R_i(Q)$, $i = 1, \dots, n$, para toda la red (ver figura 3). R_i expresa la relación funcional entre la carga hidráulica H de la red del sistema y el caudal Q , y representa de forma simplificada todas las pérdidas energéticas del fluido en los tramos de tuberías y accesorios en operación. El valor de R_i puede variar en función de las unidades terminales en uso, relacionadas con la ocupación y la dinámica de las cargas térmicas de enfriamiento.

Análogamente, para cada valor de energía que se le suministre a la bomba se tiene una función $H = B_j(Q)$, $j = 1, \dots, m$ que describe el valor de H según varía Q . Como se aprecia en la figura 3, el cambio simultáneo de las curvas de la bomba y de la red crea un espacio de soluciones del problema de encontrar cuál es la energía suficiente para lograr que la bomba garantice el caudal necesario Q_{sp} a la presión H_{sp} que garanticen el confort. Si se conoce el valor de la carga hidráulica H_{sp} y el caudal Q_{sp} , entonces puede determinarse la potencia eléctrica que se necesita para establecer la curva de la bomba que pasa por el punto $(Q_{sp}; H_{sp})$. El actual criterio de adoptar que la energía que se suministra a la bomba es la necesaria para garantizar una presión en correspondencia con la ocupación máxima, conduce a la falta de eficiencia energética.

Conocidos para la bomba: V_n (velocidad nominal); Q_n (caudal nominal); y H_n (carga hidráulica nominal). Sean, además, las variables: V_i (velocidad mínima; V_{i0} es la velocidad mínima inicial que en este caso se toma positiva y se corresponde con la menor potencia permisible en el motor para evitar su saturación); V_a (velocidad máxima; V_{a0} es la velocidad máxima inicial que en este caso se toma igual a V_n); e (condición de parada del algoritmo, positiva y cercana a cero); Q_a y Q_i (valores mínimos de los caudales calculados respectivamente para V_a y V_i); H_a y H_i (valores mínimos de presiones calculadas respectivamente para V_a y V_i); δ_Q (cota para el módulo de la diferencia máxima entre los caudales requeridos y calculados en las unidades terminales); Q_{UTE} (caudal requerido en una unidad terminal); y Q_{UTR} (caudal real en una unidad terminal). Además se considera la ecuación que relaciona caudal y presión de la bomba

$H = -A \cdot Q^2 + C$ donde sus coeficientes A y C son funciones de la velocidad de la bomba.

También se tienen restricciones especiales con respecto a la presión mínima en las unidades terminales y en el nodo de retorno.

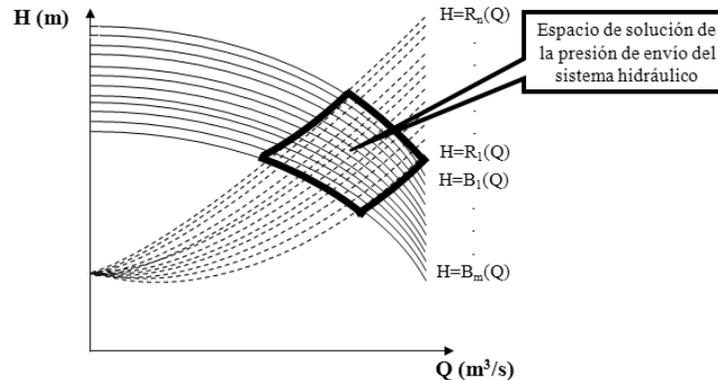


Figura 3. Espacio de solución de la presión de envío del sistema hidráulico en CSAF

Entonces, a partir de estas variables y las interrelaciones que se establecen en el algoritmo de la figura 4, se puede encontrar para una ocupación dada, la velocidad mínima de la bomba que garantice que los caudales sean suficientes para que CSAF funcione adecuadamente. Puesto que, para cada ocupación particular del hotel, el sistema hidráulico adquiere una determinada topología, una tendencia actual consiste en calcular en cada caso un nuevo valor de consigna de la presión. Entonces resulta esencial encontrar para cada ocupación una velocidad tal, que garantizando los flujos necesarios para cada ocupación, se minimice la potencia eléctrica. Al minimizar la velocidad, también se minimiza el consumo energético por bombeo.

Algoritmo para la generación del código binario de una variante de ocupación de habitaciones de un hotel si se conoce su número de orden

Sea W una ocupación de las T habitaciones del hotel, representada por una cadena de T caracteres 0 y 1. De ellas se tienen H_O ocupadas y H_{OP} asignadas directamente a clientes (representadas todas para el análisis ocupacional por 1) y D están disponibles (representadas por 0). Las H_{FS} habitaciones que están fuera de servicio no son incluidas en este análisis.

Por ejemplo, sean $T = 20$, $D = 10$ y $HAO = 4$ y sin perder generalidad supóngase que W está dado por la cadena de caracteres 11100101001101000110. Considérese la sub-cadena $O = W_4W_5W_7W_9W_{10}W_{13}W_{15}W_{16}W_{17}W_{20} = 0000000000$ y sea O_1, O_2, \dots, O_{210} la lista ordenada de $MVCR = 210$ ocupaciones posibles de las $HAO = 4$ habitaciones solicitadas cuando se tienen $D = 10$ disponibles. Cada opción de ocupación O_i puede interpretarse como un número binario (base 2) cuya equivalencia en la base numérica 10 es un número entero B_i y esto garantiza la existencia de una ordenación única de estas cadenas binarias y de las ocupaciones asociadas.

Para obtener el código binario de la ocupación a evaluar en la función objetivo y que permite activar las estructuras físicas que definen los parámetros del modelo energético, en primer lugar se inicializa la búsqueda, acotando su resultado con el fin de aumentar su eficiencia. Luego se encuentra la cadena binaria correspondiente a la ocupación de orden c que se desea evaluar.

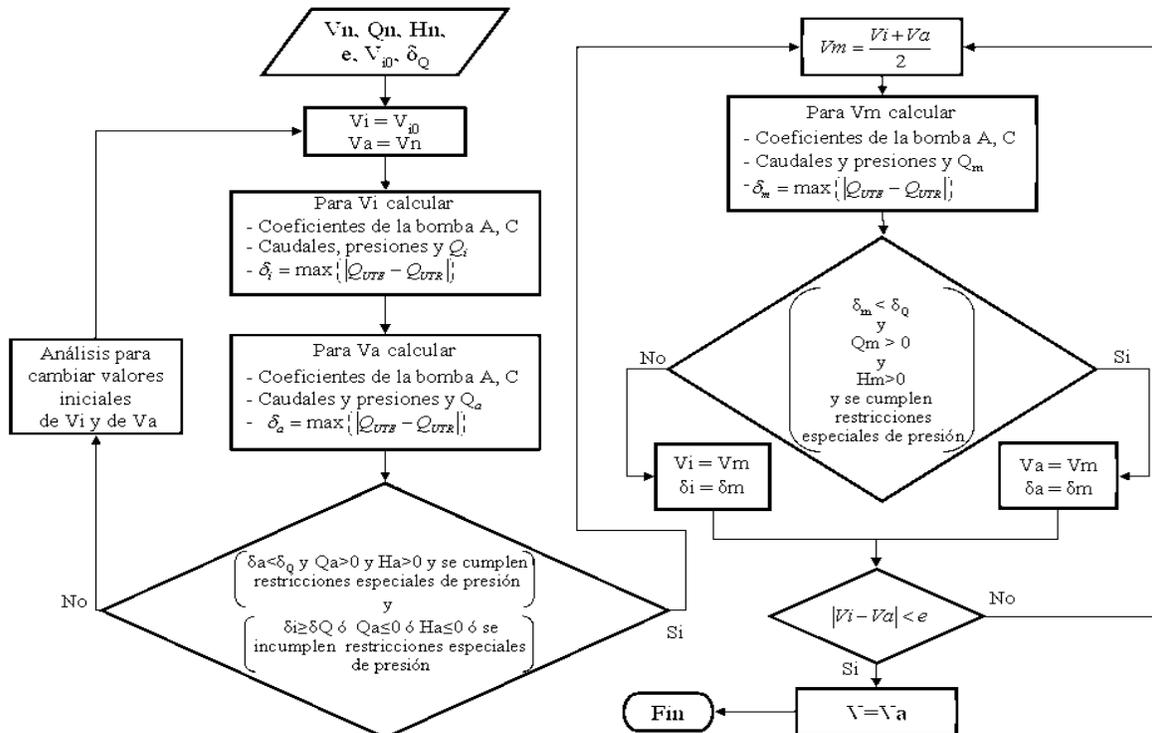


Figura 4. Algoritmo para determinar la velocidad óptima de la bomba

Aplicaciones propuestas para la modelación hidráulica: sus potencialidades

Para implementar el algoritmo de la modelación hidráulica se realizaron pasos intermedios como adaptar la aplicación CAD de Hechavarría (2009) (“AutoProyect” en redes de distribución de agua), a las condiciones de las redes malladas de los CSAF (ver figura 5). Para adaptarla se programaron en VISUAL-LISP unos códigos para el equilibrado y la operatividad de la red.

En las diferentes variantes de la ventana de trabajo de la aplicación se pueden apreciar:

- El sistema de códigos para tramos y nodos que ayudan a identificar los niveles o plantas del edificio donde se encuentran ubicadas las unidades terminales.
- Las válvulas de propósito general que permiten introducir las pérdidas hidráulicas correspondientes con los parámetros de las unidades terminales y las válvulas de equilibrado.
- La simbología de colores que indican el grado de cumplimiento de las velocidades.
- Las presiones en cada nodo, los caudales en cada tramo, las propiedades físicas de las tuberías, así como sus diámetros y longitudes entre otros aspectos.

La red de los CSAF es cerrada y opera como si existiera un solo nodo de suministro (nodo de retorno). La aplicación CAD permite a inversionistas en el turismo y otras ramas, hacer análisis hidráulicos adecuados para este tipo de redes.

La configuración ideal de este tipo de red, sería la existencia de una válvula de equilibrado en cada unidad terminal para garantizar la exactitud de los flujos requeridos por las cargas térmicas. Sin embargo, en el caso de estudio solo se cuentan con válvulas de equilibrado al final de los ramales principales. No obstante, se realizó el equilibrado hidráulico considerando los modelos de pérdidas de las unidades terminales obtenidos de los datos de catálogos y de manera similar los modelos que relacionan el K_v de las válvulas de equilibrio con respecto al número de vueltas.

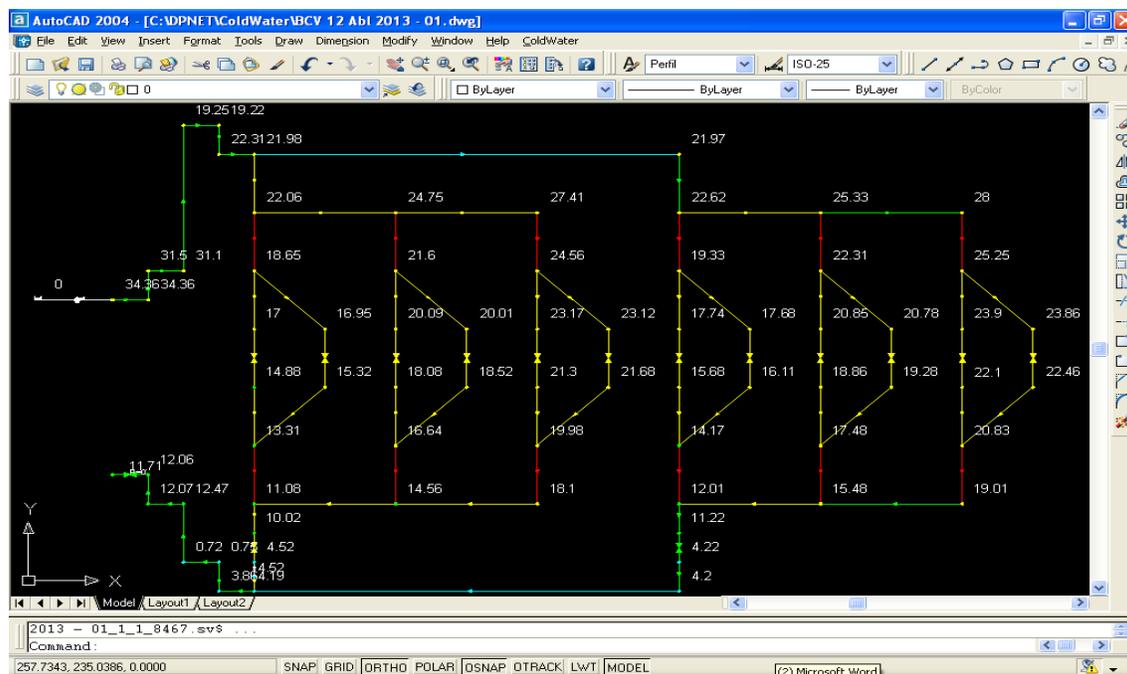


Figura 5. Tramos AB y CD de la red hidráulica con la aplicación CAD (ver figura 8)

Todos estos elementos facilitaron el ajuste del modelo hidráulico en la aplicación CAD, respetando las restricciones operacionales (velocidades y presiones en tramos y accesorios especiales, así como los caudales necesarios para el confort). Se validaron los resultados en el EPANET a partir del fichero .inp que genera la aplicación CAD. No existen diferencias entre los resultados del EPANET con respecto a la aplicación ColdWater.

Por otra parte, una vez reproducida la red hidráulica del caso de estudio con la aplicación CAD, se tomaron los datos necesarios para integrarlos en la aplicación “OcupaHotel MTH” desarrollada en Delphi (ver figura 6).

La modelación hidráulica incluida en OcupaHotel MTH tiene como objetivo principal el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el bombeo, ver ecuación (1). Para esta modelación la aplicación presenta cuatro ventanas fundamentales con las cuales se logra: la identificación de los nodos y tramos; la elaboración de la matriz de conectividad de los nodos, definiéndose la topología de la red; la introducción de los datos de los tramos y nodos (incluye las pérdidas locales de las unidades terminales, las válvulas de equilibrio, la presión en los nodos conocidos, y el caudal de suministro); y la obtención de la presión del sistema a partir de la solución del algoritmo de optimización de la velocidad que se presenta en la figura 4.

Para lograr operatividad, es posible actualizar en cualquier momento los nombres y datos de todas las tablas que contienen información de la red. Es necesario definir otros datos no menos importantes, tales como: paso para la búsqueda de la velocidad óptima de la bomba a partir de las velocidades mínima (valor que asegura la potencia mínima requerida en la bomba y que evita la saturación en el motor) y máxima iniciales; la cota del error para el cumplimiento de la presión en el nodo de retorno y en los nodos de las unidades terminal en comparación con el menor valor positivo posible; la cota de error para el cumplimiento de los caudales en los tramos; la viscosidad cinemática; y el tamaño de la rugosidad de las tuberías.

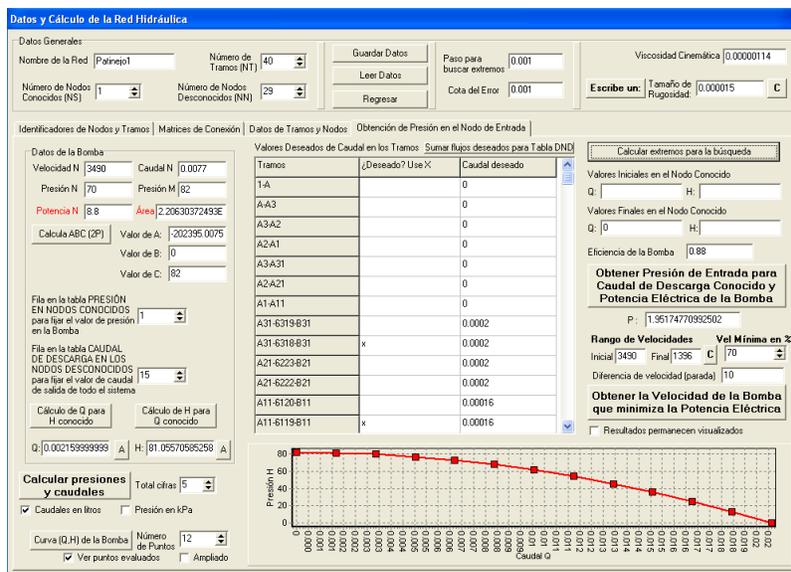


Figura 6. Ventana para los cálculos hidráulicos de la aplicación OcupaHotel MTH

Se obtienen los coeficientes de la ecuación de la bomba a partir de la introducción de los datos nominales u otros datos en correspondencia con una respuesta de la red. Adicionalmente se pueden cargar informaciones de otras redes hidráulicas predeterminadas, así como el gráfico de la curva de la bomba.

Algoritmo general para la optimización de la operación de los CSAF a flujo variable

En la figura 7 se muestra una síntesis del procedimiento general de la operación eficiente de los CSAF en SCCAH a flujo variable en hoteles, cuya estrategia de ocupación tiene un fundamento general que puede considerarse de carácter combinatorio y evolutivo.

Para determinar el conjunto de variantes de ocupación, se hace necesario conocer cuáles son las D habitaciones disponibles.

Este conjunto constituye la base del universo combinatorio de búsqueda para aplicar la *EOCE* y para esto debe conocerse la solicitud de ocupación *HAO* en la recepción del hotel. Si la cantidad de *HAO* es menor que D se calcula el máximo valor de código restringido (*MVCR*) mediante un coeficiente binomial. Si $HAO = D$ entonces la solución es única. Por ejemplo, si $D = 10$ y $HAO = 4$, se tiene la ecuación (3).

$$MVCR = \frac{D!}{(D - HAO)! HAO!} = \frac{10!}{(10 - 4)! 4!} = 210 \quad (3)$$

En correspondencia con el valor de *MVCR* y la capacidad de cómputo disponible, se selecciona el método de optimización a utilizar y este es complementado con un proceso de toma de decisiones que incluye criterios no formalizables en la determinación de la mejor ocupación.

En la figura 7, *MCE_{ex}* es la máxima combinatoria exhaustiva; *MC_xEsc* es la máxima combinatoria por escalón; *THE_{sc}* es el total de habitaciones por escalón y *VME* es la máxima cantidad de escalones. La definición de estos valores por parte del usuario, define el método de optimización.

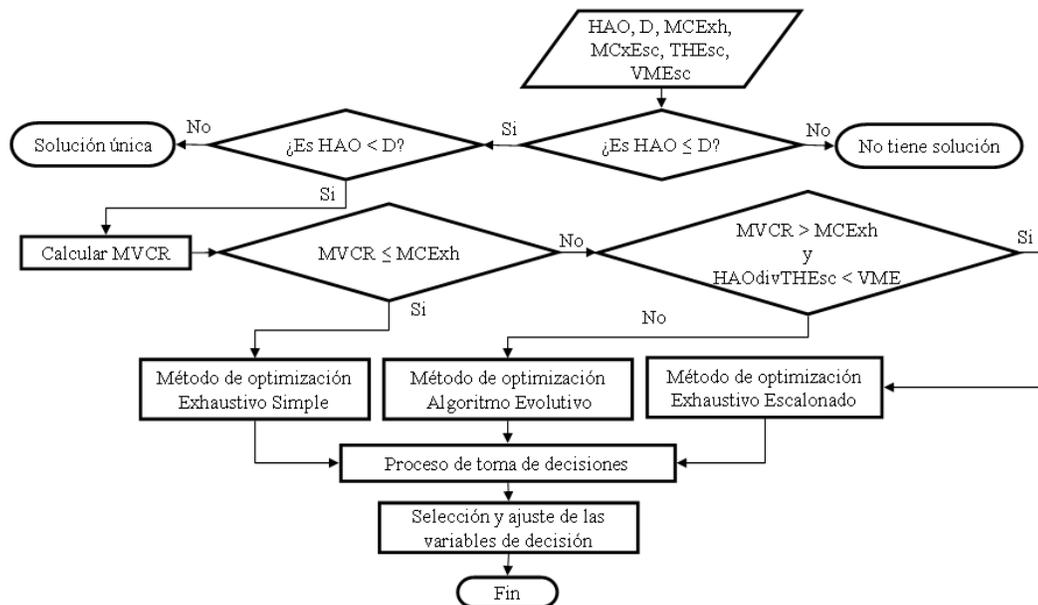


Figura 7. Procedimiento para la operación eficiente de CSAF en SCCAH a flujo variable

Presentación del circuito secundario de agua fría del caso de estudio

En el hotel escogido existe un total de siete zonas, las cuales atiende el SCCAH. Se escoge la zona 6, constituida por un edificio de tres plantas con un total de 59 habitaciones. Las características nominales de la bomba centrífuga son: 28 m³/h de caudal y una carga hidráulica de 70 m. El motor asincrónico acoplado es de una potencia nominal de 8,8 kW y 3490 rpm y el variador de velocidad es ALTIVAR 31 con un controlador proporcional integral incorporado. La red de tuberías es mallada de material PVC. En la figura 8 se muestra una imagen parcial de la red hidráulica y su representación simplificada con los nueve ramales principales. Para la optimización de la operación se escogen como ejemplo los ramales AB y CD con seis habitaciones cada uno.

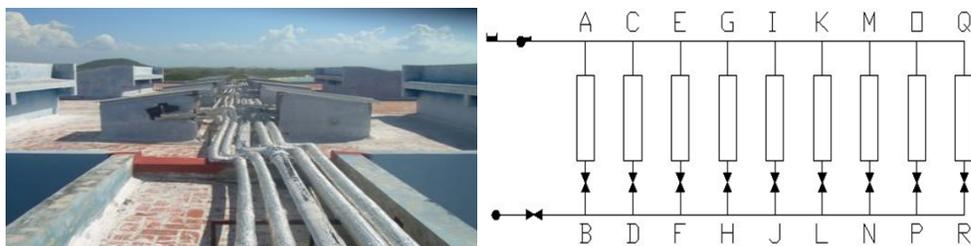


Figura 8. Imagen parcial y esquema simplificado de la red hidráulica

Dentro de los componentes de la red se resaltan, las unidades terminales y las válvulas de equilibrio. En la red hidráulica escogida, solo se emplean válvulas de equilibrado a la salida de los patinejos y una de compensación en el retorno de sistema. Finalmente la red hidráulica a analizar como ejemplo tiene 40 tramos y 30 nodos (ver figura 5).

Integración de las variables de decisión a la función objetivo

Es necesario aclarar que la función objetivo utilizada fue la ecuación (4). En esta expresión el segundo sumando corresponde a parámetros que permiten la determinación de la potencia requerida en el trabajo de compresión para extraer el calor absorbido por el agua.

$$P_t = \frac{\rho g H Q}{1000 \eta_b \eta_m} + \frac{m_{CPAF} (h_7 - h_8)}{(h_6 - h_5)} \cdot (h_2' - h_6) \quad (4)$$

A partir de un ejemplo de 12 habitaciones correspondientes a los patinejos 1(AB) y 2(CD), se escoge (sin perder generalidad) una configuración inicial que considera cuatro habitaciones ocupadas y ocho disponibles según se muestra en la tabla 1. De dicha tabla se infiere que el total de habitaciones es $T = 12$, las ocupadas $H_o = 4$ y las disponibles $D = 8$, por tanto la cadena de caracteres $W = 010001100100$ y la sub-cadena $O = O_1O_3O_4O_5O_8O_9O_{11}O_{12}$ representando a las habitaciones disponibles.

Tabla 1. Situación ocupacional antes de la definición de las habitaciones a ocupar

Hab.	6319	6318	6223	6222	6120	6119	6317	6316	6221	6220	6118	6117
H_o	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0

Para analizar la eficiencia computacional se escogió la variante de ocupar tres habitaciones ($HAO = 3$) de ocho disponibles ($D = 8$) según la tabla 1. La información utilizada para la solución del problema con los tres métodos de optimización propuestos se puede apreciar en la tabla 2. Se escogieron al azar las condiciones climatológicas de los días 218 y 219 del año base.

Tabla 2. Datos de configuración necesarios para los algoritmos de optimización

Método de optimización	MCExh	MCxEsc	THEsc	VME	Población inicial	Mejoras aleatorias	Mutaciones y Cruzamientos	Cant. de variantes
Algoritmo Genético	55	7	1	3	8	14	40%	28
Exhaustivo Escalonado	55	8	1	3	-	-	-	21
Exhaustivo Simple	56	8	1	3	-	-	-	56

Las simulaciones para la optimización a partir de la ocupación y las siete variantes posibles de operación del sistema, se efectuaron teniendo en cuenta las combinaciones de la tabla 3.

Tabla 3. Variantes de operación del sistema a considerar para su optimización energética

	Variantes de operación						
	1	2	3	4	5	6	7
Variando la ocupación	X	X	X	X	X	X	X
Variando la velocidad de rotación de la bomba	-	X	-	X	X	-	-
Variando la temperatura de salida del agua de la enfriadora	-	-	-	X	-	X	-
Usando el modelo térmico de las habitaciones	X	-	-	X	X	X	X
Usando el modelo hidráulico del circuito secundario de agua fría	-	X	X	X	X	X	X

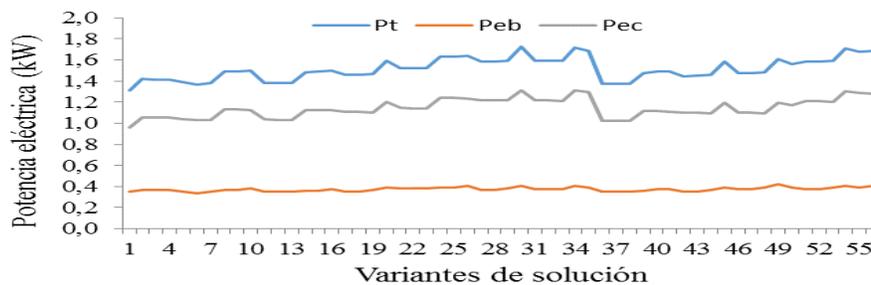
Resultados de una optimización exhaustiva simple

Los resultados de la búsqueda exhaustiva simple para las diferentes variantes de operación del SCCAH, definieron que la EOCE debe basarse en los resultados de la tabla 4. En esta tabla las habitaciones se identifican de la siguiente manera, por ejemplo, 6221 significa que es la habitación 21 del nivel 2 del edificio 6. Las habitaciones señaladas en las celdas con color azul son las que se proponen ocupar, las de color verde ya estaban ocupadas y las de color amarillo son las que quedan sin ocupar.

Tabla 4. Resultados de las ocupaciones óptimas para el método exhaustivo simple

Variante	6319	6318	6223	6222	6120	6119	6317	6316	6221	6220	6118	6117
1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
2	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
3	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1
4	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
5	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
6	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
7	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1

El mejor resultado operacional se obtiene en la cuarta variante, garantizándose las restricciones de la red hidráulica. Las variantes en las que no se optimiza la velocidad de la bomba (3, 6 y 7), se utilizan sus parámetros nominales, aunque pueden utilizarse otros estados inferiores de funcionamiento de la bomba. Los resultados de las potencias requeridas para el bombeo (*Peb*) y para el trabajo de compresión (*Pec*) y la suma de ellas (*Pt*) se presentan en la figura 9. Es notable como para las diferentes ocupaciones, las potencias varían indistintamente en correspondencia con los valores de cargas térmicas que aportan las habitaciones y en función de la topología de la red hidráulica.

**Figura 9. Variaciones de la potencia requerida por el sistema**

Resultados de la optimización exhaustiva escalonada

Para el algoritmo exhaustivo escalonado, se determinó que la mejor variante de solución consiste en tomar la menor cantidad de habitaciones por escalón ($THE=1$), y el mayor número de escalones posibles (VME). Esta variante garantiza la mayor rapidez computacional y la mejor exactitud en los resultados. Al realizar la búsqueda de la ocupación óptima mediante la optimización combinatoria basada en el método exhaustivo escalonado, se obtienen los mismos resultados que con el método exhaustivo simple. La diferencia fundamental entre un método y el otro consiste en la eficiencia computacional, la cual se aprecia en el gráfico de la figura 10.

Resultados de una optimización mediante algoritmo genético

Las soluciones convergen hacia valores muy próximos al indicador de eficiencia (IE), con diferencias que no superan 2 % de la potencia eléctrica que como promedio de todas las variantes de operación, se requiere para iguales *HAO*. La tabla 5 refleja la ocupación encontrada por el método del algoritmo genético para cada variante de operación del sistema. Luego de obtener las cadenas binarias de forma aleatoria y aplicarle los operadores genéticos (mutaciones y cruzamientos), los cromosomas resultantes teniendo en cuenta la medida de aptitud (IE), se corresponden con la ocupación a asumir.

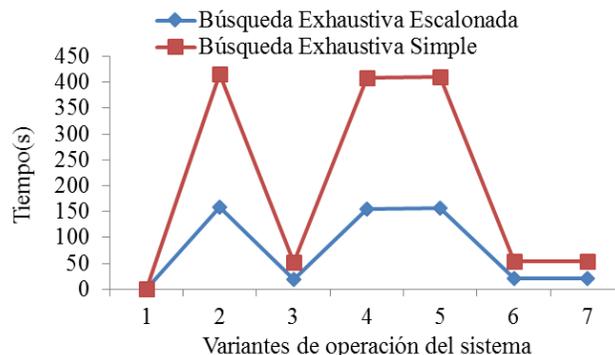


Figura 10. Tiempo computacional de las búsquedas exhaustivas simples y escalonadas

Tabla 5. Resultados de las ocupaciones óptimas para el método algoritmo genético

Variante	6319	6318	6223	6222	6120	6119	6317	6316	6221	6220	6118	6117
1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
2	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
3	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
4	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
5	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
6	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
7	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1

Patrón de ocupación como base para garantizar una EOCE

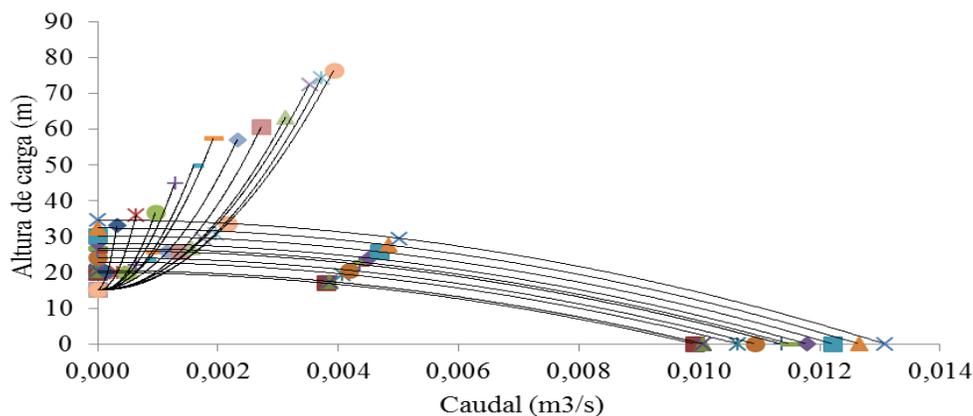
Para el caso de estudio el patrón de ocupación obtenido al ir ocupando de una en una las habitaciones, queda definido en el siguiente orden: 6221, 6118, 6119, 6220, 6120, 6117, 6319, 6223, 6317, 6222, 6318, 6316. Este orden ocupacional garantiza los menores requerimientos de potencia eléctrica del SCCAH.

En la tabla 6 aparecen los resultados de las variables para la ocupación patrón y la misma recoge las siguientes informaciones: temperatura de salida del agua de la enfriadora (t_8), temperatura de entrada del agua a la enfriadora (t_7), temperatura de retorno del agua del edificio (t_r), potencia eléctrica requerida para el trabajo de compresión (P_{ec}), velocidad de rotación de la bomba centrífuga (N), valor de consigna de la presión de envío del CSAF (H_e); presión en el nodo de retorno crítico de la red hidráulica (H_r), caudal requerido para la ocupación que se evalúa (Q_r), caudal total requerido para la ocupación máxima (Q_t); mayor incumplimiento de caudal en las unidades terminales seleccionadas ($Incp.Q$); potencia eléctrica requerida por la bomba (P_{eb}), indicador de eficiencia (IE), cantidad de combinaciones evaluadas durante la búsqueda ($Comb$), cantidad de evaluaciones al generar los códigos (EGC), y el tiempo computacional para determinar la solución óptima (t).

Es posible con los resultados obtenidos de los patrones, comprobar que se cumplen las expresiones de la proporcionalidad para el trabajo de la bomba. Las familias de curvas de las bombas que corresponden a las ocupaciones óptimas, al ocuparse el edificio de forma escalonada, se pueden apreciar en la figura 11.

Tabla 6. Valores de las variables correspondientes al patrón de la EOCE

Escalón	6221	6118	6220	6117	6119	6222	6120	6223	6318	6319	6317	6316
CTE (kW)	0,79	1,62	2,42	3,24	4,45	5,65	7,05	8,44	9,98	11,69	13,78	15,87
t8 (°C)	10,72	11,33	11,56	11,67	11,64	11,68	11,70	11,73	11,75	11,75	11,73	11,73
t7 (°C)	10,78	11,45	11,73	11,90	11,98	12,12	12,26	12,40	12,53	12,66	12,82	13,00
tr (°C)	11,48	12,12	12,34	12,46	12,55	12,64	12,74	12,79	12,83	12,86	12,93	13,00
Pec (kW)	0,09	0,18	0,26	0,35	0,50	0,66	0,82	0,98	1,16	1,34	1,61	1,89
N (rev/min)	1705	1746	1867	1989	1948	1948	1989	2070	2111	2192	2192	2273
He (mca)	18,6	20,5	22,4	26,5	24,4	24,3	26,4	28,5	28,4	30,5	30,4	32,6
Hr (mca)	0,1	0,3	0,3	0,2	0,7	0,4	0,2	0,4	0,6	0,7	0,1	0,2
Qr (m ³ /h)	0,58	1,15	1,73	2,30	2,88	3,60	4,18	4,90	5,62	6,34	7,06	7,78
Qt (m ³ /h)	7,78	7,78	7,78	7,78	7,78	7,78	7,78	7,78	7,78	7,78	7,78	7,78
Incp.Q (%)	0,00	-1,13	-15,12	-9,03	-16,00	-15,49	-10,91	-17,90	-21,56	-20,45	-19,64	-14,57
Peb (kW)	0,04	0,07	0,13	0,19	0,23	0,28	0,34	0,43	0,51	0,62	0,69	0,82
IE (kW)	0,12	0,248	0,385	0,539	0,729	0,942	1,165	1,416	1,672	1,963	2,305	2,699
Comb.	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
E.C.G	2049	1025	513	257	129	65	33	17	9	5	3	2
t (s)	104,37	89,55	79,99	71,08	62,34	54,20	44,89	37,58	29,09	21,53	13,92	4,28

**Figura 11. Curvas de la bomba y de la red correspondiente a la ocupación según patrón**

CONCLUSIONES

1. Se realizó la modelación hidráulica de los circuitos secundarios de agua fría mediante la implementación del método del gradiente, incluyendo algoritmo optimizador de la velocidad de la bomba, determinando el valor de consigna de la presión de envío para cada topología de la red, según cada ocupación particular.
2. La aplicación informática CAD presentada, aporta una solución práctica para el equilibrado de las redes malladas utilizadas en los SCCAH así como su diseño y análisis operacional.
3. La aplicación informática “OcupaHotel MTH” es una herramienta para tomar decisiones en el contexto energético de la explotación de hoteles, dada la integración de la modelación energética de los CSAF y la EOCE basada en técnicas de optimización combinatoria.
4. Una vez analizadas las variantes de operación del SCCAH, en específico las variantes que consideran el modelo termo-hidráulico (variantes cuatro, cinco, seis y siete), se puede afirmar que la variante cuatro es la más eficaz. Es decir, la variante de optimizar de forma conjunta, el valor de la temperatura de salida del agua de la enfriadora, la velocidad de la bomba y la ocupación. Lo anterior significa que con el procedimiento y la aplicación que se proponen, teniendo como variable de decisión fundamental la ocupación, se pueden evaluar y aplicar las

siguientes estrategias de explotación hotelera en cuanto los SCCAH: optimización del valor de consigna de la presión en los CSAF, racionalización de la temperatura de envío del agua fría hacia las unidades terminales, cambio de flujo constante a flujo variable, y ocupación de los locales según un criterio energético (hidráulico, térmico o termo-hidráulico).

5. Se establece un procedimiento capaz de minimizar los requerimientos de potencia eléctrica durante la operación de los CSAF en los SCCAH a flujo variable que integra: los modelos de redes hidráulicas malladas y de enfriamiento por compresión; la variabilidad de la climatología local; la ocupación seleccionada; la velocidad de la bomba; la temperatura de salida del agua de la enfriadora y una estrategia combinatoria-evolutiva para la búsqueda de mejores ocupaciones. Se utiliza una optimización combinatoria, que incluye la utilización de los métodos exhaustivo simple, exhaustivo escalonado y algoritmo genético.

REFERENCIAS

- Beecmans V. y De Lara J.** (2000). “Optimización de la altura manométrica de la bomba y ahorro energético”, Montajes e instalaciones: Revista técnica de constr. e ing. de instalac., No. 336, págs. 89-95, ISSN 0210-184X, Reed Business Information, Madrid, España.
- Coad W. J.** (2000). “Hydronic heating and cooling system design”. In ASHRAE Systems and Equipment Handbook, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Englewood, Colorado, United States, p. 18.
- Gopalakrishnan V., Brogan A. and Das R.** (2015). “Are your variable speed pumping applications delivering the predicted savings? Improving control to maximize results”. Americ. Council for Energy-Efficient Economy: Summer Study on Energy Efficiency in Industry, 13 p, Ohio, USA, extraído de: <http://aceee.org/conferences/2015/ssi>, en noviembre de 2015.
- Hechavarría J. R.** (2009). “Optimización del diseño de redes hidráulicas bajo criterios técnico-económicos”, Tesis de doctorado, Centro de Estudio CAD/CAM, Facultad de Ingeniería, Universidad de Holguín, Holguín.
- Ma Y., Tukur A. and Kissock K.** (2015) “Energy efficient static pressure reset in VAV systems” Americ. Soc. of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), Transactions 121 (1), Atlanta, Georgia, USA, extraído de <http://www.techstreet.com/products/1894280#jumps>, en noviembre de 2015.
- Martínez V., Monteagudo J. y Jáuregui, S.** (2007). “Mecánica de los fluidos y máquinas de flujo”. Editorial Universo Sur, Cienfuegos, Cuba.
- Pérez P., Del Toro R. M. y Martínez H.** (2002). “Ahorro energético en los sistemas climatización y refrigeración”. Informe técnico, Empresa Nacional de Automatización Integral (CEDAI), Santiago de Cuba.
- Petitjean R.** (2000). “Equilibrado de los sistemas de distribución”. Tour & Andersson AB, Ljung, Suecia: 71 p.
- Sierra Y.** (2009). “Comportamiento del motor de inducción en la climatización centralizada de hoteles”, Tesis de Ingeniería, Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín.
- Zhenjun M. and Wang S.** (2009). “Energy efficient control of variable speed pumps in complex building central air-conditioning systems”, Energy and Buildings, vol. 41, no. 2, pp.197–205, ISSN: 0378-7788, Elsevier, Filadelfia, Pensilvania, USA.