

# Análisis y síntesis de la operación de circuitos secundarios de agua fría en climatización centralizada

## Analysis and synthesis of the secondary circuits of cold water operation in centralized air conditioning systems

Reineris Montero-Laurencio<sup>I</sup>, Jesús Rafael Hechavarría-Hernández<sup>II</sup>,  
Arístides Alejandro Legrá-Lobaina<sup>I</sup>, Aníbal Borroto-Nordelo<sup>III</sup>,  
Rubier Santos-González<sup>II</sup>

I Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada. Holguín, Cuba  
Correo electrónico: [rmontero@ismm.edu.cu](mailto:rmontero@ismm.edu.cu)

II. Universidad de Holguín. Centro de Estudios CAD/CAM. Holguín, Cuba.

III. Universidad de Cienfuegos. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Cienfuegos, Cuba.

Recibido: 29 de junio de 2011

Aceptado: 25 de abril de 2012

---

### Resumen

En el presente trabajo se desarrolla la metodología del Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería para la preparación y toma de decisiones durante la operación en la climatización centralizada a flujo variable. Mediante un análisis externo se clasifica la información involucrada. En el análisis interno se describe el conjunto de trabajos de modelación matemática y la organización racional de los cálculos para determinar el indicador de eficiencia del proceso. El indicador de eficiencia contiene las potencias eléctricas debidas al trabajo de bombeo y al trabajo de compresión. Se plantean las generalidades de un procedimiento que implica la modelación térmica del edificio, la modelación de la red hidráulica y el cálculo de la potencia del compresor. La integración de estos aspectos termohidráulicos a partir de evaluar la incidencia de la variable de decisión, habitaciones días ocupadas, permite identificar los requerimientos mínimos de potencia del sistema.

**Palabras claves:** climatización centralizada, flujo variable, sistema de ingeniería.

### Abstract

In the current work is development the methodology of analysis and synthesis of system of the engineering to the preparation and taking of decision during the operation of the centralize air conditioning system with variable flow. Using an external analysis, the involved variables are classified. In the internal analysis are described all the works of the mathematical models and the rational organization of the calculations to determine of the process efficiency indicators. The efficiency indicators contain the electricity power due to the pump and the compressor work. The generalities of a procedure that implies the thermal simulation of the building, the simulations of the hydraulic net and the calculation of the power of the compressor are shown. The integration of these termhydraulics aspects starting from evaluating the incidence of the decision variables, busy rooms, permits to identify the minimum required of the system power.

**Key words:** centralized air conditioning systems, engineering systems, variable flow.

## Introducción

La causa fundamental del consumo de electricidad en hoteles turísticos constituye la climatización centralizada. Las investigaciones para resolver esta problemática se han centrado en sistemas a flujo constante. Sin embargo, aún no se aprovechan eficientemente las oportunidades de ahorro de energía que ofrecen los sistemas a flujo variable. En especial, los Sistemas de Climatización Centralizada por Agua Helada (SCCAH) son de uso obligatorio en los hoteles de 4 y 5 estrellas [1], y causan aproximadamente el 60% del consumo de la energía eléctrica según plantean Mostelier y Armas en el 2008 en sus tesis de doctorado.

Los mayores avances en la disminución del consumo de energía en los SCCAH están relacionados con mejoras en la eficiencia del ciclo de compresión del gas refrigerante, justificado por la potencia instalada en estos equipos. Esto ha permitido establecer parámetros técnicos adaptados a las condiciones de operación a cargas parciales [2-7]. Sin embargo el incremento de la eficiencia energética en las unidades enfriadoras, ha despertado interés en reducir el consumo de energía en los Circuitos Secundarios de Agua Fría (CSAF), debido al incremento porcentual de la potencia que requieren [8-12].

En los accionamientos electromecánicos se estima que el 20 % de los ahorros de la energía están asociados con las mejoras en la eficiencia de los motores y los sistemas de suministro eléctrico, el otro 80% a las mejoras se obtienen mediante un enfoque integral del los sistemas, haciendo énfasis en la carga impulsada y el proceso. Estos criterios se obtuvieron en estudio realizado por la Oficina de Tecnologías Industriales del Departamento de Energía de EEUU. Es precisamente como parte de ese 80 % que la modelación térmica del edificio y el análisis de sus efectos en el equipo enfriador del SCCAH, integrado a la modelación hidráulica de los CSAF, con lo que se puede obtener un análisis más profundo de las potencialidades de ahorro energético.

En la literatura consultada aunque se considera como la variable más importante la presión de trabajo de los CSAF y se han modelado múltiples sistemas, las soluciones se centran en modelos particulares de algún componente y en la utilización de complejos sistemas de medición y control a los cuales no siempre se puede acceder. La ocupación de los locales no se analiza en toda su complejidad, sin embargo es la variable operacional que decide las respuestas energéticas del sistema en su dimensión termohidráulica.

Los procesos termohidráulicos de la impulsión del agua en los SCCAH son complejos, poseen severas no linealidades y variabilidad con el tiempo. La obtención de modelos a partir de las leyes de la física resulta complicado. Esto obliga a utilizar herramientas que faciliten la modelación y evaluación del sistema donde se inserta de manera adecuada el Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería (ASSI).

Tomando como referencia los aspectos anteriores, constituye una necesidad que la operación de los CSAF debidamente insertado en los SCCAH, se realice mediante un enfoque sistémico. Es por tanto que el objetivo del presente trabajo radica en la estructuración de toda la información relacionada con la operación del sistema, para su adecuada modelación energética, facilitando la propuesta de un procedimiento que permita la determinación de las soluciones que minimizan los requerimientos de potencia eléctrica debida al bombeo y al trabajo de compresión.

En el trabajo se presentan resultados parciales de diferentes etapas del procedimiento. Las buenas soluciones parten de la selección adecuada de la ocupación de los locales a climatizar. El enfoque sistémico sienta las bases para seleccionar los parámetros adecuados de operación, demostrando la validez de la teoría del ASSI.

## Materiales y métodos

Se realizó un estudio preliminar de las variables que conforman la operación de los CSAF en el contexto de los SCCAH. Durante el análisis externo, primero se declararon las variables de coordinación relacionadas con la modelación térmica, la modelación hidráulica, el trabajo de compresión y la ocupación de los locales. Luego se define el indicador de eficiencia de carácter formalizable (potencia eléctrica requerida de forma integrada para el bombeo y para el trabajo de compresión). Se identificaron como variables de decisión, las habitaciones a ocupar y la presión de envío en el CSAF, las cuales cambian el comportamiento energético de todo el sistema. También se definieron las variables intermedias facilitando que se cumplan los parámetros permisibles durante la operación, en este caso las velocidades y presiones en los tramos y nodos de la red hidráulica. Aparecen además los datos de entrada al sistema y las variables intermedias.

Para el desarrollo de la investigación se tomó como base la metodología de ASSI [13]. Esta teoría ha demostrado su validez en: clasificar la información asociada a cada tarea, formular adecuadamente las tareas de ingeniería asociadas (insertadas en el entorno en el que deberán funcionar) y sintetizar debidamente el

sistema, adecuándolo para la solución práctica de la tarea estudiada. Estos criterios fueron sintetizados por Hechavarría en el 2009. La validez de la teoría del ASSI ha sido ratificada por múltiples trabajos científicos de diversas especialidades conducentes a grados científicos o expuestos en los seminarios Euro - Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería.

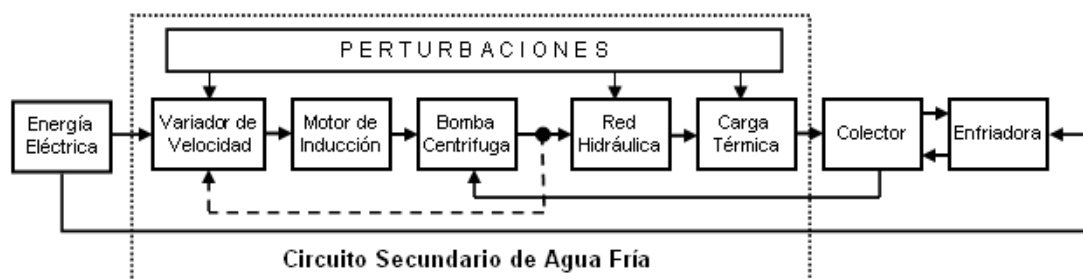
Finalmente se conforma un diagrama que muestra las iteraciones para la modelación y el análisis de la operación de los CSAF a flujo variable. A partir de las cantidades de variantes a solucionar para la selección de las mejores soluciones de la función objetivo, se presenta la necesidad de aplicar un cálculo exhaustivo para pequeñas soluciones o una heurística para grandes cantidades de soluciones. Se tiene en cuenta la convergencia del método y que se garantice el menor trabajo de cómputo.

Para determinar las cargas térmicas se utilizó el método de la ASHRAE. Los resultados fueron usados para obtener los modelos mediante redes neuronales artificiales (RNA) que mejor predicen la carga térmica a partir de la temperatura ambiente, la hora del día y el día del año. En el caso de la modelación hidráulica se utiliza el método del gradiente para evaluar los estados posibles de la red. En cuanto al trabajo de compresión fueron utilizadas las ecuaciones convencionales para determinar la potencia de compresión considerando un ciclo de una etapa y el empleo del refrigerante freón 22.

## Resultados y discusión

La climatización de los locales se materializa al hacer circular el aire de la habitación por un intercambiador de calor (*fancoil*) que utiliza el agua como fluido frío. Las válvulas de control de dos vías, disponibles en los CSAF a flujo variable, son las encargadas de permitir el trasiego del agua por la unidad ventiloconvectiva. Todas las especificaciones de los dispositivos y métodos para el equilibrado hidráulico sobre este artículo aparecen en los manuales de la empresa *Tour Anderson Hidronic* emitidos en los años 1999 y el 2000. Para una mayor precisión teórica se recomienda consultar las referencias [14]. Con el objetivo de garantizar el caudal de diseño establecido por la carga térmica máxima que demanda la habitación [15-16], se utilizan válvulas de regulación y compensación ubicadas estratégicamente en la red mallada, conocidas también como válvulas de equilibrio. El proceso que permite ajustar estos elementos para cumplir con tal fin, es conocido como "Equilibrado Hidráulico" [14]. El calor extraído por el fluido del sistema hidráulico es evacuado posteriormente en las unidades enfriadoras.

La clasificación de la información asociada a la operación de CSAF a flujo variable, así como la formulación de la función objetivo y las restricciones al modelo, se fundamenta en los resultados arrojados por varias investigaciones en aspectos relacionados con: el control automático del accionamiento electromecánico en la estación de bombeo; la modelación de la carga térmica mediante la metodología ASHRAE y la modelación del equilibrado hidráulico y del transporte del agua en una red mallada. En la figura 1 se aprecian los componentes de un CSAF a flujo variable.



**Fig. 1.** Diagrama de bloques con los componentes de un CSAF y su interacción con el SCCAH

### Análisis externo de la operación de CSAF a flujo variable

La operación de CSAF a flujo variable tiene como objetivo principal garantizar la climatización de los locales independientemente de las condiciones que imponga el *Sistema de Mayor Envergadura* (SME). Se considera SME a todo fenómeno externo que influya en el proceso de climatización, como son: condiciones climatológicas, características térmicas de la edificación, parámetros técnicos del sistema, entre otros.

### Variables de Coordinación

Las Variables de Decisión del SME, asociadas al sistema dado, constituyen las Variables de Coordinación del sistema estudiado [13]. La modelación de la operación de los CSAF a flujo variable es una tarea compleja debido a las diversas alteraciones que impone el SME. Se consideran *Variables de Coordinación* las siguientes:

Para la modelación térmica:

- Ubicación geográfica de la localidad.
- Parámetros solares de la localidad.
- Condiciones climáticas de la localidad.
- Parámetros técnicos de la edificación.
- Clasificación de los locales según su uso.

Estos elementos son utilizados para modelar el comportamiento de la carga térmica en cada una de las habitaciones de la edificación. Los parámetros técnicos de la edificación incluyen las características de las puertas, ventanas, techos, muros así como los datos de iluminación, personas, equipos e infiltración y otros.

Para la modelación hidráulica:

- Ubicación espacial de los nodos de la red.
- Topología de la red.
- Dimensiones y material de las tuberías.
- Parámetros técnicos de las válvulas de control.
- Parámetros técnicos de las válvulas de regulación.
- Parámetros técnicos de las válvulas de compensación.
- Parámetros técnicos de las unidades terminales (intercambiadores de calor).
- Parámetros técnicos de las unidades de bombeo.
- Parámetros técnicos de las unidades enfriadoras.
- Clasificación del local según su disponibilidad.
- Aceleración de la gravedad.

El trabajo por compresión de los sistemas de climatización centralizados se rige a partir de variables generales que caracterizan el ciclo de refrigeración respondiendo a las demandas del SME. Dentro de estas variables se encuentran:

- El tipo de refrigerante utilizado.
- Las temperaturas de condensación y de evaporación.
- La temperatura de envío del agua fría a la salida del evaporador.
- La temperatura de retorno del agua del CSAF a la entrada del evaporador.

La ocupación de los locales estrechamente relacionada con la carga térmica de la edificación y la configuración que adquiere la red hidráulica para cada caso particular constituye otro conjunto de variables de coordinación las cuales se relacionan a continuación:

- Total de habitaciones o locales del edificio.
- Cantidad de locales fuera de servicio, no disponibles.
- Cantidad de habitaciones disponibles.
- Cantidad de habitaciones priorizadas (escogidas a preferencia de los clientes).
- Cantidad de habitaciones a ocupar (solicitud de entradas en la recepción del hotel).

### Indicadores de eficiencia

La reducción del consumo de energía es el criterio fundamental en las formulaciones matemáticas que abordan la operación de las unidades enfriadoras en los sistemas de climatización centralizados por agua helada. En las estaciones de bombeo a flujo variable que impulsan el fluido al CSAF, la reducción del consumo de energía está caracterizada por la selección de un valor de consigna de la presión en la unidad de bombeo [6, 17]. Por estas razones se considera como *Indicador de Eficiencia* de carácter formalizable, la

minimización de los requerimientos de potencia eléctrica para cada situación de la operación del CSAF a flujo variable. Este proceso integra:

- Los requerimientos de potencia eléctrica para el trabajo de compresión en la unidad enfriadora.
- Los requerimientos de potencia eléctrica para el bombeo en el CSAF.

La pérdida de energía en la red de distribución de agua incluye las pérdidas por fricción y las pérdidas producidas por singularidades en la red, las cuales determinarán si el rendimiento del sistema, en un estado particular, puede ser bueno porque haya poca pérdida de la energía disponible; o no tan bueno, debido a una gran pérdida de la energía disponible. Por otra parte, el consumo de energía por trabajo de compresión en las unidades enfriadoras es función de la carga térmica extraída de los locales por el sistema hidráulico.

### Variables de decisión

Con el objetivo de obtener el mejor compromiso entre los componentes del indicador de eficiencia del proceso, se consideran *variables de decisión* las siguientes:

- Habitaciones a Ocupar (HO).
- Valor de consigna de la presión en la unidad de bombeo.

HO indica cuantos locales se van a ocupar en el edificio que no estén preseleccionados. La selección de las HO que formarán parte de las Habitaciones Días Ocupadas (HDO) trae consigo el siguiente análisis:

$$t = nd + d \quad (1)$$

$$nd = HDO + H_{fs} + HO_p \quad (2)$$

$$MVC = 2^{HO} \quad (3)$$

$$MVCR = \frac{d!}{(d - HO)! \cdot HO!} \quad (4)$$

Donde:

- $t$  - total de habitaciones o locales del edificio
- $d$  - cantidad de habitaciones disponibles.
- $HO_p$  - cantidad de habitaciones a ocupar priorizadas (escogidas a preferencia de los clientes).
- $H_{fs}$  - cantidad de habitaciones fuera de servicio (por razones técnicas o fuera de orden).
- $nd$  - cantidad de habitaciones no disponibles para el análisis.
- $MVC$  - Mayor Valor del Código de solución (cantidad de opciones posibles).
- $MVCR$  - Mayor Valor del Código Restringido (cantidad de opciones reales de HO en  $d$ ).

Partiendo del estado inicial de cuales son las habitaciones no disponibles y las disponibles, la decisión de cuales habitaciones se van a ocupar, condiciona la apertura o cierre de circuitos en la red hidráulica según las diferentes variantes. Estas topologías provocan que las pérdidas de energía del fluido alcance diferentes valores, en correspondencia con las singularidades de la red en cada análisis. El trabajo de compresión en la unidad enfriadora también se ve afectado por las HO según sus valores de carga térmica.

### Variables intermedias

Generar variantes de HDO trae consigo alteraciones en la modelación térmica e hidráulica, dando como resultado diferentes valores de velocidad y presión en el CSAF. Estos resultados deben ser evaluados para comprobar si cumplen con los parámetros permisibles. De este modo, resultan de interés en el proceso de toma de decisiones, las *Variables Intermedias* siguientes:

- Velocidad del líquido en cada tramo de tubería.
- Altura de presión en cada nodo

### Datos de entrada al sistema

Para una mayor claridad en la información de los datos de entrada al sistema, se propone la clasificación siguiente:

Datos para la modelación térmica

- Temperatura ambiente.
- Hora del día.
- Habitaciones a ocupar.

Datos para la modelación hidráulica

- Viscosidad cinemática del agua (en función de la temperatura del fluido).
- Rugosidad equivalente (en función del material y edad de las tuberías).
- Coeficiente de resistencia local (tipo de accesorio).
- Valores mínimos y máximos de Velocidad y Presión (rangos permisibles).

Datos para la determinación del consumo eléctrico en la unidad de bombeo

- Densidad del agua (en función de la temperatura del fluido)
- Rendimiento de la bomba.
- Coeficiente de seguridad de la potencia necesaria para la bomba.

Datos para la determinación de la potencia eléctrica en el compresor

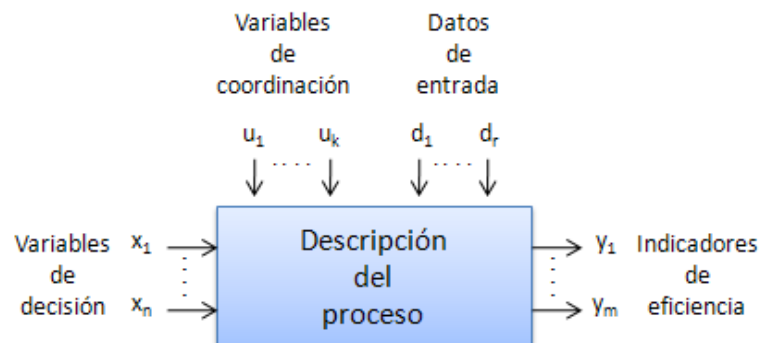
- Presión en el evaporador.
- Presión en el condensador.
- Rendimiento isentrópico.
- Entalpías del ciclo de refrigeración.
- Flujo de agua para condiciones de máxima carga térmica.
- Factor de simultaneidad de la carga

Datos para la penalización:

- Valor de penalización para incumplimiento de velocidad mínima.
- Valor de penalización para incumplimiento de velocidad máxima.
- Valor de penalización para incumplimiento de presión mínima.
- Valor de penalización para incumplimiento de presión máxima.

### Análisis Interno

Este análisis tiene como objetivo elaborar el procedimiento computacional para calcular las salidas (Indicadores de Eficiencia) en función de las entradas [13], ver figura 2.



**Fig. 2.** Información involucrada en el Análisis Externo

### Función Calidad

Al tener en cuenta los parámetros que intervienen en el indicador de eficiencia, potencia eléctrica para el trabajo de compresión y potencia eléctrica para el bombeo, la función calidad queda expresada de la forma siguiente:

$$Z = \min(P_t) \quad (5)$$

$$P_t = P_{ec} + P_{eb} \quad (6)$$

Donde:

$Z$  - potencia eléctrica total.

$P_t$  - sumatoria de la potencia eléctrica necesaria.

$P_{ec}$  - potencia eléctrica necesaria para realizar trabajo de compresión.

$P_{eb}$  - potencia eléctrica necesaria para el bombeo.

### Cálculo de las penalizaciones

Las restricciones establecidas por el destino de servicio de los CSAF a flujo variable, imponen valores de velocidad y presión enmarcados en rangos permisibles.

$$1\text{- Presión} \quad (\text{Nodos}) \quad P_i^{\inf} \leq P_i \leq P_i^{\sup}$$

$$2\text{- Velocidad} \quad (\text{Tramos}) \quad Vel_i^{\inf} \leq Vel_i \leq Vel_i^{\sup}$$

La función  $Pen$  elaborada por Hechavarría en el 2009, se establece para penalizar las soluciones obtenidas en la función calidad (5), cuando no cumplen con los requerimientos antes mencionados.

$$Pen = \sum_i^n 0^{25} \theta_i (P_i^{\inf} - P_i) + \sum_i^n 0^{25} \mu_i (P_i - P_i^{\inf}) + \sum_i^n 0^{25} \delta_i (Vel_i^{\inf} - Vel_i) + \sum_i^m 0^{25} \gamma_i (Vel_i - Vel_i^{\sup}) \quad (7)$$

Donde:

$$\theta_i = \begin{cases} 1, & \text{Si } P_i < P_i^{\inf} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}; \quad \mu_i = \begin{cases} 1, & \text{Si } P_i > P_i^{\sup} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{Si } Vel_i < Vel_i^{\inf} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}; \quad \gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{Si } Vel_i > Vel_i^{\sup} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$n$  - cantidad de nodos.

$m$  - cantidad de tramos.

### Indicador de Eficiencia

El Indicador de Eficiencia Generalizado (IEG) para cada variante de red se calcula a partir de la función calidad más las penalizaciones por concepto de velocidades y presiones no permisibles.

$$Z' = Z + Pen \quad (8)$$

Donde:  $Z'$  es el indicador de eficiencia generalizado para cada variante de operación del CSAF.

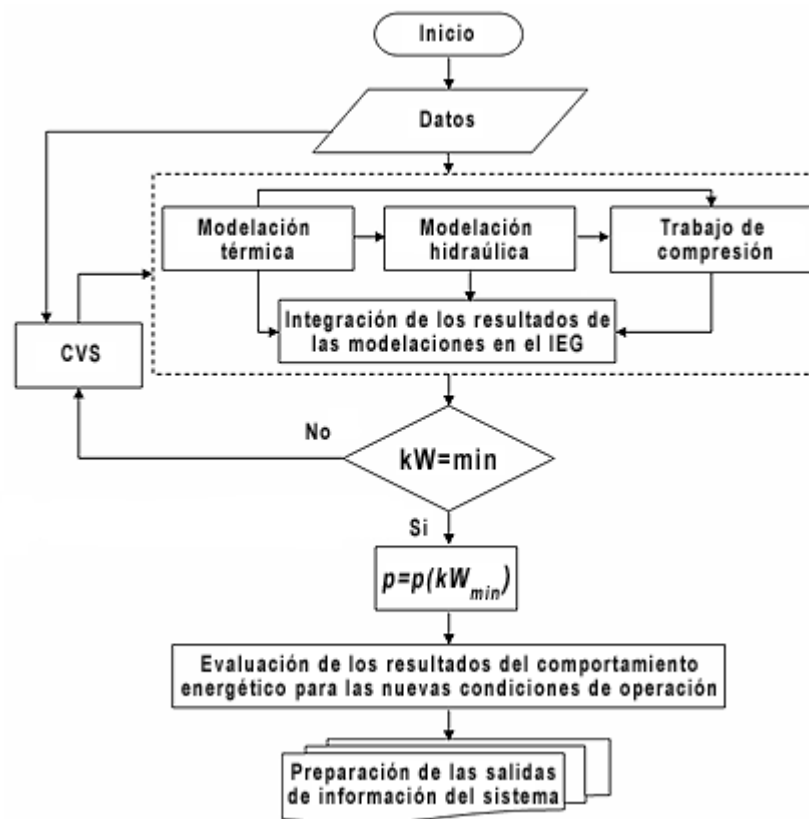
### Procedimiento para la preparación y toma de decisiones en la operación de los Circuitos Secundarios de Agua Fría a flujo variable

La modelación energética de los Sistemas de Climatización Centralizados se ha desarrollado de manera progresiva en las dos últimas décadas. Existen algunas aplicaciones e investigaciones que modelan y se especializan en una de las partes del sistema como es el caso de la carga térmica, las redes hidráulicas, las unidades terminales, los accionamientos eléctricos o el control del sistema. Sin embargo, se busca

continuamente una mejor integración de las partes componentes sobre todo para evaluar el desempeño energético.

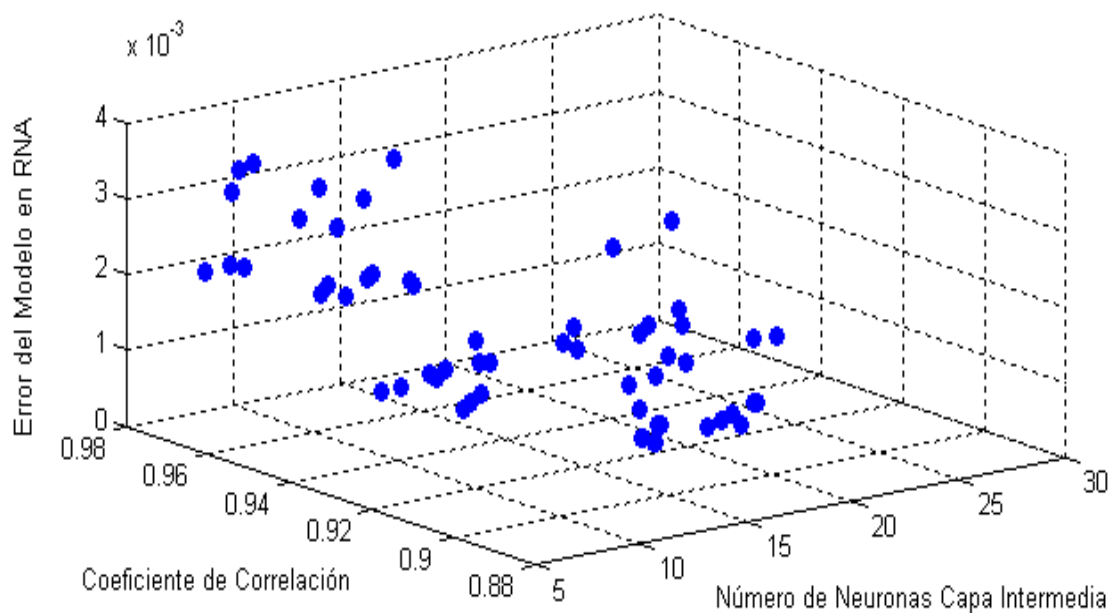
A la secuencia y procedimientos utilizados para resolver las ecuaciones se le denomina **estrategia general de modelado**, y de esta depende en gran medida la precisión de los resultados y los recursos de computación requeridos [16]. Las investigaciones sobre la simulación simultánea del edificio, el sistema secundario y el sistema primario se inició desde hace varios años. Sin embargo, algunos de los más conocidos programas de análisis de la energía todavía no aplican este enfoque, aun cuando ya están disponibles programas como el ESP-r, que permiten la simulación simultánea del edificio y los sistemas de Climatización Ventilación y Aire Acondicionado.

En la figura 3 se presenta en forma de diagrama de bloques, el procedimiento general propuesto para la modelación energética de la operación de los CSAF. CVS significa los códigos variables de soluciones, equivalentes a las diferentes variantes de ocupación del edificio y  $p$  es el valor de la presión de consigna que se debe mantener para condiciones de mínimo requerimiento de potencia eléctrica del sistema en su conjunto.



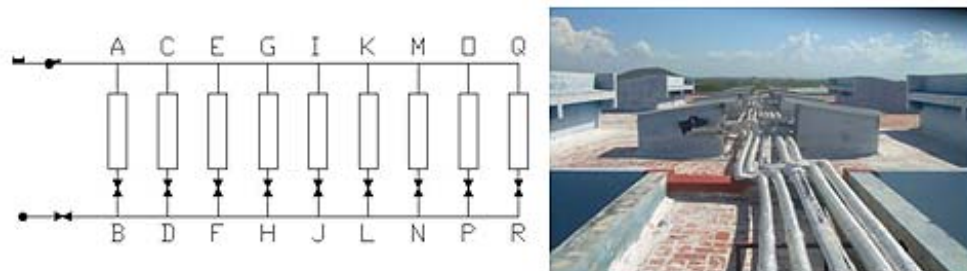
**Fig. 3.** Diagrama de bloques del procedimiento

Para una mejor comprensión de los resultados de la implementación del procedimiento y por razones de espacio se presentaran figuras y esquemas en un caso de estudio, correspondiente a una edificación hotelera de tres plantas compuesta por 59 habitaciones. La estrategia general del modelado se sustenta en realizar inicialmente una modelación de la carga térmica de cada local del edificio seleccionado. Luego, los resultados se sistematizan en modelos basados en RNA de las 59 habitaciones capaces de realizar funciones predictivas. En la figura 4 se presenta la cantidad de neuronas en la capa intermedia, el coeficiente de correlación entre los valores predichos por la RNA con respecto a los valores reales y los errores de los modelos. La estructura de la RNA que satisface estos resultados es la *feedforward backpropagation* con una capa intermedia y funciones de *transferencia tansig* en la primera capa y *purelin* en la capa de salida. A partir de los valores de la carga térmica se definen los caudales necesarios para mantener el confort a través de las unidades terminales.



**Fig. 4.** Resultados generales de la modelación de la carga térmica mediante RNA

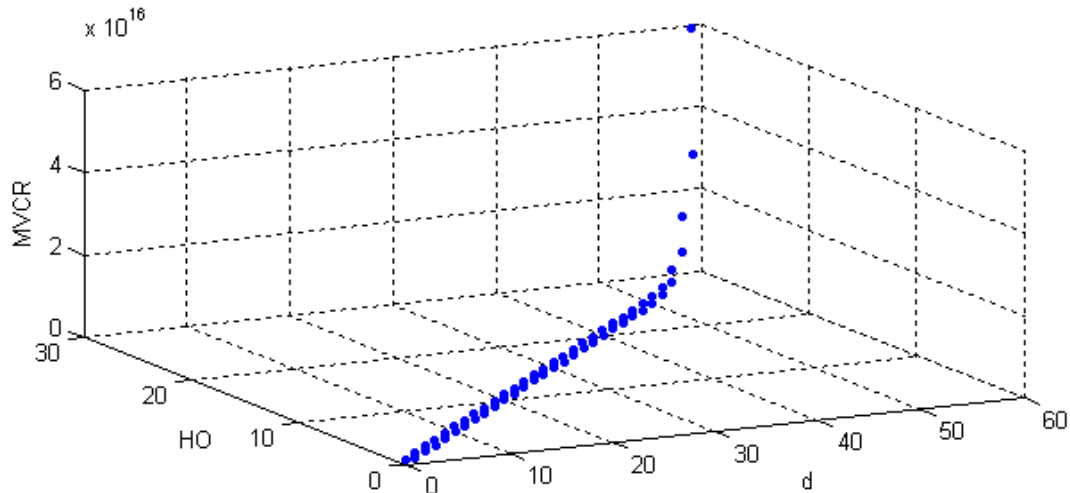
El paso siguiente consiste en efectuar una adecuada modelación hidráulica de la red (ver figura 5) debidamente equilibrada para cada variante de ocupación de los locales. A través del modelado hidráulico para cada variante se puede definir el caudal total y la presión necesaria en el sistema.



**Fig. 5.** Imagen parcial y esquema simplificado de la red hidráulica

Estos parámetros del bombeo son evaluados en una función objetivo determinándose la energía eléctrica necesaria para trasegar el agua. También se determina mediante el ciclo de compresión del gas refrigerante los parámetros necesarios para estimar el trabajo de compresión para eliminar el calor absorbido por el agua en la carga térmica.

La solución que se plantea en este procedimiento consiste en aplicar el método de integración de variables, para lo cual, se generan una cantidad de códigos de solución con ayuda de operadores que actualizan los miembros de una población. Las posibles soluciones están ligadas a un código que genera las opciones de ocupación de los locales (ver figura.6). Se crea una población inicial y se va actualizando de forma iterativa la función calidad ordenándose los códigos de acuerdo a los valores de la función objetivo.



**Fig. 6.** Valores máximos de las combinatorias para 59 habitaciones en función de  $d$  y  $HO$

El criterio de solución de la función calidad dependerá del valor que alcance MVCR. La base de selección del método para determinar los requerimientos de potencia eléctrica del sistema en función de cada variante de ocupación, radica en la cantidad de códigos a evaluar y de la capacidad de cálculo de la máquina utilizada. Es decir, pueden ocurrir las tres situaciones siguientes a manera de ejemplo:

- Si  $MVCR \leq 10000$  y  $HO \leq t/2$  entonces se aplica la búsqueda exhaustiva de soluciones
- Si  $MVCR \geq 10000$  y  $HO \leq t/2$  entonces se aplica la búsqueda escalonada de soluciones.
- Si  $MVCR \geq 10000$  y  $HO \geq t/2$  se aplica la búsqueda de soluciones mediante la aplicación del algoritmo genético para lo cual se puede seleccionar el tamaño de la población inicial y las mejoras aleatorias que se deseen realizar.

En cuanto a la búsqueda escalonada, la misma puede asumir diferentes valores de escalonamiento y se puede asociar a diferentes variantes de preselección como: analizar todas las variantes, analizar por grupos de habitaciones, o por un grupo de habitaciones que signifiquen las de menor potencia individual. Durante el escalonamiento se va actualizando la cantidad de habitaciones disponibles para nuevas búsquedas. Los estilos de preselección pueden estar asociados a condiciones físicas reales de la instalación de climatización o variables no formales de explotación. Un ejemplo de búsqueda escalonada se puede apreciar en la figura 7, en donde se obtienen las habitaciones que minimizan los requerimientos de potencia al ocupar 6 en 24 disponibles, para lo cual hay que evaluar 134596 variantes, solucionándose el problema en 1.2 segundos. El total de habitaciones en cada grupo para el escalonamiento fue de dos. Se puede solicitar el valor del código variable para cualquier combinación.

**Optimización - Reineris Montero [Enero del 2012] Diseño y Programación: Dr.C. A.A. Legrá Lobaina**

Matriz de Datos    Número Total de Habitaciones = 59    Grabar Tabla de Datos    Leer Datos desde Archivo    Obtener Cargas Térmicas    Blanquear Tabla de Datos

|               |            |            |            |            |             |            |            |            |           |           |       |
|---------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-------|
| ID H          | 1          | 2          | 3          | 4          | 5           | 6          | 7          | 8          | 9         | 10        | 11    |
| Habitable     | 0          | 1          | 1          | 1          | 1           | 1          | 1          | 0          | 0         | 1         | 1     |
| Ocupación     | 1          | 1          | 1          | 1          | 1           | 1          | 1          |            |           | 0         | 0     |
| Carga Térmica | 0.79024508 | 0.06000793 | 0.39856785 | 0.34749921 | 0.014234301 | 0.75048872 | 0.97068777 | 0.33943143 | 1.1154278 | 1.2121473 | 0.849 |
| Grupo         | 1          | 1          | 1          | 1          | 1           | 1          | 2          | 2          | 2         | 2         | 2     |

Habitaciones: Habitaciones= 47    Ocupadas= 23    Calcular Potencias Térmico-Hidráulicas    ☐ Usa Modelo Térmico-Hidráulico Complejo    G    FO =

Fecha de Reservación: Día 6    Mes 5    Año 2012    127    00    10    Estilos de pre-selección: ☒ Todos    ☐ Por grupos    ☐ Los K de menor Potencia P

Tabla de Habitaciones Disponibles y Desocupadas    Escriba los grupos (separe por comas):    K = 24

|               |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|---------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| IDk           | 1         | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         | 11         | 12         | 13         |
| IDh           | 10        | 11         | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         | 19         | 20         | 21         | 22         | 23         | 24         |
| Carga Térmica | 1.2121473 | 0.84926599 | 0.95587971 | 0.24600297 | 0.39562554 | 0.37663608 | 0.29785792 | 0.57604399 | 0.74384757 | 0.17062615 | 0.61444518 | 0.32357477 | 0.11013876 |
| Grupo         | 2         | 2          | 3          | 3          | 3          | 3          | 4          | 4          | 4          | 4          | 4          | 4          | 4          |

Reordenamiento (según Energía) de habitaciones a ocupar    Habitaciones listas para ocupar = 24

|               |            |            |            |            |            |            |            |            |           |            |            |            |            |    |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|----|
| IDk           | 13         | 10         | 14         | 4          | 7          | 12         | 6          | 5          | 15        | 8          | 11         | 9          | 2          | 11 |
| IDh           | 24         | 21         | 25         | 15         | 18         | 23         | 17         | 16         | 27        | 19         | 22         | 20         | 11         | 5  |
| Carga Térmica | 0.11013876 | 0.17062615 | 0.24171058 | 0.24600297 | 0.29785792 | 0.32357477 | 0.37663608 | 0.39562554 | 0.4530938 | 0.57604399 | 0.61444518 | 0.74384757 | 0.84926599 | 0  |
| OD ord        | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9         | 10         | 11         | 12         | 13         | 14 |

Total de Habitaciones a Seleccionar 6    Total de Combinaciones = 134596    Máxima Combinatoria Exhaustiva 100000    Máxima Combinatoria Escalonada 24

Ver Combinación Número 100    000000000100000100000000 (16640)    Eval = 7937    FO = 19.48396826

☐ Graba Exhaustivo    La carga térmica para esta selección es 19.246322425 kW  
☐ Usar datos anteriores en ME (si están disponibles)    Método de Optimización: Escalonada  
 Total de habitaciones en cada grupo durante la optimización escalonada 2    Se calcularon todos los resultados  
 Se escalonó en grupos de 2 habitaciones  
 Tiempo de cálculo 1.201939393939353 Seg

Pob. Inicial 23    Mejoras Aleatorias 10000

**Seleccionar Varias Habitaciones**    100%

Fig. 7. Ventana principal de la aplicación que integra los resultados del procedimiento

## Conclusiones

- 1- El análisis energético del SCCAH mediante el ASSI, ha favorecido la estructuración de toda la información relacionada con la operación del sistema para su adecuada modelación, identificándose las variables de decisión y el IEG que indiquen un uso más racional de la energía eléctrica.
- 2- La selección de los locales que formarán parte de las HDO tendrá repercusión en el consumo de energía eléctrica por trabajo de compresión y por bombeo. La generación de variantes de HO debe ser estudiada en función del universo de posibles soluciones del MVCR que cumplan con las exigencias del SME. De la cantidad de combinaciones posibles dependerá el criterio de solución de la función objetivo.
- 3- El procedimiento que se presenta como estrategia de modelado, integra la modelación térmica del edificio, la modelación hidráulica de la red, las expresiones para el cálculo del trabajo de compresión y la determinación de la ocupación que garantiza el menor requerimiento de potencia del sistema, favoreciendo el proceso de toma de decisiones durante la explotación hotelera.

## Agradecimientos

Al Centro de Estudios CAD/CAM de la Universidad de Holguín por la estancia de investigación que permitió aportar significativamente a este resultado; al Doctor José Monteagudo Yanes; al Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos; a los Departamentos de Matemática de la Universidad de Holguín; a los trabajadores del departamento de Servicios Técnicos del Hotel Blau Costa Verde y a los Ingenieros Morera y Yoel del departamento de Instalaciones Especiales de la Empresa de Proyectos VERTICE en Holguín, Cuba.

## Referencias

1. Oficina Nacional de Normalización. Cuba. *Bases para el diseño y construcción de inversiones turísticas parte 6: requisitos de mecánica*. NC 45-6.1999. 1999
2. Chow, T. "Applying Neural Network and genetic algorithm in chiller system optimization". En: *Building Simulation*, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001. [Consultado el: 5 de octubre de 2008], Disponible en: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2001/BS01\\_1059\\_1066.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2001/BS01_1059_1066.pdf)
3. Xiong, F.L. "Fuzzy Model-based fault-tolerant control of air-conditioning systems". En: *Building Simulation*, Kyoto, Japan, September 13-15, 1999. [Consultado el: 10 de marzo de 2007], Disponible en: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS1999/BS99\\_B-06.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS1999/BS99_B-06.pdf)
4. Ryozy, O. "Optimal design method for buildings & urban energy systems using genetic algorithms". *Building Simulation*, Beijing, China, September 03-06, 2007. [Consultado el: 20 de febrero de 2008]. Disponible en: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p059\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p059_final.pdf)
5. Armas, J. C., et al. "Optimización termoeconómica de sistemas de climatización por agua helada a partir de técnicas de inteligencia artificial". *Ingenierías*. 2008, vol. XI, nº. 40. [Consultado el: 10 de enero de 2009]. Disponible en: [http://www.ingenierias.uanl.mx/40/40\\_Optimizacion.pdf](http://www.ingenierias.uanl.mx/40/40_Optimizacion.pdf) ISSN 1405-0676
6. Zhenjun, Ma., et al. "Energy efficient control of variable speed pumps in complex building central air-conditioning systems". *Energy and Buildings*, 2009, vol. 41. nº. 2. ISSN 0378-7788
7. Jarmo, S. "Optimization model for integration of cooling and heating systems in large industrial plants". *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, p. 15-22 [Consultado el: 5 de diciembre 2010], Disponible en: <http://peer.mpg.de/pubman/faces/viewItemFullPage.jsp?itemId=peer:61705:1> ISSN 1359-4311
8. Liu, G. "Application Study of the Pump Water Flow Station for Building Energy Consumption Monitoring and Control Optimization. HVAC Technologies for Energy Efficiency". En: *Sixth International Conference for Enhanced Building Operations*, Shenzhen, China, November 6-9, 2006. Disponible en Web: <http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/5287>
9. WU, XY. "Energy saving analysis of pressure difference control of frequency conversion variable water flow system". En: *Building Simulation*, Beijing, China, September 03-06, 2007 [Consultado el: 20 de febrero de 2008]. Disponible en: [www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p062\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p062_final.pdf)
10. Xinqiao, Jin. "Energy evaluation of optimal control strategies for central VVW chiller systems". *Applied Thermal Engineering*. 2007, vol. 27, nº. 5. p. 934-941. [Consultado el: 1 de noviembre 2009], Disponible en: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=BrowseListURL&\\_type=subject&\\_title=E&sc=15&content=journals&content=books&entitle=sub&entitle=nsu&\\_acct=C000228598&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=758886d00b244f3e6e888fd4390ab87f](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=BrowseListURL&_type=subject&_title=E&sc=15&content=journals&content=books&entitle=sub&entitle=nsu&_acct=C000228598&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=758886d00b244f3e6e888fd4390ab87f) ISSN 1359-4311
11. Lianzhong, L. "Hybrid fuzzy logic control strategies for hot water district heating systems". En: *Building Simulation*, Beijing, China, September 03-06, 2007 [Consultado el: 20 de febrero de 2008]. Disponible en: <http://bse.sagepub.com/content/28/1/35.short>
12. Chen, X. "Hydraulic modeling of large district energy systems for planning purposes". En: *Building Simulation*, Beijing, China, September 03-06, 2007 [Consultado el: 20 de febrero de 2008]. Disponible en: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p476\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p476_final.pdf)
13. Arzola Ruiz, J. *Sistemas de Ingeniería*. La Habana: Editorial Félix Varela, 2000. ISBN 959-258-079-0
14. Petitjean, R. *Total Hydronic balancing*. Edition TA HYDRONICS. 1997. 530p. ISBN 9789163162008
15. CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY. *Manual de Aire Acondicionado*. España: Mc Graw Hill Company, 1972. 848 p.
16. McQuiston, F. *Calefacción Ventilación y Aire Acondicionado: Análisis y diseño*. México: LIMUSA, 2008. 622 p. ISBN 13 978-968-18-6170-4
17. Montero, R., Góngora Valdivia, Y., et al. "Caudal variable en la climatización centralizada de hoteles (parte 1)". *Revista Retos Turísticos*. 2011, vol. 9, nº 3, p. 38-45. ISSN 1681-9713