

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
CENTRO DE ESTUDIO DE ENERGÍA Y TECNOLOGÍA AVANZADA DE MOA

**PROCEDIMIENTO PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE
LA OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN
CENTRALIZADOS TODO-AGUA EN HOTELES**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

REINERIS MONTERO LAURENCIO

Moa, 2013



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA



Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa

**PROCEDIMIENTO PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE
LA OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN
CENTRALIZADOS TODO-AGUA EN HOTELES**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

Autor: Asistente, Ing. REINERIS MONTERO LAURENCIO, Ms.C

Tutores: Prof. Aux., Lic. Arístides Alejandro Legrá Lobaina, Dr.C

Prof. Tit., Ing. Jesús Rafael Hechavarría Hernández, Dr.C

Prof. Tit., Ing. Aníbal Enrique Borroto Nordelo, Dr.C

Moa, 2013

AGRADECIMIENTOS

- A la Revolución Cubana por darme la oportunidad de formarme en su inigualable sistema educacional.
- A mis padres por encaminarme en la vida, cohibiéndose de muchas cosas y enseñándome a enfrentar los más difíciles momentos, lo que me ha servido en todos los ámbitos.
- A mis queridos hijo y esposa, por comprender todo el tiempo que no pude darles.
- A mis hermanos Ronel y Rosana por estar siempre oportunos y preocupados, reproduciendo todas las enseñanzas de nuestros padres.
- A mis tíos por parte de madre por enseñarme que primero se aprende a ser hombre, y después todo lo demás. A mis tías por brindarme su cariño como una madre más.
- A mi suegra y su familia por todo el apoyo que me han brindado.
- A mi tutor Dr.C. Arístides Alejandro Legrá Lobaina, por demostrarme que la perseverancia es parte componente del resultado científico y por su inigualable evangelio con la enseñanza y la ciencia, por su extraordinario estilo de investigación capaz de irradiar voluntades a la comunidad científica.
- Al Dr.C. Jesús Rafael Hechavarría Hernández, ante todo por su amistad y por su nivel científico, capaz de dirigir la investigación hacia términos sistémicos.
- Al Dr.C. Aníbal Enrique Borroto Nordelo, siempre presente a pesar de la distancia, por su sabiduría y la corrección oportuna del camino de la investigación.
- Al Dr.C. Orlis Torres Breffe y a su esposa, por toda la ayuda profesional y por su amistad sincera.
- Al Dr.C. Carlos Pérez Tello por su incondicional apoyo en lo personal y en lo científico durante mi estancia de investigación en la Universidad Autónoma de Baja California.
- A las familias de los doctores Legrá y Jesús por soportar robarles parte del tiempo de estas valiosas personas.
- A los doctores en ciencias técnicas Secundino Marrero y Daniel Guzmán por aceptar mis primeros pasos en este laborioso y enaltecedor camino del doctorado.
- A los doctores y demás profesores del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, de la Universidad de Cienfuegos y de la Universidad de Holguín, que estuvieron dispuestos a escucharme y ayudar, como muestra de la multidisciplinariedad necesaria en la educación superior.

- A mis diplomantes y maestrantes por toda su colaboración para obtener los resultados de equipo.
- A mis colegas del Centro de Estudio, del Departamento de Ingeniería Eléctrica y del Departamento de Ingeniería Mecánica en especial a: Ever, Ignacio, Yoalbys, Galano, Héctor, Rodney, Enrique, Mendiola, Rojas, Oscar, Sierra, Lisandra, Lionnis, entre otros.
- Al Dr.C. Yuri Almaguer por su ayuda en términos de brindar calidad a determinados gráficos de la tesis con una alta complejidad para su representación.
- Al personal de la Biblioteca, del departamento de Inversiones, del Hotelito de Postgrado y sobre todo de la oficina INTERFAZ, por su amistad, colaboración y enseñanzas.
- A Yolanda Durán por iniciarme como trabajador en el ISMMM, lo cual ha significado un sentido de mi vida, logrando una pertenencia que alimenta mis ambiciones profesionales.
- A todos los profesores que han participado en mi formación, desde la primaria hasta la universidad.
- No hubiera sido posible realizar la investigación, sin la colaboración de las siguientes empresas e instituciones que tributaron a la integralidad de las soluciones, entre las cuales no puedo dejar de mencionar: el Hotel Blau Costa Verde Beach Resort, el grupo EROS de la Empresa de Servicios Técnicos de Computación, Comunicaciones y Electrónica del Níquel, el Centro de Meteorología Provincial, el departamento de Instrumentación de la Empresa Comandante “René Ramos Latour”, el departamento de Instrumentación de la Empresa Comandante “Pedro Sotto Alba” (MoaNickel S.A) y el departamento de Instalaciones Especiales de la Empresa de Proyectos VERTICE. Un papel esencial en esta colaboración lo han tenido, el Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California de México, la Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya” y el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
- A mis amigos...

A todos los que he mencionado y a los que no he recogido en estos agradecimientos, pero que siempre se preocuparon:

Muchas Gracias...

DEDICATORIA

A la Revolución Cubana.

A Crístofer Daniel y Moraima.

A toda mi familia.

SÍNTESIS

Se establece un procedimiento que integra, un modelo energético de la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable en hoteles, 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 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. Se implementa el procedimiento en un edificio del hotel Blau Costa Verde, automatizándose las tareas mediante una aplicación informática.

| TABLA DE CONTENIDOS | Pag. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA MODELACIÓN ENERGÉTICA EN LA OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS TODO-AGUA | 10 |
| 1.1 Eficiencia energética y turismo en Cuba | 10 |
| 1.1.1 Eficiencia energética de los sistemas de climatización de hoteles | 12 |
| 1.2 Sistemas de climatización centralizados todo-agua en hoteles | 13 |
| 1.2.1 Generalidades de los sistemas de climatización centralizados todo-agua | 13 |
| 1.2.2 Estructura de los circuitos secundarios de agua fría | 14 |
| 1.2.3 Consideraciones energéticas sobre los circuitos secundarios de agua fría | 15 |
| 1.3 Aspectos térmicos fundamentales de la climatización centralizada | 16 |
| 1.3.1 Fundamentos teóricos generales para la modelación térmica de edificios | 18 |
| 1.3.2 Cargas térmicas | 18 |
| 1.3.3 Simulación térmica de edificios | 20 |
| 1.3.4 Equipo de enfriamiento | 21 |
| 1.3.5 Unidades terminales | 22 |
| 1.4 Aspectos hidráulicos fundamentales de la climatización centralizada | 22 |
| 1.4.1 Fundamentos teóricos generales para la modelación hidráulica | 22 |
| 1.4.2 Equilibrado hidráulico de las redes para climatización a flujo variable | 23 |
| 1.4.3 Métodos de cálculo de las redes malladas | 24 |
| 1.4.4 Bombas centrífugas a caudal variable | 24 |
| 1.5 Procedimiento de operación de los circuitos secundarios de agua fría a flujo variable | 25 |
| 1.5.1 Estrategias de operación | 26 |
| 1.5.2 Relación entre la topología de la red hidráulica y la bomba centrífuga | 26 |

| | |
|---|-----------|
| 1.5.3 Relación entre la estrategia ocupacional y la operación | 27 |
| 1.6 Modelación y simulación de los sistemas de climatización centralizados | 30 |
| 1.6.1 Modelación y simulación térmica de los sistemas de climatización centralizados | 32 |
| 1.6.2 Modelación y simulación hidráulica de los sistemas de climatización centralizados | 34 |
| CONCLUSIONES del capítulo | 38 |
| 2 PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS TODO-AGUA CON CIRCUITOS SECUNDARIOS DE AGUA FRÍA A FLUJO VARIABLE | 39 |
| 2.1 Análisis externo de la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable | 40 |
| 2.1.1 Descripción del Sistema de Mayor Envergadura | 40 |
| 2.1.2 Variables de coordinación | 41 |
| 2.1.3 Indicador de eficiencia | 41 |
| 2.1.4 Variable de decisión | 42 |
| 2.1.5 Variables intermedias | 43 |
| 2.1.6 Datos de entrada al sistema | 43 |
| 2.2 Análisis interno de la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable | 45 |
| 2.2.1 Formulación del sistema de ingeniería del objeto de estudio | 45 |
| 2.2.1.1 Función objetivo e indicador de eficiencia | 45 |
| 2.2.2 Modelación matemática de la carga térmica de enfriamiento | 47 |
| 2.2.3 Modelación matemática de la red hidráulica para el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el bombeo | 50 |
| 2.2.4 Modelación matemática para el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el trabajo de compresión en la unidad enfriadora | 55 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.5 Algoritmo resumen para el cálculo de la función objetivo | 61 |
| 2.3 Algoritmos para la organización de los procedimientos de cálculo | 62 |
| 2.3.1 Algoritmo del procedimiento para la optimización energética de la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua a flujo variable | 63 |
| 2.3.2 Algoritmo para la generación del código binario de una variante de ocupación de habitaciones de un hotel si se conoce su número de orden | 65 |
| 2.3.3 Optimización mediante el método exhaustivo simple | 66 |
| 2.3.4 Optimización mediante el método exhaustivo escalonado | 67 |
| 2.3.5 Optimización mediante computación evolutiva | 68 |
| CONCLUSIONES del capítulo: | 70 |
| 3 IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA PROPUESTO EN UN CASO DE ESTUDIO | 71 |
| 3.1 Presentación del circuito secundario de agua fría del caso de estudio | 71 |
| 3.2 Implementación de los algoritmos del procedimiento | 73 |
| 3.2.1 Descripción de la aplicación informática | 74 |
| 3.3 Validación de los principales algoritmos del procedimiento | 77 |
| 3.3.1 Modelo para obtener el código binario de la ocupación | 77 |
| 3.3.2 Modelación de la carga térmica de enfriamiento | 78 |
| 3.3.2.1 Modelación térmica del edificio mediante simulador | 78 |
| 3.3.2.2 Modelación térmica del edificio mediante redes neuronales artificiales | 81 |
| 3.3.3 Modelación de la red hidráulica | 82 |
| 3.3.4 Modelación del trabajo de compresión | 86 |
| 3.4 Validación de la optimización energética | 87 |
| 3.4.1 Integración de la variable de decisión a la función objetivo | 87 |
| 3.4.2 Resultados de la optimización exhaustiva simple | 89 |

| | |
|---|------------|
| 3.4.3 Resultados de la optimización exhaustiva escalonada | 91 |
| 3.4.4 Resultados de la optimización mediante algoritmo genético | 92 |
| 3.4.5 Análisis de los resultados de las variantes de operación del sistema | 93 |
| 3.5 Patrón de ocupación energético de habitaciones: variante para garantizar una Estrategia de Ocupación bajo Criterios Energéticos | 93 |
| 3.6 Valoración técnico-económica y medioambiental del uso de una Estrategia de Ocupación bajo Criterios Energéticos para el hotel caso de estudio | 95 |
| CONCLUSIONES del capítulo: | 98 |
| CONCLUSIONES GENERALES | 99 |
| RECOMENDACIONES | 100 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | |
| ANEXOS | |

INTRODUCCIÓN

Muchos indicadores del desarrollo de un país están definidos por el acceso a la energía. La creciente infraestructura económica de los sectores productivos y de servicio se sustenta fundamentalmente en la satisfacción de la demanda energética para cada caso en particular. Asociado al modelo energético global se encuentran los problemas ambientales. Debido a que las necesidades energéticas del mundo se duplicarán en el año 2050, la eficiencia energética es la alternativa que representa el mayor potencial de reducción de las emisiones de gases efecto invernadero a corto y mediano plazo [1].

La industria turística, que concentra el 11,8 % de las inversiones y el 10,9 % de la fuerza de trabajo mundial, se proyecta como el sector de mayor crecimiento en la segunda década del siglo XXI, con un promedio de crecimiento actual superior al 3,8 % [2, 3]. El turismo internacional no ha sido seriamente afectado por las últimas coyunturas económicas [3], no obstante, la problemática energética sigue incidiendo en la explotación hotelera.

En consecuencia, los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución en Cuba [4], enfatizan la necesidad de aumentar la competitividad del turismo, estrechamente ligada a la política energética. En ellos se ha declarado que un objetivo fundamental de la actividad turística es maximizar el ingreso medio por turista. Además se indica: trabajar en el acomodo de la carga eléctrica, alcanzar el potencial de ahorro identificado, concebir nuevas inversiones con soluciones para el uso eficiente de la energía, así como el perfeccionamiento del trabajo de planificación y control. Asimismo, debe priorizarse el mantenimiento y la renovación de la infraestructura e implementar medidas para disminuir el índice de consumo de agua y de portadores energéticos.

Los hoteles representan aproximadamente el 8 % de las 1000 empresas más consumidoras de

energía en Cuba, según datos del Grupo Nacional de Eficiencia Energética [5], por lo que en estas instalaciones se debe mejorar la racionalidad en el empleo de los energéticos, garantizando el servicio que desea el cliente. A partir de diagnósticos energéticos realizados en hoteles del polo turístico de Holguín [6-14], el tercero de importancia del país, se determinó que los principales portadores energéticos empleados son: Electricidad (80 - 95 %), Gas Licuado del Petróleo (5 - 9 %), Diesel (3 - 7 %) y Gasolina (2 - 5 %). Como consecuencia las acciones para un uso más eficiente de los energéticos deben estar dirigidas fundamentalmente a la electricidad. Existen cuatro áreas fundamentales en las que se concentran las tecnologías en los hoteles: la climatización, la domótica, los servicios de alimentos y bebidas, y los servicios telemáticos. Todas ellas en su conjunto deciden la funcionalidad de la explotación hotelera. En especial, la climatización juega un papel decisivo en el comportamiento energético, causando aproximadamente el 60 % de los gastos de energía eléctrica [15-19].

En la explotación hotelera los costos energéticos constituyen la partida más elevada tras los gastos de personal y de alimentación [20]. El turismo en Cuba, por su crecimiento dinámico, está obligado al uso de tecnologías que mejoren su eficiencia energética, especialmente en el área de la climatización. Para la climatización de hoteles se utilizan fundamentalmente dos alternativas: los acondicionadores de aire de ventana y la climatización centralizada. Los sistemas centralizados se dividen en: todo - aire, aire - agua y todo-agua. El sistema todo-agua es uno de los más utilizados en Cuba, conocido como sistema de agua helada [19].

Estas tecnologías son objeto de continuas mejoras en su diseño y explotación, basadas en lo fundamental en el empleo de: los variadores de velocidad (VV), la acumulación térmica, válvulas inteligentes para la regulación óptima, pizarras de control avanzado, motores de alta eficiencia, bombas eficientes, tuberías con mejores propiedades para el transporte, métodos de equilibrio hidráulico, estrategias de ocupación de los hoteles, entre otras. En la actualidad cubana estas variantes no se explotan en todas sus potencialidades, en particular lo referido a la estrategia de ocupación de las habitaciones en función de reducir el consumo energético, sin

afectar la calidad del servicio.

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 las habitaciones a ocupar (HAO), las cuales deben 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 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. En este caso, 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).

En muchos hoteles cubanos el acondicionamiento del aire se realiza mediante los sistemas de climatización centralizados todo-agua (SCCAH). A pesar de que dichos sistemas son técnicamente eficientes [21, 22], aún constituyen uno de los grandes consumidores de energía. Por tal motivo, en la presente investigación se asumirá el modelo energético del SCCAH como modelo energético del hotel y función objetivo para determinar la ocupación que minimiza los requerimientos de potencia eléctrica.

El transporte del agua mediante los circuitos de bombeo en los SCCAH consume aproximadamente el 10 % de la energía eléctrica total de un hotel y las bombas operan los 365 días del año, las 24 horas del día. Un subsistema esencial dentro de los SCCAH lo constituyen

los circuitos secundarios de agua fría (CSAF), encargados de enviar el fluido a través de una red hidráulica mallada hasta las unidades terminales.

Aproximadamente el 90 % de los SCCAH presentes en los hoteles cubanos se han diseñado a flujo constante. El cambio para obtener un flujo variable adaptado a la demanda térmica real, representa una inversión con tiempo de recuperación de aproximadamente dos años, con la posibilidad de disminuir el consumo de energía eléctrica hasta un 50 % [23]. Pueden, además, obtenerse ahorros relacionados con un menor tiempo de trabajo de las enfriadoras.

En los SCCAH con CSAF a flujo variable, mediante el empleo de los VV se ahorra energía ya que no es necesario mantener la presión de envío todo el tiempo en su valor máximo. Para optimizar esta magnitud debieran tenerse en cuenta las cambiantes condiciones climatológicas en las que se explota el edificio, pero esto no siempre se hace [19, 24, 25]. También, en ocasiones la instalación hidráulica montada puede diferir de la prevista: las rugosidades de las tuberías son distintas a las que definen las tablas y las bombas pueden estar sobredimensionadas [26].

A pesar que están normadas las características sobre las cuales se deben diseñar y operar estos sistemas [27, 28], generalmente los proyectos de climatización no responden a enfoques energéticos integrales. Durante el diseño y explotación no siempre se tienen en cuenta la variabilidad de las condiciones futuras de operación, la creatividad de los proyectistas depende de múltiples factores y el acceso a las tecnologías eficientes depende en la mayoría de los casos de factores objetivos.

Los procedimientos de operación de los CSAF a flujo variable constituyen por sí mismos sistemas de criterios para la toma de decisiones dirigidas a cumplimentar un objetivo: disminuir el consumo energético manteniendo el confort a través de la selección adecuada de la presión de trabajo del sistema. Estos criterios se basan en el comportamiento de los componentes del circuito, vistos a través de sus variables y modelos matemáticos (térmicos e hidráulicos).

Estos procedimientos de operación, usualmente son definidos en la etapa de diseño y se informan a los clientes del equipamiento, estableciéndose una vez concluidas las inversiones. **La**

generalidad consiste en proponer parámetros para las condiciones máximas de explotación [27]. Siendo el clima uno de los aspectos importantes que se debe tener en cuenta para el análisis de cualquier sistema de climatización, no siempre se integra de manera adecuada la climatología local a las concepciones operacionales. En la práctica esto significa que los sistemas de operación de los SCCAH no integran la variabilidad de la climatología local con el modelo termo-hidráulico (energético) y esto no asegura una EOCE del hotel.

Si se asume que el procedimiento de ocupación de un hotel consiste en encontrar el valor mínimo de la potencia eléctrica que requiere el SCCAH cuando se evalúan las posibles ocupaciones, entonces para lograr 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.

A partir de los criterios planteados anteriormente se declara como **problema científico** 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.

Se considera como **objeto** de estudio de la presente investigación los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable en hoteles, y como **campo de acción** la eficiencia energética en la operación del objeto de estudio.

El **objetivo general** consiste en establecer un procedimiento para la optimización energética de la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable en hoteles.

Como **hipótesis** se asume la siguiente:

Sea una función objetivo que expresa el requerimiento de potencia eléctrica de los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable en hoteles, donde en la misma 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.
- El ciclo de refrigeración por compresión mecánica del vapor.
- La temperatura de salida del agua de la enfriadora.
- La ocupación de las habitaciones.

Entonces, un procedimiento que para la búsqueda de mejores ocupaciones en hoteles aplique una estrategia combinatoria-evolutiva a dicha función objetivo, permitirá minimizar el consumo de energía eléctrica de estos sistemas.

La **novedad científica** consiste en el procedimiento concebido mediante un enfoque sistémico para optimizar la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable en hoteles.

El **aporte teórico** es el modelo energético constituido en función objetivo para minimizar el consumo de energía eléctrica en la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable en hoteles.

Los **aportes prácticos** se centran en los siguientes aspectos:

- a. La aplicación informática, que entrena y valida las redes neuronales artificiales (RNA) que modelan la carga térmica de enfriamiento de cada local de una edificación, para cualquier día del año y cualquier temperatura.
- b. La modelación y simulación de los circuitos secundarios de agua fría a flujo variable, que bajo determinadas restricciones, identifica los parámetros de operación más racionales desde el punto de vista energético, a partir de las diferentes topologías de la red hidráulica.
- c. El procedimiento que permite el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el trabajo de compresión en la unidad enfriadora de un sistema de climatización centralizado todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable.

- d. El algoritmo para generar variantes de ocupación, a partir de un código variable de solución restringido con respecto a la relación entre los locales disponibles y a ocupar.
- e. El procedimiento de optimización basado en la combinación de los métodos: exhaustivo simple, exhaustivo escalonado y algoritmo genético.

Para alcanzar el objetivo general se plantean a continuación los siguientes **objetivos específicos**:

- I. Realizar el estudio sistémico de la operación los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable que permita definir la composición e interrelación de las variables involucradas.
- II. Identificar los modelos matemáticos para predecir la carga térmica de enfriamiento en cada local de una edificación, a partir de la simulación térmica para un año característico.
- III. Establecer la modelación hidráulica del circuito secundario de agua fría a flujo variable que permita calcular la potencia eléctrica requerida, considerando las variables y dispositivos involucrados, así como las diferentes restricciones operacionales.
- IV. Realizar el cálculo de potencia eléctrica requerida para el trabajo de compresión del ciclo de refrigeración de una etapa en un sistema de climatización centralizado todo-agua considerando los efectos termo-hidráulicos de la operación del circuito secundario de agua fría a flujo variable y las características del refrigerante utilizado.
- V. Integrar los modelos anteriores en un procedimiento para la optimización energética del objeto de estudio bajo un enfoque sistémico.
- VI. Aplicar los resultados alcanzados en un caso de estudio.

Se definen como **tareas** las siguientes:

- IA. Sistematización y búsqueda de inconsistencias en el conocimiento actual sobre el tema, presentando un conjunto de conocimientos relacionados con: la modelación energética y la operación de los SCCAH, la modelación y simulación térmica e hidráulica en edificios y los factores que determinan la eficiencia energética de los SCCAH.
- IB. Caracterización de las estructuras físicas y las regularidades de los componentes

relacionados con los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable en hoteles, analizando el procedimiento actual para su operación, en aras de establecer la modelación conceptual y la modelación matemática del sistema.

- IIA. Sistematización de las características climatológicas de la localidad y constructivas del edificio que contribuyan a la adecuada simulación térmica.
- IIB. Desarrollo de una aplicación que permita el entrenamiento y la validación de las RNA para la modelación de la carga térmica de enfriamiento.
- IIIA. Desarrollo de un procedimiento y la aplicación informática que mejor se adapte a la modelación hidráulica de los circuitos secundarios de agua fría a flujo variable.
- IVA. Desarrollo de un procedimiento y la aplicación informática para el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el trabajo de compresión en la unidad enfriadora del SCCAH.
- VA. Estudio de los métodos y algoritmos asociados al proceso de optimización, seleccionando los más adecuados para la generación de variantes de solución.
- VB. Implementación de los procedimientos, métodos y algoritmos requeridos para la reducción del consumo de energía eléctrica en los SCCAH con CSAF a flujo variable en hoteles.
- VIA. Aplicación a un caso de estudio del procedimiento general establecido.

Los principales **métodos** de investigación empleados se relacionan a continuación:

- Método de compilación de conocimientos [29]: mediante entrevistas, encuestas, intercambios de conocimientos y revisión de bibliografía, para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- Método de investigación empírico: para contribuir a la descripción y caracterización del objeto de estudio y las principales regularidades de su fenomenología.
- Método de análisis y síntesis: se empleó para determinar los factores claves que influyen en el fenómeno, interrelacionar los efectos presentes que constituyen explicaciones al problema, analizar los nexos internos y las dependencias recíprocas.
- Método de integración de variables en Sistemas de Ingeniería: para generar variantes de

ocupación en un hotel, a partir de un código variable de solución restringido a la relación entre las habitaciones disponibles y a ocupar.

- Métodos matemáticos: para facilitar la evaluación computacional de los estados del sistema y la optimización.

Los resultados se presentan en una introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y anexos. En el primer capítulo aparecen los antecedentes y estado actual de la modelación energética de la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua en hoteles a través de un marco teórico - metodológico. Este capítulo aborda las generalidades de la situación energética del turismo; la caracterización de los SCCAH, sus regularidades energéticas, con énfasis los CSAF que lo conforman; y las insuficiencias en el procedimiento de operación de estos sistemas de climatización a flujo variable. Se muestran aspectos teóricos básicos de los componentes térmicos, hidráulicos y de potencia, reflejando la complejidad operacional.

En el capítulo dos se desarrolla la formulación matemática de la tarea de operación de los SCCAH con CSAF a flujo variable, mediante un procedimiento que concluye con una nueva modelación energética, como base para una adecuada estrategia energética ocupacional. Contiene además las concepciones de los algoritmos para resolver la modelación y la optimización del sistema. En el tercer capítulo se muestran los resultados de la optimización de la operación del sistema mediante la implementación del procedimiento en un caso de estudio. Se destaca la aplicación informática que favorece la obtención de las soluciones.

Como parte de la investigación, el autor desarrolló un conjunto de trabajos relacionados con: publicaciones en revistas (8), publicaciones en eventos científicos (22), trabajos de diploma (19), tesis de maestría (5), registro no informático (1), premios anuales provinciales de Innovación Tecnológica (2) y proyectos de investigación (5). Estos trabajos se relacionan en el Anexo 1.

**1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA MODELACIÓN ENERGÉTICA EN
LA OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS
TODO-AGUA**

1 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA MODELACIÓN ENERGÉTICA EN LA OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS TODO-AGUA

En el capítulo se abordan las generalidades de la situación energética global y se particulariza en el ámbito nacional y en el turismo. Se caracterizan los SCCAH, sus regularidades energéticas y principalmente los CSAF que lo conforman. Aparece la fundamentación teórica básica de los componentes térmicos, hidráulicos y de potencia, reflejando la complejidad del sistema. El objetivo del capítulo es presentar un sistema de conocimientos actualizado sobre la modelación energética de la operación de los sistemas de climatización centralizado todo-agua a flujo variable, donde se argumente la insuficiente integración de la variabilidad de la climatología local y la ocupación al modelo energético termo-hidráulico del sistema, lo cual afecta negativamente su operación energéticamente eficiente.

1.1 Eficiencia energética y turismo en Cuba

Independientemente de la modalidad turística, se necesitan políticas energéticas muy ligadas al desempeño empresarial, es por eso que para lograr un desarrollo energético sostenible se señalan tres direcciones fundamentales: la elevación de la eficiencia energética, la sustitución de fuentes de energía y el empleo de tecnologías para atenuar los impactos ambientales [30].

A pesar de la crisis energética y económica global se continúa apostando por el desarrollo del turismo como uno de los principales renglones de la economía cubana, declarándose un conjunto de estrategias para incrementar la actividad [31]. Estos cambios incrementan el consumo energético, por lo que se necesita una sinergia entre los diseños, las tecnologías, la satisfacción del cliente, y la disminución de los costos de operación.

La gestión tecnológica dedicada al aumento de la efectividad del uso de la energía en el sector

turístico reviste gran importancia [8, 32]. Todas las acciones para incrementar la actividad turística implicarán un nivel de compromiso entre la creación o rehabilitación de infraestructuras y el ahorro energético que debe prevalecer según la resolución 117/2004. Dentro de las estrategias de la eficiencia energética que guardan estrecha relación con el desempeño energético del turismo se encuentran: la automatización, el cambio de motores ineficientes, certificación de manera obligatoria de la eficiencia energética en los nuevos proyectos a través de la norma cubana NC 220, mejoras del aislamiento térmico, y **el uso eficiente de la climatización** [33].

Para que un hotel funcione eficientemente desde el punto de vista energético, debe utilizar entre un 5 y un 7 % de sus ingresos totales para cubrir los gastos energéticos [34, 35]. El indicador utilizado como regla general para evaluar el desempeño energético en los hoteles es el índice de consumo de energía eléctrica por habitación día ocupada (kW·h/HDO), el cual no es un indicador efectivo y debe ser perfeccionado, como lo han señalado diversos autores [6, 11, 36, 37].

En los hoteles cubanos existe un control energético diario, en el cual incide significativamente el personal de servicios técnicos (SS.TT). A pesar de los esfuerzos en el control de los portadores energéticos en las distintas cadenas hoteleras, los costos energéticos sobrepasan en ocasiones el 10 % de los costos totales [36, 38, 39]. Una de las causas del elevado costo energético, es que no siempre se tienen en cuenta el empleo de tecnologías eficientes. A la falta de tecnologías eficientes se le suma un conjunto de irregularidades que se presentan durante la ejecución de las obras, manifestándose luego en la operación del hotel.

Otro elemento que aporta sustancialmente a la eficiencia energética es la automatización de los procesos. Generalmente se automatizan los hoteles de 4 y 5 estrellas que tienen mayor complejidad operacional. Dentro de los tres niveles en los que se puede clasificar la automatización, el estado medio de los hoteles cubanos es el primer nivel (básico).

A pesar que los indicadores económicos del turismo, utilidades y aportes a la economía nacional, reflejan crecimiento sostenido en los últimos años, se considera que aún existen posibilidades de

incrementarlos. Para ello se señala la necesidad de trabajar en las dificultades detectadas, dentro de las que se destaca, la eficiencia en los sistemas de aire acondicionado [40]. Los sistemas de climatización, que consumen la mayor parte de la energía eléctrica de los hoteles cubanos [18, 19, 37, 41, 42], también son objeto de perfeccionamiento tecnológico. La eficiencia energética durante su explotación está fuertemente relacionada con las características de las edificaciones, la climatología local y la estrategia de ocupación de las habitaciones del hotel.

1.1.1 Eficiencia energética de los sistemas de climatización de hoteles

Los SCCAH constituyen un conjunto de equipamientos y aditamentos termo-hidráulicos y de potencia que permiten en grandes edificaciones el acondicionamiento del aire. Existen dos posibilidades de climatización de hoteles independientemente de su estilo constructivo, la climatización distribuida [43] y la climatización centralizada. La climatización distribuida se puede realizar mediante equipos de ventana, mediante *splits* o unidades manejadoras autónomas que pueden satisfacer los requisitos de confort por zonas. En el caso de la climatización centralizada se presta servicio a una mayor cantidad de recintos.

La climatización centralizada más difundida en las regiones tropicales como Cuba resulta la del tipo todo-agua, la cual tiene la oportunidad de recuperar el calor de la etapa de condensación del ciclo de refrigeración y posee bajos índices de consumo en cuanto a los kW/t de refrigeración.

Un nuevo indicador que puede favorecer la toma de decisiones en la operación de un hotel que cuente con SCCAH a flujo variable, sería el requerimiento conjunto de energía eléctrica por bombeo y por trabajo de compresión, venciendo de forma adecuada las características específicas que imponga la carga térmica para una ocupación determinada. Por tal motivo, una EOCE favorecería la toma de decisiones en la explotación hotelera, incidiendo en los costos de operación sin afectar los parámetros de calidad del servicio.

La ocupación puede estar relacionada también con otros criterios (el tipo de cliente, los ingresos que reportan, las exigencias de las habitaciones que se solicitan, el servicio que prestan las camareras y otros parámetros de explotación) de carácter formalizables o no, los cuales pueden

ser nuevas restricciones en el proceso de toma de la decisión ocupacional.

1.2 Sistemas de climatización centralizados todo-agua en hoteles

Con el transcurso de los años se ha optado por utilizar los SCCAH en muchas edificaciones y en particular en las hoteleras. Esta elección se basa en su mayor eficiencia energética, menor costo de mantenimiento y de mano de obra [19, 44]. En los últimos 15 años, en la etapa inversionista ha prevalecido el criterio de utilizar los SCCAH, independientemente del estilo constructivo de las edificaciones. Esto se debe a que su eficiencia ha alcanzado valores de 0,5 kW/t [22, 45], y a las posibilidades de recuperación de calor para el sistema de Agua Caliente Sanitaria (ACS).

1.2.1 Generalidades de los sistemas de climatización centralizados todo-agua

El empleo de los SCCAH posee una infraestructura hidráulica con requerimientos térmicos de aislamiento que garantizan el transporte eficiente del agua fría. El desempeño de las bombas centrífugas, las unidades terminales y el uso de las zonas a climatizar, convierten a esta tecnología en un sistema operacionalmente complejo. La configuración más utilizada es mediante enfriadoras trabajando en paralelo. Los condensadores de estos sistemas pueden ser enfriados por aire o por agua. En el caso del intercambiador gas-agua permite la recuperación de calor, el cual es incorporado al circuito primario de agua caliente (CPAC), como fuente de calor para el ACS. En la Figura 1 de Anexo 2 se aprecia una imagen de un SCCAH típico.

Otras generalidades consisten en el uso de compresores recíprocos y de tornillo; configuración simétrica de las unidades y compresores; capacidades instaladas que oscilan desde las 60 hasta 1000 toneladas de refrigeración; empleo del refrigerante R22; unidades terminales; bombas a flujo constante y válvulas de tres vías [19, 41].

La unidad enfriadora absorbe el calor del edificio por medio del evaporador, donde se enfría el agua que luego es distribuida por medio de redes hidráulicas a las zonas con temperaturas de envío y retorno generalmente de 7 °C y 12 °C, respectivamente [44, 46, 47]. Como refrigerante primario se utiliza fundamentalmente el R22 y como secundario el agua [47-49].

El agua proveniente del intercambio térmico en las zonas, se envía hacia los evaporadores a

través del circuito primario de agua fría (CPAF), y hacia las unidades terminales con los CSAF. Por lo general, siempre se le da mayor importancia a los CSAF, pero en varios diseños estructurales el mismo circuito que impulsa el agua hacia las edificaciones, tiene la función de retornarla al evaporador. En el Anexo 2 aparecen las conexiones de los lazos de producción de frío y de distribución más utilizados en los SCCAH a flujo variable.

En los últimos 10 años se ha consolidado el uso mundial de variadores de velocidad (VV) en los SCCAH. En Cuba aún no se utiliza esta estrategia de operación en las bombas del CPAF. En el caso de los CSAF los VV están presentes en aproximadamente el 10 % de los casos.

Aunque en los hoteles las cargas térmicas siempre tienen un carácter parcial, aún no se ha generalizado el uso de los VV. Los sistemas que cuentan al mismo tiempo con CPAF y CSAF tienen una alta operatividad debido a que: las bombas secundarias pueden circular el agua por el resto del sistema sin restricciones de presión de flujo mínimo, y por la estabilidad que produce el lazo primario debido al desacople con el secundario [46].

1.2.2 Estructura de los circuitos secundarios de agua fría

La clasificación general de los componentes de la climatización centralizada considera cinco grupos: manipuladores o administradores de aire y ventiladores, fuentes de calor, dispositivos de refrigeración o enfriamiento, bombas y los controles e instrumentación, según la clasificación que hace McQuistong [47]. No obstante, es conveniente representar en la Figura 1.1 la posición funcional de cada componente de los CSAF.

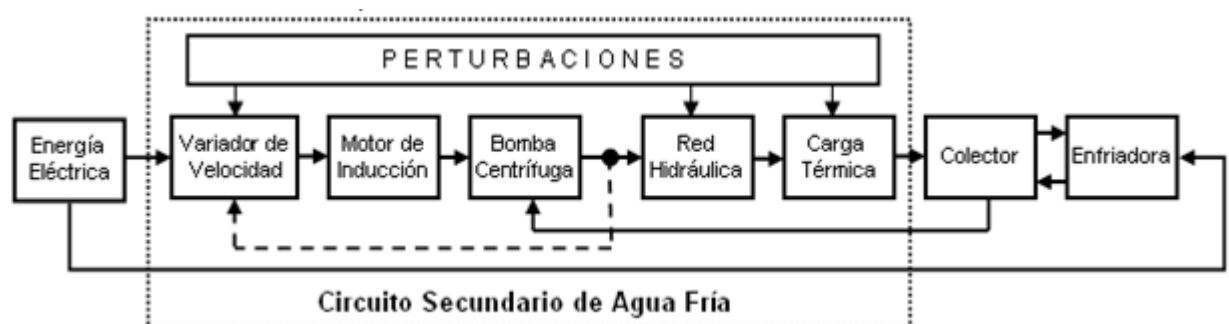


Figura 1.1. Diagrama en bloques del bombeo a flujo variable empleado en los CSAF.

En los sistemas a flujo variable el valor de la presión de descarga de la bomba debe permitir,

vencer las diferentes resistencias hidráulicas de la red. Al emplear VV no son necesarias válvulas, arrancadores suaves, bancos de condensadores y protecciones adicionales. Otra ventaja consiste en que los VV tienen incorporados un controlador que elimina la necesidad de instalar equipos adicionales debido a la autonomía que alcanzan [16, 50]. Los VV cuentan con algoritmos de control, que cada día mejoran sus funciones [51, 52]. Aun cuando muchos controladores electrónicos pueden funcionar en el modo proporcional integral derivativo (PID), un buen sistema de control para climatización no requiere de la parte derivativa [47, 53].

En el caso del motor, se utilizan los de inducción, de características probadas para estas prestaciones. En los CSAF a flujo variable, con una reducción del flujo del 50 %, el motor demanda solo el 12,5 % de la potencia correspondiente para el flujo nominal [23, 54]. Este comportamiento se ha demostrado a partir de la variación de la ocupación de habitaciones en circuitos secundarios de agua fría a flujo variable [54].

En Cuba, existen aproximadamente 80 SCCAH ubicados en hoteles. En el polo turístico de Holguín solo existen dos hoteles con flujo de agua variable en los CSAF (Blau Costa Verde y la villa del Hotel Brisas Guardalavaca), en el polo turístico de Ciego de Ávila cuatro (Iberostar Daiquiri, Playa Coco, Blue Bay y Los Balcones) y entre Varadero y La Habana dos (Sireny y el Occidental Miramar). Esta información ilustra el escaso uso de los VV.

No solo se debe tener en cuenta los kW por toneladas de refrigerante como parámetro de eficiencia en los SCCAH; otro indicador de eficiencia resulta el factor del transporte de agua, que no es más que la relación entre la potencia térmica útil entregada por el agua a los locales y la potencia consumida por el motor(es) de la bomba(as) [27]. Usualmente, las bombas se calculan para una potencia que esta entre un 15% y un 25% por encima de la necesaria [16, 55].

1.2.3 Consideraciones energéticas sobre los circuitos secundarios de agua fría

En las unidades terminales se define la eficiencia del retiro de calor de las habitaciones, para lo cual el agua debe ser transportada a grandes distancias. El agua, por su alto calor específico, puede transportar mayores cantidades de energía por volumen que el aire. Con este sistema no

solo se pueden utilizar tuberías más delgadas, sino que el costo de la energía para mover este fluido es mucho menor que el costo que tiene mover aire [47].

A pesar de que los sistemas de agua son más racionales, aún quedan posibilidades de realizar mejoras en el transporte. Por ejemplo, las pérdidas de carga en las redes hidráulicas se reducen entre un 15 y 20 % cuando se sustituyen las tuberías metálicas por las de PVC, representando un ahorro en potencia de bombeo de un 10 % como promedio [39].

Debido al flujo variable en el CSAF, la presión mínima necesaria debe mantenerse para evitar ruido en el sistema y mejorar la eficiencia. Un valor de consigna mínimo, genera el mínimo gasto energético. El punto de consumo mínimo es de 25 % de la presión de diseño y el ahorro energético es de alrededor de 33 % [16], aunque hay autores que refieren entre 12- 32 % [24].

En la Figura 1.2 se muestra como en la década de 1980 las bombas representaban el 18 % del consumo de electricidad de la climatización, pero ya en la década del 2000, por las mejoras implementadas en las enfriadoras, el porcentaje de las bombas se incrementó al 26 %, de aquí la importancia del estudio de los CSAF.

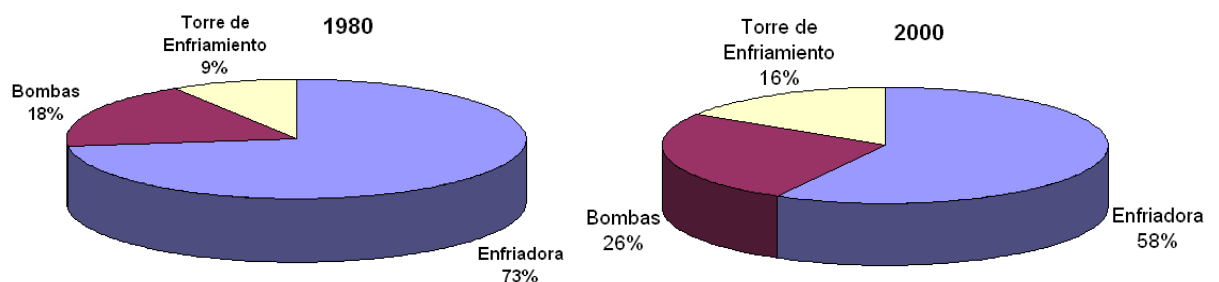


Figura 1.2. Estructura del consumo de energía eléctrica en los SCCAH [57].

De forma general, la eficiencia de los SCCAH se evalúa en términos de la menor cantidad de kW por toneladas de refrigerante en el caso de las enfriadoras y en términos de la mayor extracción de calor con el menor consumo de energía en el CSAF. Para mejorar estos dos aspectos, se necesita del uso de tecnologías competentes y su integración sistémica [24, 56].

1.3 Aspectos térmicos fundamentales de la climatización centralizada

En todos los proyectos de diseño o de evaluación de los SCCAH, la modelación y simulación térmica juega un papel fundamental por su incidencia en la dimensión del equipamiento y en el

valor de la inversión, constituyendo una valiosa herramienta para la toma de decisiones.

En todos los SCCAH los componentes se subdividen en dos, los térmicos y los hidráulicos. Los componentes térmicos consisten en las unidades terminales encargadas de retirar la carga térmica, el equipo enfriador y el tanque de expansión. Los componentes hidráulicos consisten en las redes hidráulicas, las bombas, y el tanque de expansión [46] (ver Figura 1.3).

Una estratificación de los componentes térmicos de los CSAF obligan a pensar en: las condiciones interiores, las condiciones exteriores, las unidades terminales, las propiedades térmicas de las redes de distribución y su aislamiento. El mayor intercambio térmico se produce en las unidades terminales, por lo que se debe velar por su compatibilidad.

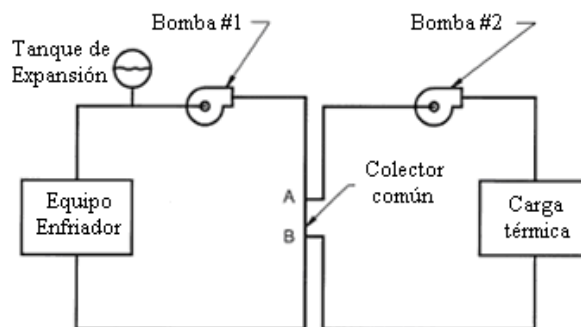


Figura 1.3. Esquema simplificado de los componentes de los SCCAH.

En los CSAF pueden presentarse dificultades con el aislamiento térmico de las redes y se necesita un tiempo adicional para trasegar el fluido, y de esta forma eliminar las ganancias de calor que se han producido a través del aislante. El uso del material PVC en las redes hidráulicas con un coeficiente de conductividad térmica K de solo $0,16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [58], ha favorecido la disminución de las ganancias de calor al fluido.

Las tuberías de PVC, con las mismas condiciones de aislamiento térmico, ganan dos veces más calor a través del aislamiento cuando están en la intemperie, que cuando viajan por el interior de las edificaciones [39]. Las formulaciones, tablas y métodos para determinar estas ganancias de calor pueden encontrarse en [59, 60]. Aunque la transferencia de calor en tuberías puede considerarse como carga térmica, las ganancias y retiros de calor más significativas se producen en las habitaciones y unidades terminales.

1.3.1 Fundamentos teóricos generales para la modelación térmica de edificios

La modelación térmica en los SCCAH corresponde fundamentalmente a procesos de transferencia de calor, los cuales se manifiestan en las siguientes etapas: cálculo de las cargas térmicas; cálculo de la ganancia de calor a través del aislante de las tuberías; la convección forzada en las unidades terminales; el desempeño del evaporador de las unidades enfriadoras y el intercambio térmico en el punto de conexión entre el CPAF, el CSAF y el colector común. La eficiencia de los intercambiadores aire-agua en las unidades terminales y el intercambiador agua-gas del evaporador en el enfriador deciden sustancialmente los procesos globales de transferencia de calor en los SCCAH. Una expresión básica que favorece el análisis de estos sistemas térmicos, constituye la expresión 1.1, relacionada con la cantidad de calor asociada con un cambio de temperatura del sistema, desde la temperatura inicial a la final, cuando la capacidad calorífica sea aproximadamente constante [61, 62].

$$q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Donde en el caso de los sistemas de climatización todo-agua se considera lo siguiente:

q – cantidad de calor; kW.

m - flujo másico; kg/s.

ΔT - diferencia de temperatura; K.

C_p - calor específico del agua; kJ/kg·K.

Esta expresión es útil para conocer, la cantidad de calor que se transfiere al agua en las unidades terminales, la determinación del flujo de agua necesario en los CPAF para una diferencia de temperatura en el evaporador y una carga térmica máxima de diseño, entre otras aplicaciones.

Otro proceso decisivo en el comportamiento térmico del SCCAH representa el ciclo de refrigeración [18, 41], en correspondencia con el refrigerante empleado y su temperatura de condensación y de evaporación dentro sus regímenes de operación.

1.3.2 Cargas térmicas

Para el cálculo de las cargas térmicas se consideran: las condiciones exteriores, el momento del

día con carga pico de enfriamiento, la ganancia de calor por radiación solar a través de vidrios, la ganancia de calor a través de componentes estructurales, concentración de personas como base de diseño, ganancias de calor originadas por equipos instalados en el interior de un espacio a acondicionar y las ganancias de calor por infiltración y ventilación.

Existen varios métodos para el cálculo de carga térmica: el método de cargas instantáneas, método del balance térmico, método E20 de Carrier, cálculo de cargas por temperatura diferencial y factores de carga de enfriamiento (CLTD/CLF) de ASHRAE y el método de las funciones de transferencia. El balance térmico es el método más preciso porque tiene en cuenta los tres mecanismos de transmisión de calor (conducción, convección y radiación), así como la acumulación de calor [47, 63, 64]. No obstante, en la presente investigación se utilizará la metodología ASHRAE con el método de las funciones de transferencia por ser uno de los más precisos. Otros métodos están considerados como simplificaciones del mismo [65].

La ganancia de calor a través de un muro o el techo depende mayoritariamente de la temperatura aire sol [47, 66], pues los demás parámetros son constantes o se relacionan con las características constructivas de la edificación. La temperatura aire-sol se define como la temperatura que tendría el aire exterior para provocar el mismo efecto convectivo de flujo del calor hacia la superficie externa del edificio, en ausencia de luz solar e intercambio de calor por radiación de onda larga [65]. Ahora, el flujo calorífico a través de una pared puede obtenerse de un balance de energía mediante la expresión 1.2.

$$q/A = \alpha I t + h_0 (t_0 - t_s) - \epsilon \delta R \quad (1.2)$$

y la temperatura aire-sol se define entonces como,

$$t_e = t_0 + \alpha I t / h_0 - \epsilon \delta R / h_0 \quad (1.3)$$

Donde:

α - absorptividad de la superficie a la luz solar; adimensional.

$I t$ - radiación solar total incidente sobre la superficie; $W/h \cdot m^2$.

h_0 - coeficiente de transferencia de calor convectivo y de longitud de onda larga en la

superficie externa ($W/h \cdot m^2 \cdot K$), depende de la velocidad del viento.

t_0 - temperatura exterior (ambiente); K.

t_s - temperatura de la superficie; K.

δR - diferencia entre la radiación de onda larga incidente procedente de la bóveda celeste y el entorno, y la radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura ambiente ($W/h \cdot m^2$).

ϵ - emitancia de la superficie; adimensional.

Por consiguiente, como la temperatura ambiente es prácticamente igual a la temperatura aire-sol sin la presencia de la radiación solar, y en su presencia puede representar hasta un 75 % para niveles altos de radiación [65], se puede considerar entonces a la temperatura ambiente como la variable climatológica de mayor incidencia en la ganancia de calor por paredes.

En este trabajo se escoge la temperatura ambiente como variable independiente para la modelación de la carga térmica de enfriamiento, para cada hora del día y cada día del año, por su relación con la radiación solar total. De los resultados de la simulación térmica (ganancias instantáneas de calor, potencia o carga de enfriamiento y rapidez de retiro de calor), se escoge la carga térmica de enfriamiento, definida como la rapidez a la cual el calor debe ser removido desde el espacio para mantener la temperatura del aire del mismo a un valor constante [65].

1.3.3 Simulación térmica de edificios

Existen programas, tales como el TRNSYS, el DOE-2, el ENERGY PLUS, el COOL PACK, entre otros, que pueden ser empleados para la simulación térmica de edificios [19, 67]. Los costos de estas aplicaciones oscilan entre 3 000,00 USD y 10 000,00 USD. Como limitaciones de estos programas se plantea que solo tienen incorporada la información meteorológica de algunas localidades, y no permiten el cambio de determinadas variables que influyen en el cálculo, como las propiedades térmicas de algunos materiales [63, 65].

Considerando estos aspectos, el simulador desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UABC se basa en la metodología ASHRAE, y se ha empleado en investigaciones conducentes a grados científicos, mostrando la capacidad de adaptarse a las necesidades de cada región. Esta

aplicación, tiene la particularidad de que puede adaptarse para generar el valor de la carga térmica de enfriamiento para cada día del año y para cada hora, atendiendo a las particularidades estructurales de la habitación, a los valores de indicadores ambientales y al comportamiento ocupacional horario. Se ha demostrado, que sus resultados en comparación con otros simuladores como el TRNSYS y el DOE-2 no difieren en más de un 5 % [65].

A partir de la simulación térmica de una instalación hotelera se pueden tomar decisiones que permiten reducciones superiores a 13 kW·h diarios por habitación en función de la orientación y uso de elementos de protección solar. También se pueden obtener ahorros entre 5 y 13 kW·h diarios por habitación según tipología, dimensiones y materiales de las paredes exteriores, materiales de las ventanas y color de la superficie exterior de la cubiertas; y reducciones inferiores a 5 kW·h por desplazamientos de los volúmenes de las habitaciones, proporciones y ubicación de las ventanas, formas, orientación y materiales de la cubierta [68].

Una variante utilizada actualmente para determinar el comportamiento térmico de las edificaciones, es el empleo de las técnicas de inteligencia artificial que posibilitan desarrollar modelos que simplifican la determinación de las cargas de enfriamiento sin la necesidad de una elevada experticia, reduciendo el tiempo de ejecución y facilitando la toma de decisiones [69-75]. No obstante, los modelos de carga de enfriamiento que se presentan en estos trabajos no recogen las condiciones para todo un año característico.

1.3.4 Equipo de enfriamiento

La selección del valor de temperatura del agua, de conjunto con la temperatura ambiente y la temperatura de entrada del agua al evaporador, definen los resultados del comportamiento energético del ciclo de compresión del refrigerante que utilice el sistema. Las enfriadoras que operan de acuerdo con el ciclo de compresión de vapor (la mayoría) tienen muchas formas, y su capacidad fluctúa entre tres toneladas y más de mil toneladas. Las unidades más pequeñas generalmente utilizan compresores reciprocantes o de espiral y condensadores enfriados por aire, en tanto las grandes unidades usan compresores centrífugos. Uno de los parámetros que definen

la eficiencia en la operación del SCCAH es la temperatura de salida del agua de las enfriadoras en relación con las características de las cargas parciales que se manifiesten [19, 37, 76].

1.3.5 Unidades terminales

La selección adecuada de las unidades terminales depende del cálculo de carga térmica de enfriamiento. Esta selección deberá tener en cuenta el cumplimiento de las normas, en el caso de Cuba, la NC-45 de 1999. La norma especifica los tipos de unidades para diferentes edificaciones, así como sus características constructivas y de instalación. Las unidades terminales empleadas en los SCCAH son las ventiloconvectoras, conocidas como fan-coil, y las climatizadoras [77]. En la Figura 3 del Anexo 3 se resaltan los datos de caudal y las pérdidas de carga, parámetros que permiten la inserción adecuada de las unidades terminales a la modelación hidráulica del CSAF.

1.4 Aspectos hidráulicos fundamentales de la climatización centralizada

En los SCCAH el refrigerante secundario (agua), es distribuido por medio de redes hidráulicas desde el equipo de enfriamiento a las unidades terminales y viceversa. Por sus características, a estas redes se les llama redes malladas de climatización y es cambiante su topología en dependencia de la cantidad y cuáles unidades terminales estén en funcionamiento. A diferencia de las redes malladas de abastecimiento, donde un punto puede abastecerse por varios caminos [58, 78], en las redes para la climatización se distinguen las tuberías de envío y retorno, además de que el agua debe seguir el sentido establecido para la extracción del calor en las habitaciones. Ambas redes requieren de métodos para lograr el equilibrio hidráulico. En la actualidad se cuenta con programas informáticos que resuelven esta problemática [79-81], y se utilizan en el cálculo hidráulico para simular diferentes estados que se producen en la red de distribución de agua, sin tener que experimentar físicamente [81, 82]. El modelo hidráulico de un CSAF a flujo variable incluye bombas, tuberías, válvulas de equilibrio y las unidades terminales.

1.4.1 Fundamentos teóricos generales para la modelación hidráulica

La modelación hidráulica constituye el eslabón fundamental para determinar los parámetros de los accionamientos encargados de garantizar las presiones en los nodos, de tal forma que

permitan mover el fluido y conseguir los caudales requeridos en las unidades terminales. El transporte del agua como fluido incomprensible posee un conjunto de regularidades en cuanto al cálculo de las pérdidas energéticas, las cuales pueden ser determinadas con la ayuda de expresiones y leyes conocidas que se resumen en: las ecuaciones de Bernoulli, las ecuaciones para determinar las pérdidas de carga, la ecuación de continuidad, la primera y segunda ley de Kirchoff y las leyes de afinidad [83, 84]. Estas expresiones y leyes físicas que rigen el comportamiento del agua como fluido se definen en la literatura [48, 83-85].

Durante las dos últimas décadas, a las redes hidráulicas para climatización se han incorporado dispositivos de propósitos específicos. Entre ellos se destacan las válvulas de control y de equilibrado que agregan pérdidas de cargas y establecen regímenes de operación favorables para el desempeño de las redes. Por otra parte, las unidades terminales provocan una determinada pérdida de carga, la cual está en función de las características constructivas de cada modelo y del caudal que circule por el serpentín (ver Figura 3, Anexo 3).

1.4.2 Equilibrado hidráulico de las redes para climatización a flujo variable

Los problemas de equilibrado se deben a que no se obtienen los caudales que se proyectaron. Sólo si se obtienen los caudales nominales, el sistema de control puede actuar eficazmente. La única manera de conseguirlos es equilibrando la instalación, mediante válvulas juiciosamente repartidas en la red hidráulica [86-88]. Un SCCAH se diseña para poder trabajar con cargas térmicas máximas. Si la instalación por no estar equilibrada, no puede producir o distribuir esta potencia, entonces no será rentable la inversión. Con una inversión del 1% del costo de la instalación, el equilibrado permite distribuir y emitir la potencia máxima instalada [87].

Las herramientas necesarias para realizar el equilibrado de las redes son: las válvulas de equilibrado, un instrumento de medida y un procedimiento de equilibrado. Las válvulas de equilibrado tienen como objetivo ofrecer la mayor precisión en los caudales y en consecuencia contribuir a la optimización del funcionamiento del sistema de control y de los consumos energéticos. En el Anexo 4 se aprecian figuras y características relacionadas con las válvulas de

equilibrado del objeto de estudio, los demás detalles se pueden encontrar en la literatura [86, 87]. A pesar de que las válvulas que más se utilizan en las redes de distribución son las válvulas de equilibrado, no se pueden dejar de mencionar las válvulas de control que se usan a la entrada de las unidades terminales. Las válvulas de control comúnmente utilizadas en los sistemas a caudal variable son las motorizadas de operación on-off [27], sin embargo, pueden ser de acción modulante cuando se exige una regulación muy precisa de la temperatura de los locales.

1.4.3 Métodos de cálculo de las redes malladas

La mayoría de los métodos de solución propuestos en el campo de las redes de distribución se pueden agrupar en dos grandes familias: los primeros, basados en las conocidas técnicas iterativas de Gauss-Seidel y Jacobi, los cuales resuelven el sistema al efectuar en cada iteración la resolución secuencial de cada una de las ecuaciones (al emplear fundamentalmente el Método de Cross y sus derivados); y los segundos, basados en la linealización del sistema de ecuaciones, de forma que el problema original se transforme en la resolución simultánea de un sistema de ecuaciones lineales [79, 81].

Actualmente se destaca el Método del Gradiente, el cual implementa un modelo para la resolución de sistemas de tuberías a presión. El modelo está representado por un sistema de ecuaciones lineales expresadas en forma matricial y tiene como principal ventaja que evita el ensamblado de las matrices, por lo que disminuye la cantidad de procesos a realizar en comparación con otros métodos [78]. Este es un aspecto importante durante los procedimientos de optimización. Algunas ventajas del método radican en que: asegura solución única al no tener problemas de convergencia; permite expresar la topología de la red, las pérdidas de carga y la continuidad de caudales en términos de ecuaciones matriciales; emplea un modelo real de redes y no es necesario estimar una solución inicial cercana al valor real [78].

1.4.4 Bombas centrífugas a caudal variable

En los sistemas de climatización generalmente se utilizan bombas centrífugas (BC) [47]. Los motores eléctricos, las bombas y los ventiladores son las máquinas que más se utilizan en el

mundo [89]. Esto significa que el diseño y operación eficiente de las electrobombas centrífugas ofrece un gran potencial para el ahorro de energía.

La regulación de la velocidad de rotación en el motor que acciona la BC, se presenta como un método energéticamente eficaz para regular el caudal. Desde el punto de vista de mantenimiento, es un buen sistema de regulación que evita golpes de ariete al disponer de rampas de frenado suaves, y evita las altas intensidades de la corriente de arranque del motor al efectuar arranques progresivos, además, se consigue simplificar la manipulación, al funcionar de manera autónoma. Las leyes de proporcionalidad describen la dependencia que existe entre el flujo (caudal), presión y el consumo energético. Al variar dentro de pequeños límites la frecuencia de rotación N de una BC, los cambios de su caudal Q , altura de presión H y potencia eléctrica P se determinan según las leyes de proporcionalidad [84, 85]. El trabajo en conjunto de varias BC se utiliza para aumentar la altura o el caudal en una instalación y no existe una máquina que sea capaz por si sola de satisfacer estos parámetros. Este trabajo en conjunto se diferencia entre la conexión en serie y en paralelo [90].

1.5 Procedimiento de operación de los circuitos secundarios de agua fría a flujo variable

El procedimiento para la operación de los CSAF, presupone que se hayan tenido en cuenta correctamente: la determinación de las cargas térmicas, selección de las unidades terminales, ubicación de los nodos de la red hidráulica, trazado de las tuberías, selección de las válvulas de control, selección de las unidades de bombeo y la selección de la unidad enfriadora [91].

El éxito de la operación está marcado por las herramientas utilizadas para la proyección del sistema, donde se destacan: el cálculo de las cargas térmicas mediante software especializados que facilitan la simulación térmica del edificio, y el cálculo de los parámetros de operación de la red hidráulica a partir de la inclusión de los elementos de equilibrado que garantizan los caudales de diseño. Para el cálculo de las cargas térmicas se destacan internacionalmente dos metodologías: la Carrier y la ASHRAE [21, 66, 92]. La operación conjunta de las válvulas de dos vías en las unidades terminales y el accionamiento electromecánico a velocidad variable, deben satisfacer las condiciones de confort en las habitaciones ocupadas.

1.5.1 Estrategias de operación

Se pueden considerar varias estrategias para mejorar los parámetros de explotación de los CSAF:

1. Incorporación de procedimientos de diagnóstico de la funcionalidad de las instalaciones [93].
2. Uso de motores de alta eficiencia [89, 94].
3. Mejoras tecnológicas de las BC y del material de fabricación de las redes hidráulicas.
4. Configuración y equilibrado de la red mallada. El descontrol de este aspecto provoca pérdidas hasta de un 20 % de la energía eléctrica [26, 95].
5. Selección adecuada del aislamiento térmico [59, 60].
6. Disminución de las pérdidas de energía mediante la selección adecuada del valor de la presión de envío.
7. Estrategia ocupacional. Se ha planteado la variante de ocupación de los hoteles en función de las cargas térmicas de cada local [19, 96]. Esta solución resulta sencilla en sistemas a caudal constante, pero a caudal variable se necesita un enfoque que considere el modelo termo-hidráulico, es función de la ocupación de las habitaciones.
8. Selección adecuada de las variables que caracterizan la operación del sistema, sobre todo del punto de medición de la presión para controlar el sistema, considerando las tecnologías disponibles [16].
9. Implementación de controladores que favorezcan la manipulación de los accionamientos prefijando valores racionales de operación en bombas y unidades terminales [24, 97].
10. Selección adecuada de los métodos de solución de las redes malladas para garantizar eficiencia y eficacia en los cálculos necesarios durante el proceso operacional [78, 79, 81].

1.5.2 Relación entre la topología de la red hidráulica y la bomba centrífuga

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 1.4). R_i expresa la relación funcional entre la altura de carga 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.

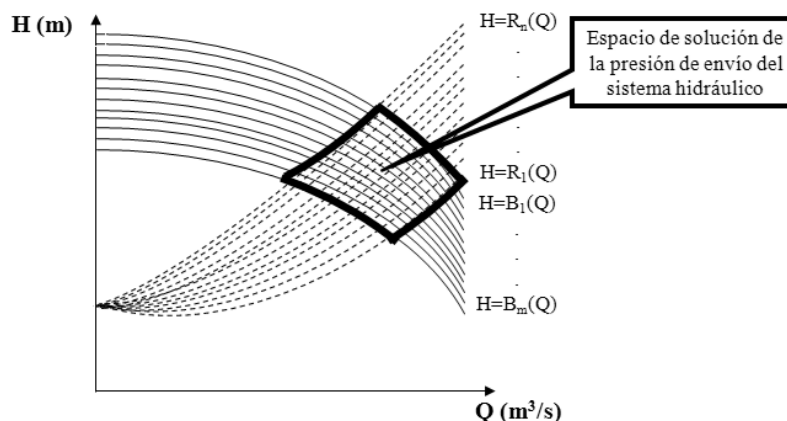


Figura 1.4. Espacio de solución de la presión de envío del sistema hidráulico en CSAF.

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 1.4, 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 altura de carga H_{sp} (valor de presión requerido en la red hidráulica para garantizar el caudal de diseño Q_{sp} , calculado a partir del cumplimiento de los caudales necesarios en las unidades terminales), 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 asumir 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.

1.5.3 Relación entre la estrategia ocupacional y la operación

En general, la selección del valor de la presión de envío en los CSAF se realiza actualmente en función de las condiciones de máxima carga térmica, teniendo en cuenta además su factor de diversidad. El factor de diversidad garantiza un régimen racional de operación, al considerar que las edificaciones, por lo general, no cuentan con todas sus habitaciones en la misma orientación

solar [21, 92]. El factor de diversidad favorece a que no se sobredimensionen las potencias nominales de la bomba y del equipo enfriador [92].

Indisolublemente ligada a la operación de los CSAF se encuentra la ocupación, la cual aporta en ocasiones hasta más del 25 % de la carga térmica del local. La ocupación también genera el cambio de los parámetros hidráulicos de las redes y la activación del intercambio térmico en las unidades terminales, ya sean de operación on-off o de acción modulante.

Para conocer los regímenes de ocupación diaria de los hoteles se puede acceder a los registros de los departamentos de recepción, pero para conocer la dinámica que ofrece durante el día es necesario realizar encuestas [54] u obtener registros de los autómatas de habitaciones, si se tienen altas prestaciones como sensores de presencia. En tal sentido, trabajos como los de *Energy Design Resources* [98, 99], ofrecen datos similares de ocupación horaria promedio en diferentes hoteles en Estados Unidos. Estos mismos datos se utilizaron para hacer un análisis de regresión con la temperatura ambiente y la diferencia de temperatura entre envío y retorno de un CSAF a flujo variable en un edificio de un hotel en Cuba [100]. Se obtuvieron modelos de regresión con coeficientes de correlación superiores a 0,8.

Algunas investigaciones estudian la incorporación de la climatología local en el cálculo de las cargas térmicas y posteriormente esto contribuye a una correcta toma de decisiones de diseño y operacionales de los sistemas de climatización [18, 19, 25, 54, 65, 101, 102]. Se ha demostrado que en las condiciones climatológicas de Cuba, en los meses de septiembre, octubre y noviembre aparecen los mayores valores de potencia requeridos por la climatización, a pesar de que las condiciones climáticas no son tan desfavorables como en los días más críticos del verano. Esto se debe a la incidencia marcada que tiene la carga térmica por ocupantes del edificio [100].

Existen trabajos que analizan la dinámica de la climatología local mediante modelos térmicos de habitaciones a partir de la extrapolación del intercambio térmico a un circuito eléctrico resistivo-capacitivo [103]. En otra variante se desarrolla una estrategia de control predictivo basado en el modelo térmico de una habitación y el conocimiento de las predicciones del clima y la ocupación

con 24 horas de antelación. Utilizando la unidad terminal instalada en la habitación, se obtiene un valor dinámico de ajuste de la temperatura de agua helada para la unidad enfriadora. Por su parte Bravo [104] compara métodos de simulación de carga térmica dinámicos del TRNSYS 16 con aplicaciones como el COOLPACK y el simulador de cargas térmicas de la UABC. Todas estas investigaciones coinciden en la necesaria integración de la climatología local en la toma de decisiones operacionales de los SCCAH.

La ocupación de hoteles desde el punto de vista tecnológico se ha tratado en la literatura en dos direcciones fundamentales: los **sistemas de control de la ocupación** y las **estrategias ocupacionales**. Los sistemas de control, necesitan de un alto componente de automatización para facilitar el control del confort y el funcionamiento de las diferentes cargas eléctricas, aunque no siempre estos sistemas están disponibles. Por su parte las estrategias ocupacionales han sido menos utilizadas y están orientadas a: disminuir la presencia de los huéspedes en las habitaciones en los horarios que la electricidad es más costosa, la compactación de habitaciones y a la evaluación de los sistemas sobre todo la climatización para ahorrar energía. En la literatura aparecen un conjunto de consideraciones en referencia a la ocupación las cuales plantean:

- Las dimensiones de los sistemas de climatización dependen de muchos factores tales como la localidad, las dimensiones del edificio, el tipo de puertas y ventanas, y el tipo de ocupación. Es necesario conocer adecuadamente las cargas y sobre todo los horarios de ocupación para reducir la climatización cuando el edificio está desocupado [105]
- Los programas de desarrollo y administración energética de edificios plantean: mantener actualizado los datos correspondientes a los horarios de ocupación, cuando se usan lugares innecesariamente y los horarios de trabajo intermitente de los locales; que los horarios de utilización de los locales sean regulares para poder tenerlos en cuenta en las estrategias de operación energéticas [105] e instalar sistemas computarizados para el control de la temperatura en todas las partes del edificio de acuerdo a la ocupación [16, 67]
- Los programas de análisis energético repiten sus secuencias de cálculo muchas veces, para

simular todo un año de operación bajo diferentes condiciones del clima, la ocupación y las condiciones de la carga térmica. El ahorro de energía depende mucho de estos factores [67].

- Apagar las unidades terminales en los horarios en que las habitaciones no están ocupadas puede ahorrar entre un 10 y 50 % de la energía en los CSAF. También es recomendable cambiar la temperatura de salida del agua de las enfriadoras en correspondencia al porcentaje de la ocupación entre otros factores [67].
- Los parámetros operacionales óptimos de la climatización deben ser desarrollados en las condiciones reales del edificio y los requisitos de ocupación actuales, teniendo en cuenta que el comportamiento energético debe ser comparado bajo las mismas condiciones normalizadas de ocupación y del clima [106]
- La determinación de la línea base de los sistemas de climatización deben considerar el cambio del clima y de los horarios de ocupación. La variable independiente más común a tener en cuenta es la temperatura ambiente, aunque también es incidente la ocupación [106]

A pesar de los criterios anteriores, no se reporta en la literatura consultada el uso de estrategias combinatorias – evolutivas para definir como ocupar un edificio, lo que implica, utilizar modelos computacionales que respondan mediante determinadas heurísticas a la optimización energética de la operación de los SCCAH con CSAF a flujo variable. Estos sistemas tienen una tendencia hacia un predominio tecnológico en la climatización de hoteles.

Por otra parte, existen software que calculan la carga térmica y en ocasiones de manera simultánea con la modelación de la red hidráulica tales como el TRANSYS y el SPR-r, pero estas no integran la evaluación de las múltiples combinaciones de ocupación de los locales a los algoritmos de cálculo del comportamiento termo-hidráulico.

1.6 Modelación y simulación de los sistemas de climatización centralizados

En la Figura 1.5 se muestra la secuencia de los distintos modelos que componen la climatización para su adecuada simulación. Para simular el comportamiento energético de SCCAH, el modelo

matemático correspondiente debe representar el comportamiento térmico de la estructura del edificio (el modelo de las cargas térmicas), el sistema de acondicionamiento de aire (el modelo de los sistemas secundarios) y de la planta central (el modelo de los sistemas primarios). El modelo económico puede formar parte o no del programa de análisis energético [47].

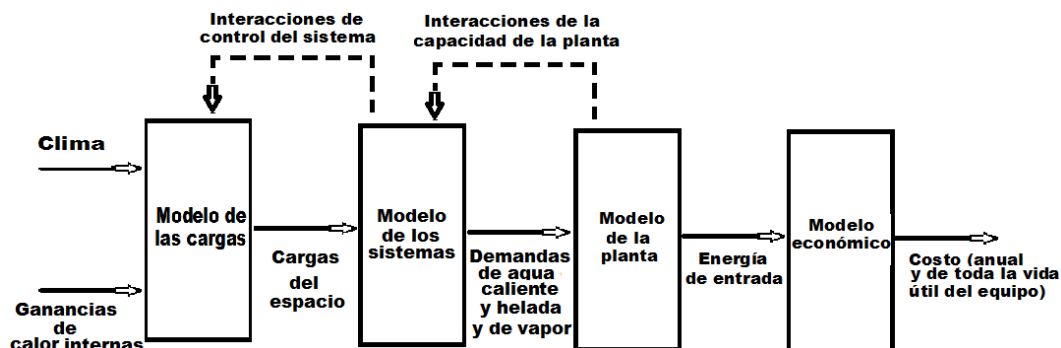


Figura 1.5. Interacción de modelos para la simulación energética de edificios [47].

La modelación y simulación de sistemas de impulsión de agua, han sido menos abordados que la los regímenes y parámetros de las enfriadoras. Por lo general, debido a la magnitud de la potencia instalada en los SCCAH, las investigaciones en estos equipos persiguen mejorar la eficiencia del ciclo de compresión del gas refrigerante mediante análisis termodinámicos.

Un estudio realizado por la Oficina de Tecnologías Industriales del Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos estima que la corrección en la distribución eléctrica representa el 8 % del total del ahorro posible, la eficiencia del motor representa el 4 %, el sistema mecánico el 44 % y la optimización del proceso el 44 % [107].

Durante la investigación, se pudo constatar la existencia de 18 tesis de doctorado desarrolladas en Cuba, muy estrechamente relacionadas con los temas generales de la climatización (56 %) [18, 19, 68, 108-114] y refrigeración (44 %) [115-122]. De manera particular abarcan los temas de: diseño; operación; cargas térmicas, confort y sicrometría del aire; lazo de producción de frío o compresión mecánica del vapor; cambios tecnológicos o en algún componente físico; sistemas agua-aire, todo aire o todo refrigerante; sistemas todo-agua; optimización; optimización de sistemas centralizados a flujo constante; modelos matemáticos; procedimientos y los hoteles. Sin embargo, las referencias anteriores no desarrollan los temas relacionados con: el

comportamiento de las redes hidráulicas y su efecto en el comportamiento energético del sistema, el análisis combinatorio de la ocupación de habitaciones ni los SCCAH a flujo variable.

1.6.1 Modelación y simulación térmica de los sistemas de climatización centralizados

Las variables arquitectónicas relacionadas con la bioclimática contribuyen al ahorro energético durante la explotación de la edificación. Ellas se dividen en dos grupos fundamentales: las que dependen de los criterios de diseño y las que dependen de decisiones económicas [68].

Una forma natural de ahorrar electricidad, es prevenir que la energía del asoleamiento penetre hacia el interior de las edificaciones. Las técnicas de diseños que reducen el calor que penetra suelen aplicarse de forma individual o agrupadas convenientemente; algunas investigaciones señalan que para las condiciones de Cuba es necesario: el empleo de materiales en el revestimiento exterior de baja absorción térmica, protección de las superficies exteriores de la radiación solar directa, incremento del espesor de los materiales de construcción que conforman las cubiertas y fachadas, el uso de materiales aislantes de elevada resistencia térmica y el empleo de cubiertas y pinturas reflectivas [123-125]. Estas decisiones tienen en cuenta el conocimiento de la climatología local y son variables a considerar en la modelación y simulación térmica.

Montero [39] realiza un estudio del comportamiento energético de los CSAF, evaluando elementos incidentes y parámetros de operación del climatizador central, las redes, la carga térmica y del conjunto motor bomba así como algunas variables climatológicas. En su caso de estudio se establecieron modelos del conjunto motor-bomba mediante técnicas estadísticas. Los resultados expresan enfoques y soluciones particulares sobre la base de los CSAF a flujo variable. Se proponen expresiones que permiten evaluar el costo, caudal y energía adicional que ocasionan las principales deficiencias termo-energéticas.

Uribazo en el 2004 [126] determina la incidencia del clima en las tecnologías de la climatización. Mediante una identificación experimental, obtiene un modelo paramétrico de estructura ARMAX de segundo orden, del sistema de climatización centralizado de un hotel. El modelo permite controlar el número de cilindros de los compresores a partir del comportamiento de la

temperatura de retorno del agua fría, la temperatura de envío y la temperatura ambiente. Luego el mismo autor propone un sistema de control borroso del clima del hotel [127].

Monteagudo [37], mediante el aumento de la temperatura de salida del agua helada en función de la temperatura ambiente, ha comprobado que se reduce el consumo de electricidad en las enfriadoras del Hotel Unión en aproximadamente un 15%.

Montelier [19], desarrolla un procedimiento para establecer la temperatura más adecuada del agua helada en los SCCAH a flujo constante. A partir de bases de datos obtenidas de la simulación térmica del edificio, este autor establece una RNA que posibilita determinar la carga térmica de enfriamiento y propone un sistema neurodifuso para determinar el consumo de energía eléctrica del sistema de climatización en función de la temperatura de agua helada y corrobora la existencia de un mínimo consumo. Finalmente, se propone un algoritmo genético para encontrar el valor de ajuste de la temperatura del agua helada que posibilita reducir el consumo energético.

En el 2008, Armas crea un modelo híbrido de optimización termo-económica para minimizar el costo de los productos finales del SCCAH, integrando: el algoritmo genético, las RNA que modelan las sustancias de trabajo del sistema y los modelos físicos, los flujos y el costo para cada componente [18]. El modelo planteado se circunscribe a las unidades enfriadoras.

Chow en el 2001[128] aplica las redes neuronales para modelar el desempeño de una enfriadora por absorción y mediante un algoritmo genético optimiza la función del costo de su operación. Este modelo tiene como una de las variables de entrada la temperatura de envío a las zonas, y la energía que se le transfiere al agua para entrar en el evaporador es la que utiliza para trasegarla por el sistema. Se muestra que la inteligencia artificial puede predecir los costos de explotación y el consumo de energía de una enfriadora sin estudiar los detalles termo-hidráulicos de los CSAF. La administración y detección de fallas en los sistemas de climatización centralizados en edificios comerciales también constituye un aspecto vital que favorece un ahorro energético entre el 20 % y el 30 % [129]. Yoshida en el 2001[130], propone un algoritmo de detección y

diagnóstico para sistemas de climatización a partir de un modelo paramétrico recursivo ARX, tomando la desviación del valor de consigna de la temperatura en el espacio climatizado como entrada y como salida el flujo de aire que se suministra. Este modelo solo permite conocer e imponer al sistema sus características de operación a partir de una identificación.

Fu en 1999 [93] empleó un modelo fuzzy para predecir cada estado de un sistema agua - aire, tanto para la enfriadora como para la manejadora de aire. El sistema es de volumen de aire variable. Este autor demostró la capacidad de los modelos Neuro-fuzzy para modelar el sistema y asegurar la toma de decisiones en relación de los parámetros de la enfriadora y del ventilador. Los datos de entrenamiento fueron generados en el simulador HVACSIM+. Los resultados de las estimaciones abarcan todo el diapasón de operaciones en condiciones libres de fallas y con la presencia de estas. El modelo predice el consumo del ventilador y la velocidad de operación del mismo, pero tiene la limitante que es para el caso de agua-aire, y solo integra al modelo las condiciones del aire interior para el caso del modelo de la enfriadora. Para el aire, se predice la potencia del ventilador y la velocidad mediante el flujo y un vector predictor de fallas.

1.6.2 Modelación y simulación hidráulica de los sistemas de climatización centralizados

Las redes hidráulicas revisten una gran importancia en el contexto energético y especialmente en los SCCAH debido a la cantidad de energía que se necesita para transportar el agua desde las enfriadoras hasta las unidades terminales, garantizando los caudales necesarios.

Hechavarría en el 2009 [81], presenta un procedimiento que aplica los fundamentos del Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería (ASSI) para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples al diseño de redes de distribución de agua. Los métodos utilizados para la modelación hidráulica en la optimización del diseño de redes malladas bajo criterios técnicos-económicos son válidos para la modelación y simulación en SCCAH [91].

Puesto que en un CSAF la cantidad de fluido enviado al sistema es la misma que retorna, entonces, desde el punto de vista de envío y retorno, la red se considera simétrica en longitudes y diámetros en las tuberías. Esto condiciona que durante el proceso de diseño, inicialmente se

evalúe la red de climatización como si estuviera abierta [91]. El primer criterio a tenerse en cuenta al seleccionarse las unidades de bombeo, es que siempre debe cumplirse los valores de presión de 3 kPa mínimos en cada una de las válvulas de equilibrado, lo que comprende, desde el inicio de la tubería, hasta el final del retorno [87, 95]. La experiencia de los diseñadores de estas instalaciones especiales en Cuba, indica que un valor de 500 kPa es capaz de satisfacer los requerimientos hidráulicos para las variantes constructivas utilizadas en hoteles [131].

En el 2009 se presentan resultados que tienen como centro los CSAF. Uno de ellos realiza un riguroso marco teórico de las relaciones entre los componentes de los CSAF y las variables que inciden en su operación eficiente [132]. Se expone un análisis crítico sobre las insuficiencias al no aplicar las normativas cubanas vigentes NC-45 y NC-220 [27, 28]. Mediante un enfoque sistémico, se proponen cambios para la automatización de tareas basados en tener en cuenta los aspectos hidráulicos y de intercambio térmico del agua con la edificación. Aparecen críticas acertadas, pero las propuestas de soluciones aún no están implementadas.

El método de compensación y balance [26] racionaliza el consumo de energía en una red de distribución de agua para la climatización. Un estudio basado en este método consistió en ubicar válvulas de compensación en todos los ramales de la red, trabajando en línea con un sistema computarizado. Estas válvulas operan a través de un modelo matemático creado para la red hidráulica en función de las mediciones realizadas [26]. Los modelos no se divulgaron y no se reflejaron aspectos térmicos del sistema. No obstante, el equilibrado hidráulico obtenido redujo el consumo energético entre el 15 % y 20 %.

La operación de los CSAF se puede modelar con la ayuda de herramientas informáticas que consideren los elementos termo-hidráulicos del sistema. Entre los sistemas que modelan un sistema hidráulico y calculan las presiones, caudales y velocidades se encuentran el EPANET, WATERCAD, entre otros sistemas CAD. En cualquier caso, los rangos de velocidades deben mantenerse entre 1 m/s y 2 m/s [27], elemento que impone restricciones energéticas al sistema, evitando también que se produzcan ruidos en la red debido a la dinámica de operación.

Salsbury [133], a partir de los datos de un sistema de ventilación de dos vías en una gran edificación, establece un modelo de caja negra teniendo en cuenta la presión, la humedad relativa y temperatura del fluido logrando mejores prestaciones de la instalación. El modelo simulado, en paralelo con las variables del sistema real corrige las necesidades del fluido y obtiene mejoras energéticas. La limitante para aplicar este modelo a los SCCAH es que se trata de una instalación de ventilación. El caudal de ventilación se controló con un lazo PI y los modelos empleados son de primer y de segundo orden, obtenidos con el método de integración de Euler.

Núñez y Rodríguez [53] implementaron una aplicación prototipo que enlaza el software de supervisión de procesos EROS mediante un control PID a un CSAF a flujo variable. Esta aplicación permite la recolección de datos y operación del sistema para cualquier valor admisible de la presión de descarga. El controlador se ajusta desde el computador. Los resultados no integran a la operación del controlador el análisis de los aspectos térmicos del edificio, ni las condiciones climatológicas para lograr un modelo de la planta más acertado.

Aguilar en el 2009 [134] propone un enfoque multivariable de un CSAF para su modelación y Montero en el 2012 [97] perfecciona el resultado determinando el modelo paramétrico que mejor relaciona las HDO, temperatura ambiente y caudal con respecto a las salidas, potencia activa, temperatura de retorno del agua y presión en el retorno. El modelo mejoró con el uso de las RNA obteniéndose ajustes de un 94 % al manipularse la variable HDO.

En el 2002, León propone una metodología para el análisis de variadores de velocidad en sistemas de bombeo, pero solo se relacionan las interacciones entre las características de la bomba, la red y el motor de inducción [135]. A partir de las ecuaciones de proporcionalidad y las ecuaciones del motor de inducción se establecen leyes de afinidad para el análisis de sistemas de carga estática. A pesar de que se evalúa el comportamiento energético del accionamiento, no se ha aplicado la metodología al caso específico de los CSAF.

La gran mayoría de los hoteles cubanos son instalaciones con determinado tiempo de operación, esto hace que algunos CSAF en ocasiones se desajusten. En el trabajo presentado por Rodríguez

en el 2004 [136], mediante cálculos hidráulicos con las expresiones de Bernoulli, se demuestra que es insuficiente el caudal de agua en los ramales de un CSAF. Se da solución al problema de suministro pero el sistema analizado es a flujo constante. Para resolver una situación similar en la villa del hotel Las Brisas en Guardalavaca, se realizó el cambio a caudal variable del sistema de impulsión [137]. En ambos casos no se consideraron: las perturbaciones del clima, el modelo térmico de la edificación y las estrategias ocupacionales.

Sierra en el 2009 [138] analiza el comportamiento energético de un motor de inducción (MI) en un CSAF a flujo variable, obteniendo sus características ante diferentes situaciones ocupacionales y valores de consigna de la presión de descarga de la bomba. Se utilizaron aplicaciones sobre Matlab que tomaron como base el modelo del MI. Aunque fueron interrelacionadas variables ambientales con diferentes puntos de operación del sistema, no se modeló la integración de estos factores. No obstante, se demostró empíricamente que el CSAF puede trabajar a menor valor de consigna de la presión (de 500 kPa a 450 kPa) para una misma ocupación del 92 %, en condiciones del clima similares, demandando un 35 % menos de potencia activa manteniendo el confort.

La utilización de VV en las bombas de agua fría permite la reducción del consumo de energía en las condiciones de cargas parciales al circular menos agua por el sistema [44, 139]. Los ahorros de energía reportados pueden llegar hasta un 30 % con respecto al consumo de un sistema con flujo constante [16, 46, 50]. 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 [24].

En los sistemas de monitoreo y control existentes en los hoteles con SCCAH se observa que las variables incorporadas son principalmente las relacionadas con el trabajo de las enfriadoras; no sucede así con las variables termo-hidráulicas y energéticas asociadas a los circuitos de impulsión. En los sistemas a caudal variable en operación resulta difícil cambiar los parámetros de las variables de consigna de la presión de envío debido a la imposibilidad del acceso a los

controles del VV y a los insuficientes sistemas informáticos para tomar esta decisión.

Todos los aspectos abordados en el análisis bibliográfico, resaltan la necesidad de estudios con enfoques sistémicos para favorecer la optimización operacional de los sistemas de climatización.

CONCLUSIONES del capítulo

1. El actual escenario energético mundial exige de estrategias que permitan fomentar el uso de tecnologías que tributen a la disminución del consumo de energía, trabajando por la eficiencia energética como una variante de alto impacto.
2. El sector del turismo se establece como un importante potencial económico en el desarrollo del país y con posibilidades reales de disminución de los costos de operaciones mediante un uso más racional de energía, a través de procedimientos que permitan una mejor explotación de los sistemas sin deteriorar la calidad de los servicios.
3. Los sistemas de climatización de las instalaciones turísticas son los mayores consumidores de energía en estas instalaciones y son objeto de los estudios energéticos. En los SCCAH, y en particular en los CSAF, se presentan importantes potencialidades para mejorar la eficiencia energética en los hoteles que usan esta tecnología.
4. Es necesario conformar un procedimiento mediante un enfoque sistémico para la optimización energética de la operación de los SCCAH, basado en una función objetivo que integre: los modelos de la red hidráulica, del ciclo de compresión mecánica del vapor y el modelo térmico del edificio, en los que intervienen cada estado del sistema, ineludiblemente relacionados con la ocupación, el clima y las características de las edificaciones.
5. Se hace necesario el desarrollo de aplicaciones informáticas que favorezcan los procesos de toma de decisiones en la explotación hotelera, con énfasis en aquellas actividades que permitan un mejor desempeño energético del equipamiento tecnológico.

2. PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS TODO-AGUA CON CIRCUITOS SECUNDARIOS DE AGUA FRÍA A FLUJO VARIABLE

2 PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS TODO-AGUA CON CIRCUITOS SECUNDARIOS DE AGUA FRÍA A FLUJO VARIABLE

El presente capítulo tiene como objetivo el desarrollo de la formulación matemática de la tarea de operación energética óptima de los SCCAH con CSAF a flujo variable, considerando la variabilidad de la climatología local y la ocupación de un hotel.

Siguiendo el enfoque de Arzola [140], en la presente investigación se asume el concepto sistema de ingeniería como aquel que ayuda en la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples, incluyendo indicadores de carácter subjetivo propios del diseño, la generación de tecnologías, la operación de procesos, la planeación de la producción, la logística y el mantenimiento, y su integración a la gestión económica de las empresas.

Mediante el Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería (ASSI) se clasifica la información asociada a la tarea de ingeniería, se formulan adecuadamente las tareas en el entorno en el que deberán funcionar, y se sintetiza debidamente el sistema para la solución práctica del problema [81, 141]. La metodología ASSI se compone básicamente de los pasos siguientes [140]:

1. Análisis externo: contiene la descripción del sistema de mayor envergadura (SME) que es la mayor tarea a la cual se encuentra subordinado el sistema objeto de análisis y se determinan las variables involucradas (ver Figura 2.1), la descomposición de la tarea en elementos componentes, y la elaboración del modelo conceptual de preparación de decisiones.
2. Análisis interno: modelación matemática de relaciones que explican las salidas de los indicadores de eficiencia a partir de los valores de las variables de coordinación, de decisión y datos de entradas; organización racional de los procedimientos de cálculo e identificación de los componentes del modelo matemático conceptual de preparación y toma de decisiones.

2.1 Análisis externo de la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable

En la presente investigación se pretende que la operación de los SCCAH se realice con el mínimo requerimiento de potencia eléctrica, considerando el modelo termo-hidráulico de la edificación, así como las fluctuaciones del clima y la ocupación. En la clasificación de la información asociada a la operación de los SCCAH, para la formulación de la función objetivo intervienen: la modelación de la carga térmica, la modelación de la red hidráulica, la determinación del trabajo de compresión y las restricciones de los modelos.

En la Figura 2.1 se presenta de forma simplificada los elementos del análisis externo.

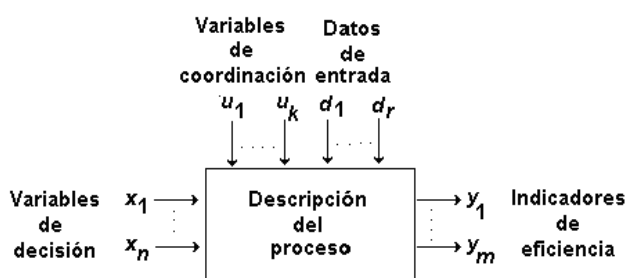


Figura 2.1. Clasificación de la información involucrada en el análisis externo [140].

2.1.1 Descripción del Sistema de Mayor Envergadura

La operación de los SCCAH tiene como objetivo principal garantizar la climatización de los locales, independientemente de las condiciones que imponga el SME. Se considera como parte del SME a todo fenómeno externo que influya en el proceso de climatización, para este caso se consideran los siguientes aspectos: las condiciones climatológicas de la localidad; las características físicas de la edificación, los parámetros técnicos del sistema y la información necesaria que permite valorar el impacto técnico-económico de la tarea.

Para sustentar una caracterización del SME, así como contribuir a la definición de las variables a tener en cuenta en el análisis externo, fue necesario implementar un Sistema Automático de Medición (SAM) mediante el SCADA de procesos industriales EROS versión 5.5, el cual se presenta en el Anexo 5. Los datos obtenidos mediante experimentos exploratorios, más que para definir un modelo formal, contribuyeron a la selección de las variables que participan en el

análisis externo y que definirán el análisis interno. En el Anexo 5 también aparecen a manera de ejemplos, algunas mediciones en el sistema relacionadas con: la temperatura ambiente de la localidad, pruebas dinámicas del VV y pruebas escalonadas de cambios de la ocupación.

2.1.2 Variables de coordinación

Las variables de decisión del SME, asociadas al sistema dado, constituyen las variables de coordinación [141]. Se consideran, mediante una adecuada clasificación, las siguientes:

Para la modelación térmica: parámetros técnicos de la edificación (clasificación de los locales según su uso, comportamiento ocupacional horario, zonificación, inventario de cargas fijas y uso de equipos), parámetros climatológicos (ubicación geográfica, parámetros solares, condiciones climáticas de la localidad, humedad relativa y la temperatura ambiente por día y hora).

Para la modelación hidráulica: ubicación espacial de los nodos; topología de la red; dimensiones y material de las tuberías; parámetros técnicos de: las válvulas de control, las válvulas de equilibrado, unidades terminales, las unidades de bombeo, unidades enfriadoras. También es necesaria la clasificación del local según su disponibilidad y la aceleración de la gravedad.

Para el cálculo del trabajo por compresión: el tipo de refrigerante utilizado, las temperaturas de condensación y de vaporización, la temperatura de envío del agua fría a la salida del evaporador y la temperatura del agua en la entrada del evaporador.

Para el análisis de la ocupación: total de habitaciones del edificio, cantidad de habitaciones fuera de servicio (no disponibles), cantidad de habitaciones disponibles, cantidad de habitaciones priorizadas (escogidas a preferencia de los clientes) y cantidad de habitaciones a ocupar.

2.1.3 Indicador de eficiencia

En los CSAF a flujo variable, la reducción del consumo de energía se ha basado en la selección adecuada del valor de consigna de la presión de envío o su re-establecimiento para cada condición de la red hidráulica [24, 25, 46]. La tendencia actual para la optimización del consumo de energía en los SCCAH es la determinación simultánea de la temperatura adecuada del agua suministrada por la unidad enfriadora y de la presión de envío en las bombas del CSAF [46, 56].

En la presente investigación se pretende minimizar el requerimiento de potencia eléctrica para la operación de los SCCAH, por lo cual se toma como **indicador de eficiencia formalizable: la suma de la potencia eléctrica necesaria para el bombeo, más la potencia eléctrica necesaria para el trabajo de compresión en la unidad enfriadora en función de la ocupación.** Para la determinación de este indicador, necesariamente se deben evaluar las pérdidas de energía por fricción, las pérdidas de energía por singularidades en la red hidráulica, y el efecto de las cargas térmicas de enfriamiento parciales que dependen de ciertas variables.

2.1.4 Variable de decisión

Sea T el total de habitaciones de un edificio. Se conoce que hay D habitaciones disponibles y HAO son solicitadas. Considérese que hay ND habitaciones no disponibles para el análisis, H_O es el total de habitaciones que ya están ocupadas, H_{OP} las habitaciones a ocupar que están priorizadas (según preferencia de los clientes) y H_{FS} es la cantidad de habitaciones fuera de servicio (por razones técnicas o fuera de orden). Las relaciones entre estos parámetros son:

$$T = ND + D \quad (2.1)$$

$$ND = H_O + H_{OP} + H_{FS} \quad (2.2)$$

$$HDO = H_O + H_{OP} + HAO \quad (2.3)$$

$$MVC = 2^D \quad (2.4)$$

$$MVCR = \frac{D!}{(D - HAO)! HAO!} \quad (2.5)$$

Donde: HDO es la cantidad de habitaciones que se tendrán en cuenta durante la modelación térmica e hidráulica, Habitaciones Días Ocupadas; MVC es el Mayor Valor del Código de solución (cantidad total de opciones de ocupación de los locales disponibles) y $MVCR$ coeficiente binomial al que se denominó Mayor Valor del Código Restringido (cantidad total de opciones de ocupación de los locales disponibles que cumplan con la restricción de HAO).

Ahora, puede definirse una variable a la que se denomina **Ocupación** que describe cuáles serán las HAO habitaciones seleccionadas entre las D habitaciones disponibles. Esta será la variable de

decisión y condiciona la apertura de circuitos dentro de la red mallada al igual que las H_O y las H_{OP} , mientras que las H_{FS} no. Por lo tanto, las diversas configuraciones de la red hidráulica, ocasiona mayores o menores pérdidas de energía. El trabajo de compresión en la unidad enfriadora, también se ve afectado por la variable Ocupación en correspondencia con los valores de carga térmica de enfriamiento que aportan las HDO habitaciones día ocupadas.

2.1.5 Variables intermedias

Generar variantes de ocupación trae consigo cambios en la modelación hidráulica, dando como resultado diferentes valores de velocidad y presión en el CSAF. Estos resultados deben ser evaluados para comprobar si cumplen con las restricciones. De este modo, resultan de interés, las variables intermedias: velocidad del agua en cada tramo de tubería, altura de presión en cada nodo y caudal de agua en las unidades terminales. Estas variables son consecuencia de la velocidad de rotación de la bomba, pues de su valor y de la carga que representa la red hidráulica depende la potencia eléctrica requerida por la bomba. La determinación de esta velocidad debe corresponder con los requerimientos mínimos de presión de envío del CSAF.

Cambiar la ocupación también implica cambios en la modelación térmica. Es práctica común elevar la temperatura del agua helada para ahorrar energía durante los períodos de menor carga de enfriamiento, o de temperaturas exteriores más bajas [19]. Se puede elevar la temperatura entre 2,5 °C y 5,5 °C incluso en condiciones de cargas nominales [139, 142]. Un grado Celsius que se eleve la temperatura, incrementa la eficiencia del enfriador en un 4 % [142]. Al considerarse las condiciones climatológicas y la ocupación en el modelo energético, es posible declarar como otra variable intermedia del sistema, la temperatura de salida del agua de la enfriadora. Tanto la velocidad de rotación de la bomba como la determinación de la temperatura de salida del agua de la enfriadora se pueden determinar mediante cálculos iterativos.

Estas variables intermedias están restringidas respectivamente a ciertos rangos, los cuales definen la factibilidad de cualquier propuesta de ocupación.

2.1.6 Datos de entrada al sistema

Para mayor claridad de los datos de entrada al sistema, necesarios para la simulación a partir de

la existencia de los modelos correspondientes, se propone la clasificación siguiente:

Datos para la modelación térmica: temperatura ambiente, hora del día, día del año y las habitaciones que entran al análisis de la Ocupación.

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) y dimensiones de las tuberías.

Datos para la determinación de la potencia eléctrica necesaria en la unidad de bombeo: densidad del agua, rendimiento de la bomba centrífuga, rendimiento del motor eléctrico de inducción.

Datos para determinar la potencia eléctrica necesaria en el compresor: temperaturas de condensación y de vaporización, rendimiento isentrópico, entalpías del ciclo de refrigeración, flujo de agua para carga térmica máxima, y el factor de diversidad de la carga térmica.

Datos para determinar las soluciones factibles: valores mínimos y máximos de velocidad; de presión; y caudal del agua, que definen la factibilidad de una propuesta de ocupación.

La Figura 2.2 resume el análisis externo y evidencia el carácter de las variables descritas, así como la interrelación entre los componentes que describen el proceso. Se resalta el papel del variador de velocidad en el suministro de la energía necesaria para el sistema de bombeo a partir del resultado de la presión de envío requerida por el sistema. Estas condiciones las impone la red hidráulica, consecuencia de la Ocupación (variable de decisión) que se seleccione.

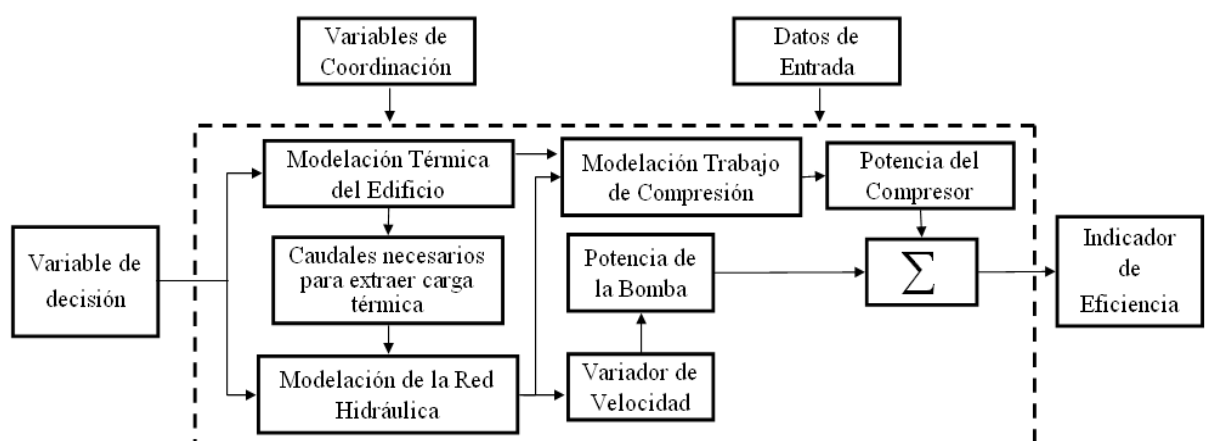


Figura 2.2. Diagrama de bloques para la descripción del proceso a través del Análisis Externo.

2.2 Análisis interno de la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua con circuitos secundarios de agua fría a flujo variable

Se propone un procedimiento para calcular el Indicador de Eficiencia en función de las entradas.

2.2.1 Formulación del sistema de ingeniería del objeto de estudio

La modelación matemática para la simulación simultánea del edificio, el sistema secundario y el sistema primario se inició desde hace varios años [143-146], y aunque ya están disponibles programas como el ESP-r [147-149] que simulan simultáneamente el edificio y los sistemas de Climatización, Ventilación y Aire Acondicionado (CVAA), aún no se aplica este enfoque.

2.2.1.1 Función objetivo e indicador de eficiencia

Al tener en cuenta los parámetros que intervienen en el indicador de eficiencia, potencia eléctrica para el trabajo de compresión más la potencia eléctrica para el bombeo, la función objetivo se presenta mediante el siguiente desglose de las expresiones matemáticas que la componen.

$$M_T = g_1(X_e, X_{cl}, X_{CSAF}) \quad (2.6)$$

$$M_C = g_2(X_{cl}, R_n, T_{ev}, T_{cd}, X_{SCCAH}) \quad (2.7)$$

$$M_H = g_3(X_e, X_{CSAF}) \quad (2.8)$$

$$C_{T(d)} = g_4(HDO_{(c)}, Tamb_{(d)}, h_{(d)}, d_{(a)}, M_T) \quad (2.9)$$

$$C_{C(d)} = g_5(C_{Tmax(a)}, Q_{(d)}, Te_{(d)}, Tr_{(d)}, M_C) \quad (2.10)$$

$$C_H = g_6(HDO_{(c)}, H_{(d)}, Q_{(d)}, M_H) \quad (2.11)$$

$$P_{eb} = g_7(C_{T(d)}, C_{H(d)}) \quad (2.12)$$

$$P_{ec} = g_8(C_{T(d)}, C_{H(d)}, C_{C(d)}) \quad (2.13)$$

$$P_t = P_{ec} + P_{eb} \quad (2.14)$$

Donde:

M_T - modelo térmico del edificio.

M_C - modelo del trabajo de compresión.

M_H - modelo hidráulico.

C_T - expresiones para determinar las magnitudes que caracterizan la carga térmica.

C_C - expresiones para determinar las magnitudes que caracterizan el trabajo de compresión.

C_H - expresiones para determinar las magnitudes que caracterizan la carga hidráulica del sistema.

P_{eb} - potencia eléctrica requerida para el bombeo en el CSAF; kW.

P_{ec} - potencia eléctrica requerida para realizar trabajo de compresión; kW.

P_t - función objetivo: sumatoria de las potencias P_{eb} y P_{ec} , kW.

g_1, g_2, g_3 - intensidades de las relaciones de las variables de coordinación con M_T, M_C y M_H .

g_4, g_5, g_6 - intensidades de las relaciones de los datos de entrada, las variables de coordinación, intermedias y de decisión del sistema con C_T, C_C y C_H .

X_e - variables que caracterizan el edificio y que definen la estructura de los modelos M_T y M_H .

X_{cl} - variables que caracterizan el clima y que definen la estructura de los modelos M_T y M_C .

X_{SCCAH} - variables que caracterizan la estructura y parámetros generales del SCCAH.

X_{CSAF} - variables que caracterizan la estructura y parámetros generales del CSAF.

R_n - tipo de refrigerante que utiliza el equipo enfriador.

T_{ev} - temperatura de entrada del refrigerante en el evaporador; K.

T_{cd} - temperatura de entrada del refrigerante al condensador; K.

T_{amb} - temperatura ambiente; K.

h - hora del día.

d - día del año.

C_{Tmax} - carga térmica de enfriamiento máxima; kW.

$T_e = t_8$ - temperatura de envío del agua fría hacia el edificio; K.

T_r - temperatura de retorno del agua fría desde el edificio; K.

H - altura de carga de sistema hidráulico; m.

Q - caudal a la salida de la bomba; m³/s.

(a) - 1, ..., 365

(c) - 1, ..., MVCR; adimensional.

(d) - 1, ..., 24

Las relaciones entre las expresiones matemáticas que integran la función objetivo se presentan en la Figura 2.3. En ella se destacan dos elementos: la dependencia de la potencia de la bomba con respecto de los resultados de los modelos térmicos e hidráulicos, así como la dependencia de la potencia del compresor con respecto de los modelos térmicos, hidráulicos y de compresión.

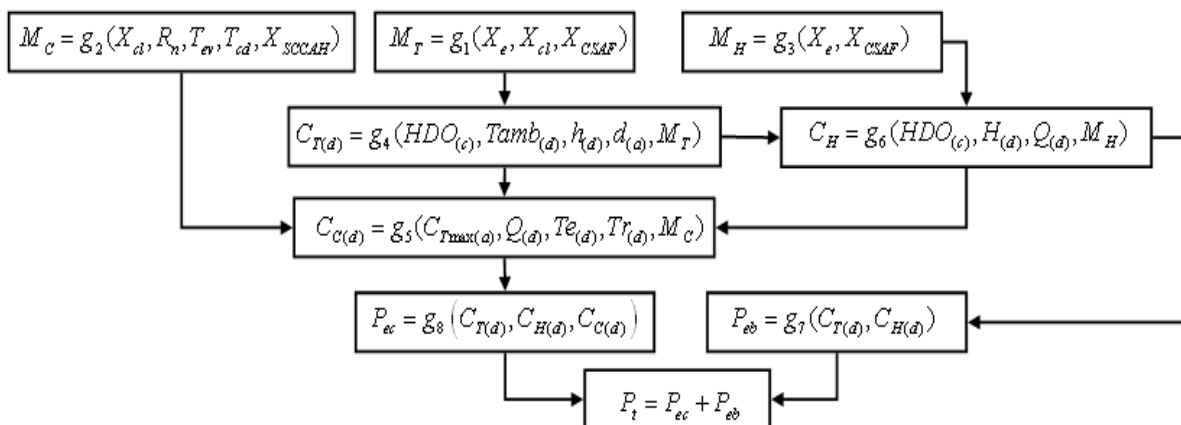


Figura 2.3. Secuencia e iteraciones de las expresiones que permiten definir la función objetivo.

El **Indicador de Eficiencia (IE)**, se determina al minimizar el valor de P_t para cada variante de red hidráulica y régimen de operación del compresor como consecuencia de la ocupación factible seleccionada donde:

$$Z = \min(P_t) \tag{2.15}$$

Del criterio anterior se infiere la necesidad de definir todas las ocupaciones de los locales con compromisos aceptables respecto del IE. Obtenidas las mejores soluciones, quedan definidos los valores de las variables de decisión e intermedias que garantizan cada resultado particular. Se decide entonces cuál variante satisface los criterios de preferencia asegurando un régimen racional de consumo.

2.2.2 Modelación matemática de la carga térmica de enfriamiento

Los pasos para la modelación y el cálculo de las cargas térmicas son los siguientes:

1. Captura y sistematización de datos climatológicos de la región.
2. Selección de la zona que será objeto de evaluación del comportamiento térmico.
3. Captura y análisis de la información del edificio y exploración de condiciones ambientales.
4. Determinación (mediante un simulador) de la carga térmica de enfriamiento para cada

habitación en un año promedio. Estos resultados, que consideran las características de ocupación horaria, establecen para cada habitación relaciones funcionales entre la carga térmica y las variables temporales día y hora, pero no se relaciona explícitamente la temperatura ambiente con el valor de carga térmica.

5. Modelación de la carga térmica de enfriamiento de cada habitación en función del día del año, la hora del día y la temperatura ambiente, mediante un modelo RNA obtenido a partir de: los resultados de la simulación del punto 4, las temperaturas ambiente del año y la hora del día en que se realizaron las mediciones.
6. Integración de modelos de carga térmica de enfriamiento a la modelación hidráulica.

Cada proyecto de climatización debería realizar un estudio de las condiciones climatológicas para un año característico del lugar donde se va a situar la edificación. Lo que aún se hace es tomar los datos de las condiciones de diseño existentes en la literatura, lo cual implica referirse a las condiciones de temperatura ambiente y humedad relativa para el día más caliente del año y las condiciones predominantes del viento [27, 66, 92, 150].

Informaciones necesarias para la evaluación energética de las edificaciones resultan las coordenadas polares de la localidad, las cuales aseguran datos climatológicos más precisos contribuyendo además a la mejor definición de los parámetros solares. Los parámetros solares definen las ganancias de calor principales a través de las estructuras y facilitan las decisiones al seleccionar los materiales y estrategias constructivas para una adecuada bioclimática.

En la selección de la zona pueden estar incluidas las distintas formas constructivas. Las formas constructivas típicas de los hoteles cubanos son bungalows, edificios y su combinación. Esto implica que la red hidráulica, puede presentarse con distintas topologías. La tendencia actual es utilizar materiales que disminuyan los gastos de inversión pero que tengan propiedades acordes con los requerimientos energéticos. Los datos del edificio pueden obtenerse mediante el análisis del expediente de la obra (revisión de los planos y documentos) o mediciones en el terreno.

Los pasos 1, 2 y 3 hasta ahora descriptos permiten conformar un conjunto de datos de gran

importancia para la determinación de la carga térmica de enfriamiento para un año promedio.

En el Anexo 6 aparecen las informaciones generales de las herramientas con que cuenta el simulador térmico de edificios de la UABC [65] y otros datos relevantes. La metodología empleada se utiliza hasta el proceso que integra las cargas de enfriamiento de los niveles analizados y la demanda total del edificio. Para obtener los resultados de las cargas térmica interactúan las diferentes hojas de cálculo sustentadas en la metodología ASHRAE.

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 [19, 25, 70, 71].

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 [151].

Teniendo en cuenta los elementos del aprendizaje automático [152], se elaboró una aplicación en el software Matlab R2008b [153] que realiza las operaciones para obtener los modelos (ver RNA24hFinal, Anexo 7). 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. La expresión general puede expresarse como [153]:

$$Y = f^3(LW_{3,2}f^2(LW_{2,1}f^1(IW_{1,1}p + b^1) + b^2) + b^3) \quad (2.16)$$

Donde:

Y - salida de la RNA.

f^1, f^2, f^3 - funciones de transferencia de las diferentes capas de neuronas.

$IW_{1,1}, LW_{2,1}, LW_{3,2}$ - pesos de las diferentes capas de neuronas.

b^1, b^2, b^3 - polarizaciones de las diferentes capas de neuronas.

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.

2.2.3 Modelación matemática de la red hidráulica para el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el 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 hidráulica. 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 de 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.

Los SCCAH envían el agua del evaporador hacia la succión de las bombas del CSAF, a la temperatura prefijada en la consigna de la enfriadora. El valor sugerido por los fabricantes y las firmas especializadas es de $7 \pm 0,3$ °C [45, 46, 139]. 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. La Figura 1 del Anexo 8 permite comprender esta configuración, y la Tabla 1 las propiedades termo-físicas del agua.

La configuración de la red hidráulica para un CSAF a flujo variable está caracterizada por ser una red mallada, con sistema de tuberías de retorno directo (ver Figura 2, Anexo 2). La tendencia actual es utilizar tuberías de PVC garantizando menores pérdidas de carga.

Por su parte el accionamiento electromecánico está compuesto por el convertidor eléctrico, motor y transmisión mecánica acoplada a la máquina receptora [154]. En los CSAF estos elementos se traducen en: variador de velocidad, motor asincrónico de inducción, y un acoplamiento directo con una bomba centrífuga. La carga está constituida por una compleja red hidráulica, con tuberías, accesorios, válvulas para el equilibrado y unidades terminales.

En el caso del motor, recibe la potencia eléctrica modulada en tensión y frecuencia por un VV,

entregando a su vez una potencia mecánica de rotación a la bomba centrífuga. El procedimiento determina la potencia eléctrica necesaria en el bombeo para cada variante de ocupación, consecuencia de evaluar en la expresión 2.17 [83-85], el caudal total y la altura requerida por el sistema hidráulico para garantizar el confort en cada variante de ocupación.

$$P_{eb} = \frac{\rho g H Q}{1000 \eta_b \eta_m}; \text{ kW} \quad (2.17)$$

En la expresión anterior: ρ es la densidad del agua (kg/m^3); g aceleración de la gravedad (m/s^2); H es la altura de carga requerida en el CSAF (m), Q el caudal de agua requerido en el CSAF (m^3/s); η_b y η_m los rendimientos de la bomba y del motor respectivamente (adimensional). Ahora, mediante las leyes de proporcionalidad se puede determinar la velocidad de rotación requerida en la bomba centrífuga.

Los fabricantes de unidades terminales brindan en sus catálogos la relación entre el flujo de agua y las pérdidas de carga entre otras características (ver Anexo 3). La modelación de la red hidráulica se realiza a partir de los caudales que requieren las unidades terminales utilizadas.

Cada componente que interviene en el equilibrado hidráulico (válvulas de: equilibrado, control, compensación y controladoras de presión) realiza 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 una expresión que relaciona el coeficiente de variación de flujo K_v , el caudal (Q_{ve}) en l/h y las pérdidas de carga (Δp) en kPa [87].

$$K_v = \frac{0,01 \cdot Q_{ve}}{\sqrt{\Delta p}} \quad (2.18)$$

En las Figuras 3, 4 y 5 del Anexo 4 se aprecian los resultados de los modelos que se obtuvieron para los tres tipos de válvulas de equilibrado del caso de estudio, los cuales relacionan el K_v con el número de vueltas. Con K_v , se determina las pérdidas de carga para un determinado caudal.

En esta investigación, para el cálculo hidráulico se seleccionó el Método del Gradiente en base a sus bondades algorítmicas y asumiendo: la correcta utilización de las dimensiones de la red

vistas a través de sus tramos, las alturas de los nodos, el correcto ensamblaje de las matrices que definen la topología de la red, la utilización precisa del modelo de la bomba y considerando, además, 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 necesarios en cada unidad terminal en uso.

Nótese que el caudal que circule por el CSAF, también constituye información básica para el cálculo de parámetros del trabajo por compresión junto con la información de la carga térmica.

El flujo de agua necesario en las unidades terminales, ya sea para cargas máximas o parciales, se puede calcular utilizando la expresión del calor [61, 62, 155], pero no debe olvidarse que estos flujos también dependen de la topología de la red hidráulica.

La circulación del caudal está relacionada con la energía que el accionamiento electromecánico de la bomba le entregue al fluido. Para controlar este accionamiento, al VV 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 (en función de los flujos esperados en cada habitación del hotel), 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 [42, 97].

A partir de las variables y las interrelaciones que se establecen en el algoritmo de la Figura 2.4, se puede encontrar para una ocupación dada, la velocidad mínima de la bomba que garantice que los caudales sean suficientes para que el CSAF funcione adecuadamente.

Conocidos para la bomba: V_n (velocidad de rotación nominal); Q_n (caudal nominal); y H_n (altura de carga nominal). Sean, además, las variables: V_i (velocidad de rotación mínima; V_{i0} es la velocidad de rotación mínima inicial que en este caso se toma positivo y se corresponde con la menor potencia permisible en el motor para evitar su saturación); V_a (velocidad de rotación máxima; V_{a0} es la velocidad de rotación 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 las 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 rotación de la bomba. También se tienen restricciones especiales con respecto a la presión mínima en las unidades terminales y en el nodo crítico (donde el fluido vence la altura geométrica máxima en su retorno).

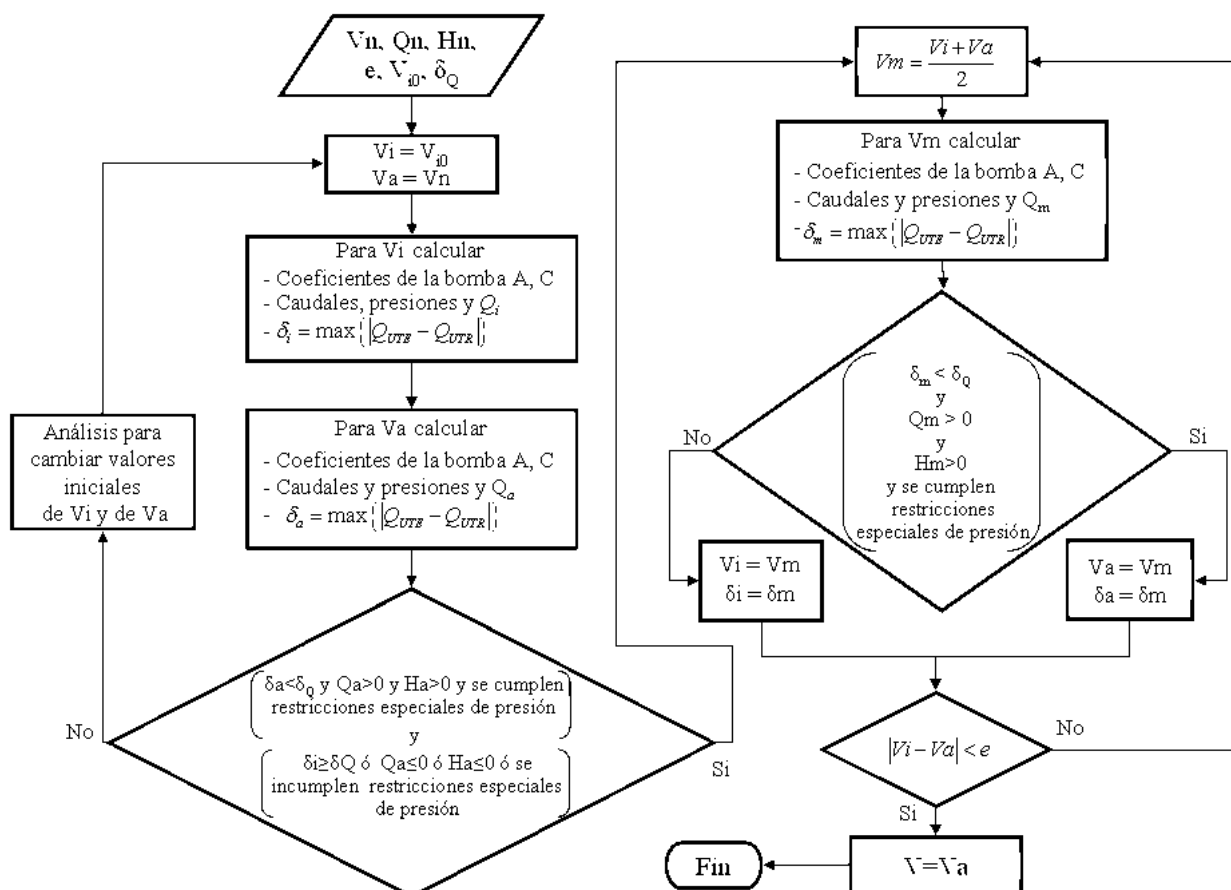


Figura 2.4. Algoritmo para determinar la velocidad de operación de la bomba del CSAF.

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.

2.2.4 Modelación matemática para el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el trabajo de compresión en la unidad enfriadora

La pretensión de esta modelación es evaluar en el ciclo de refrigeración de una etapa, los efectos en los requerimientos de potencia eléctrica que representan las diferentes combinaciones de ocupación de los locales. A pesar de existir expresiones determinísticas para el cálculo de trabajo de compresión, estas no tienen como finalidad predecir el desempeño real de los compresores, sino mostrar las relaciones entre las variables importantes [47, 62]. Por otra parte, los fabricantes proporcionan los datos de funcionamiento de los equipos de refrigeración en forma de gráficos o tablas que recogen la capacidad y la potencia en correspondencia con las temperaturas de evaporización y condensación (ver Figura 1, Anexo 9). Como los gráficos de potencia no siempre están disponibles y el ciclo teórico puede modificarse para que se parezca bastante a los sistemas reales [47, 62], entonces se plantean los pasos siguientes que permiten determinar la potencia del compresor para un ciclo de refrigeración de una etapa insertado en un SCCAH:

1. Determinación de las entalpías del gas refrigerante en el ciclo de compresión.

La temperatura de condensación debe ser de 5 a 12 °C superior a la del fluido que absorbe el calor que entrega el refrigerante en el condensador. Para los condensadores enfriadores por agua se elige de 5 a 6 °C y para los enfriados por aire de 8 a 12 °C [92]. La temperatura del medio de enfriamiento utilizado en la presente investigación corresponde a la temperatura ambiente para las condiciones climatológicas de la localidad, y la temperatura de condensación 8 °C superior a la temperatura ambiente. La temperatura de evaporización se elige en aproximadamente 5 °C inferior a la temperatura de salida de agua de la enfriadora.

A partir de las temperaturas de condensación y de evaporización y con la ayuda del diagrama de presión-entalpía del gas refrigerante (ver Figura 2, Anexo 9) o mediante tablas, se buscan las presiones de trabajo y las entalpías del ciclo que se presentan en la Figura 2.5.

h_6 - entalpía de vapor saturado a la entrada del compresor; kJ/kg.

h_2 - entalpía teórica del vapor sobrecalentado a la salida del compresor; kJ/kg.

h_5 - entalpía del líquido saturado; kJ/kg.

h_4 - entalpía de la mezcla saturada a la entrada del evaporador; kJ/kg.

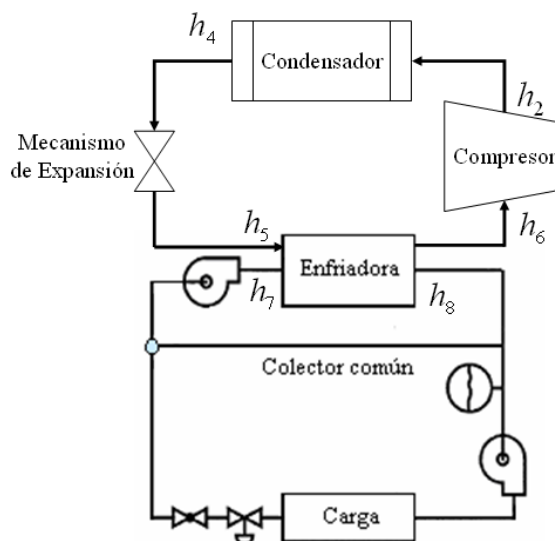


Figura 2.5. Esquema funcional simplificado de un SCCAH.

2. Determinación del trabajo isentrópico.

$$W_{Real} = h_2' - h_6 \tag{2.19}$$

$$h_2' = \frac{h_2 - h_6}{\eta_s} + h_6 \tag{2.20}$$

En estas expresiones: W_{Real} es el trabajo real de compresión (kJ/kg), h_2' la entalpía real del gas refrigerante a la descarga del compresor (kJ/kg) y η_s el rendimiento isentrópico (adimensional).

3. Determinación del flujo másico necesario del refrigerante.

$$N_C = m_R \cdot W_{real} \tag{2.21}$$

$$m_R = \frac{m_{CPAF} (h_7 - h_8)}{h_6 - h_5} \tag{2.22}$$

$$m_{CPAF} = \frac{Q_R \cdot \theta}{h_7 - h_8} \tag{2.23}$$

Donde:

$N_C = P_{ec}$ - potencia eléctrica requerida por el compresor; kW.

Q_R - carga térmica máxima a extraer del edificio; kW.

m_R - flujo másico de refrigerante; kg/s.

m_{CPAF} - flujo másico del agua por el evaporador (constante); kg/s.

h_5 - entalpía del refrigerante (R22) a la entrada del evaporador; kJ/kg.

h_7, h_8 - entalpía del agua a la entrada y salida del evaporador respectivamente (kJ/kg). En este caso h_8 depende de la temperatura de salida del agua prefijada en la enfriadora.

θ - factor de diversidad; adimensional.

La determinación del flujo de agua al evaporador, se realiza en función de la carga térmica de enfriamiento máxima a vencer para todos las habitaciones ocupadas, con un factor de diversidad igual a uno para garantizar un equilibrio con el flujo de agua en el CSAF.

4. Balance de masa y energía en el punto de mezcla en el colector del SCCAH.

En la Figura 2.6 el punto de mezcla en un SCCAH es donde confluyen el agua de retorno del CSAF y el flujo de agua que se bifurca en el colector común, debido a las cargas parciales.

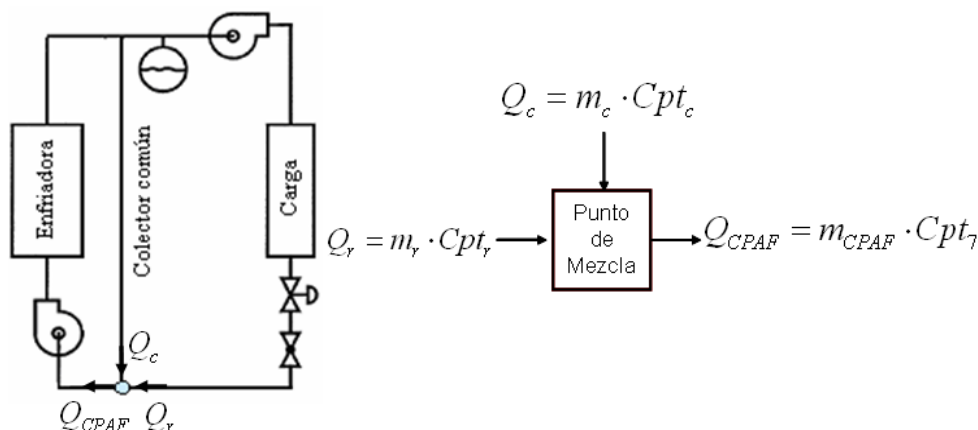


Figura 2.6. SCCAH simplificado: balance de masa y energía en el punto de mezcla.

La cantidad de estos dos fluidos y su temperatura determinan la temperatura del agua de entrada al evaporador. De esta temperatura depende la entalpía h_7 y para determinar su valor, se hace necesario realizar un balance de masa y energía en el punto de mezcla

A partir del análisis de la Figura 2.6 se obtiene la siguiente expresión de balance.

$$m_r Cpt_r + m_c Cpt_c = m_{CPAF} Cpt_7 \quad (2.24)$$

Donde:

m_r - flujo másico de agua que retorna en correspondencia con la carga parcial; kg/s.

m_c - flujo másico del agua a través del colector común; kg/s.

t_r - temperatura de retorno del agua; K.

t_c - temperatura del agua a través del colector, se considera igual a la temperatura del agua a la salida de la enfriadora; K.

t_7 - temperatura de entrada del agua al evaporador; K.

C_p - calor específico del agua (kJ/kg.K).

Como $m_c = m_{CPAF} - m_r$ al sustituir m_c en (2.24) se tiene que:

$$m_r \cdot C_p t_r + (m_{CPAF} - m_r) \cdot C_p t_c = m_{CPAF} \cdot C_p t_7 \quad (2.25)$$

Para determinar el valor de t_r es necesario determinar m_r a partir de las respuestas de la modelación hidráulica. En correspondencia, t_r se determinará por el valor medio ponderado de todas las temperaturas de salida de cada unidad terminal en funcionamiento.

5. Determinación de la temperatura y la entalpía del agua en la entrada del evaporador.

Al considerar el valor de C_p constante debido a la pequeña variación en el intervalo de temperaturas que se manifiestan en el proceso, se tiene que la temperatura del agua en la entrada de la enfriadora se determina por:

$$t_7 = \frac{m_r}{m_{CPAF}} \cdot t_r + t_c - \frac{m_r}{m_{CPAF}} \cdot t_c \quad (2.26)$$

6. A partir del valor de t_7 se puede determinar la entalpía del agua (h_7) en estas condiciones.

Teniendo en cuenta las diferentes consideraciones y expresiones anteriores, la potencia eléctrica requerida para el trabajo de compresión se determina mediante la expresión 2.27.

$$P_{ec} = \frac{m_{CPAF} (h_7 - h_8)}{(h_6 - h_5)} \cdot h_2 - h_6; \text{ kW} \quad (2.27)$$

Si se toman temperaturas de salidas diferentes a las requeridas por las cargas térmicas parciales de las habitaciones ocupadas, entonces: o se incumplen los parámetros de confort, o se incrementa innecesariamente la demanda de potencia eléctrica. Generalmente el problema

tecnológico más común es encontrar la temperatura de salida que mantenga el confort con el menor gasto de energía. Es práctica usual que el control de la temperatura de salida del agua de la enfriadora se realice bajo criterios incorporados por los fabricantes. Las variantes más comunes toman como referencia la temperatura de salida o la temperatura de entrada.

La ASHRAE reconoce la existencia de 18 modelos entre estadísticos y dinámicos, que en algunos casos sugieren el cambio de la temperatura de envío, los cuales emplean desde métodos estadísticos hasta la inteligencia artificial para su solución [156]. Sin embargo, el uso de la ocupación como variable no ha sido abordado de forma exhaustiva, máxime por su significado en los actuales SCCAH a flujo variable.

El incremento de la temperatura de salida del agua de la enfriadora incrementa su eficiencia. En los sistemas a flujo constante, resulta una regla básica mantener esta temperatura tan alta como sea posible. Sin embargo, en los sistemas a flujo variable, no siempre es el método más eficiente de operación. La razón está dada en que el incremento de la temperatura del agua, requiere de más agua y energía eléctrica para satisfacer la carga de enfriamiento [67].

Para las condiciones de operación de los SCCAH en Cuba, Monteagudo en el 2005 propuso una vía para elevar la temperatura de salida del agua de la enfriadora considerando las variables climatológicas, demostrando que para similares ocupaciones esta variable puede asumir valores energéticamente racionales [37]. Por otra parte, Montelier en el 2008 de forma similar y partiendo de un modelo de consumo de energía eléctrica de la enfriadora optimiza mediante algoritmo genético esta temperatura de salida [19].

El nuevo enfoque que aquí se presenta sugiere la integración de los componentes térmicos e hidráulicos de los CSAF y permite proponer valores adecuados de temperatura de envío atendiendo a los valores de la principal variable considerada en esta investigación: la ocupación.

Los sistemas de enfriamiento de las habitaciones son todos semejantes y la eficacia de su funcionamiento depende del flujo constante de agua que le llega con cierta temperatura t_s (temperatura de salida del enfriador), que para la carga térmica de enfriamiento de la habitación

facilita llevar la temperatura en esta hasta el valor de confort.

Basado en las consideraciones que se tuvieron en cuenta durante la modelación térmica de las habitaciones, puede asumirse que mantener el confort en las habitaciones ocupadas es equivalente a mantener un valor constante de la temperatura de la habitación (24 °C). Durante el diseño del CSAF se fijan los valores nominales de t_8 y de t_r como valores estándares que, debido a la variabilidad de las cargas térmicas, conducen a situaciones de uso irracional de la energía en el enfriador o a situaciones de falta de confort en las habitaciones.

Siendo variable (en cada habitación y en el tiempo) la carga térmica de enfriamiento, entonces en esta modelación, pueden considerarse variables o constantes, la temperatura de salida de la enfriadora t_8 (entrada a las habitaciones) y la temperatura de retorno de las habitaciones t_r .

A cada habitación i (unidad terminal) entra un caudal de agua a la temperatura t_8 y sale a una temperatura t_i . La temperatura t_i depende del caudal de agua que circula en la unidad terminal, de la carga térmica de la habitación (CTE_i) y del calor específico del agua a estas temperaturas $Cp(t)$. Estas magnitudes se pueden relacionar a través de la expresión del calor [155, 157, 158],

$$CTE_i = m_i \int_{t_8}^{t_i} Cp(t) dt = \rho Q_{UTi} \left[\int_0^{t_i} Cp(t) dt - \int_0^{t_8} Cp(t) dt \right] \quad (2.28)$$

donde m_i es el flujo másico, ρ es la densidad del agua y Q_{UTi} es el flujo volumétrico de agua en la unidad terminal (determinado en el cálculo hidráulico) . El valor de t_r se puede calcular como:

$$t_r = \left[\sum_{i=1}^{HDO} m_i t_i \right] / \left[\sum_{i=1}^{HDO} m_i \right] \quad (2.29)$$

Entonces el valor de t_7 se puede calcular mediante la expresión 2.26.

Debido a que la temperatura de confort en las habitaciones es de 24 °C y ésta se alcanza cuando t_i sea constante e igual a 12 °C, entonces de lo que se trata es de encontrar un valor racional de t_8 para cada ocupación tal que se garantice que los valores de todos los t_i y t_7 estén cercanos y por encima de 12 °C. Para encontrar el valor racional de t_8 debe utilizarse la expresión:

$$CTE_{HDO} = m_{HDO} \int_{t_8}^{t_7} Cp(t) dt \quad (2.30)$$

Donde m_{HDO} es el flujo másico para la ocupación y CTE_{HDO} es su carga térmica.

El valor de CTE_{HDO} puede asumirse a partir de diferentes criterios. Uno de ellos es tomarlo como el valor medio de todos los valores de carga térmica en las habitaciones durante todo el tiempo que se analice, pero si es acentuada la variabilidad de estas cargas térmicas entonces algunas habitaciones pueden llegar a tener temperaturas significativamente diferentes a las de confort. La variante que se propone es tomar a CTE_{HDO} como la suma de este promedio más tres veces la desviación estándar correspondiente. En esta variante el consumo de energía en la enfriadora toma valores medios racionales y al mismo tiempo es de un 99 % la probabilidad de que la CTE de cualquier habitación esté por debajo del valor considerado.

Otra posible solución es tomar CTE_{HDO} como el valor máximo de las cargas térmicas de manera que t_8 será la menor de todas las que se necesitan. En este caso algunas habitaciones llegarán a tener temperaturas menores a las de confort (cuestión que puede regularse con el control de la habitación) y no se controla el consumo de energía en la enfriadora.

2.2.5 Algoritmo resumen para el cálculo de la función objetivo

Una vez descritos los elementos del análisis externo y el análisis interno de la tarea de ingeniería, y específicamente los elementos de la modelación matemática, se llega a la definición en detalles de la función objetivo, la cual resulta de la suma de las expresiones 2.17 y 2.27.

$$P_t = \frac{\rho g H Q}{1000 \eta_b \eta_m} + \frac{m_{CPAF} (h_7 - h_8)}{(h_6 - h_5)} \cdot (h_2' - h_6); \text{ kW} \quad (2.31)$$

La Figura 2.7 muestra el algoritmo que integra los cálculos de las variables del sistema a la función objetivo. En la estrategia general de modelado, se determinan los caudales de agua en las unidades terminales, y a partir de los valores de las cargas térmicas de enfriamiento de cada local, determinados por los modelos en RNA, se calcula los cambios de temperatura del agua. De los resultados de la carga térmica se pueden utilizar sus diferentes variantes (valor nominal,

parcial, promedio del día o máxima para el año).

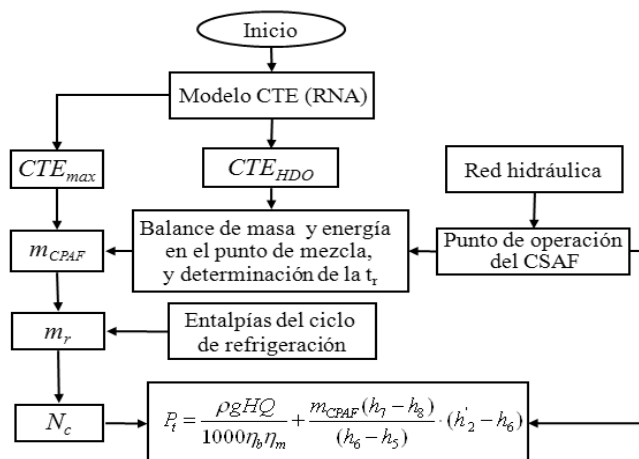


Figura 2.7. Algoritmo para obtener los resultados de las variables de la función objetivo.

Se evalúa en el modelo de la red hidráulica, el efecto de las distintas variantes de ocupación. Para cada variante analizada se define la velocidad de rotación de la bomba que garantiza los caudales en las unidades terminales con el menor requerimiento energético y el valor de presión correspondiente. En cada corrida se obtienen las informaciones de las presiones en los nodos y los caudales en los tramos mediante la vigilancia del cumplimiento de los parámetros hidráulicos en unidades terminales, válvulas de equilibrado y en el nodo crítico del CSAF.

De forma paralela se determina mediante el ciclo de compresión del gas refrigerante, la potencia necesaria en el compresor que permita extraer el calor absorbido por el agua, según los pasos descritos en el epígrafe 2.2.4.

En el Anexo 4 aparecen los datos específicos de los elementos de equilibrado hidráulico para el caso de estudio a emplear en la investigación; y en el Anexo 6 la descripción de la metodología y los datos considerados para establecer la línea base de la modelación térmica del edificio.

2.3 Algoritmos para la organización de los procedimientos de cálculo

En esta investigación, la operación eficiente de los SCCAH se formula a partir de una estrategia de ocupación de los locales. Esta estrategia es en principio una tarea de optimización combinatoria ya que cada ocupación (de un conjunto finito de ocupaciones posibles) debe evaluarse en la función objetivo para determinar cuál de ellas la minimiza. Si no es excesiva la

magnitud del total de combinaciones, entonces se aplican Algoritmos de Búsqueda Exhaustiva; en caso contrario deberá aplicarse otro método, eligiéndose los Algoritmos Evolutivos.

Las opciones de ocupación son representadas mediante una cadena de caracteres 1 y 0 que significan la ocupación o no de la habitación. Las opciones pueden ordenarse en una lista, a cada opción le corresponde biyectivamente un número natural que representa su posición en la lista.

2.3.1 Algoritmo del procedimiento para la optimización energética de la operación de los sistemas de climatización centralizados todo-agua a flujo variable

En la Figura 2.8 se muestran los componentes del modelo matemático conceptual de preparación y toma de decisiones, y se muestra una síntesis del procedimiento general de la operación eficiente de los SCCAH con CSAF 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 Estrategia Ocupacional bajo Criterios Energéticos 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 valor de MVCR. Si $HAO = D$ entonces la solución es única.

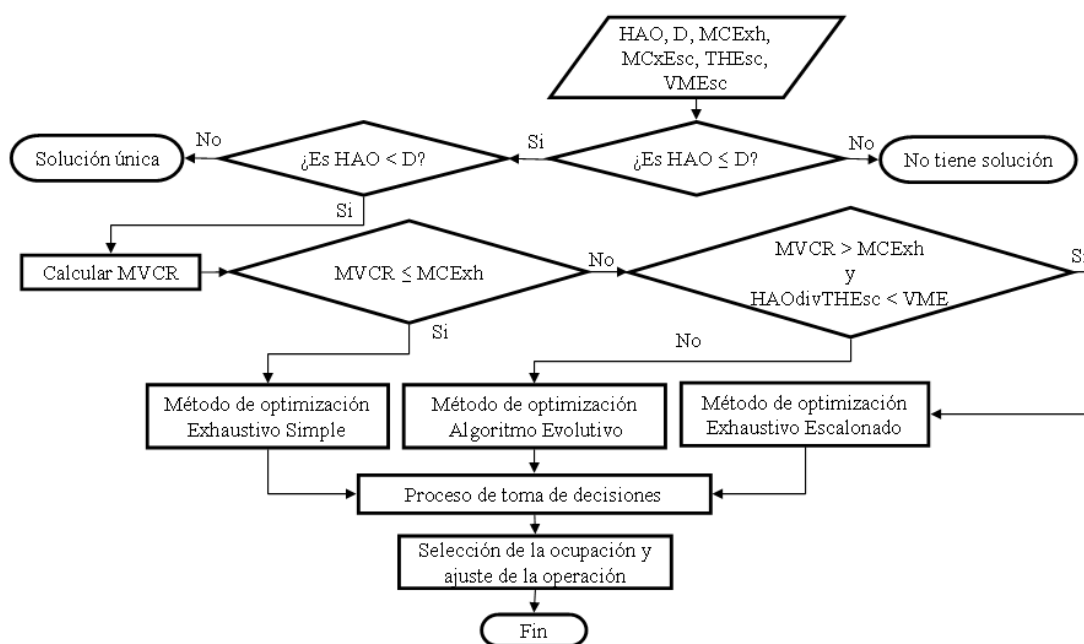


Figura 2.8. Procedimiento para la operación eficiente de los CSAF en SCCAH a flujo variable.

Por ejemplo, $D = 10$ y $HAO = 4$, se tiene que: $MVCR = \frac{D!}{(D-HAO)! HAO!} = \frac{10!}{(10-4)!4!} = 210$

En correspondencia con el valor de MVCR y la capacidad de cómputo disponible, se selecciona el método de optimización a utilizar y éste es complementado con un proceso de toma de decisiones que puede incluir criterios no formalizables en la determinación de la mejor ocupación. Cuando la decisión de la ocupación depende solo de criterios formalizables el resultado del IE converge hacia un óptimo global, en caso contrario el óptimo es local.

En la Figura 2.8 MCExh, 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, define el método de optimización a utilizar.

La estrategia computacional que se elabore debe tener en cuenta la laboriosidad de la búsqueda de soluciones mediante códigos variables, por lo cual es recomendable almacenar resultados, favoreciendo la disminución del tiempo de cálculo en caso de coincidencia de variantes de ocupación. Una consecuencia positiva es que, además, se crean bases de datos y patrones de conocimiento en cuanto a la operación del sistema, que son la base de los denominados sistemas de Diagnóstico y Detección de Fallas [93, 159].

Los análisis interno y externo permiten sustentar los siguientes pasos del procedimiento para la optimización de la operación de los SCCAH con CSAF a flujo variable en hoteles:

1. Determinación de las cargas térmicas de enfriamiento de la edificación para un año característico mediante simulación térmica.
2. Modelación de la carga térmica de enfriamiento de cada habitación y otros locales mediante modelos predictivos basados en RNA.
3. Modelación de la red hidráulica del CSAF mediante el método del gradiente.
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 con una determinada ocupación de las habitaciones del hotel.

6. Realizar la 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 la 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.

2.3.2 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.

En el ejemplo que se ha descrito, las posibles ocupaciones son:

$$O_1 = W_4W_5 W_7W_9 W_{10}W_{13} W_{15}W_{16} W_{17}W_{20} = 0000001111, B_1 = 15$$

$$O_2 = W_4W_5 W_7W_9 W_{10}W_{13} W_{15}W_{16} W_{17}W_{20} = 0000010111, B_2 = 23$$

$$O_3 = W_4W_5 W_7W_9 W_{10}W_{13} W_{15}W_{16} W_{17}W_{20} = 0000011011, B_3 = 27$$

$$O_4 = W_4W_5 W_7W_9 W_{10}W_{13} W_{15}W_{16} W_{17}W_{20} = 0000011101, B_4 = 29$$

$$O_5 = W_4W_5 W_7W_9 W_{10}W_{13} W_{15}W_{16} W_{17}W_{20} = 0000011110, B_5 = 30$$

...

$$O_{210} = W_4W_5 W_7W_9 W_{10}W_{13} W_{15}W_{16} W_{17}W_{20} = 1111000000, B_{210} = 960$$

Nótese que algunas de estas combinaciones tienen secuencias consecutivas de todos sus 1. Estas serán denominadas Secuencias Compactas. Entre ellas están: O_1 , O_5 y O_{210} . Insertando correctamente cada variante seleccionada O_i en la cadena W se tendrá establecida la nueva ocupación del hotel W_i que deberá ser evaluada desde el punto de vista energético.

El algoritmo para la generación de códigos binarios que representan la ocupación obtiene eficientemente el código O_c correspondiente al número de orden c de la ocupación. En su primer paso se establece el intervalo de búsqueda con el fin de aumentar la eficiencia del procedimiento. Para ello se determina entre cuáles Secuencias Compactas está la secuencia pedida; los órdenes de estas secuencias se denominarán S_1 y S_2 . A continuación se determina si el orden de la secuencia buscada está más cerca de S_1 (búsqueda ascendente) o de S_2 (búsqueda descendente) y, entre los valores de B , el mejor valor de comienzo de la búsqueda en el próximo paso y a este, se le denomina h . El seudocódigo correspondiente puede verse en el Anexo 10.

En el segundo paso, para $h, h+1, h+2, \dots$ se determinan cuáles de las cadenas binarias correspondientes tienen como suma de sus dígitos el valor HAO y de esta forma identificamos cuáles de ellas representan la ocupación de HAO habitaciones de D disponibles. Enumerando a partir de h estas cadenas, podemos encontrar para la cadena de orden c la cadena binaria correspondiente. El seudocódigo correspondiente puede verse en el Anexo 11.

2.3.3 Optimización mediante el método exhaustivo simple

Como puede observarse en la Figura 2.9 la esencia de este método es evaluar la función objetivo en todas las opciones y seleccionar aquella que la minimice. Una variante que enriquece el método es guardar un conjunto de las mejores soluciones factibles para seleccionar entre ellas aquella que sea la más compatible respecto de condiciones no formalizables.

En este algoritmo, las variables que caracterizan la ocupación que se seleccione como óptima son: S (orden que ocupa en la lista) y Z_{min} como valor del IE para la ocupación de orden S .

El algoritmo se inicia asumiendo que los valores por defecto son $S = 0$ y $Z_{min} = \infty$. Se utiliza como contador la variable i y para $i = 1, 2, \dots, MVCR$ se obtiene la ocupación W_i . Si esta

ocupación es factible, entonces es evaluada en la función objetivo obteniéndose los valores Z . Ahora se compara Z con Z_{\min} . Cuando el primero es menor que el segundo se asume que $S=i$ y $Z_{\min} = Z$ y además, la nueva solución es almacenada como población de mejores ocupaciones. Después de probar todas las opciones posibles, mediante un sistema de toma de decisiones se determina, entre las mejores soluciones almacenadas, aquella que es más compatible con los criterios formalizables y no formalizables de la explotación hotelera.

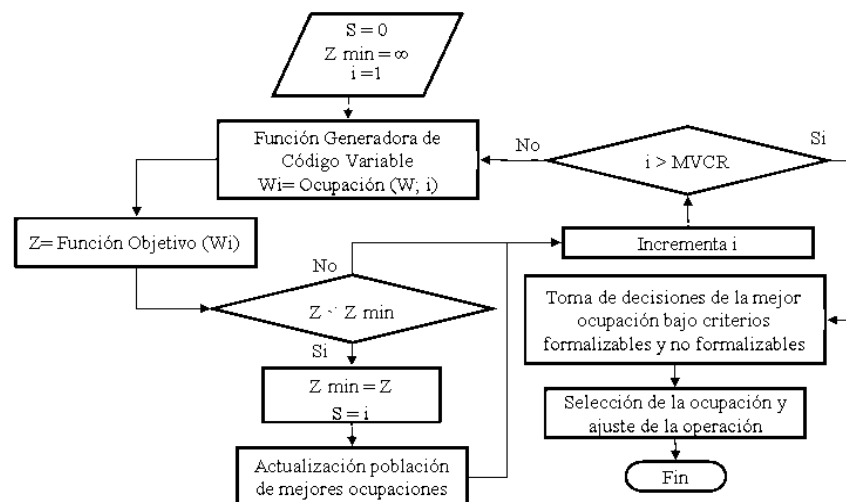


Figura 2.9. Algoritmo para la optimización mediante el Método Exhaustivo Simple.

2.3.4 Optimización mediante el método exhaustivo escalonado

Si se asume que T_T es el producto de $MVCR$ por el tiempo unitario de cómputo necesario para calcular Z para una variante de ocupación, y que T_T es mayor que el tiempo disponible para tomar una decisión en la Recepción del hotel, entonces se hace necesario cambiar la estrategia de optimización. La Figura 2.11 representa el algoritmo para dar solución a esta problemática.

Conocido el valor total de $HAO_T = HAO$ de habitaciones a ocupar, la variante que se propone en esta investigación consiste en aplicar varias veces el método exhaustivo simple explicado en el epígrafe 2.3.3 tomando un nuevo $HAO = P < HAO_T$, a este valor P se le denomina paso del escalón y al método, Exhaustivo Escalonado (ver el algoritmo en la Figura 2.10).

Sea $E = HAO_T \bmod P$. El número de veces que será aplicado el método exhaustivo simple es:

- $k = HAO_T \div P$, si $E = 0$;
- $k = (HAO_T \div P) + 1$, si $E \neq 0$. En este caso en el último escalón se toma $HAO=E$.

Por ejemplo: si $HAO_T = 25$, $D = 31$ y $P = 7$ entonces MVCR resulta 736281, $E = 4$ y $k = 3+1 = 4$.

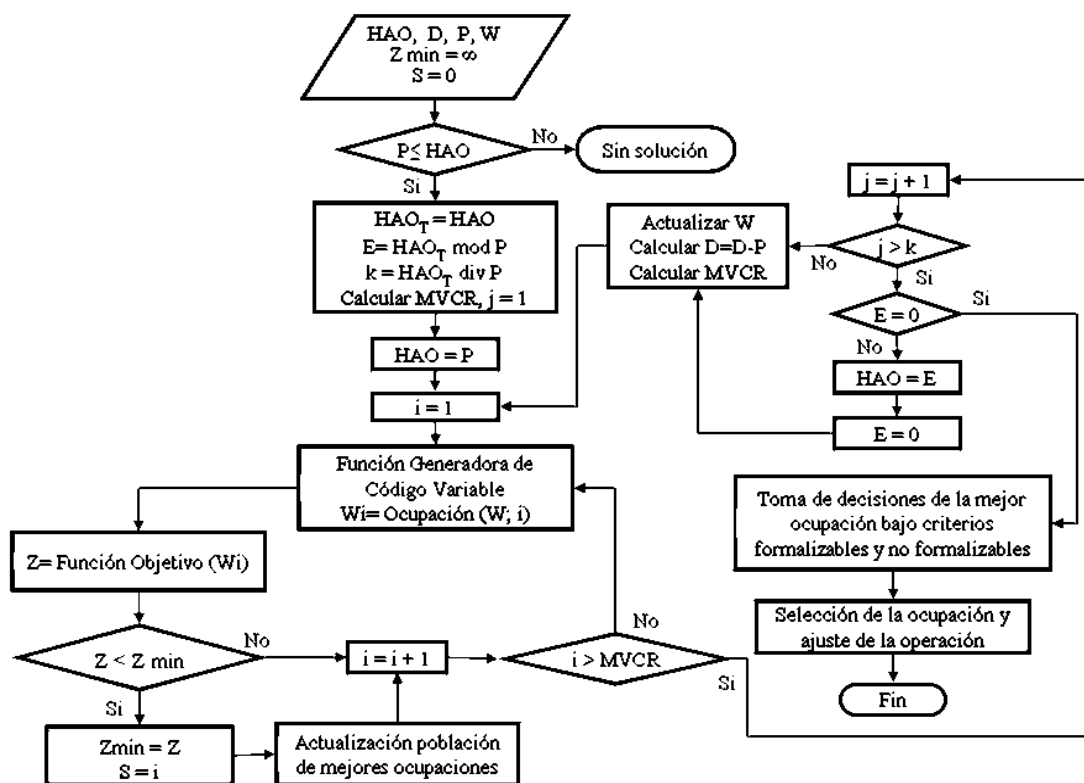


Figura 2.10. Algoritmo para la optimización mediante el Método Exhaustivo Escalonado.

La aplicación del método exhaustivo escalonado genera soluciones óptimas, pero en principio éstas son de menor calidad (en el sentido de la cercanía al óptimo absoluto) que las que se obtienen aplicando el método exhaustivo simple. Esto se manifiesta más en tanto disminuya P , por lo cual se recomienda que el paso sea tan grande como lo permita el valor de T_T .

La selección del paso también puede estar asociada a criterios numéricos y a criterios no formalizables basados en la experiencia de expertos. También debe considerarse que el escalonamiento se asocia a variantes de preselección sobre grupos de habitaciones semejantes (por ejemplo: vista al mar, piso de ubicación, cercanía dentro del sistema de climatización, etc.).

2.3.5 Optimización mediante computación evolutiva

La “Computación Evolutiva” se refiere a una familia de técnicas inspiradas en la simulación del proceso de evolución natural [153, 160]. Hay varias formas de inicializar la Población y es común hacerlo aleatoriamente. Las modificaciones de la población, se hacen generalmente mediante: Selección, Mutación y Cruzamiento; los dos últimos procedimientos conducen a los

algoritmos genéticos. En la inicialización como en la modificación de la Población, solo se admiten los individuos aptos o factibles que son aquellos que cumplen con las restricciones del problema. Son varios los criterios de parada en los algoritmos evolutivos, sin embargo el utilizado en el algoritmo genético seleccionado en la presente investigación, se basa en que los mejores individuos no han sufrido cambios significativos en las últimas generaciones.

En la Figura 2.11 aparece el algoritmo evolutivo utilizado. En esta figura, cada O_i ($i=1, \dots, MVCR$), variante de ocupación de las habitaciones disponibles en el hotel, es un individuo del universo de población. La Población consta de T_{PI} individuos, número definido particularmente por el usuario para cada caso y que no debe ser mayor que MVCR. La selección aleatoria de individuos aptos se hace tomando una cadena de longitud HAO, donde todos sus elementos son 1. Luego se incorporan D-HAO caracteres 0 en posiciones aleatorias.

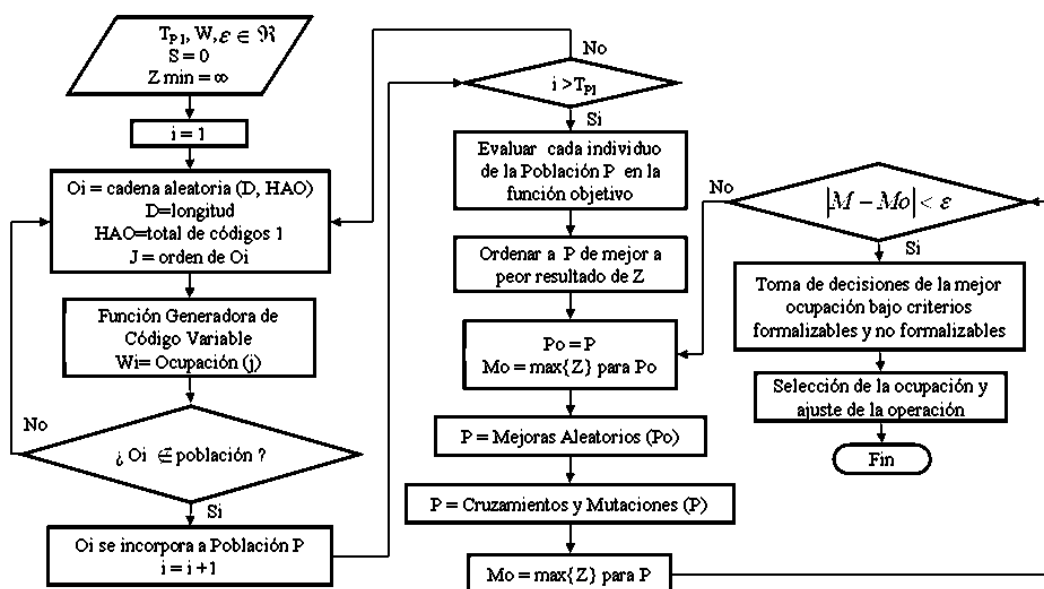


Figura 2.11. Algoritmo para la optimización mediante algoritmo genético.

Las mejoras de la población se han programado en dos etapas. En la primera se realizan mejoras sustituyendo el peor individuo de la población por un nuevo individuo, seleccionado aleatoriamente, apto y de mejor resultado al evaluar la función objetivo; este procedimiento se detiene cuando se realice cierto número prefijado de mejoras (ver Figura 1 del Anexo 12).

La segunda etapa consiste en tomar el 40 % de los mejores individuos de la Población (P_0) y se le realizan mutaciones aleatorias a cada uno de ellos. De la cadena de n caracteres que significa

cada individuo, se escogen aleatoriamente dos genes, si son diferentes se intercambian de posición, esto se repite k veces, donde k es inferior a la mitad de la longitud de n . Luego se realizan los cruzamientos entre dos cadenas padres S_1 y S_2 , creándose un hijo h_1 de tamaño n (ver Figura 2 del Anexo 12). Los genes iguales de los padres se heredan y los diferentes quedan vacíos; ahora son seleccionados aleatoriamente algunos de los espacios vacíos de h_1 , completándolos con 1 hasta completar las HAO y el resto de los espacios se completan con 0. Los “hijos” de mejores resultados, sustituyen a los peores individuos de la población.

CONCLUSIONES del capítulo:

1. 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 generación de las variantes de ocupación de los locales.
2. El Indicador de eficiencia Z , expresa el mejor compromiso entre los requerimientos de potencia eléctrica por bombeo y por trabajo en el compresor. La optimización del IE consiste en minimizar los requerimientos de potencia eléctrica durante la operación de los CSAF garantizando las condiciones energéticas racionales de explotación del SCCAH.
3. La modelación térmica se establece a partir modelos basados en RNA para cada local, abarcando las condiciones de un año promedio y se adapta a la variabilidad de la climatología local, definiéndose los caudales necesarios en las unidades terminales.
4. La modelación hidráulica, inserta de manera adecuada a la red a flujo variable en el SME, calculando las pérdidas de energía, los caudales y la velocidad de rotación de la bomba con el respectivo valor de presión, satisfaciendo las diferentes condiciones de ocupación.
5. La generación de variantes de HAO constituye el operador del sistema y debe ser estudiado en función del universo de soluciones del MVCR que cumplan con las exigencias del SME. De la cantidad de combinaciones dependerá el criterio de solución de la función objetivo.
6. Se hace necesario concebir un sistema computacional que permita integrar la estrategia de modelado para la operación de los SCCAH con CSAF a flujo variable, mediante el cual se indique el valor de la variable de decisión a través de una adecuada EOCE.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA PROPUESTO EN UN CASO DE ESTUDIO

3 IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA PROPUESTO EN UN CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se presentan los resultados de la implementación del procedimiento para la optimización energética de la operación de los SCCAH con CSAF a flujo variable en climatización centralizada de hoteles. Se ha seleccionado un edificio de tres plantas para la modelación energética de manera que se puedan demostrar los algoritmos del procedimiento.

Los objetivos del presente capítulo son los siguientes:

- Implementar una aplicación informática que facilite los cálculos debido a la complejidad del trabajo manual con los modelos, mostrando la validación de sus algoritmos y su integración en el procedimiento general.
- Desarrollar la simulación termo-hidráulica para diferentes estados operacionales del caso de estudio, mostrando los resultados del proceso de optimización y de la variable de decisión que minimiza el Indicador de Eficiencia.
- Realizar una valoración técnico-económica y medioambiental del empleo de EOCE en la explotación hotelera, así como de las herramientas desarrolladas para establecer el procedimiento operacional propuesto.

3.1 Presentación del circuito secundario de agua fría del caso de estudio

En el hotel Blau Costa Verde existen 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. En la Figura 3.1 se aprecian: una vista parcial del edificio, una habitación típica y la sala de máquinas donde se encuentra la bomba de la zona escogida.

Las características nominales de la bomba de la zona 6 son: marca STERLING de la serie SIHI 032200B con 28 m³/h de caudal y una carga de 70 m. El motor asincrónico acoplado de forma

directa a la bomba es del modelo AM132 – SZA2, con una potencia nominal de 8,8 kW y 3490 rev/min. Al motor se encuentra acoplado un variador de velocidad ALTIVAR 31 [52].



Figura 3.1. Imágenes representativas del CSAF de la zona 6.

La red de tuberías es mallada de material PVC. En la Figura 3.2 se muestra una imagen parcial de la red hidráulica y su representación simplificada con los nueve ramales principales. Para la validación de procedimiento se escogen los ramales AB y CD con seis habitaciones cada uno.

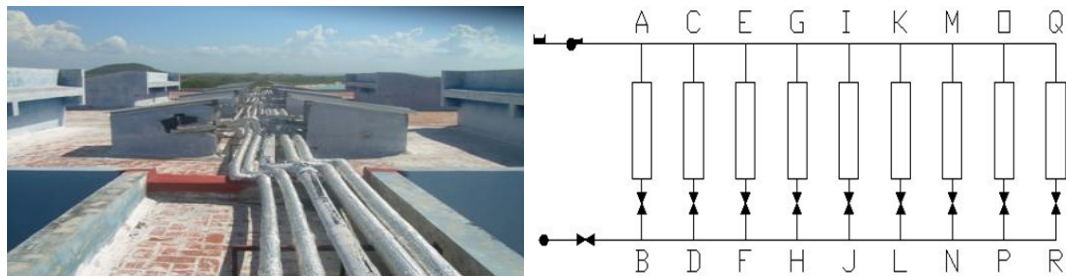


Figura 3.2. Imagen parcial y esquema simplificado de la red hidráulica.

Dentro de los componentes de la red se resaltan, las unidades terminales (fan-coil) y las válvulas de equilibrio (ver Anexos 3 y 4). 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.

Para mayores detalles, en el Anexo 13 se presentan más informaciones tales como: la composición general del SCCAH del hotel; los planos de planta del edificio e imágenes del interior de las habitaciones; informaciones constructivas; informaciones del catálogo de la bomba y del variador de velocidad utilizado; datos de los tramos y nodos de la red hidráulica a utilizar en la validación; e imágenes de las válvulas de equilibrio y de las unidades terminales.

Condiciones generales para la modelación

Para realizar una modelación se deben establecer determinadas fronteras o condiciones sobre las cuales se realiza. En el caso de estudio estas condiciones se definen como:

- La cantidad de habitaciones es finita y se consideran las condiciones climatológicas de la

región como elemento decisivo en las características térmicas de la edificación, a partir de los datos de la estación climatológica más cercana y los parámetros solares de la localidad.

- Como base se toman los datos de la CTE obtenidos con el simulador térmico de edificios de la UABC, correspondientes a los valores horarios para un año promedio.
- Se conocen las características técnicas de las unidades terminales (*fan-coil*), pero no se conocen las efectividades térmicas de la convección forzada.
- El análisis individual del CSAF es factible debido a la ausencia de iteración con el CPAF, ya que se emplea un colector común entre ambos circuitos y un flujo constante en el CPAF.
- Las condiciones iniciales de operación del CSAF son de presión constante y flujo variable, cumpliéndose los requerimientos del fluido en cuanto a las diferentes trayectorias en la red.
- La red hidráulica es mallada, con sistema de tuberías con retorno directo y unidades terminales dispuestas verticalmente entre pisos y horizontalmente en el mismo piso (conexiones en paralelo). Las válvulas empleadas en las unidades terminales son motorizadas, de dos vías y de operación on/off.
- Se considera equilibrado el sistema hidráulico y se conocen las características técnicas de las válvulas de equilibrado y de compensación.
- Los cálculos del trabajo de compresión se establecen bajo la consideración de un ciclo de una etapa y como refrigerante el R22.
- No se consideran significativas las ganancias de calor en las tuberías debido al bajo coeficiente de conductividad térmica del PVC y el buen estado técnico del aislamiento.
- El control de temperatura de las habitaciones se realiza en torno al valor normado de 24 °C en condiciones normales de ganancias de calor sensible y latente.

3.2 Implementación de los algoritmos del procedimiento

Para lograr la integración entre el análisis externo de la operación de los SCCAH con CSAF a flujo variable, el análisis interno para la modelación matemática, y la simulación del objeto de estudio se elaboró una aplicación informática. La aplicación, denominada “OcupaHotel MTH”, fue programada por miembros del CEETAM mediante el desarrollador Delphi versión 7.0 [161].

La aplicación está compuesta por tres ventanas principales que permiten, dada una ocupación y condiciones ambientales determinadas, realizar los cálculos correspondientes a: la modelación y simulación hidráulica; la modelación y simulación térmica del edificio; y la determinación de las mejores variantes de ocupación, usando los métodos de optimización descritos en el capítulo 2.

La aplicación permite sugerir a los explotadores de las instalaciones hoteleras una EOCE que se actualiza sistemáticamente de acuerdo con las restricciones de la operatividad. Se define en cada caso particular, la ocupación, el valor de la presión mínima de trabajo del CSAF y la temperatura más racional de salida del agua de las enfriadoras.

3.2.1 Descripción de la aplicación informática

La **modelación hidráulica** tiene como objetivo principal el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el bombeo (ver expresión 2.17), y sustenta sus cálculos en el Método del Gradiente. Para este modelo, 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 para determinar la velocidad de rotación mínima de la bomba que se presenta en el epígrafe 2.2.3.

Para lograr operatividad, es posible actualizar en cualquier momento los datos de todas las tablas que contienen información de la red. Es necesario definir también: el paso para la búsqueda de la velocidad de rotación 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 del punto crítico 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 (según la temperatura promedio del agua); y el tamaño de la rugosidad de las tuberías.

Para identificar los tramos en los que se desean determinados caudales, en correspondencia con los requerimientos térmicos (especialmente en las unidades terminales), se marcan con el identificador **X** para que el programa identifique estas referencias. 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. En la Figura 1 del Anexo 14 se aprecia la ventana principal de modelación hidráulica descrita.

La **modelación térmica** tiene como objetivo principal el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el trabajo de compresión (ver expresión 2.27). Esta modelación facilita diferentes análisis relacionados con las individualidades de las cargas térmicas de las habitaciones, la obtención de las respuestas térmicas de todo el edificio para una determinada ocupación y condiciones ambientales. Entre otras opciones, se puede determinar cuál es la temperatura de salida del agua de la enfriadora de modo que el sistema funcione más racionalmente.

A partir de la selección de una hora y un día del año se obtiene desde una base de datos el valor de temperatura ambiente correspondiente, pero estos datos pueden ser incorporados desde fuentes predictivas como el Departamento de Pronósticos del Instituto de Meteorología o pueden ser el resultado de una medición directa. Estos datos son utilizados para determinar la carga térmica de enfriamiento a partir del modelo basado en RNA de la habitación seleccionada.

Para el cálculo de la temperatura de salida del agua de la unidad terminal pueden considerarse: los valores promedios de la simulación térmica, los valores máximos, o el resultado de la carga térmica según el modelo RNA.

Conociendo la base de datos de la temperatura ambiente, es posible determinar las cargas térmicas para un año cualquiera, así como las temperaturas de salida del agua esperada en las unidades terminales, considerando los cambios en el C_p (2.28) y los caudales de agua según las condiciones particulares de la red hidráulica en función de la ocupación. Se pueden determinar los flujos de agua específicos para cada situación particular de la CTE en caso que se empleen

válvulas de control de acción modulante en las unidades terminales.

En esta ventana de la aplicación, también se puede determinar la potencia eléctrica que requiere el SCCAH (función objetivo) considerando las variantes: solo la parte térmica del sistema; solo la parte hidráulica; ambas. Este cálculo puede hacerse considerando el valor racional de la temperatura de salida del agua de la enfriadora previamente calculado. Es posible considerar: los caudales que se obtienen de la modelación hidráulica para el cálculo térmico; un porcentaje específico de incumplimiento admisible de los caudales en las unidades terminales; y la activación de la función de penalización de las presiones y velocidades. En la Figura 2 del Anexo 14 se puede apreciar la ventana de la modelación térmica con sus diferentes prestaciones.

Desde la ventana para **la optimización combinatoria** (ver Figura 3, Anexo 14) se introducen los datos de las habitaciones (habitación habitable, si está ocupada o no, la carga térmica base para el cálculo y el grupo de clasificación habitacional), que permite el cálculo del MVCR a valorar para que el sistema tome la decisión del método de optimización a utilizar.

Con las opciones de esta ventana es posible seleccionar la cantidad de habitaciones a ocupar, calculándose el total de combinaciones posibles bajo esta restricción. También se puede solicitar para un determinado número de orden, la combinación en números binarios y el equivalente en la base numérica 10. En función de: el MVCR; la máxima combinatoria exhaustiva; y la máxima combinatoria por escalón definidas por el usuario, se refleja el método de optimización que se empleará. Se puede evaluar la función objetivo para una combinación particular con la facilidad de representar el resultado, así como el tiempo de evaluación computacional.

Al realizar una **búsqueda exhaustiva simple** se pueden grabar los resultados y también usarlos en otras corridas. Para la **optimización exhaustiva escalonada**, previamente debe seleccionarse un estilo de selección de los tres posibles: todos los datos, por grupos o los k elementos que demandan menor potencia bajo determinados criterios. Cuando se escoge la variante por grupos es necesario definir los grupos en los cuales se buscarán las soluciones (estos grupos pueden ser, por patinejos, por pisos, por las habitaciones con vista al mar, etc.). Otro elemento esencial es

definir la cantidad de habitaciones por escalón, así como el valor máximo de escalones.

Por último, para la optimización con **algoritmo genético** es necesario: incorporar el tamaño de la población inicial, la cantidad de mejoras aleatorias y el porcentaje de la población que será objeto de mutaciones y cruzamientos.

3.3 Validación de los principales algoritmos del procedimiento

En este epígrafe se presenta la validación de los principales algoritmos del procedimiento, para algunos de ellos se emplean informaciones correspondientes al caso de estudio.

3.3.1 Modelo para obtener el código binario de la ocupación

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 (ver epígrafe 2.3.2 y Anexo 10). Luego se encuentra la cadena binaria correspondiente a la ocupación de orden c que se desea evaluar (ver epígrafe 2.3.2 y Anexo 11). Se formalizó mediante la expresión 2.5, la cantidad de variantes a analizar de forma exhaustiva conociendo HAO y D. Los algoritmos anteriores evitan la generación de todos los códigos correspondientes a un determinado valor de HAO y de D para luego ser evaluada la variante que se solicite.

Para tener una idea de las dimensiones de MVCR, se presenta en la Figura 3.3 un ejemplo de como para el intervalo de $D = 1-59$ los valores máximos de MVCR están en el orden de $5.9 \cdot 10^{16}$. Si la búsqueda fuera entre 1-20, los valores estarían en el orden de 180 000. En cualquier caso la cantidad de combinaciones es máxima para valores de HAO a la mitad del intervalo de D.

La sumatoria del tiempo para la búsqueda de un código específico cualquiera en la aplicación “OcupaHotel MTH”, no supera los $1 \cdot 10^{-15}$ s y la solución de la función objetivo para el código en particular demora entre $1 \cdot 10^{-3}$ s y 0,1 s. Todo esto para una computadora Pentium 4, con un CPU a 2,8 GHz y 512 MB de memoria RAM. Para evaluar la eficiencia en la búsqueda del código variable se elaboró una aplicación en Matlab capaz de generar todos los códigos posibles según HAO y D. Se pudo constatar que para $HAO = 29$ en $D = 59$ (MVCR máximo = $5,9 \cdot 10^{16}$)

generar solo los códigos en el mismo CPU demora unos 15 minutos.

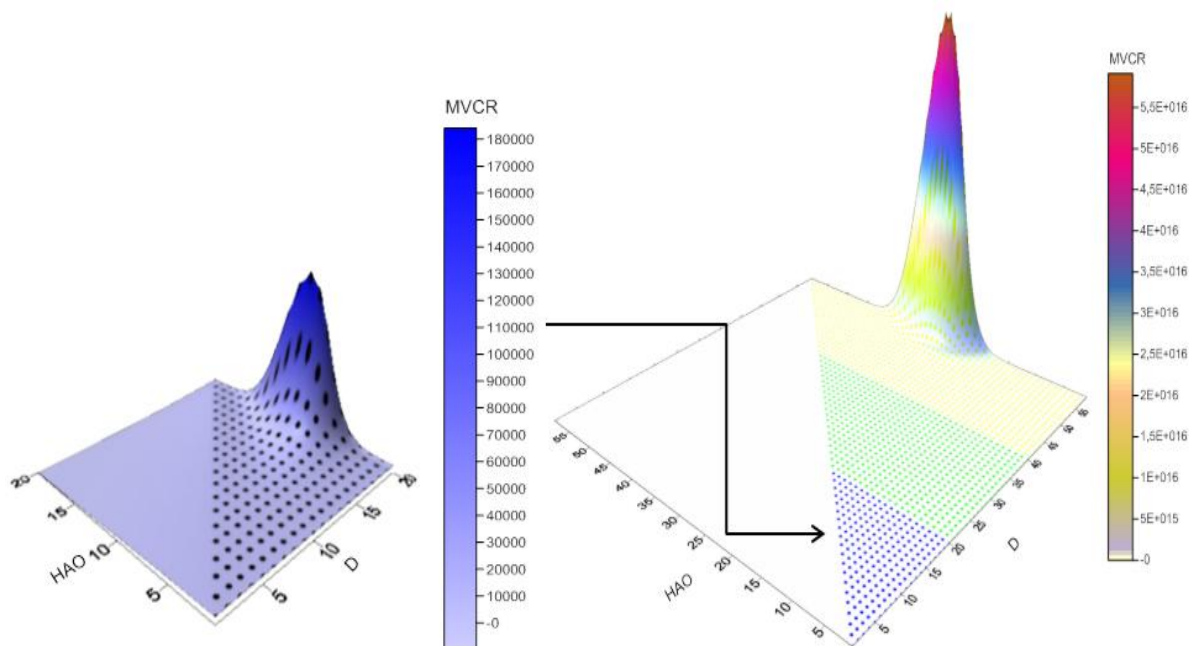


Figura 3.3 Valores que puede alcanzar MVCR para diferentes valores de D y HAO en diferentes intervalos de búsqueda.

3.3.2 Modelación de la carga térmica de enfriamiento

Los cálculos de la carga térmica de enfriamiento se realizaron con el simulador térmico de edificios de la UABC, seleccionándose una instalación en un clima tropical, representativa de los hoteles de sol y playa, los predominantes dentro la empresa turística en Cuba.

3.3.2.1 Modelación térmica del edificio mediante simulador

El edificio a analizar se encuentra situado a los 21,01 grados de latitud norte y a los 75,93 grados de longitud oeste. Se utilizaron los datos de la estación climatológica más cercana, situada en Cabo Lucrecia en el municipio de Banes, provincia de Holguín. La estación se localiza en la misma franja costera del edificio en estudio. Los valores de temperatura ambiente utilizados corresponden al promedio de los años 2007 y 2008, oscilando entre 20,30 y 32,20 °C, con valores promedio entre 25 y 29 °C. En el Anexo 15 se pueden apreciar estas y otras informaciones climatológicas de la localidad así como la certificación de los datos por parte el centro de meteorología provincial. Para tener una idea del comportamiento de la temperatura

ambiente diaria, se presenta en la Figura 3.4 el histograma de la variable.

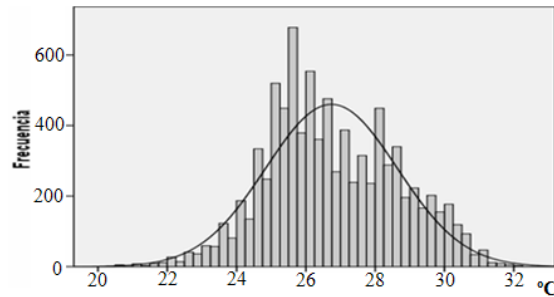


Figura 3.4. Histograma de la temperatura ambiente horaria.

Un análisis estadístico básico muestra los valores: media aritmética = 26,7 °C, desviación estándar = 1,898 °C; coeficiente de variación de un 7,11%; moda = 25,8 °C, mediana = 26,5 °C; el histograma tiene asimetría positiva con un coeficiente de 0,0096, sesgada a la derecha, y con una tendencia muy cercana la distribución normal. Solo el 0,08 % de los datos está fuera de control (fuera de los límites del valor medio de la variable +/- tres veces la desviación estándar).

Una representación de la variabilidad de las condiciones climatológicas de la localidad a través del comportamiento de la temperatura ambiente se puede apreciar en la Figura 6 del Anexo 15.

Los demás datos necesarios para los cálculos de carga térmica aparecen en el Anexo 6 donde se destacan: las características de los muros y sus propiedades térmicas, el régimen de ocupación horario y para el día, los equipos que contienen la habitación, la iluminación, los coeficientes de ponderación de los locales y las temperaturas máximas y mínimas diarias de un año promedio. Los datos de eficiencia del equipo climatizador del local, las dimensiones de las paredes entre otros elementos se introducen en el simulador.

Después de sistematizar los datos para el cálculo de las cargas térmicas, se procede a su determinación para cada una de las habitaciones. Los valores máximos que se alcanzaron en los cálculos se pueden apreciar en la Figura 3.5. En esta figura se comparan estos valores con las potencias de enfriamiento nominales de las unidades terminales existentes, FCX - 42 de 3,4 kW y las FCX - 52 de 4,19 kW. Estos valores demuestran que en el 56 % de los casos pudo utilizarse unidades terminales de menor potencia como la FCX - 32 de 2,21 kW y que aproximadamente el 90 % de las unidades terminales están sobredimensionadas.

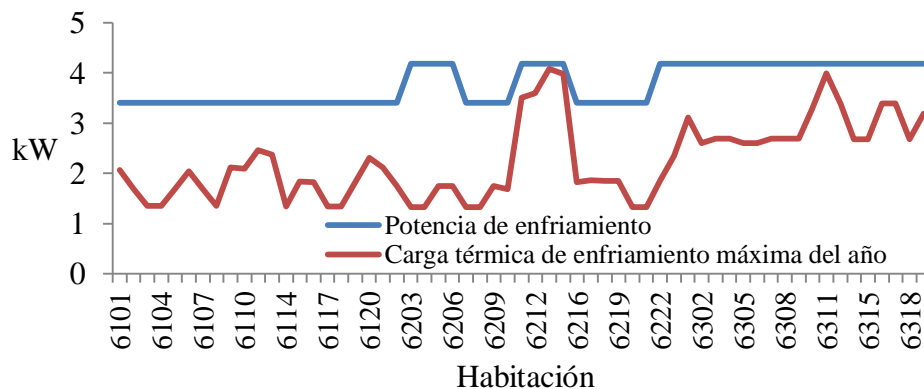


Figura 3.5. Valores máximos de la carga térmica de enfriamiento de cada habitación.

Las individualidades de la carga térmica de enfriamiento máximas para todo un año promedio se pueden resumir de la siguiente forma:

- Siete habitaciones con cargas térmicas de enfriamiento máximas a las 11:00 horas y 27 a las 17:00 horas (se destacan el 66 % de las habitaciones del tercer piso).
- 18 habitaciones con cargas térmicas de enfriamiento máximas en tres horarios del día 7:00, 11:00 y las 17:00 horas.
- Seis habitaciones con cargas térmicas máximas en los horarios 11:00 y las 17:00 horas. Los valores máximos de las 11:00 horas ocurren solo en aproximadamente el 9 % de los días.
- Solo una habitación manifiesta cargas térmicas máximas a las 11:00 y a las 7:00 horas mayoritariamente a las 11:00.

Con los resultados de las cargas térmicas de enfriamiento se pueden establecer estrategias ocupacionales basadas en ubicar primero las habitaciones de menor carga térmica [19, 25, 96]. La ocupación promedio del edificio caso de estudio se presenta en la Figura 3.6. Ocupando primero las habitaciones de menor carga térmica, existe una disminución apreciable de la energía a extraer del edificio, lo que representa una menor potencia de enfriamiento a utilizar

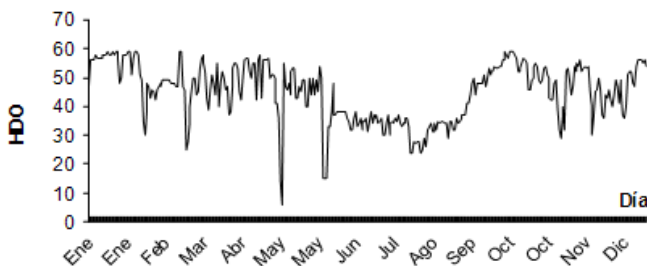


Figura 3.6. Ocupación promedio anual del edificio de la zona 6 del hotel.

En la Figura 3.7 se pueden apreciar las diferencias entre la carga térmica de enfriamiento para la ocupación promedio y la misma ocupación pero con estrategia ocupacional.

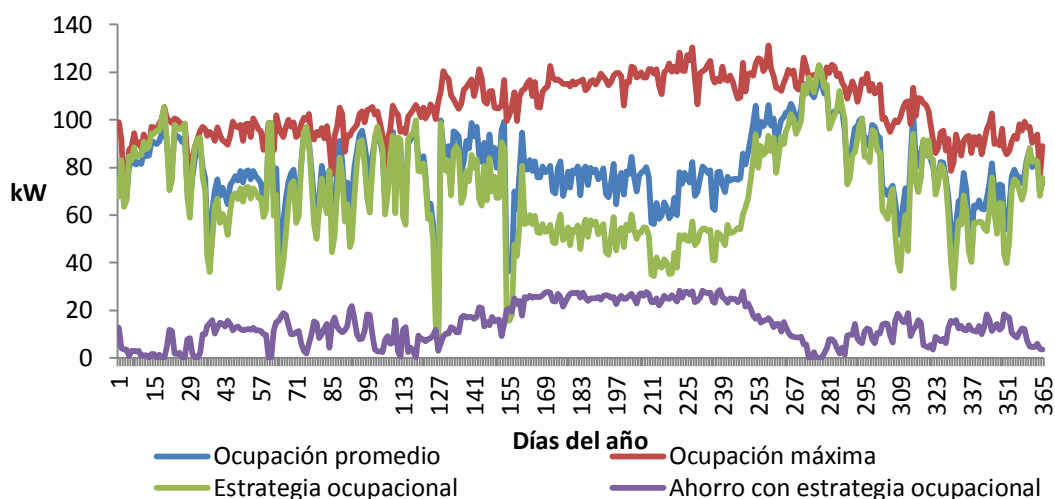


Figura 3.7. Diferentes comportamientos de la carga térmica del edificio.

En los días del año en que la ocupación es menor y la temperatura ambiente es más elevada se aprecia una mayor efectividad de esta estrategia ocupacional.

3.3.2.2 Modelación térmica del edificio mediante redes neuronales artificiales

Se desarrolló una aplicación en Matlab basada en el método de prueba y error, capaz de realizar de manera ininterrumpida el aprendizaje de las RNA. En el Anexo 7 aparecen los códigos del programa principal para el aprendizaje, los códigos que permitieron extraer los coeficientes matriciales de cada uno de los modelos de carga térmica de enfriamiento de las habitaciones y otras aplicaciones necesarias para esta modelación. Los resultados generales de la modelación térmica de las 59 habitaciones del edificio se presentan en la Figura 3.8.

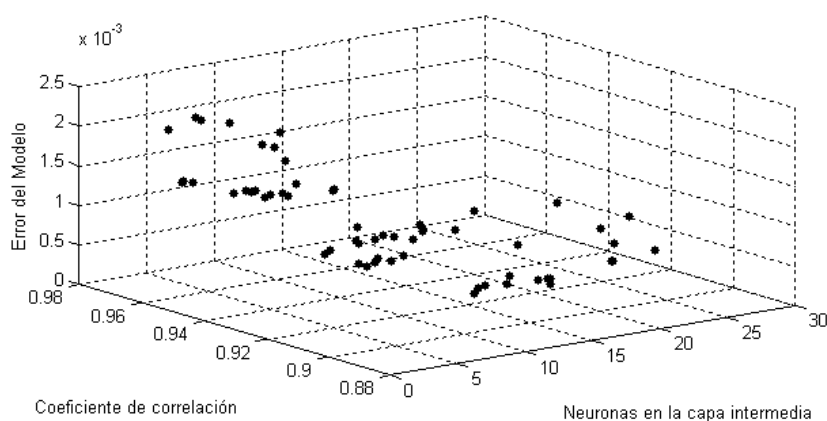


Figura 3.8. Resultados de la modelación de la carga térmica de enfriamiento con RNA.

Las variables independientes escogidas fueron, la temperatura ambiente, la hora del día y el día del año. La variación del porcentaje de los datos para el entrenamiento se realizó desde el 20 % hasta el 50 % con un incremento progresivo del 10 %. 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 de los modelos se realizó con el 100 % de los datos.

La estructura de RNA que mejor se adaptó en todos los casos fue la *Feedforward Backpropagation*. Se realizaron 100 entrenamientos para cada variante, inicializándose en cada uno los pesos, y el número máximo de neuronas en la capa intermedia para el aprendizaje se estableció en 50. El incremento de la cantidad neuronas en la capa intermedia fue desde tres hasta 50 con un paso de una neurona en cada prueba.

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, según puede apreciarse en la tabla del Anexo 16. La tabla contiene el coeficiente de correlación entre los valores reales de carga térmica de enfriamiento y los predichos por la RNA, así como el error de los modelos.

3.3.3 Modelación de la red hidráulica

Para implementar el algoritmo de la modelación hidráulica, fue necesario realizar pasos intermedios como el de adaptar la aplicación CAD desarrollada por Hechavarría en el 2009 [81] (“AutoProject”, referida a las redes de distribución de agua), a las condiciones de las redes malladas de los CSAF (ver Figura 3.9). La nueva aplicación se denomina “ColdWater”.

Para lograr esta adaptación fueron programadas por Hechavarría en VISUAL-LISP [162] un conjunto de códigos para facilitar el equilibrado y la operatividad de la red. Como aspecto novedoso se destaca, la adaptación de las válvulas de propósito general y las de ruptura de carga que permiten considerar las pérdidas hidráulicas correspondientes, en función de los parámetros

de las unidades terminales y las válvulas de equilibrado respectivamente.

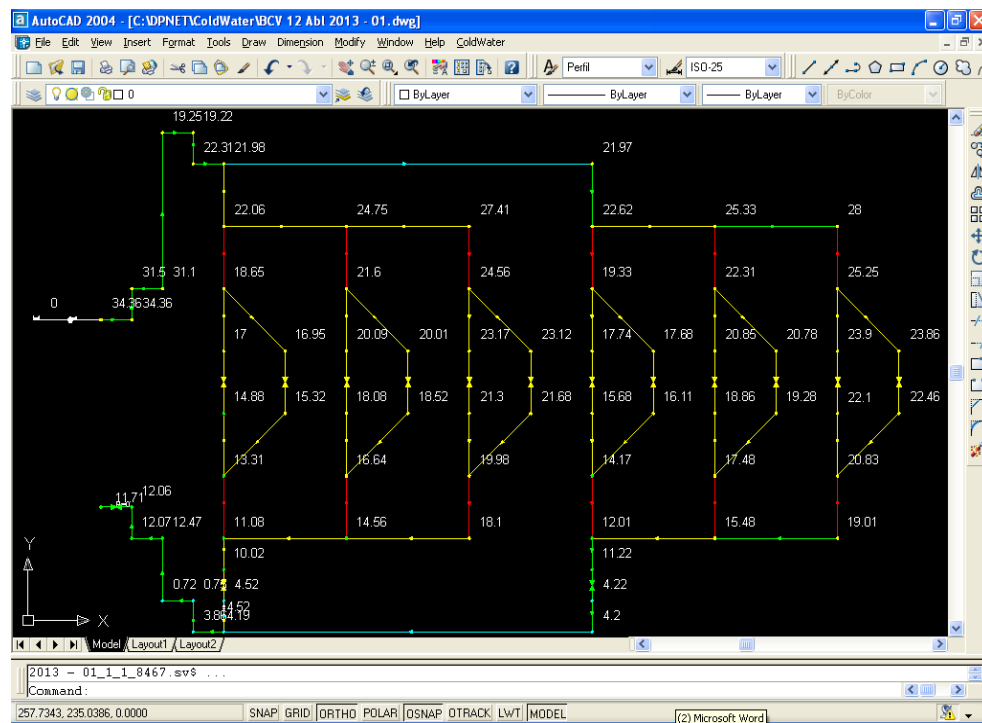


Figura 3.9. Vista de los tramos AB y CD de la red hidráulica con la aplicación CAD.

En la ventana de la aplicación CAD de la Figura 3.9 según las preferencias del cliente se pueden visualizar: los códigos de los tramos y nodos lo cual ayuda a identificar los niveles o plantas del edificio donde se encuentran ubicadas las unidades terminales; la simbología de colores que indican el grado de cumplimiento de las velocidades; los caudales y presiones en tramos y nodos luego del cálculo hidráulico; longitudes y diámetros, propiedades físicas de las tuberías y otras opciones útiles para la modelación hidráulica.

En el contexto cubano las aplicaciones para diseñar y simular instalaciones especiales, como los CSAF, no van más allá de realizar un análisis de estas redes como si cada unidad terminal fuera un nodo de suministro. Sin embargo, la red es completamente 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. El costo de adquirir una aplicación para el diseño de redes con equilibrado hidráulico mediante válvulas especiales en la empresa líder Tour and Andersson (TA - SELECT 4, TA - Pocket, TA Shunt v.1.2), oscila entre 3 000,00 USD y 5 000,00 USD [163-165].

Los caudales que se asignan a las unidades terminales en los CSAF a flujo variable, deben estar en correspondencia con los valores de diseño [87]. La configuración ideal de este tipo de red, sería la existencia de una válvula de equilibrado en cada unidad terminal para garantizar la exactitud en los flujos requeridos por las cargas térmicas. Este aspecto no siempre es así, provocando determinadas insuficiencias operacionales.

Se realizó el equilibrado hidráulico de la red considerando los modelos de pérdidas de cargas de las unidades terminales obtenidos de los datos de la Figura 3 del Anexo 3. De manera similar se obtuvieron los modelos que relacionan el K_v de las válvulas de equilibrio con respecto del número de vueltas (ver Figuras 3, 4 y 5 del Anexo 4).

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 software EPANET 2 [79], a partir del fichero ColdWater.inp que genera la aplicación CAD (ver Figura 3.10). No existen diferencias de los resultados del EPANET con respecto de ColdWater, lo cual se puede apreciar al comparar las Figuras 3.9 y 3.10.

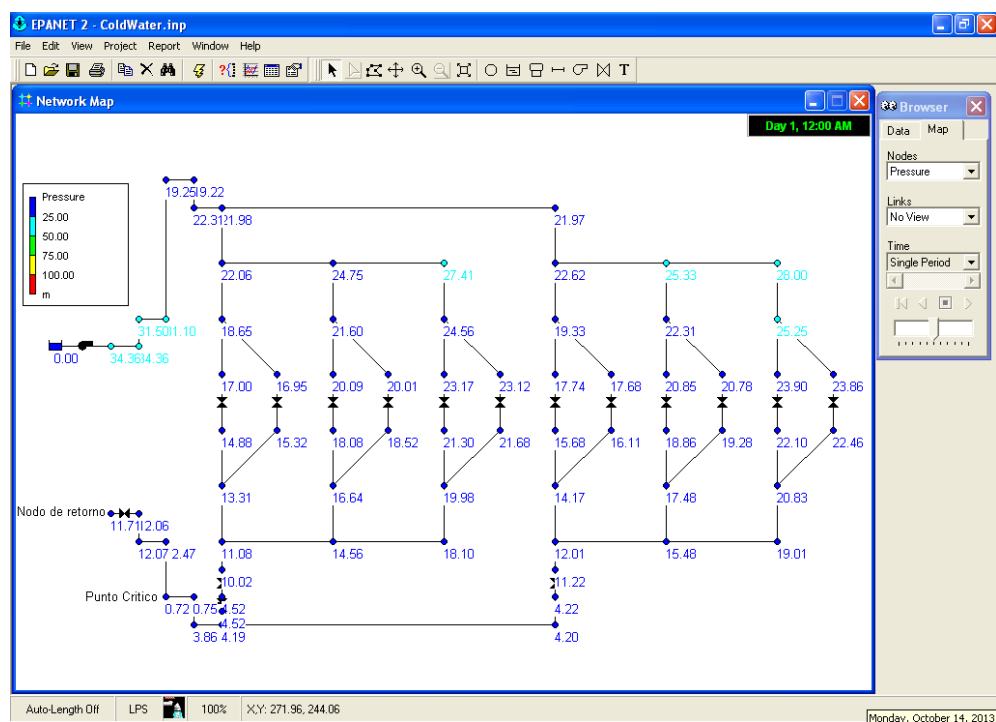


Figura 3.10 Comprobación en el EPANET de la modelación con el sistema CAD.

Por otra parte, una vez reproducida la red hidráulica del caso de estudio con la aplicación CAD, y su comprobación con el EPANET, se tomaron los datos necesarios para integrarlos en la aplicación “OcupaHotel MTH”. Para programar y validar el Método del Gradiente en esta aplicación, se ensamblaron las ecuaciones descritas en la literatura [78].

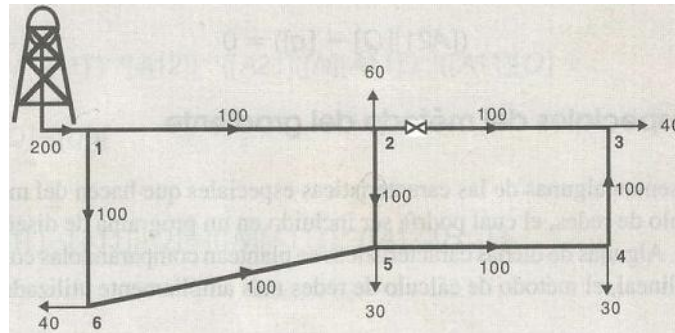


Figura 3.11. Esquema del ejemplo para validar la funcionalidad del método del gradiente [78].

Se validó el método con el ejemplo resuelto 7.5 del libro “Hidráulica de Tuberías”, que consiste en calcular los caudales y las presiones del esquema de la Figura 3.11 [78]. En esta red todos los caudales iniciales se suponen de 100 l/s, la presión en el nodo 1 conocido es de 100 mca. Otros datos de la red y el ejemplo resuelto en la aplicación informática se presentan en el Anexo 17.

A continuación, en la Tabla 3.1 se exponen los resultados del ejemplo y los calculados, donde la desviación estándar del error porcentual para los caudales en los tramos y presiones en los nodos no supera el 0,23 % y el 0,053 %, respectivamente.

Tabla 3.1. Resultados de la validación del Método del Gradiente con la aplicación OcupaHotel.

| Tramo | Q. ejemplo (m ³ /s) | Q. calculado (m ³ /s) | Desv. (%) | Nodo | H. ejemplo (mca) | H. calculado (mca) | Desv. (%) |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------|
| 1-2 | 0,10667 | 0,10665 | 0,018749 | H2 | 92,960 | 92,914 | 0,049 |
| 2-3 | 0,03658 | 0,03660 | -0,046473 | H3 | 81,358 | 81,242 | 0,143 |
| 3-4 | 0,00342 | 0,00340 | 0,508772 | H4 | 81,780 | 81,667 | 0,138 |
| 5-4 | 0,03342 | 0,03340 | 0,050868 | H5 | 89,812 | 89,746 | 0,073 |
| 2-5 | 0,01009 | 0,01005 | 0,416254 | H6 | 96,727 | 96,705 | 0,023 |
| 6-5 | 0,05333 | 0,05336 | -0,046878 | Desviación promedio | | | 0,085 |
| 6-1 | 0,09333 | 0,09336 | -0,026787 | Desviación estándar | | | 0,053 |
| Desviación promedio | | | 0,124929 | | | | |
| Desviación estándar | | | 0,234833 | | | | |

Asimismo, se comprobó que son semejantes los resultados obtenidos mediante las tres aplicaciones para los datos del caso de estudio. El valor óptimo de la presión de envío para las 12

habitaciones ocupadas, según, la aplicación CAD es de 34,36 mca. Los resultados de presión y flujo obtenidos con Autocad y Epanet son semejantes a los resultados obtenidos en OcupaHotel para ese valor de presión de 34,36 mca. Cuando se busca el valor óptimo de velocidad en la aplicación OcupaHotel se obtuvo 2 287,6 rev/min, el que define una presión de 34,29 mca para un error porcentual de 0,22 %. El análisis de los restantes resultados de los valores de presión y caudales aparece en el Anexo 18. El valor promedio del error porcentual para las presiones es de 1,12 % y para los caudales 0,41 %.

3.3.4 Modelación del trabajo de compresión

Para modelar la potencia necesaria en el trabajo de compresión se utilizó el algoritmo del epígrafe 2.2.4. Se destaca que la determinación de las propiedades del refrigerante, es decir, los diferentes valores de las entalpías del ciclo se calculan mediante interpolaciones del tipo Spline cúbicos de los datos [166]. Los datos para la interpolación se obtuvieron de aplicaciones informáticas especializadas como Solkane Refrigerants Versión 3.2 [167] y Refrigeration Utilities versión 1.1 [168]. Posteriormente para validar los cálculos, se comprobaron en la gráfica de presión contra entalpía del refrigerante utilizado (ver Figura 2, Anexo 9).

En el caso de estudio, las unidades enfriadoras están concebidas para varias edificaciones (ver Figura 5, Anexo 13), por tanto se decidió modelar la potencia necesaria en el trabajo de compresión, utilizando las expresiones y los pasos contenidos en el algoritmo del epígrafe 2.2.4. Las expresiones utilizadas coinciden con las empleadas por [18, 19, 41] en sus tesis de doctorado aplicadas en SCCAH. Una representación de la dinámica de la potencia eléctrica requerida para el trabajo de compresión, según la ocupación promedio (ver Figura 3.6) del edificio y calculada con la aplicación OcupaHotel, se puede apreciar en el gráfico de isolíneas de la Figura 3.12.

En esta figura, es notable que entre los meses de septiembre y octubre, se manifiestan los mayores valores de potencia a pesar de que las condiciones climáticas no son tan desfavorables como en los días más críticos del verano. Esto se debe a la incidencia marcada que tiene la ocupación y la carga térmica por ocupantes (en todas las habitaciones oscila entre 20 y 35 %).

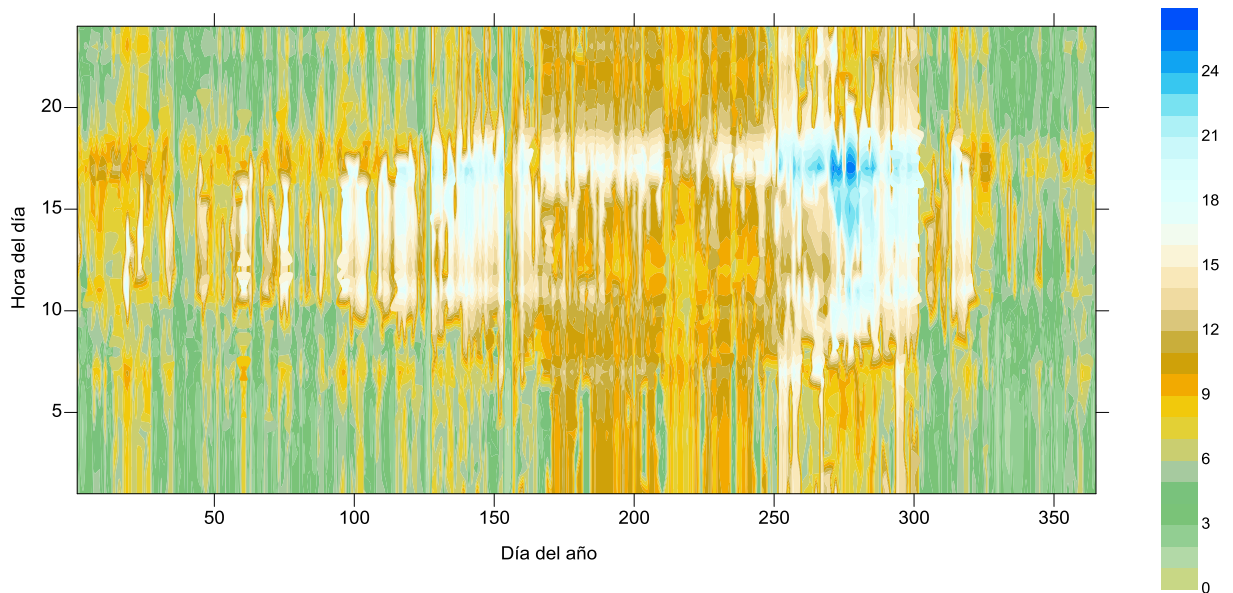


Figura 3.12. Potencia eléctrica en kW necesaria para el trabajo de compresión según la carga térmica de enfriamiento para ocupación promedio del edificio caso de estudio.

3.4 Validación de la optimización energética

Una vez validados individualmente los modelos y los algoritmos computacionales que permiten el cálculo de la función objetivo, es necesario mostrar cómo se integran estos elementos en la determinación de la variable de decisión y las variables intermedias en el caso de estudio. Se estudia la eficiencia computacional respecto de los tres métodos de optimización propuestos en la solución de un mismo problema y la eficacia del modelo que se propone como aporte teórico, mediante la comparación de los resultados obtenidos en la función objetivo cuando se implementan las variantes principales de operación del sistema.

3.4.1 Integración de la variable de decisión a la función objetivo

A partir de un ejemplo de 12 habitaciones correspondientes a los patinejos 1(AB) y 2(CD) del edificio de la zona 6 del hotel, se escoge (sin perder generalidad) una configuración inicial que considera cuatro habitaciones ocupadas y ocho disponibles según se muestra en la Tabla 3.2. 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 según el epígrafe 2.3.2 la cadena de caracteres $W = 010001100100$ y la subcadena $O = O_1O_3O_4O_5O_8O_9O_{11}O_{12}$, representando a las habitaciones disponibles.

Para analizar la eficiencia computacional se escogió la variante de ocupar tres habitaciones

(HAO = 3) de ocho disponibles (D = 8) según la tabla 3.2. El número de la habitación, por ejemplo 6319, significa que está en la zona seis, tercer piso y es la habitación 19 del piso.

Tabla 3.2 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 ₀ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Patinejo | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

La información general utilizada para la solución del problema con los tres métodos de optimización propuestos en la investigación se puede apreciar en la tabla 3.3. Las definiciones de las nomenclaturas utilizadas en la tabla aparecen en el epígrafe 2.3.1.

Tabla 3.3 Datos de configuración necesarios para los algoritmos de optimización.

| Método de optimización | MCE _{Exh} | MC _{xEsc} | THE _{Esc} | 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 energética del sistema a partir de la ocupación se realizaron teniendo en cuenta las variantes de la tabla 3.4.

Tabla 3.4. 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 CSAF | - | X | X | X | X | X | X |

Se consideraron en todos los cálculos los siguientes datos:

Para la modelación térmica: el rendimiento isentrópico de 0,85 en el compresor; coeficiente de simultaneidad de la carga térmica de 0,85; temperatura nominales de envío y retorno del agua a la enfriadora de 7 y 12 °C respectivamente; y valores promedios de las cargas térmicas de enfriamiento para el total del días que estarán ocupadas las habitaciones seleccionadas,

independientemente si son obtenidas mediante el modelo de cargas térmicas de enfriamiento mediante RNA, o de las tablas de la simulación térmica del edificio.

Para la red hidráulica: eficiencia nominal de 0,88 en la bomba; viscosidad cinemática del agua de 0,00000131 m²/s; rugosidad de las tuberías de 0,0001 m; 30 % de la diferencia de caudales admisibles en las unidades terminales; paso para la búsqueda de los extremos de la velocidad óptima de la bomba de 0,001 con una cota del error de 0,001; y valores iniciales de presión de trabajo del CSAF correspondiente al valor actual de consigna de 500 kPa (51 mca).

3.4.2 Resultados de la 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 3.5. 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 3.5. 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 |

Los mejores resultados de las 56 combinaciones de solución, analizadas en cada una de las siete formas de operación de sistema, se resumen en la Tabla 3.6. En esta tabla se recogen las siguientes informaciones: temperatura de salida del agua de la enfriadora (t8), temperatura de entrada del agua a la enfriadora (t7), temperatura de retorno del agua del edificio (tr), potencia eléctrica requerida para el trabajo de compresión (Pec), velocidad de rotación de la BC (N), valor de consigna de la presión de envío del CSAF (He); presión en el nodo de retorno crítico de la red hidráulica (Hr), caudal requerido para la ocupación que se evalúa (Qr), 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 (E.C.G), y el tiempo computacional para determinar la solución óptima (t).

Tabla 3.6. Comportamiento de las variables en la optimización exhaustiva simple.

| Variante | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CTE (kW) | 8,089 | - | - | 8,089 | 8,089 | 8,089 | 8,089 |
| t8 (°C) | 7 | - | - | 11,557 | 7 | 11,557 | 7 |
| t7 (°C) | 7,632 | - | - | 12,202 | 7,651 | 12,202 | 7,651 |
| tr (°C) | 8,137 | - | - | 12,718 | 8,172 | 12,717 | 8,172 |
| Pec (kW) | 1,138 | - | - | 0,959 | 1,173 | 0,959 | 1,173 |
| N (rev/min) | - | 1948,5 | 2979 | 1989 | 1989 | 2979 | 2979 |
| He (mca) | - | 24,2 | 51 | 26,3 | 26,3 | 51 | 51 |
| Hr (mca) | - | 0,16 | 25,58 | 0,361 | 0,361 | 25,02 | 25,02 |
| Qr (m³/s) | - | 0,0012 | 0,0012 | 0,0012 | 0,0012 | 0,0012 | 0,0012 |
| Qt (m³/s) | - | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 |
| Incp.Q (%) | - | -14,5 | -16,41 | -19,286 | -19,286 | -19,286 | -19,286 |
| Peb (kW) | - | 0,338 | 0,795 | 0,352 | 0,352 | 0,795 | 0,795 |
| IE (kW) | 1,138 | 0,338 | 0,795 | 1,312 | 1,525 | 1,755 | 1,968 |
| Comb. | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 |
| E.C.G | 225 | 225 | 225 | 225 | 225 | 225 | 225 |
| t (s) | 1,25 | 416,156 | 52,141 | 409,172 | 410 | 53,359 | 53,406 |

El mejor resultado operacional se obtiene en la cuarta variante, la cual incluye el cambio de la temperatura de salida del agua de la enfriadora en función de las cargas térmicas parciales, y la búsqueda del valor de la velocidad de rotación de la bomba más racional garantizando las restricciones de la red hidráulica. Las variantes en las que no se determina la velocidad de rotación óptima de la bomba (3, 6 y 7), se utilizan sus parámetros nominales para una presión de 51 mca. Pueden utilizarse otros estados iniciales siempre que correspondan con las características de la bomba.

En el gráfico de la Figura 3.13 se muestran para la variante de operación cuatro y para todas las ocupaciones posibles, la potencia eléctrica requerida para el bombeo, para el trabajo de compresión y la suma de las dos potencias. Es notable cómo para las diferentes ocupaciones, la

potencia varía indistintamente en correspondencia con los valores de cargas térmicas que aportan las habitaciones y en función de la topología de la red hidráulica.

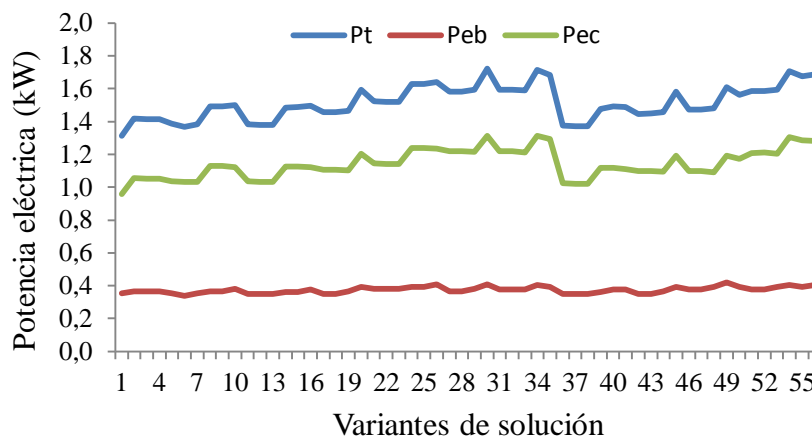


Figura 3.13 Variaciones de la potencias, para el bombeo, para el trabajo de compresión y la suma de ambas potencias para las 56 variantes de ocupación posibles de HAO=3 en D=8.

En el Anexo 19 se pueden apreciar los resultados de las 56 evaluaciones de la función objetivo en la búsqueda exhaustiva simple. En este anexo, aparece el ordenamiento descendente de las soluciones con respecto al IE en la variante de operación cuatro, coincidiendo los resultados de la primera solución con el resultado presente en las Tablas 3.5 y 3.6

3.4.3 Resultados de la optimización exhaustiva escalonada

Para la validación del algoritmo exhaustivo escalonado, se determinó que la mejor variante para esta búsqueda de soluciones 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 exactitud en los resultados, lográndose formalizar en la expresión 3.1, el total de búsquedas exhaustivas de paso 1 ($TB_{Exh(1)}$) para cualquier variante de HAO y D.

$$TB_{Exh(1)} = \frac{2 \cdot HAO \cdot D + HAO - HAO^2}{2} \quad (3.1)$$

Al realizar la búsqueda de la Ocupación mediante la optimización combinatoria basada en el método exhaustivo escalonado, se obtienen los mismos resultados de las variables que con el método exhaustivo simple. La diferencia fundamental entre un método y el otro consiste en la eficiencia computacional, la cual se puede apreciar en el gráfico de la Figura 3.14.

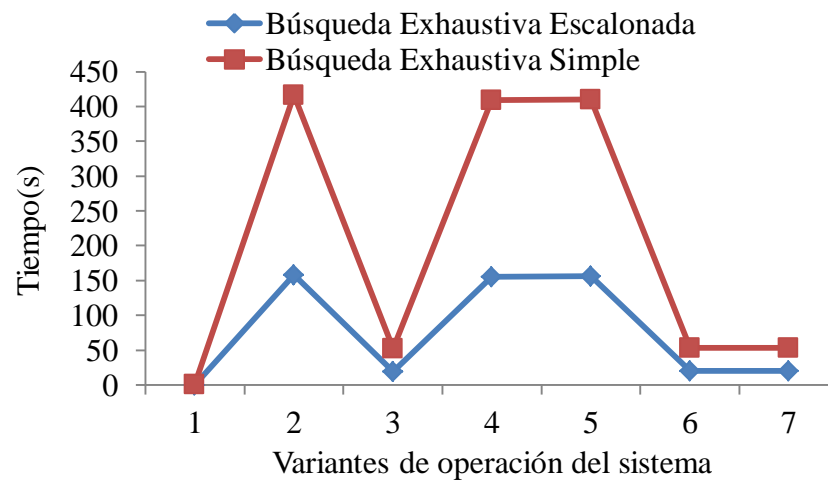


Figura 3.14. Tiempo computacional de las búsquedas: exhaustiva simple y escalonada.

3.4.4 Resultados de la optimización mediante algoritmo genético

Al determinarse la ocupación óptima mediante algoritmo genético, las ocupaciones que se proponen pueden ser distintas con respecto de los métodos anteriores. Sin embargo, las soluciones convergen hacia valores muy próximos al 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. Estos elementos indican que estamos en presencia de un óptimo local muy próximo al global. La Tabla 3.7 refleja la ocupación encontrada por el algoritmo genético.

Tabla 3.7. 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 |

Luego de obtener las cadenas binarias de forma aleatoria y aplicarles los operadores genéticos (mutaciones y cruzamientos), los cromosomas resultantes se corresponden con la ocupación a asumir, teniendo en cuenta la medida de aptitud (IE). Los resultados de las variables del sistema para la ocupación de la Tabla 3.7 se pueden apreciar en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Comportamiento de las variables para la optimización con algoritmo genético.

| Variante | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| CTE (kW) | 8,089 | - | - | 8,089 | 8,089 | 8,089 | 8,089 |
| t8 (°C) | 7 | - | - | 11,557 | 7 | 11,557 | 7 |
| t7 (°C) | 7,632 | - | - | 12,202 | 7,651 | 12,202 | 7,651 |
| tr (°C) | 8,137 | - | - | 12,718 | 8,172 | 12,718 | 8,172 |
| Pec (kW) | 1,138 | - | - | 0,959 | 1,173 | 0,959 | 1,17 |
| N (rev/min) | - | 1948,5 | 2979 | 1989 | 1989 | 2979 | 2979 |
| He (mca) | - | 24,2 | 51 | 26,3 | 26,3 | 51 | 51 |
| Hr (mca) | - | 0,159 | 25,02 | 0,361 | 0,361 | 25,02 | 25,02 |
| Qr (m ³ /s) | - | 0,0012 | 0,0012 | 0,0012 | 0,0012 | 0,0012 | 0,0012 |
| Qt (m ³ /s) | - | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 |
| Incp.Q (%) | - | -14,498 | -19,286 | -19,286 | -19,286 | -19,286 | -19,286 |
| Peb (kW) | - | 0,338 | 0,795 | 0,352 | 0,352 | 0,795 | 0,795 |
| IE (kW) | 1,138 | 0,338 | 0,795 | 1,314 | 1,525 | 1,755 | 1,968 |
| Comb. | 25 | 27 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| t(s) | 1,094 | 201,375 | 23,812 | 184,984 | 183,547 | 24,485 | 24,469 |

3.4.5 Análisis de los resultados de las variantes de operación del sistema

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. Esto significa que con el procedimiento y la aplicación que se proponen, teniendo como variable de decisión la ocupación, se pueden evaluar y aplicar las siguientes estrategias de la explotación hotelera en cuanto los SCCAH: determinación del valor de consigna más adecuado 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).

3.5 Patrón de ocupación energético de habitaciones: variante para garantizar una EOCE

A modo de facilitar la implementación de la EOCE, se presenta en la Tabla 3.9 el patrón de ocupación obtenido al ir ocupando de una en una las habitaciones, empleando el método exhaustivo simple. Es decir, el orden ocupacional que garantiza los menores requerimientos de potencia eléctrica del SCCAH. También aparecen las variables operacionales que acompañan el patrón, de aquí se seleccionan las consignas de las variables de decisión tecnológicas (He y t8).

Es posible con los resultados del patrón de ocupación, comprobar que se cumplen las expresiones de las leyes de proporcionalidad. También se pueden determinar las expresiones matemáticas de las curvas de la BC y la red hidráulica para los 12 puntos de operación propuestos (ver Anexo 20).

Tabla 3.9 Patrón de ocupación de las habitaciones analizadas y valores de las variables correspondientes a la EOCE.

| Escalón | 6221 | 6118 | 6220 | 6117 | 6119 | 6222 | 6120 | 6223 | 6318 | 6319 | 6317 | 6316 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| CTE (kW) | 0,794 | 1,619 | 2,416 | 3,241 | 4,447 | 5,648 | 7,052 | 8,435 | 9,984 | 11,691 | 13,783 | 15,866 |
| t8 (°C) | 10,719 | 11,328 | 11,557 | 11,666 | 11,637 | 11,679 | 11,702 | 11,733 | 11,745 | 11,754 | 11,732 | 11,733 |
| t7 (°C) | 10,776 | 11,446 | 11,732 | 11,901 | 11,975 | 12,123 | 12,257 | 12,396 | 12,526 | 12,658 | 12,819 | 13,002 |
| tr (°C) | 11,483 | 12,119 | 12,343 | 12,46 | 12,549 | 12,637 | 12,735 | 12,786 | 12,826 | 12,863 | 12,93 | 13,002 |
| Pec (kW) | 0,085 | 0,175 | 0,259 | 0,349 | 0,502 | 0,659 | 0,824 | 0,984 | 1,159 | 1,341 | 1,615 | 1,885 |
| N (rev/min) | 1705 | 1745,6 | 1867,3 | 1989 | 1948,4 | 1948,4 | 1989 | 2070,1 | 2110,7 | 2191,8 | 2191,8 | 2272,9 |
| 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) | 0,147 | 0,334 | 0,269 | 0,193 | 0,654 | 0,365 | 0,206 | 0,436 | 0,573 | 0,741 | 0,103 | 0,182 |
| Qr (m3/s) | 0,00016 | 0,00032 | 0,00048 | 0,00064 | 0,00080 | 0,00100 | 0,00116 | 0,00136 | 0,00156 | 0,00176 | 0,00196 | 0,00216 |
| Qt (m3/s) | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 | 0,00216 |
| Incp.Q (%) | -0,003 | -1,129 | -15,115 | -9,033 | -16,001 | -15,485 | -10,911 | -17,895 | -21,558 | -20,445 | -19,638 | -14,568 |
| Peb (kW) | 0,035 | 0,073 | 0,125 | 0,189 | 0,227 | 0,282 | 0,341 | 0,432 | 0,513 | 0,622 | 0,69 | 0,815 |
| 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) | 104,374 | 89,547 | 79,797 | 71,078 | 62,344 | 54,203 | 44,891 | 37,578 | 29,094 | 21,531 | 13,922 | 4,281 |

Para que se tenga una idea del espacio de soluciones alrededor de los puntos de operación para la ocupación patrón, se presenta el gráfico de la Figura 3.15.

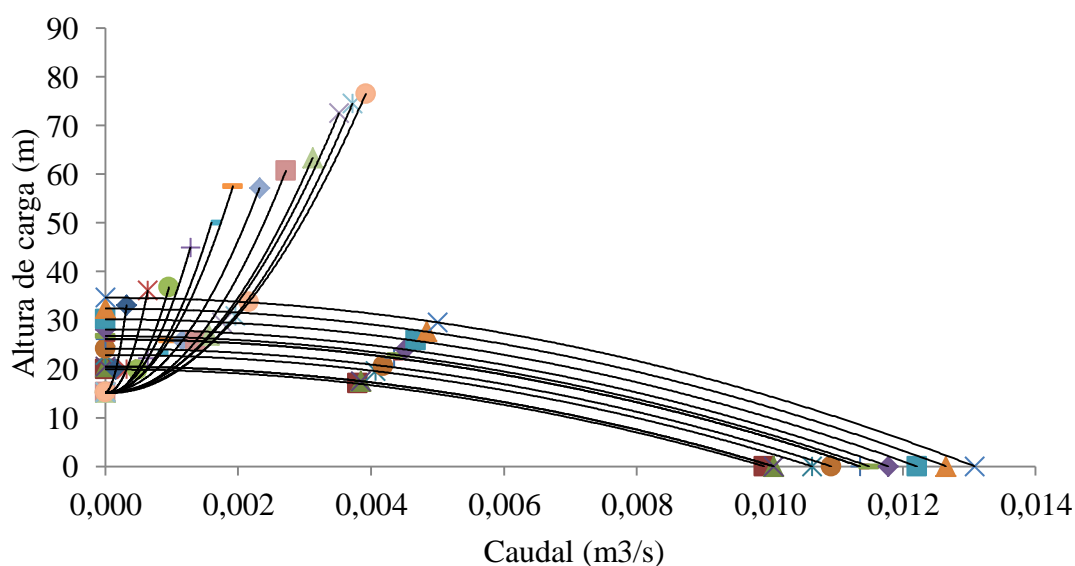


Figura 3.15. Familia de curvas de la red y la bomba centrífuga para la ocupación patrón.

En la Figura 3.16 se puede comprobar que, según las líneas de los resultados de la función objetivo, los valores de P_t para cualquiera de las cinco secuencias de ocupación elegidas al azar, son superiores a los resultados de la ocupación patrón.

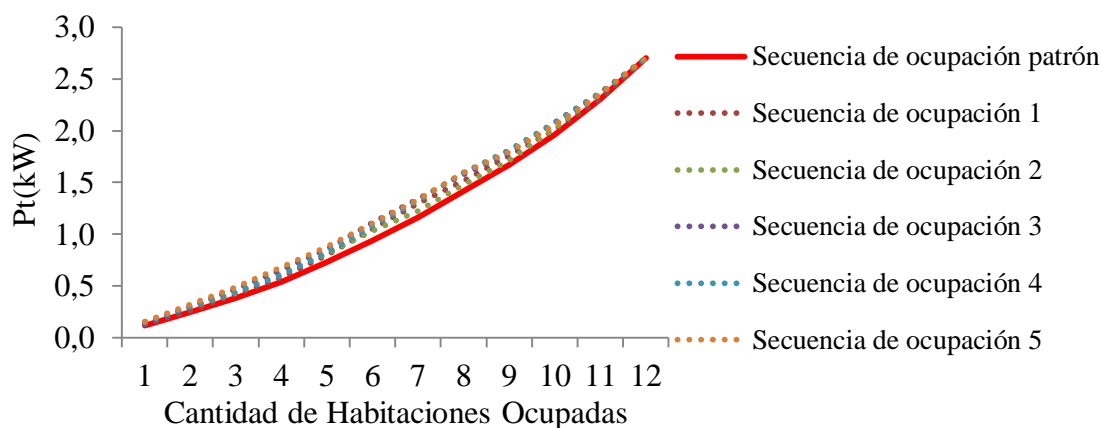


Figura 3.16. Resultados de la función objetivo para ocupación patrón y otras secuencias.

3.6 Valoración técnico-económica y medioambiental del uso de una Estrategia de Ocupación bajo Criterios Energéticos para el hotel caso de estudio

Según la ocupación patrón de las 12 habitaciones, se ejecutó el procedimiento con las variantes que implican el uso del modelo termo-hidráulico. Se partió de los parámetros actuales con los que trabaja la bomba centrífuga (valor de consigna fijo de 500 kPa en el CSAF) y la enfriadora (7 °C de temperatura de salida del agua). Los resultados se pueden apreciar en la Figura 3.17 donde la variante de operación cuatro resulta la más eficaz con respecto a las demás.

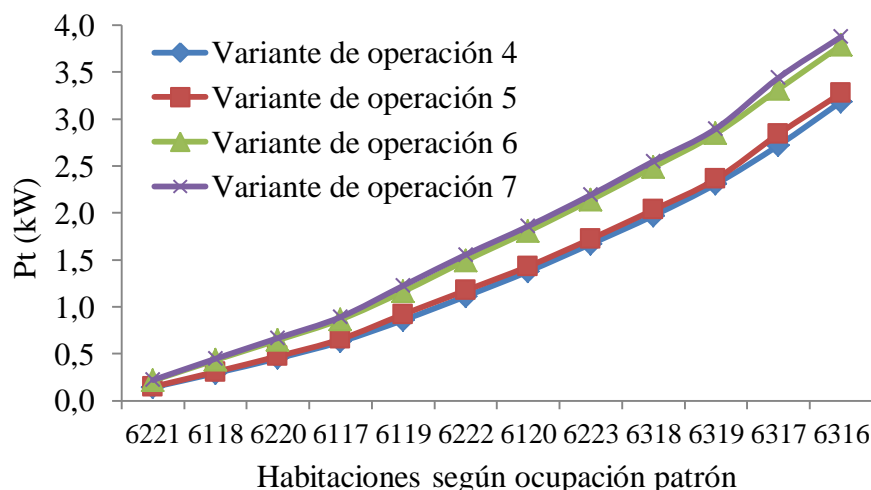


Figura 3.17. Comportamiento de los requerimientos de potencia para diferentes ocupaciones y variantes de operación del sistema, utilizando el modelo termo-hidráulico.

Ya que el sistema trabaja actualmente sin cambiar la presión de envío en el CSAF, sin racionalizar el valor de la temperatura de salida del agua de la enfriadora y sin tener en cuenta la ocupación de habitaciones bajo criterios energéticos, fue necesario evaluar los comportamientos operacionales en comparación con un año base. Los requerimientos de potencia eléctrica promedio diaria, con referencia a la ocupación típica de las habitaciones y tres variantes de operación que optimizan energéticamente el sistema se pueden apreciar en la Figura 3.18.

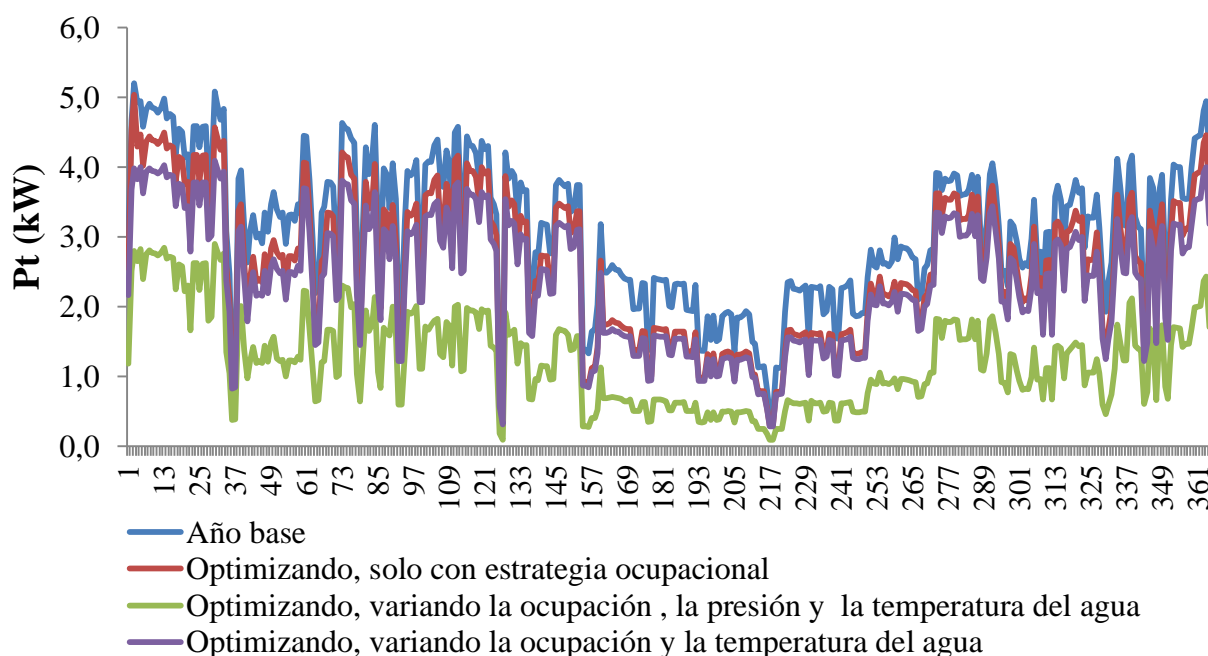


Figura 3.18. Requerimiento potencia eléctrica promedio diaria para un año característico.

Los resultados generales de la Figura 3.18 indican que se pueden disminuir los requerimientos de potencia eléctrica entre 18,4 y 63,7 %, enmarcados en todo el diapasón de ocupaciones y de variantes operacionales del sistema que usan el modelo termo-hidráulico. Resulta adecuado conocer que el promedio de ocupación hotelera en Cuba es de un 60 % aproximadamente [169]. Si se acepta que en las actuales condiciones, el consumo promedio diario de energía eléctrica de la climatización centralizada es de un 60 % del total del hotel, entonces, si se quiere saber cuál sería el escenario energético futuro del hotel, aplicando el procedimiento de optimización energética propuesto, se tiene que el peso relativo de la climatización puede disminuir hasta valores que pueden oscilar entre 19,7 y 35,1 %.

Estos porcentajes dependen de la estrategia de operación que se asuma, del nivel ocupacional y de las condiciones climatológicas, significando para el hotel, la posibilidad de disminuir el consumo promedio anual de 2 573 MW·h a valores entre 2 286 y 1 602 MW·h, lo cual representa ahorros entre 37 225,20 y 126 226,34 CUC al precio promedio de 0,13 CUC el kW·h. Estos datos significan la reducción entre 77,2 y 262,9 t de combustible en generación de energía eléctrica, disminuyendo la emisión a la atmósfera entre 234,5 y 796,2 t de CO₂.

El gráfico de la Figura 3.19 muestra cómo sería el escenario del consumo de energía eléctrica del hotel, aplicando la EOCE basada en el procedimiento que se plantea en la presente investigación.

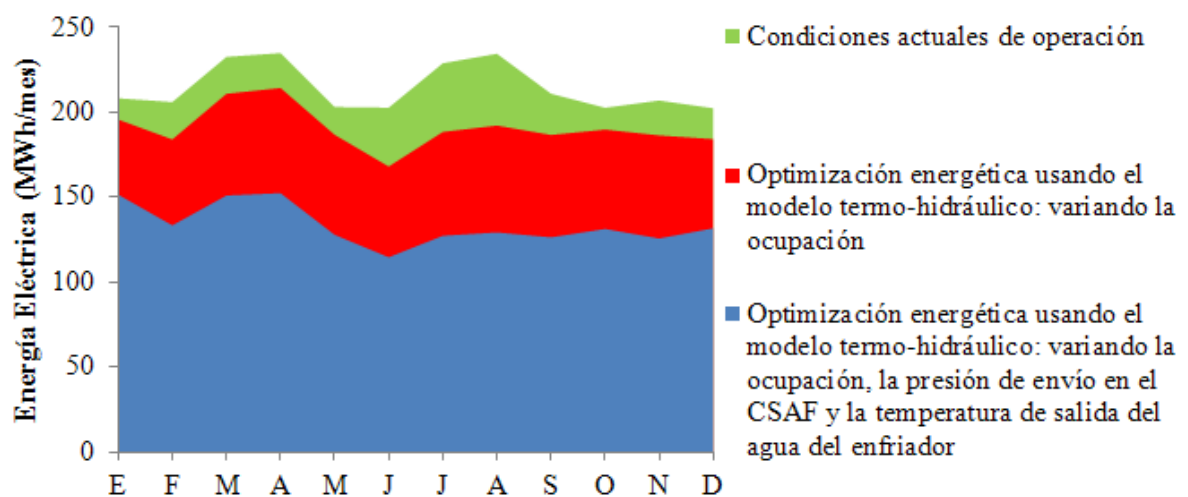


Figura 3.19. Escenarios energéticos del hotel Blau Costa Verde si se aplica la EOCE.

Para el gráfico anterior se tomó como línea base los valores promedios mensuales de consumo de energía eléctrica y se extrapolaron al hotel, los resultados del análisis de las 12 habitaciones.

El proyecto para implementar EOCE en el hotel Blau Costa Verde, mediante el procedimiento propuesto en esta investigación, tendría un importe total de 40 205,00 CUC, distribuidos entre las tareas de ingeniería, los gastos específicos y otros gastos (ver Anexo 21). Al implementar el proyecto en el hotel, si se opera el SCCAH con la variante 7 (variando solo la ocupación) el proyecto tendría una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 78,67 y un período de recuperación de la inversión (PRI), de 2 años y 2 meses. Si se opera el sistema con la variante 6 (racionalizando la temperatura de envío del agua de la enfriadora y variando la ocupación) la TIR sería de 196,51 y el PRI de 1 año y 6 meses. Para las demás variantes de operación (4 y 5) los tiempos de

recuperación de la inversión después de implementado el proyecto son inferiores a un año.

Con respecto de las herramientas desarrolladas durante la investigación (ColdWater y OcupaHotel MTH), de forma resumida se puede realizar la siguiente valoración técnica: las aplicaciones pueden sustituir importaciones por compra de software similares, se pueden fortalecer los criterios de diseño de estos sistemas, son adaptables a los SCCAH instalados en el país y se pueden implementar de una manera fácil si se cumplen los requerimientos de los algoritmos.

CONCLUSIONES del capítulo:

1. La aplicación informática CAD (ColdWater), aporta una solución práctica para realizar el equilibrado de las redes hidráulicas malladas utilizadas en los SCCAH así como su diseño y análisis operacional.
2. La aplicación informática “OcupaHotel MTH” constituye una herramienta para la toma de decisiones en el contexto energético de la explotación de hoteles, debido a la integración de la modelación energética de los CSAF y la EOCE basada en técnicas de optimización combinatoria.
3. Cuando se incrementan las variantes de ocupación, desde el punto de vista computacional el método exhaustivo escalonado resulta más eficiente que el exhaustivo simple, obteniéndose los mismos resultados. De la misma forma el algoritmo genético es más eficiente que el método exhaustivo escalonado.
4. De las variantes de operación del SCCAH la más eficaz resulta la que incluye la optimización conjunta de la ocupación, la presión de envío del CSAF a flujo variable y la temperatura de salida del agua de la enfriadora.
5. La EOCE de hoteles con SCCAH a flujo variable basada en optimización combinatoria de la ocupación mediante la solución del modelo termo-hidráulico, es tecnológicamente superior al criterio de operación actual en Cuba, el cual se basa en operar el CSAF a flujo variable a una presión constante. Asumir esta estrategia repercute directamente en los indicadores técnico-económicos de la explotación hotelera.

CONCLUSIONES GENERALES

1. 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.
2. 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. Los errores cuadráticos medios de los modelos fueron inferiores a 0,002058 kW y los coeficientes de correlación superiores a 0,9.
3. Se estableció la modelación hidráulica de los CSAF a flujo variable mediante la implementación del Método del Gradiente y un algoritmo 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 más adecuada y la incorporación de las características de las unidades terminales y de las válvulas de equilibrio.
4. 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 parciales y las propiedades del refrigerante utilizado, sistematizadas en modelos spline cúbicos.
5. 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.

6. La implementación del procedimiento general en el hotel Blau Costa Verde, muestra las potencialidades de disminución del peso relativo de la energía eléctrica que consume la climatización de un 60 % a valores entre 19,7 y 35,1 %. Estos porcentajes dependen del nivel ocupacional y de la variante de operación que se asuma, ya sea, determinando la velocidad de rotación de la bomba, racionalizando el valor de la temperatura de salida del agua del enfriador o mediante la combinación de estas variantes.

RECOMENDACIONES

1. Proponer el uso de la herramienta CAD “ColdWater” para el desarrollo de los diseños de los CSAF incluidos en las inversiones hoteleras, independientemente de que el flujo sea variable o constante en las redes hidráulicas.
2. Recomendar el uso del procedimiento propuesto en todos los hoteles cubanos con SCCAH, sobre la base de la EOCE sustentada en la optimización combinatoria, logrando la autonomía del sistema en cuanto a: el cambio de los valores de consigna de la presión de envío en el CSAF y la temperatura de salida del agua del lazo de producción de frío.
3. Continuar desarrollando el procedimiento mediante la integración a la herramienta “OcupaHotel MTH” de métodos de optimización multiobjetivo, sobre todo incluyendo un indicador de eficiencia relacionado con los aspectos económicos de la explotación del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TESKE, S.; ZERVOS, A.; SCHÄFER, O., "Energy revolution: a sustainable world energy outlook". European Renewable Energy Council, 2007, p. 96.
- [2] TORRES RODRÍGUEZ, R. M., "Tecnología para la gestión de los servicios técnicos en hoteles de sol y playa: aplicaciones en hoteles del polo turístico de Guardalavaca". Universidad de Holguín. 2008.
- [3] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DEL TURISMO, "El turismo internacional crecerá entre un 2 % y un 4 % en 2013", 2013.
- [4] PARTIDO COMUNISTA DE CUBA, "Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución ", VI Congreso del Partido Comunista de Cuba, 2011, p. 39.
- [5] GRUPO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA, "Base de datos de las 1000 empresas más consumidoras de energía", Cuba, 2006.
- [6] MARRERO RAMÍREZ, S., "Diagnóstico Energético Hotel Sol Club Río de Mares". Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Grupo de Eficiencia Energética de Moa, 2000, p. 69.
- [7] MONTERO LAURENCIO, R., "Diagnóstico Energético Hotel Super Club Breezes Costa Verde". Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Grupo de Eficiencia Energética de Moa, 2001, p. 58.
- [8] MONTERO LAURENCIO, R., "Diagnósticos energéticos y su influencia en la gestión empresarial de hoteles". *III Convención Entorno Agrario*. Santi Spiritus, 2005, p. 10.
- [9] MONTERO LAURENCIO, R., "Diagnóstico Energético del Hotel Miraflores", Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, 2007, p. 88.
- [10] MONTERO LAURENCIO, R.; COLUMBIÉ NAVARRO, Á. O.; PEÑA GUILARTE, O. W., "Diagnóstico Energético Hotel Playa Pesquero", Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Grupo de Eficiencia Energética de Moa, 2003, p. 85.
- [11] MONTERO LAURENCIO, R.; GALANO MILETH, R.; *et al.*, "Diagnóstico Energético Hotel LTI Costa Verde Beach Resort", Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa, Grupo de Eficiencia Energética de Moa, 2002, p. 81.
- [12] MONTERO LAURENCIO, R.; GÓNGORA LEYVA, E., "Diagnóstico Energético Hotel Blau Costa Verde", Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Centro de Estudios de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, 2008a, p. 79.
- [13] MONTERO LAURENCIO, R.; GÓNGORA LEYVA, E., "Aplicación del toolbox-matlab en la estimación de Gestión Total Eficiente de Energía en Moa, Holguín, Cuba". *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 2008, vol. 7, no. 2, p. 39-44.
- [14] MONTERO LAURENCIO, R.; TORRES TAMAYO, E.; IZQUIERDO PUPO, R., "Diagnóstico Energético del Hotel Occidental Grand Playa Turquesa", Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa, Grupo de Eficiencia Energética de Moa, 2005, p. 69.
- [15] MATHEWS, E. H.; ARNDT, D. C.; GEYSER, M. F., "Reducing the energy consumption of a conference centre a case study using software". *Building and Environment*, 2002, no. 37, p. 437-444.
- [16] PÉREZ AJO, P.; DEL TORO MATAMORO, R. M.; MARTÍNEZ OCHOA, H., "Ahorro Energético en los Sistemas Climatización y Refrigeración", 2002, p. 14.
- [17] SELCUK CANBAY, C.; HEPBASLI, A.; GULDEN, G., "Evaluating performance indices of a shopping centre and implementing HVAC control principles to minimize energy usage". *Energy and Buildings*, 2004, no. 36 p. 587-598.

- [18] ARMAS VÁLDEZ, J. C., "Procedimiento para la optimización de sistemas de Climatización Centralizados por Agua Helada desde la etapa de diseño conceptual". Tesis Doctoral, Universidad de Cienfuegos. 2008.
- [19] MONTELIER HERNÁNDEZ, S., "Reducción del consumo de energía en instalaciones con sistemas de climatización centralizadas todo agua a flujo constante". Tesis Doctoral, Universidad de Cienfuegos. 2008.
- [20] FERRÁN, A., "Energy Management in Hotels and Implanting Environmental Labels", *ICAEN*, España, 2002.
- [21] ASHRAE, "Improving the Efficiency of Chilled Water Plants - Avery", *The American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineer*, 2001a, p. 9.
- [22] YORK INTERNATIONAL CORPORATION, "Chiller- Plant Energy Performance". *HVAC&R Engineering*, Mayo 2004.
- [23] AGUIRRE, C., "Ahorros de energía en sistemas HVAC de hoteles mediante el uso de variadores de velocidad", <http://www.conae.gob.mx/ahorro/escos.html#inicio>, 2006.
- [24] ZHENJUN, M.; WANG, S., "Energy efficient control of variable speed pumps in complex building central air-conditioning systems". *Energy and Buildings*, 2009, vol. 41 p. 197–205.
- [25] MONTERO LAURENCIO, R.; HECHAVARRÍA HERNÁNDEZ, J. R.; BORROTO NORDELO, A., "Carga térmica y consumo energético en edificación turística con climatización centralizada a flujo variable". *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 2011, vol. 15, no. 61, p. 196-202.
- [26] BEECMANS, V.; DE LARA, J., "Optimización de la altura manométrica de la bomba y ahorro energético". 2003, pp. 5.
- [27] OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, "NC-45- 1-3 Bases del diseño para el turismo", 1999.
- [28] OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, "NC -220-1,2,6-9 Requisitos de diseño para la eficiencia energética", 2002.
- [29] LEGRÁ LOBAINA, A. A.; SILVA DIÉGUEZ, O. R., "La Investigación Científica: Conceptos y Reflexiones", 2011.
- [30] BORROTO NORDELO, A., "Gestión y Economía Energética". Cienfuegos: Universo Sur, 2006. ISBN 959-257-114-7.
- [31] MARRERO CRUZ, M., "Discurso del ministro del turismo". *Granma*. 2007, vol. 8 de Mayo.
- [32] MOLINA GONZÁLEZ, A., "Metodología de gestión tecnológica para aumentar la efectividad en el uso de la energía en instalaciones turísticas", *5to Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos, 2008, p. 9.
- [33] MINBAS, "La Revolución Energética. Resultados y Perspectivas", *7mo Taller de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos, 2012.
- [34] WEST, M.; LARRY, E., "Energy Manegement Programs that increase Hotel and Motel profits". University of Florida, 1996.
- [35] MARTINS, A., "Guía de oportunidades de inversión en el sector hotelero cubano", Comisión Europea, 2000, p. 35.
- [36] CABRERA GORRÍN, O., "Evaluación del indicador kWh/HDO de eficiencia eléctrica en instalaciones hoteleras cubanas". *Revista Retos Turísticos*, 2004, vol. 13, no. 2.
- [37] MONTEAGUDO YANES, J.; BORROTO NORDELO, A.; *et al.*, "Considerar los factores climatológicos durante la explotación reduce el consumo de potencia en los Chiller en más de un 15%". *CIER*. 2005.
- [38] CABRERA GORRÍN, O., "Reflexiones sobre el consumo del sector turístico cubano". 2006, [citado 10-04-2006]. Disponible en Internet: <www.monografia.com>.

- [39] MONTERO LAURENCIO, R., "Disminución del consumo energético en los circuitos secundarios de agua fría de la climatización centralizada de hoteles". Tesis de Maestría Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Moa, 2004.
- [40] LEE, S., "Hoy se rompe el récord histórico de 2319000 turistas". *Granma*. 2008.
- [41] SÁNCHEZ ÁVILA, J. L., "Desarrollo y aplicación del diagnóstico y pronóstico técnico al mantenimiento de los sistemas centralizados de aire acondicionado". Tesis Doctoral, Universidad de Matanzas. 1999.
- [42] MONTERO LAURENCIO, R.; ROMERO RUEDA, I., "Caudal variable en la climatización centralizada de hoteles (parte 2)". *Retos Turísticos*, 2012a, no. 1.
- [43] MONTERO LAURENCIO, R.; RUEDA ROMERO, I., "Climatización distribuida en hoteles: alternativa para el uso racional de la energía eléctrica". *Restos Turísticos*, 2007b, vol. 6, no. 3, p. 12-16.
- [44] HARTMAN, T., "The Hartman LOOP Chiller Plant Design and Operating Technologies: Improve Chiller Plant Efficiency". 2004, [citado 04 -02-2004]. Disponible en Internet: <<http://www.automatedbuildings.com>>.
- [45] ASHRAE, "Improving the quality of life". The American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineer, 2001b.
- [46] COAD, W. J., "Hydronic heating and cooling system design". *ASHRAE Systems and Equipment Handbook*. 2000, p. 18.
- [47] MCQUISTONG, F.; PARKER, J. D.; SPITLER, J. D., "Calefacción Ventilación y Aire Acondicionado". LIMUSA WILEY, 2008. 622 p. ISBN 978-968-18-6170-4
- [48] CRANE, "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías". MCGRAW-HILL, 1977. 215 p.
- [49] JONES, R. A., "System practices for halocarbon refrigerants". *ASHRAE Refrigeration Handbook* ASHRAE, 1998, p. 30.
- [50] LOWERY, T.; PETERSON, S. L.; SWAN, E. J., "Motors, motor controls, and variable-speed drives". *ASHRAE Systems and Equipment Handbook*. ASHRAE, 2000, p. 14.
- [51] BONAL, J., "Accionamientos eléctricos a velocidad variable: fundamentos de electrotecnia y de mecánica, las técnicas de variación de velocidad". París: TEC & DOC, 1999. ISBN 2-7430-0357-X.
- [52] SCHNEIDER, "Variadores de velocidad para motores asíncronos Altivar 31: Guía de programación", 2008, p. 75.
- [53] NUÑEZ ESTENOZ, M.; RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, Y., "Sistema Automático de Medición para variables termohidráulicas en la Climatización Centralizada del Hotel Blau Costa Verde". Tesis de Ingeniería, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2009
- [54] MONTERO LAURENCIO, R.; GONGORA LEYVA, E.; *et al.*, "Caudal variable en la climatización centralizada de hoteles (parte 1)". *Retos Turísticos*, 2010, vol. 9, no. 3, p. 38-45.
- [55] RAMOS PÁES, N., "Bombas, Ventiladores y Compresores". 1994. 398 p.
- [56] XINQIAO, J., "Energy evaluation of optimal control strategies for central VWV chiller systems". *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, no. 5, p. 934-941.
- [57] RYAN GEISTER, W., "Beyond the Flanges, A Look at Chilled Water System Design". TRANE, 2007.
- [58] ASETUB, "Manual técnico de conducciones de PVC". 2005. 425 p.
- [59] E.E.U.A, "Termal Insulation of Pipes and Vessels". Labor, 1976. 208 p. ISBN 84-335-6348-3.
- [60] INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003. 886 p.

- [61] FIRES, V., "Termodinámica". Editado por Editorial REVOLUCIONARIAS, 1987.
- [62] MORAN, M.; SHAPIRO, H., "Fundamentals of Engineering Thermodynamics". Fifth ed., 2006. 847 p.
- [63] REY, F. J.; FRANCO, J. A.; *et al.*, "Estudio comparativo de métodos de cálculo de cargas térmicas en edificios". 2003. Disponible en Internet: <<http://www.energuia.com>>.
- [64] ÁLVAREZ-GUERRA PLACENCIA, M.; RODRÍGUEZ SANTOS, O.; *et al.*, "Temas avanzados de refrigeración y acondicionamiento de aire". Universidad de Cienfuegos: UNIVERSO SUR, 2008. 200 p. ISBN 978-959-257-180-8.
- [65] PÉREZ TELLO, C.; CAMPBELL RAMÍREZ, H. E., "Comportamiento térmico de edificios". México: Instituto de Ingeniería Universidad Autónoma de Baja California, 2003.
- [66] BELLENGER, L.; BRUNING, S.; *et al.*, "Nonresidential cooling and heating load calculation procedures". *ASHRAE Fundamentals Handbook*. 2001, p. 40.
- [67] WULFINGHOFF, D. R., "Energy efficiency manual". Wheaton, Maryland, United States of America, 1999. 1429 p. ISBN 0-9657926-7-6.
- [68] RUEDA GUZMÁN, L. A., "Influencia del diseño en la carga térmica y el consumo de energía en habitaciones de hoteles con Destino Sol y Playa en Cuba ". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría 2003.
- [69] NAKAHARA, N.; ZHENG, M.; *et al.*, "Load prediction for optimal thermal storage - comparison of three kinds of model application". *Building Simulation*. 1999, p. 8.
- [70] CHARYTONIUK, W.; MO-SHING, C., "Very Short-Term Load Forecasting Using Artificial Neural Networks". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, 2000, vol. 15, no. 1, p. 6.
- [71] KALOGIROU, S. A.; NEOCLEOUS, C. C.; SCHIZAS, C. N., "Building heating load estimation using artificial neural networks". pp. 8.
- [72] SENJYU, T.; TAKARA, H.; *et al.*, "One-Hour-Ahead Load Forecasting Using Neural Network". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, February 2002, vol. 7, no. 1, p. 113-118.
- [73] YANG, J.; HUGUES, R.; ZMEUREANU, R., "Building energy prediction with adaptive artificial neural networks". *Building Simulation*. Montréal, Canada 2005, p. 1401-1408.
- [74] SENJYU, T.; PARAS, M.; *et al.*, "Next Day Load Curve Forecasting Using Hybrid Correction Method". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, February 2005, vol. 20, no. 1, p. 102-109.
- [75] BAO, J., "Short-term Load Forecasting based on Neural network and Moving Average". 2005, pp. 17.
- [76] BRAUN, J. E., "Supervisory Control Strategies and Optimization". *ASHRAE Applications Handbook*. 1999, p. 36.
- [77] FRIOCLIMA, "Enfriadoras de agua de condensación por aire con compresores alternativos y baterías de condensadores en W", 2002.
- [78] SALDARRIAGA, J. G., "Hidráulica de tuberías". Colombia: D'VINNIL TDA, 1998. 564 p. ISBN 958-600-831-2.
- [79] ROSSMAN, L. A., "EPANET 2.0: Análisis hidráulico y de calidad en redes de distribución de agua." [en línea]. [España]: Grupo IDMH. Departamento de Ingeniería Hidráulica y M.A. Universidad Politécnica de Valencia 2002.
- [80] HAESTAD, ""User's manual WaterCAD 8.0", Water Distribution Modeling & Management Software." [en línea]. [USA]: 2009. Disponible en World Wide Web: <<http://www.bentley.com>>.

- [81] HECHAVARRÍA HERNÁNDEZ, J. R., "Optimización del diseño de redes hidráulicas bajo criterios técnicos - económicos". Tesis Doctoral, Universidad de Holguín. Holguín, 2009.
- [82] AGUIRRE, A., "Ingeniería Hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua ". Valencia, España: Departamento de Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, 1996.
- [83] NEKRASOV, B., "Hidráulica". Moscú, Rusia: Editorial Mir, 1990.
- [84] STREETER, V.; BENJAMIN, E.; BEDFORD, K., "Mecánica de Fluidos". Novena Edición ed. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, Best Seller International, S.A, 2000.
- [85] MARTÍNEZ, V., MONTEAGUDO, J. Y JÁUREGUI, S. , "Mecánica de los Fluidos y Máquinas de Flujo". Cienfuegos, Cuba: Universo Sur, 2007.
- [86] PETITJEAN, R., "Equilibrado de los bucles de control". Suecia: Tour & Andersson AB 1999. 52 p.
- [87] PETITJEAN, R., "Equilibrado de los sistemas de distribución". Suecia: Tour & Andersson AB, 2000. 71 p.
- [88] PETITJEAN, R., "Equilibrado hidráulico con controladores de presión diferencial". Suecia: Tour & Andersson AB, 2002. 63 p.
- [89] VIEGO FELIPE, P., "Uso final de la energía eléctrica". La Habana: Félix Varela, 2010. 203 p. ISBN 978-959-07-1132-9.
- [90] LOBANOFF , V. S.; ROSS, R. R., "Centrifugal Pumps, Design and Applications". 1992. 577 p.
- [91] SANTOS GONZÁLEZ, R., "Procedimiento para el diseño de sistemas secundarios de climatización centralizada por agua fría". Tesis de Maestría, Universidad de Holguín. Holguín, 2011.
- [92] CARRIER, "Manual de Aire Acondicionado". España: Mc Graw Hill Company, 1972. 848 p.
- [93] FU LIU, X.; DEXTER, A., "Fuzzy Model-based fault-tolerant control of air-conditioning systems". *Building Simulation*. 1999, p. 6.
- [94] VIEGO FELIPE, P. R.; CÁRDENAS MARTÍNEZ, A. U., "Un proyecto para el ahorro de energía con la instalación de motores asincrónicos de alta eficiencia". 1997, pp. 7. Disponible en Internet: <www.energuia.com >.
- [95] PETITJEAN, R., "Total Hydronic balancing". TA HYDRONICS, 1997. 530 p.
- [96] MONTEAGUDO YANES, J.; BORROTO NORDELO, A.; *et al.*, "Estrategia Ocupacional: Una vía para el ahorro de energía en hotels turísticos". *Montaje e Instalaciones*, 2007, vol. Enero, no. 412.
- [97] MONTERO LAURENCIO, R.; HECHAVARRÍA HERNÁNDEZ, J. R., "Aspectos relacionados con el control del flujo secundario de agua en climatización centralizada". *Ingeniería Investigación y Tecnología*, julio-septiembre 2012c, vol. XIII, no. 3, p. 307-313.
- [98] ENERGY DESIGN RESOURCES, "Guestroom controls for the hospitality sector: The Orchard Garden Hotel, a case study". *e-News*, Enero 2010, no. 68, p. 4.
- [99] ENERGY DESIGN RESOURCES, "Guest Room Occupancy Controls ". *e -News*, Octubre 2011, no. 73, p. 5.
- [100] ARCE ARIAS, J. M., "Evaluación termoenergética de la operación de un Circuito Secundario de Agua Fría a flujo variable en Climatización Centralizada". Tesis de Ingeniería, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Moa, 2012.

- [101] MAGAÑA ALMAGUER, H. D.; PÉREZ TELLO, C.; *et al.*, "Caracterización de temperaturas en México con propósitos de ahorro y uso eficiente de la energía". *7mo Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos, 2012, p. 8.
- [102] MOLINA GONZÁLEZ, A.; BORROTO NORDELO, A.; *et al.*, "Herramienta de ordenamiento habitacional para el control energético hotelero". *7mo Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos, 2012, p. 10.
- [103] CASTELLANOS MOLINA, L. M.; VEGA LARA, B. G., "Modelado térmico de habitaciones". *7mo Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos, 2012, p. 13.
- [104] BRAVO HIDALGO, D., "Estudio comparativo del cálculo de cargas térmicas de climatización en edificaciones turísticas utilizando herramientas computacionales ". *7mo Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos, 2012, p. 12.
- [105] PATRICK, D. R.; FARDO, S. W.; *et al.*, "Energy conservation guidebook". Second ed. United States of America: The Fairmont Press, Inc, 2006. 526 p. ISBN 0-88173-526-4
- [106] TURNER, W. C.; DOTY, S., "Energy Management Handbook". Sixth ed. United States of America: The Fairmont Press, Inc., 2006. 924 p. ISBN 0-88173-542-6.
- [107] EECA; EMANZ, "Energy Audit Manual (Energy Efficiency and Conservation Authority and Energy Management Association of New Zealand Inc)". New Zealand, 2007, p. 187.
- [108] ÁLVAREZ-GUERRA PLASENCIA, M. A., "Recuperación de energía en climatización mediante un sistema mixto evaporativo indirecto y tubos de vacío ". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. 1998.
- [109] ANDRADE GREGORI, M. D., "Modelos de cálculos fundamentados en los mecanismos de transporte de humedad y calor para la climatización de locales soterrados". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. 2006.
- [110] BARCIELA PEÑA, A., "Uso económico de la energía residual ". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. 2001.
- [111] CORDOVÉS GARCÍA, A., "Diseño óptimo multiobjetivo para la fabricación (CAD/CAPP) de redes de conducto de climatización". Tesis Doctoral, Universidad de Holguín. 1999.
- [112] DÍAZ HERNÁNDEZ, J. A., "Reducción de la ganancia de calor en las edificaciones climatizadas ". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 1993.
- [113] LEÓN MONZÓN, I., "Microestructuras de polisilicio para la medición de parámetros relacionados con el confort térmico ". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2003.
- [114] SAURA GONZÁLEZ, G., "Métodos y procedimientos para el cálculo del clima térmico y lumínico de las cámaras de crecimiento in vitro en biofábricas". Tesis Doctoral, Universidad Central de Las Villas, 2006.
- [115] DEIROS FRAGA, B., "Simulación y optimización de una instalación de refrigeración por compresión de una etapa". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2001.
- [116] CISNEROS RAMÍREZ, A., "Modelación de la transferencia de calor y masa en el absorbedor de una máquina de refrigeración por absorción". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 1999.
- [117] QUESADA RAMOS, G., "Aplicación de la tecnología de microondas en el proceso de desorción de un sistema de refrigeración por absorción". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2000.
- [118] ORO ORTIZ, C., "Formulación de un lubricante para compresores de refrigeración doméstica que trabajan con el refrigerante hidrocarbonato LB-12". Tesis Doctoral, 2003.

- [119] DIAZ GONZALEZ, L. O., "Ampliación de la zona estable de explotación de las máquinas frigoríficas turbocompresoras de freón, fuera del régimen de diseño". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 1990.
- [120] CARDERO CORREA, G. R., "Comportamiento energético de máquinas enfriadoras con recuperación de calor". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 1999.
- [121] GONZÁLEZ PETIT JEAN, M. L., "Procedimiento de cálculo basado en costos exergoeconómico-ambientales para la evaluación de sistemas de refrigeración por absorción". Tesis Doctoral, Universidad Central de Las Villas, 2004.
- [122] ACOSTA MARRERO, G., "Sicrometría práctica del aire exterior". Tesis Doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 1998.
- [123] DÍAZ HERNÁNDEZ, J. A.; QUINTERO CABRERA, D., "Diseño optimizado de la envolvente de las edificaciones climatizadas". *CIER*. 2005, p. 5.
- [124] PÉREZ TELLO, C.; CAMPBELL RAMÍREZ, H. E.; *et al.*, "Análisis de cubiertas reflectivas como alternativa de ahorro de energía por climatización en edificaciones turísticas". *CIER 2005*. Varadero, Cuba, 2005.
- [125] AMADO MORENO, M. G.; PÉREZ TELLO, C.; VÁZQUEZ ESPINOZA, A. M., "Pinturas reflectivas para ahorrar electricidad en edificaciones de climas cálidos". *4to Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos, Cuba, 2006.
- [126] URIBAZO ARZUAGA, E. R.; RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, B.; *et al.*, "Identificación del sistema de climatización de un hotel". 2004.
- [127] URIBAZO ARZUAGA, E. R.; RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, B.; *et al.*, "Sistema de control borroso de clima de un hotel inteligente". 2005.
- [128] CHOW, T.; LIN, Z.; *et al.*, "Applying neural network and genetic algorithm in chiller system optimization". *Building Simulation*. Rio de Janeiro, Brazil, 2001, p. 8.
- [129] JOHN, R., "Operating experience of building Management Systems". *Int. Congress on Building Energy Management*. USA, 1987.
- [130] YOSHIDA, H.; KUMAR, S., "RARX algorithm based model development and application to real time data for on-line fault detection in VAV AHU units". 2001, pp. 8.
- [131] MORERA SAMADA, A. D., "Operación de las redes hidráulicas para la climatización de hoteles", 2011.
- [132] DELGADO VELÁZQUEZ, O., "Componentes de la climatización centralizada en hoteles: propuestas para racionalizar el consumo energético". Tesis de Ingeniería, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Moa, 2009.
- [133] SALSBURY, T.; DIAMOND, R., "Performance validation and energy analysis of HVAC systems using simulation. Indoor Environment Department. Lawrence Berkeley National Laboratory. California.". 1999, pp. 19.
- [134] AGUILAR BERMÚDEZ, J. C., "Herramientas para la predicción energética en el hotel Blau Costa Verde". Tesis de Ingeniería, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Moa, 2009.
- [135] LEÓN BENITEZ, C.; ARIAS GARCIA, R.; JÁURAGUI RIGÓ, S., "Metodología para el análisis de empleo de variadores de velocidad en sistemas de bombeo". *Conferencia Internacional, FIE 2002*. Santiago de Cuba, Cuba, 2002, p. 15.
- [136] RODRÍGUEZ LEZCANO, J.; ORAMA ORTEGA, M.; SÁNCHEZ ÁVILA, J. L., "Evaluación y propuesta de solución del sistema de suministro de agua para la climatización de habitaciones de un hotel de varadero". *Restos Turísticos*, 2004, vol. 3, no. 1, p. 38-42.

- [137] HERNÁNDEZ VELÁZQUEZ, J., "Cambio a caudal variable del sistema de clima central de la villa del Hotel Brisas Guardalavaca". Tesis de Maestría, Universidad de Oriente. 2005.
- [138] SIERRA AGUILERA, Y., "Comportamiento del motor de inducción en la Climatización Centralizada de hoteles". Tesis de Ingeniería, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Moa, 2009.
- [139] WULFINGHOFF, D., "Chiller Plant: Keep the chilled water supply temperature as high as possible". 1999.
- [140] ARZOLA RUIZ, J., "Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería: preparación y toma de decisiones de ingeniería bajo criterios múltiples". 2010. 104 p. ISBN 978-959-261-299-0.
- [141] ARZOLA RUIZ, J., "Sistemas de Ingeniería". Primera ed. La Habana: Félix Varela, 2000. 482 p. ISBN 959-258-079-0.
- [142] TRANE, "ARI Standard 550/590–1998 Implications for Chilled-Water Plant Design". United State: Engineer News Letter, 1998.
- [143] CAWLEY, D. B., "Beyond DOE-2 and BLAST: Energy Plus, the new generation energy simulation program". *Summer study on energy efficiency in buildings*. California: ACEE, 1989.
- [144] WITTE, M.; PEDERSEN, C. O.; SPITLER, J. D., "Techniques for Simultaneous Simulation of Buildings and Mechanical Systems in Heat Balance Based Energy Analysis Programs". *Building Simulation*. Vancouver , Columbia Británica, 1989.
- [145] TAYLOR, R. D., "Impact of Simultaneous Simulation of Buildings and Mechanical System in Heat Balance Based Energy Analysis Programs on System Response and Control". *Building Simulation*. Sophia Antipolis, Niza, Francia, 1991b.
- [146] TAYLOR, R. D.; PEDERSEN, C. O.; LAWRIE, L., "Simultaneous Simulation of Buildings and Mechanical Systems in Heat Balance Based Energy Analysis Programs". *International Conference on System Simulation in Buildings*. Lieja, Bélgica, 1991a.
- [147] CLARKE, J. A., "Energy Simulation in Building Design". Boston: Adam Hilger Ltd, 1991.
- [148] HENSEN, J. L., "On the Thermal Interaction of Building Structure and Heating and Ventilating Systems". 1991.
- [149] HERNÁNDEZ CRUZ, M. Á., "Modelo de evaluación de la demanda eléctrica en planificación urbanística. Aplicación al estudio del Parque Goya". Tesis de Doctorado, Universidad de Zaragoza. 2008.
- [150] POLAINO DE LOS SANTOS, L., "Instalaciones de climatización". Ciudad de La Habana: ISPJAE, 1987.
- [151] DE ARMAS TEYRA, M. A.; GÓMEZ SARDUY, J.; *et al.*, "Inteligencia artificial aplicada al análisis de sistemas energéticos con Matlab". Cartagena: Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, 2007. 269 p.
- [152] CORTES GARCÍA, U.; BÉJA ALONSO, J.; MORENO RIBAS, A., "Inteligencia Artificial". Barcelona, España: EDICIONES UPC, 1994. 286 p. ISBN 84-7653-403-5.
- [153] MATHWORKS; "Matlab ". [Version for 7.7.0.471 (R2008b)]. 2008.
- [154] MARTÍNEZ ESCANAVERINO, M., "Curso de Mecánica de los Accionamientos". *Doctorado Curricular en Electromecánica*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2007, p. 70.
- [155] KIRILLIN, V. A.; SICHEV, V. V.; SEINDLIN, A. E., "Termodinámica técnica". Moscú: Mir, 1986. 598 p.
- [156] NORFORD, L., "Energy estimating and modeling methods". *ASHRAE Handbook - Fundamentals* Unated State: ASHRAE, 2009, p. 39.

- [157] RESNIK, R., "Primera Ley de la Termodinámica". *Física I*. México D.F: CECSA, 2002.
- [158] SERWAY, R. A.; JEWET, J. W., "Calor específico". *Física I*. México D.F: Thomson, 2003.
- [159] DUMITRU, R.; MARCHIO, D., "Fault identification in air handling unit using physical models and neural networks". *Building Simulation*. Ecole des Mines de Paris, 1995.
- [160] POLI, R.; LANGDON, W. B.; MCPHEE, N. F., "A Field Guide to Genetic Programming". 2008. ISBN 978-1-4092-0073-4.
- [161] BORLAND; "Delphi ". [Version for 7.0. 2002.
- [162] AUTODESK; "AutoLISP Developer's Guide ". [Canadá: AutoDesk Official Training Courseware (AOTC), 2008.
- [163] TOUR AND ANDERSSON; "TA Shunt version 1.2". [2005.
- [164] TOUR AND ANDERSSON; "TA Select 4 v4.0.3.6". [TA Hydronic College, 2011a.
- [165] TOUR AND ANDERSSON; "TA-Pocket - La calculadora hidráulica de bolsillo". [2011b.
- [166] ÁLVAREZ, B. M.; GÓMEZ, M. A.; *et al.*, "Matemática Numérica". La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela, 2002.
- [167] SOLVAY; "Solkane Refrigerants Versión 3.2". [Solvay Flour und Derivate GmbH & CO.KG, 2002.
- [168] SKOVRUP, H.; KNUDSEN, J. H.; HOLM, H. V.; "Refrigeration utilities versión 1.1". [Department of Energy Engineering, DTU, 1996.
- [169] OFINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS E INFORMACIÓN, "Anuario Estadístico de Cuba". La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Estadísticas e Información, 2010.
- [170] AERMEC, "FAN COIL FCX", 2008.
- [171] RAVINOVICH, E. Z., "Hidráulica". Moscú, Rusia: Editorial Mir, 1986.
- [172] KUTTZ, M., "Enciclopedia de la Mecánica Ingeniería y Técnica". España Océano, 1995.
- [173] HAESTAD, "WaterGEMS for GIS User's Guide". 2003. Disponible en Internet: <<http://www.haestad.com>>.
- [174] PÉREZ FRANCO, D., "Introducción al estudio de redes de tuberías". La Habana , Cuba: Editorial Pueblo y Educación, 1986.
- [175] STERLING, "SIHI SuperNova ". PUMP TECHNOLOGY 2003.

NOMENCLATURA UTILIZADA SEGÚN EL ORDEN DE APARICIÓN EN EL TEXTO

| Simbología | Significado | Unidad |
|-------------------|--|------------------------|
| T | Total de habitaciones | número entero positivo |
| D | Habitaciones disponibles | número entero positivo |
| HAO | Habitaciones a ocupar | número entero positivo |
| kW·h/HDO | Índice de consumo utilizado en el turismo en Cuba. Energía eléctrica entre Habitaciones Días Ocupadas | kW·h/HDO |
| kW·h/t | Índice de consumo de las unidades enfriadoras | kW·h/t |
| K | Coefficiente de conductividad térmica | kcal/mh °C |
| q | Cantidad de calor | kW |
| m | Flujo másico | kg/s |
| ΔT | Diferencia de temperatura | K |
| C_p | Calor específico del agua | kJ/kg·K |
| q/A | Flujo calorífico a través de una pared | W/h·m ² |
| α | Absortividad de la superficie a la luz solar | Adimensional |
| I_t | Radiación solar total incidente sobre la superficie | W/h·m ² |
| h_0 | Coefficiente de transferencia de calor convectivo y de longitud de onda larga en la superficie externa | W/h·m ² K |
| t_0 | Temperatura exterior (ambiente) | K |
| t_s | Temperatura de la superficie de la pared | K |
| δR | Diferencia entre la radiación de onda larga incidente procedente de la bóveda celeste y el entorno, y la radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura ambiente | W/h·m ² |
| ε | Emitancia de la superficie | Adimensional |
| N=V | Velocidad de rotación de una bomba centrífuga | rev/min |
| Q | Caudal de agua | m ³ /s |
| H | Altura de carga | m |
| P | Potencia eléctrica | kW |
| R_i | Relación funcional entre la altura de carga H de la red del sistema y el caudal Q según la red | adimensional |
| B_j | Relación funcional entre la altura de carga H de la red del sistema y el caudal Q según la bomba | adimensional |
| H_{sp} | Altura de carga requerida por el CSAF y que garantiza el confort | m |
| Q_{sp} | Caudal requerido por el CSAF y que garantiza el confort | m ³ /s |
| ND | Cantidad de habitaciones no disponibles | número entero positivo |
| H_O | Total de habitaciones que ya están ocupadas | número entero positivo |
| H_{OP} | Habitaciones a ocupar que están priorizadas (escogidas a preferencia de los clientes) | número entero positivo |
| H_{FS} | Habitaciones fuera de servicio | número entero positivo |
| MVC | Mayor Valor del Código de solución (cantidad total de opciones de ocupación de los locales disponibles) | número entero positivo |
| MVCR | Coefficiente binomial al que se denominó Mayor Valor del Código Restringido | número entero positivo |
| M_T | Modelo térmico del edificio | - |

| | | |
|-----------------|---|--------------|
| M_C | Modelo del trabajo de compresión | - |
| M_H | Modelo hidráulico | - |
| C_T | Expresiones para determinar las magnitudes que caracterizan carga térmica de enfriamiento | - |
| C_C | Expresiones para determinar las magnitudes que caracterizan el trabajo de compresión | - |
| C_H | Expresiones para determina las magnitudes que caracterizan la carga hidráulica del sistema | - |
| P_{eb} | Potencia eléctrica requerida para el bombeo en el CSAF | kW |
| P_{ec} | Potencia eléctrica requerida para realizar trabajo de compresión en la enfriadora | kW |
| P_t | Función objetivo: sumatoria de las potencias eléctricas requeridas $P_{eb} + P_{ec}$ | kW |
| Z | Función calidad: mínima potencia eléctrica total requerida | kW |
| g_1, g_2, g_3 | Intensidades de las relaciones de las variables de coordinación con M_T, M_C y M_H | - |
| g_4, g_5, g_6 | Intensidades de las relaciones de los datos de entrada, las variables de coordinación, intermedias y de decisión del sistema con C_T, C_C y C_H | - |
| X_e | Variables que caracterizan el edificio y que definen la estructura de los modelos M_T y M_H | - |
| X_{cl} | Variables que caracterizan el clima y que definen la estructura de los modelos M_T y M_C | - |
| X_{SCCAH} | Variables que caracterizan la estructura y parámetros generales del SCCAH | - |
| X_{CSAF} | Variables que caracterizan la estructura y parámetros generales del CSAF | - |
| R_n | Tipo de refrigerante que utiliza el equipo enfriador | - |
| T_{ev} | Temperatura de entrada del refrigerante en el evaporador | K |
| T_{cd} | Temperatura de entrada del refrigerante al condensador | K |
| T_{amb} | Temperatura ambiente | K |
| h | Hora del día | 1-24 |
| d | Día del año | 1-365 |
| C_{Tmax} | Carga térmica de enfriamiento máxima | kW |
| $T_e ; t_8$ | Temperatura de envío del agua fría hacia el edificio | K |
| T_r | Temperatura de retorno del agua fría desde el edificio | K |
| (a) | Día del año (1,...,365) | adimensional |
| (c) | Cantidad de variantes de códigos del MVCR | adimensional |
| (d) | Hora del día (1,...,24) | adimensional |
| R | Coefficiente de correlación | adimensional |
| Y | Salida de la Red Neuronal Artificial | kW |
| f^1, f^2, f^3 | Funciones de transferencia de las diferentes capas de neuronas | - |
| b^1, b^2, b^3 | Polarizaciones de las diferentes capas de neuronas | - |

| | | |
|----------------|---|-------------------|
| ρ | Densidad del agua | kg/m ³ |
| g | Aceleración de la gravedad | m/s ² |
| η_b | Rendimiento de la bomba | adimensional |
| η_m | Rendimiento del motor | adimensional |
| K_v | Coefficiente de variación de flujo en válvulas de equilibrio | adimensional |
| Q_{ve} | Caudal en las válvulas de equilibrio | l/h |
| Δp | Pérdidas de carga en las válvulas de equilibrio | kPa |
| V_n | Velocidad de rotación nominal de la bomba | m/s |
| Q_n | Caudal nominal de la bomba | m ³ /s |
| H_n | Altura de carga nominal de la bomba | m |
| V_i | Velocidad de rotación mínima de la bomba | rev/min |
| V_{i0} | Velocidad de rotación mínima inicial de la bomba | rev/min |
| V_a | Velocidad de rotación máxima de la bomba | rev/min |
| V_{a0} | Velocidad máxima inicial de la bomba | rev/min |
| $V=N$ | Velocidad de rotación seleccionada para la bomba | rev/min |
| Q_a | Valores mínimos de los caudales calculados para V_a | m ³ /s |
| Q_i | Valores mínimos de los caudales calculados para V_i | m ³ /s |
| H_a | Valores mínimos de las presiones calculadas V_a | m |
| H_i | Valores mínimos de las presiones calculadas V_i | m |
| δ_Q | Cota para el módulo de la diferencia máxima entre los caudales requeridos y calculados en las unidades terminales | m ³ /s |
| Q_{UTE} | Caudal requerido en una unidad terminal | m ³ /s |
| Q_{UTR} | Caudal real en una unidad terminal | m ³ /s |
| A, C | Coefficientes de la ecuación de la bomba | adimensional |
| h_6 | Entalpía de vapor saturado a la entrada del compresor | kJ/kg |
| h_2 | Entalpía teórica del vapor sobrecalentado a la salida del compresor | kJ/kg |
| h_5 | Entalpía del líquido saturado | kJ/kg |
| h_4 | Entalpía de la mezcla saturada a la entrada del evaporador | kJ/kg |
| W_{Real} | Trabajo real de compresión | kJ/kg |
| h_2 | Entalpía real del gas refrigerante a la descarga del compresor | kJ/kg |
| η_s | Rendimiento isentrópico | adimensional |
| $N_c = P_{ec}$ | Potencia eléctrica requerida por el compresor | kW |
| m_R | Flujo másico de refrigerante | kg/s |
| m_{CPAF} | Flujo másico del agua por el evaporador (CPAF) | kg/s |
| h_7, h_8 | Entalpía del agua a la entrada y la salida del evaporador | kJ/kg |
| θ | Factor de diversidad de la carga térmica | adimensional |
| m_r | Flujo másico de agua que retorna en correspondencia con la carga parcial | kg/s |
| m_c | Flujo másico del agua a través del colector común | kg/s |
| t_r | Temperatura de retorno del agua del CSAF | K |

| | | |
|--------------------|---|------------------------|
| t_c | Temperatura del agua a través del colector, se considera igual a la temperatura del agua a la salida de la enfriadora | K |
| t_7 | Temperatura de entrada del agua al evaporador | K |
| CTE_i | Carga térmica de enfriamiento de la habitación i | kW |
| m_i | Flujo másico en la unidad terminal i | kg/s |
| Q_{ut_i} | Flujo volumétrico del agua en la unidad terminal i (determinado durante el cálculo hidráulico) | m ³ /s |
| t_i | Temperatura de salida del agua de la unidad terminal i | K |
| m_{HDO} | Flujo másico para ocupación específica HDO | kg/s |
| CTE_{HDO} | Carga térmica de enfriamiento de la ocupación HDO | kW |
| MCE _{exh} | Máxima combinatoria exhaustiva | número entero positivo |
| MC _{xEsc} | Máxima combinatoria por escalón | número entero positivo |
| THE _{Esc} | Total de habitaciones por escalón | número entero positivo |
| VME | Máxima cantidad de escalones | número entero positivo |
| W | Cadena de caracteres binarios que representa las HDO | - |
| O | Subcadena binaria que representa la cantidad de habitaciones D | - |
| O_i | Número binario que representa las variantes de ocupación según la subcadena O en función de HAO | - |
| B_i | Valor de O_i en la base numérica 10 | - |
| c | Número de orden de la Ocupación según MVCR | número entero positivo |
| O_c | Código binario de la ocupación de orden c | - |
| S_1, S_2 | Secuencias binarias compactas de HAO | - |
| h | Paso de la búsqueda del código binario de la ocupación c | número entero positivo |
| S | Orden que ocupa en la lista de ocupaciones la ocupación óptima | número entero positivo |
| i | Contador de variantes de ocupación en la búsqueda exhaustiva simple | número entero positivo |
| T_T | Producto de MVCR por el tiempo unitario de cómputo necesario para calcular Z' para una variante de ocupación | s |
| P | Paso del escalón en la búsqueda escalonada | número entero positivo |
| HAO _T | Valor máximo del paso del escalón | número entero positivo |
| E | Número de veces que será aplicado el método exhaustivo simple según los escalones del método exhaustivo escalonado. | número entero positivo |
| T_{PI} | Tamaño de la población inicial para la optimización mediante algoritmo genético | número entero positivo |
| Po | Cantidad de individuos de la población inicial | número entero positivo |
| CTE | Carga térmica de enfriamiento promedio para los días de ocupación para los cuales se realiza la optimización | kW |
| He | Valor de consigna de la presión de envío del CSAF | m |
| Hr | Presión en el nodo de retorno de la red hidráulica | m |
| Qr | Caudal requerido para la ocupación que se evalúa | m ³ /s |
| Qt | Caudal total requerido para la ocupación máxima | m ³ /s |

| | | |
|----------------------|---|------------------------|
| Incp.Q | Mayor incumplimiento de caudal en las unidades terminales seleccionadas | % |
| EGC | Cantidad de evaluaciones al generar los códigos para una optimización determinada | número entero positivo |
| t | Tiempo computacional para determinar la solución óptima | s |
| TB _{Exh(1)} | Total de búsquedas exhaustivas de paso 1 para cualquier variante de HAO y D | número entero positivo |

ACRÓNIMOS UTILIZADOS

| Acrónimo | Significado |
|----------|---|
| VV | Variador de Velocidad |
| EOCE | Estrategia de Ocupación bajo Criterios Energéticos |
| SCCAH | Sistema de Climatización Centralizado por Agua Helada (todo-agua) |
| CSAF | Circuito Secundario de Agua Fría |
| UABC | Universidad Autónoma de Baja California |
| RNA | Redes Neuronales Artificiales |
| PTCT | Proyecto Territorial de Ciencia y Técnica |
| MES | Ministerio de Educación Superior |
| CENDA | Centro Nacional de Derechos de Autor |
| SS.TT | Servicios Técnicos (departamentos de mantenimiento de los hoteles cubanos) |
| ACS | Agua Caliente Sanitaria |
| CPAC | Circuito Primario de Agua Caliente |
| R22 | Refrigerante freón 22 |
| CPAF | Circuito Primario de Agua Fría |
| PID | Proporcional Integral Derivativo |
| PVC | Tuberías plásticas |
| ASHRAE | Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción Refrigeración y Aire Acondicionado |
| NC | Norma Cubana |
| BC | Bombas Centrífugas |
| ARMAX | Autoregresión con Variable Exógena |
| ASSI | Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería |
| CAD | Diseño Asistido por Computadora |
| EROS | Sistema de supervisión y monitoreo industrial, desarrollado por el Grupo EROS de la Empresa de Servicios Técnicos de Computación, Comunicaciones y Electrónica del Níquel |
| SME | Sistema de Mayor Envergadura |
| IE | Indicador de Eficiencia |
| SCADA | Control de Supervisión y Adquisición de Datos |
| TA | Tour and Andersson |
| MTH | Modelo Termo-Hidráulico |

ANEXOS

ANEXO 1**TRABAJOS DESARROLLADOS POR EL AUTOR RELACIONADOS CON EL TEMA DE LA INVESTIGACIÓN****Tesis de maestría:**

Disminución del consumo energético en los Circuitos Secundarios de Agua Fría de la Climatización Centralizada en hoteles. Maestría en Electromecánica, ISMM, 2004.

Publicaciones en revistas como autor principal:

1. *Climatización distribuida en hoteles: alternativa para el uso racional de la energía eléctrica*. Revista Retos Turísticos, número 3, volumen 6, p.10-16, 2007. ISSN 1681-9713.
2. *Aplicación del toolbox - matlab en la estimación de Gestión Total Eficiente de Energía en Moa, Holguín, Cuba*. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Universidad Politécnica y Tecnológica de Colombia, número 2, volumen 7, p.39-44, 2009. ISSN 1900-771X.
3. *Predicción del consumo de electricidad y Gas LP en un hotel mediante redes neuronales artificiales*. Revista Energética, Instituto de Energía de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, número 42, p.21-28, julio - diciembre 2009. ISSN 0120-9833.
4. *Caudal variable en la climatización centralizada de hoteles (parte 1)*. Revista Retos Turísticos, Universidad de Matanzas, número 3, volumen 9, p.42-49, 2010. ISSN 1681-9713.
5. *Carga térmica y consumo energético en edificación turística con climatización centralizada a flujo variable*. Revista Universidad, Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Venezuela, número 61, volumen 15, p.196-202, 2011. ISSN 1316-4821.
6. *Caudal variable en la climatización centralizada de hoteles (parte 2)*. Revista Retos Turísticos, Universidad de Matanzas, número 1, volumen 11, p.3-10, 2012. ISSN 1681-9713.
7. *Análisis y síntesis de la operación de circuitos secundarios de agua fría en climatización centralizada*. Revista Ingeniería Mecánica, Instituto Superior José Antonio Echavarría, La Habana, Cuba, número 2, volumen 15, mayo - agosto 2012, p. 83-94. ISSN 1815-5944.
8. *Aspectos relacionados con el control del flujo secundario de agua en climatización centralizada*. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, número 3, volumen XIII, p.307-313, julio - septiembre 2012. ISSN 1405-7743.

Publicaciones en eventos científicos como autor principal (2005-2013):

1. Diagnósticos Energéticos y su influencia en la gestión empresarial en hoteles. III Convención “Entorno Agrario 2005”, Sancti Spiritus. ISBN 959-250-219-6.
2. Eficiencia energética mediante la climatización localizada en hoteles con habitaciones bungalow. 4^{to} Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, 2006. ISBN 959-257-110-4.
3. Algunos aspectos de la Tecnología de la Gestión Total Eficiente de la Energía aplicados en hoteles de la provincia de Holguín. 5^{to} Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente,

- 2008, Cienfuegos. ISBN 978-959-257-186-0.
4. Evaluación del sistema de climatización de un restaurant buffet. 5^o Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, 2008, Cienfuegos. ISBN 978-959-257-186-0.
 5. Agua Caliente Sanitaria en hoteles: realidades y evaluación de las condiciones operacionales. 5^o Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, 2008, Cienfuegos. ISBN 978-959-257-186-0.
 6. Caudal variable en la impulsión del agua fría de la climatización centralizada en hoteles. Convención Internacional de la Ingeniería en Cuba. 2008. Matanzas. ISBN 978-959-247-058-3.
 7. Caudal variable y carga de enfriamiento anual: oportunidades para el ahorro de energía en la climatización centralizada de hoteles. 6^o Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, 2010. ISBN 978-959-257-231-7.
 8. Circuitos Secundarios de Agua Fría en la climatización centralizada de hoteles: pruebas de explotación desde computadora. 6^o Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, 2010. ISBN 978-959-257-231-7.
 9. Ajuste del controlador y red neuronal artificial multivariable para circuitos secundarios de agua fría en climatización centralizada. III ENERMOA, Fórum Tecnológico Especial de Energía, 2010, Moa. ISBN 978-959-16-1216-8.
 10. Aspectos termo-hidráulicos en la operación de circuitos secundarios de agua fría a caudal variable en climatización centralizada. III ENERMOA, Fórum Tecnológico Especial de Energía, 2010. ISBN 978-959-16-1216-8.
 11. Análisis y síntesis de la operación de circuitos secundarios en la climatización centralizada a flujo variable: aspectos termo-hidráulicos. X Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica y VI Seminario Internacional de Ingeniería Hidráulica, 2011. ISBN 978-959-247-082-8.
 12. Análisis y síntesis para la optimización energética de la operación en climatización centralizada a flujo variable. I Conferencia Internacional de la Universidad de Sancti Spiritus, YAYABOCIENCIA 2011. ISBN 978-959-250-703-6.
 13. Carga térmica en climatización centralizada a flujo variable. I Conferencia Internacional de la Universidad de Sancti Spiritus, YAYABOCIENCIA 2011. ISBN 978-959-250-703-6.
 14. Climatización Centralizada a flujo variable: optimización energética de la operación. XXXIII Convención Panamericana de Ingenierías, 2012, La Habana, ISBN 978-959-247-094-1.
 15. Selección de modelos de cargas térmicas basados en redes neuronales artificiales y la ocupación que minimiza el trabajo de compresión. 7^{mo} Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, 2012. ISBN 978-959-257-323-9.
 16. Climatización centralizada a flujo variable: optimización energética de la operación. 7^{mo} Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, 2012. ISBN 978-959-257-323-9.
 17. Análisis y síntesis de la operación de circuitos secundarios de agua fría en climatización centralizada. 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, VIII Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería, 2012. La Habana. ISBN 978-959-261-405-5.
 18. Aspectos relacionados con el control del flujo secundario de agua en climatización centralizada. 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, VIII Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería, 2012. La Habana. ISBN 978-959-261-405-5.

19. Algunas respuestas termo-hidráulicas y energéticas de un sistema de Climatización Centralizado en un edificio de un hotel. IV ENERMOA, Fórum Tecnológico Especial de Energía, Moa, 2012. ISBN 978-959-16-2067-5.
20. Análisis sistémico de la operación de los circuitos secundarios de agua fría en climatización centralizada de hoteles. VI Conferencia Científica Internacional, Holguín, 2013. ISBN 978-959-16-2138-2.
21. Optimización operacional de redes hidráulicas para la climatización centralizada a flujo variable en hoteles. XI Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica, Ciego de Ávila, 2013. ISBN 978-959-247-106-1.
22. Respuestas termo-hidráulicas en un sistema de climatización centralizado todo-agua en un hotel turístico. Jornada Internacional de Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Industrial y ramas a fines, La Habana, 2013. ISBN 978-959-247-110-8.

Trabajos de diploma tutorados (2002-2013):

1. Estudio del sistema de Climatización Centralizado del Hotel “LTI Costa Verde Beach Resort”, 2002.
2. Bases para la Gestión Energética en los Sistemas de Suministro Eléctrico en instalaciones Hoteleras, 2003.
3. Variadores de Velocidad en los sistemas de Climatización Centralizados en Hoteles, 2003.
4. Estudio de los sistemas secundarios de agua fría de la climatización centralizada en hoteles, 2004.
5. Análisis de los regímenes de explotación de los sistemas de impulsión de agua fría y caliente en el hotel Blau Costa Verde, 2007.
6. Diagnostico energético del hotel Miraflores, 2007.
7. Gestión energética en el hotel Miraflores, 2008.
8. Redes hidráulicas en la climatización centralizada de hoteles, 2008.
9. Herramientas para predicción energética aplicadas en el hotel Blau Costa Verde, 2009.
10. Componentes de la climatización centralizada en hoteles: propuestas para racionalizar el consumo energético, 2009.
11. Sistema automático de medición para variables termo-hidráulicas en la climatización centralizada del hotel Blau Costa Verde, 2009.
12. Comportamiento del motor de inducción en la climatización centralizada de hoteles, 2009.
13. Aspectos relacionados con el control de los circuitos secundarios de agua fría de la climatización centralizada en el Hotel Blau Costa Verde, 2010.
14. Procedimiento para estimar y reducir el consumo de electricidad en un circuito secundario de agua fría en la climatización centralizada, 2010.
15. Evaluación del sistema de climatización del hotel Miraflores su incidencia en la calidad del aire y en el consumo energético, 2010.
16. Red hidráulica y requerimientos de potencia eléctrica en climatización centralizada a flujo variable, 2011.
17. Evaluación termo-energética de la operación de un circuito secundario de agua fría a flujo variable en climatización centralizada, 2012.
18. Propuesta de una estrategia de control para los circuitos secundarios de agua fría a flujo

variable de la climatización del hotel Blau Costa Verde, 2013.

19. Sistema CAD para el diseño de los circuitos secundarios de agua fría en la climatización centralizada de hoteles turísticos, 2013.

Tesis de maestría tutoradas:

1. Pronóstico del consumo de energía eléctrica en el hotel Porto Santo. Maestría en Electromecánica, 2010.
2. Gestión Energética en el Hotel Playa Pesquero. Maestría en Eficiencia Energética, 2011.
3. Procedimiento para el diseño de Sistemas Secundarios de Climatización Centralizada por Agua Fría. Maestría en CAD/CAM, UHo, 2011.
4. Pronóstico de la demanda de energía eléctrica mediante algoritmos genéticos. Maestría en Eficiencia Energética, 2011.

Registro CENDA:

La disminución del consumo energético en circuitos secundarios de agua fría de la climatización centralizada de hoteles, 2007.

Premios CITMA provincial de Innovación Tecnológica:

1. La Automatización Industrial y el uso racional de la energía en el sector empresarial como fuente para el incremento de la eficiencia energética”, 2002 (coautor).
2. Soluciones y herramientas para la gestión energética en el sector de los servicios, 2007 (autor principal).

Proyectos de investigación (2007-2013):

1. Proyecto ramal del MES (7.14) desarrollado entre la Universidad de Cienfuegos, la Universidad Central de las Villas y el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, “Eficiencia energética de sistemas de climatización centralizados tipo todo-agua”, participante.
2. Proyecto territorial de investigación – desarrollo e innovación tecnológica (PTCT 17/08), “Modelación, simulación y control de los circuitos de impulsión de agua fría y agua caliente en hoteles para las condiciones de explotación en Cuba”, coordinador.
3. Proyecto para estancia de estudios avanzado de posgrado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, México. “Eficiencia energética en los sistemas de climatización centralizados por agua helada en hoteles”, coordinador.
4. Proyecto Empresarial 1711, entre la Empresa de Automatización Integral y la Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, “Procedimiento tecnológico para el proceso de supervisión y control energético en hoteles cubanos”, participante.
5. Proyecto Universitario, “Energía y Turismo: una mirada desde el mantenimiento y la explotación hotelera” (PU1232), coordinador.

ANEXO 2

CONEXIONES BÁSICAS DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS TODO-AGUA

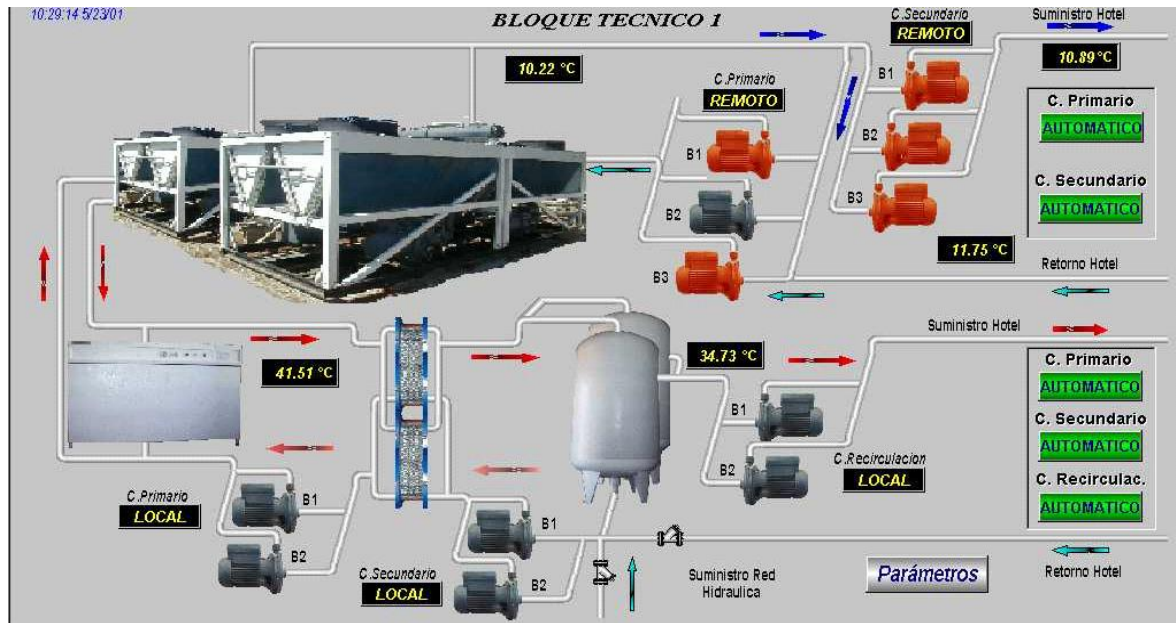


Figura 1. Sistema de Climatización Centralizado Todo-Agua [7].

Las flechas azules indican los fluidos del agua fría y las rojas el sistema de ACS.

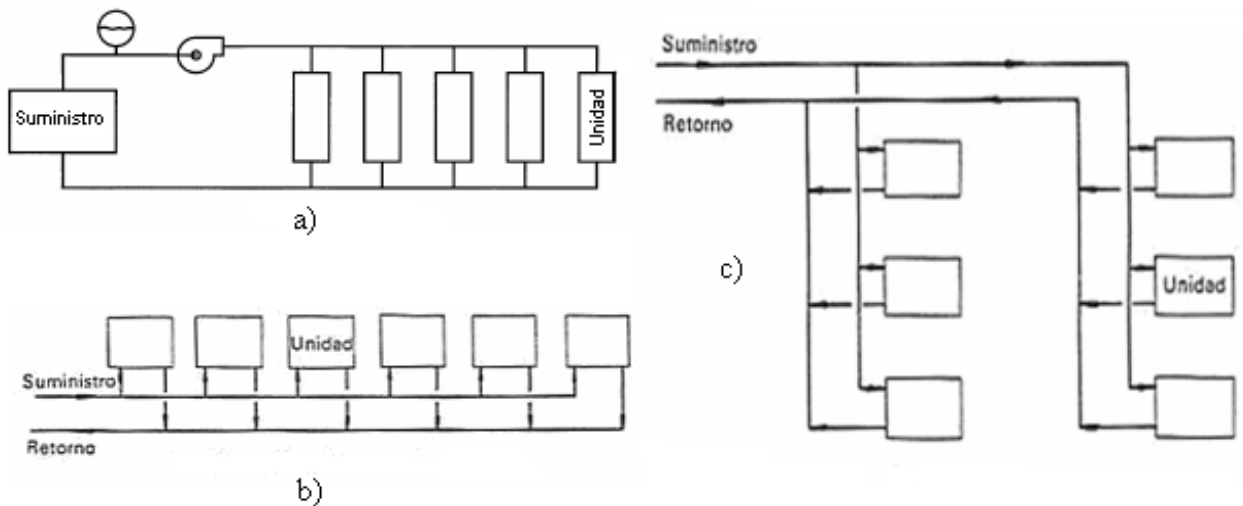


Figura 2. Red hidráulica mallada con retorno directo empleada en los CSAF

- a) Esquema general simplificado [46]
- b) unidades conectadas horizontalmente [92] y
- c) unidades conectadas verticalmente [92].

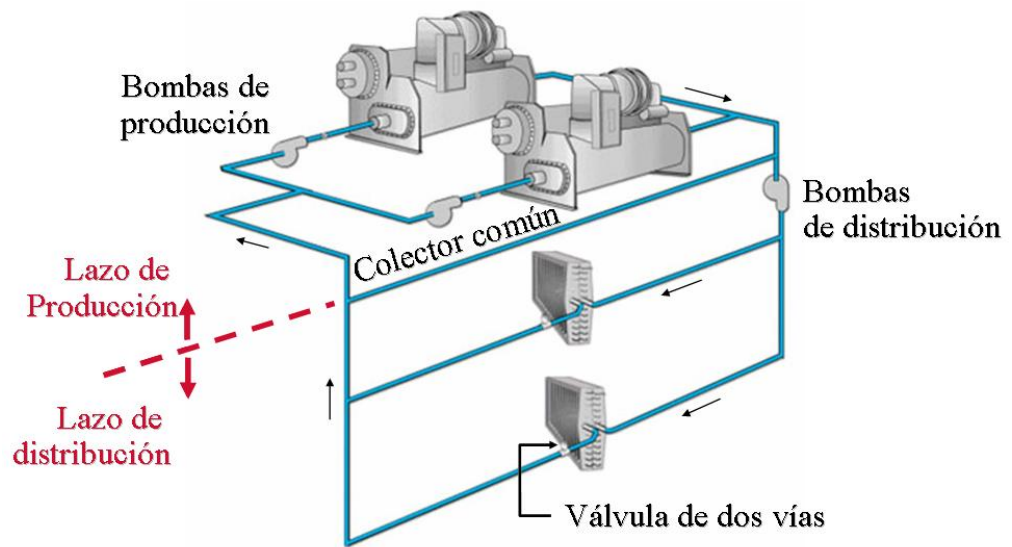


Figura 3. Configuración estándar de los SCCAH a flujo variable [57].

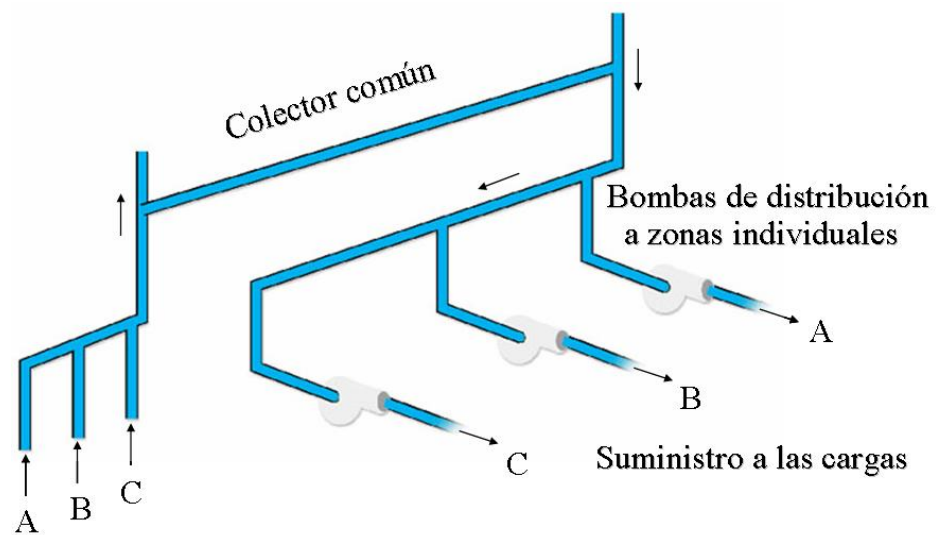


Figura 4. Sistema de distribución con bombas individuales para cada zona [57].

ANEXO 3**CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES Y PARÁMETROS DE LAS UNIDADES TERMINALES (FAN-COIL)**

Las unidades terminales más utilizadas en los SCCAH son los fan-coil. Estas unidades para las condiciones tropicales solo trabajan para climatizar, por lo que se le denomina de dos tubos. Estas unidades terminales pueden trabajar asociadas a sistemas a flujo constante (válvulas de control de tres vías) o en sistemas a flujo variable (válvulas de control de dos vías). En la Figura 1 aparece una vista general de los fan-coil básicos modelos FBHA de FRIOCLIMA. Estas unidades son las más utilizadas en Cuba en toda su variedad de capacidades.

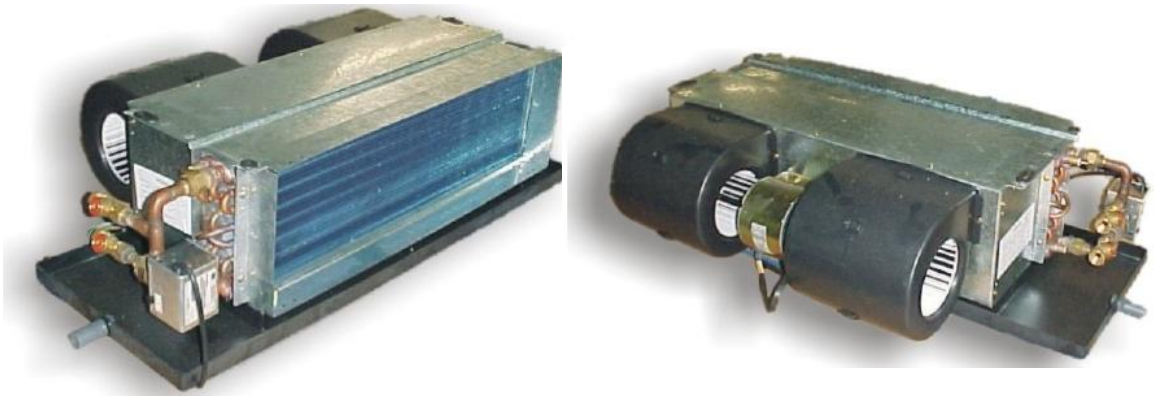


Figura 1. Unidades terminales básicas fan-coil modelos FBHA [77].

Unidades terminales emplazadas en el hotel caso de estudio (FCX 42 y FCX 50)

Figura 2. Unidades terminales de la familia FCX [170].

Tabla 1. Datos técnicos de las unidades terminales de diferentes capacidades [170].

FCX A-AS-ACT-APC-ACB-U-P with 3-row coil

| Mod. | | FCX 17 | FCX 22 | FCX 32 | FCX 42 | FCX 50 | FCX 62 | FCX 82 | FCX 102 |
|--|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Heating | | | | | | | | | |
| Heating capacity | W (max.) | 2490 | 3400 | 4975 | 7400 | 8620 | 12920 | 15140 | 17020 |
| | W (med.) | 2070 | 2700 | 4085 | 6415 | 7530 | 10940 | 13350 | 15240 |
| | W (min.) | 1610 | 1915 | 3380 | 5115 | 5420 | 8330 | 10770 | 12560 |
| Heating capacity* (water inlet 50°C) | W (E) | 1360 | 2100 | 3160 | 4240 | 4900 | 6460 | 7990 | 9670 |
| Heating capacity (accessory RX) W | | 700 | 950 | 1300 | 1650 | 1950 | 2200 | 2200 | 2200 |
| Water flow rate | l/h | 214 | 292 | 427 | 636 | 741 | 1110 | 1300 | 1464 |
| Water pressure drop | kPa | 2,8 | 6,3 | 14,2 | 14,1 | 14,2 | 14,8 | 19,8 | 16,6 |
| Cooling | | | | | | | | | |
| Total cooling capacity | W (max.) (E) | 1000 | 1500 | 2210 | 3400 | 4190 | 4860 | 7420 | 7620 |
| | W (med.) | 890 | 1330 | 2055 | 2800 | 3640 | 4660 | 5500 | 7140 |
| | W (min.) | 720 | 1055 | 1570 | 2310 | 2840 | 3950 | 4710 | 6270 |
| Sensible cooling capacity | W (max.) (E) | 830 | 1240 | 1750 | 2760 | 3000 | 3980 | 5680 | 5980 |
| | W (med.) | 710 | 1055 | 1540 | 2115 | 2750 | 3510 | 4250 | 4984 |
| | W (min.) | 540 | 755 | 1100 | 1635 | 2040 | 2825 | 3450 | 4263 |
| Water flow rate | l/h | 172 | 258 | 380 | 585 | 721 | 836 | 1276 | 1311 |
| Water pressure drop | kPa (E) | 2,6 | 5,8 | 16,6 | 14,3 | 19,3 | 11,6 | 13,5 | 19,2 |
| Air flow rate | m ³ /h (max.) | 200 | 290 | 450 | 600 | 720 | 920 | 1140 | 1300 |
| | m ³ /h (med.) | 160 | 220 | 350 | 460 | 600 | 720 | 930 | 1120 |
| | m ³ /h (min.) | 110 | 140 | 260 | 330 | 400 | 520 | 700 | 900 |
| Fans | n. | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Sound pressure | dB (A) (max.) | 36,5 | 41,5 | 39,5 | 42,5 | 47,5 | 48,5 | 53,5 | 57,5 |
| | dB (A) (med.) | 29,5 | 34,5 | 32,5 | 35,5 | 42,5 | 42,5 | 48,5 | 52,5 |
| | dB (A) (min.) | 22,5 | 22,5 | 25,5 | 28,5 | 33,5 | 33,5 | 41,5 | 47,5 |
| Sound power | dB (A) (max.) (E) | 45 | 50 | 48 | 51 | 56 | 57 | 62 | 66 |
| | dB (A) (med.) (E) | 38 | 43 | 41 | 44 | 51 | 51 | 57 | 61 |
| | dB (A) (min.) (E) | 31 | 31 | 34 | 37 | 42 | 42 | 50 | 56 |
| Water contents | l | 0,58 | 0,79 | 1,11 | 1,48 | 1,48 | 2,52 | 2,52 | 2,52 |
| Max. motor power | W (E) | 35 | 25 | 44 | 57 | 67 | 82 | 106 | 131 |
| Max. input current | A | 0,16 | 0,12 | 0,21 | 0,28 | 0,35 | 0,40 | 0,49 | 0,58 |
| Max. motor power with electric heater | W | 735 | 975 | 1344 | 1707 | 2017 | 2282 | 2306 | 2331 |
| Input current with electric heater | A | 3,2 | 4,25 | 5,86 | 7,45 | 8,83 | 9,97 | 10,06 | 10,15 |
| Coil connections 3R | ø | 1/2" | 1/2" | 1/2" | 3/4" | 3/4" | 3/4" | 3/4" | 3/4" |
| Coil connections 1R | ø | 1/2" | 1/2" | 1/2" | 1/2" | 1/2" | 1/2" | 1/2" | 1/2" |

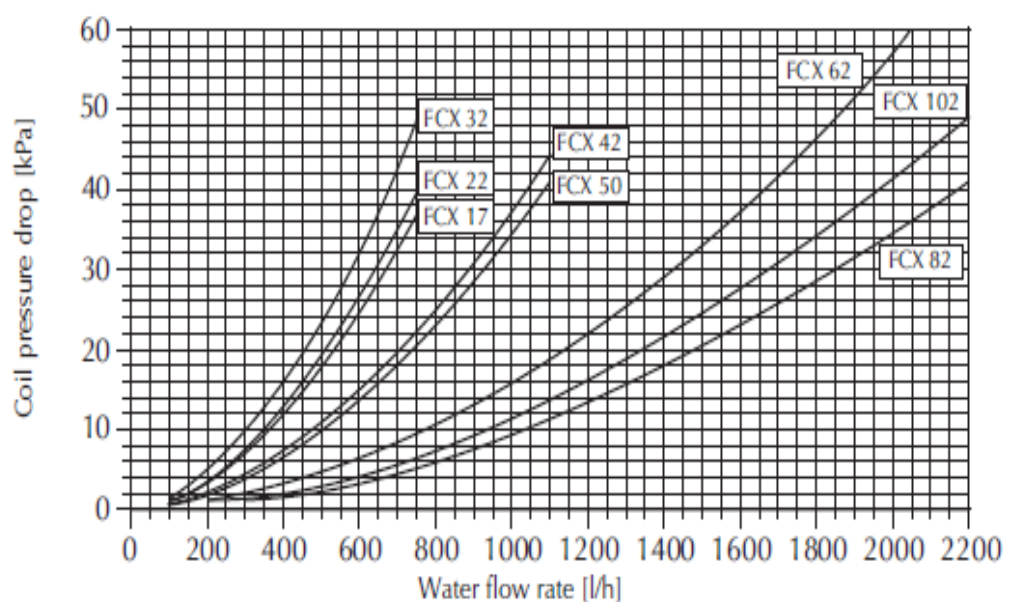


Figura 3. Caída de presión en las unidades terminales con relación al flujo [170].

ANEXO 4

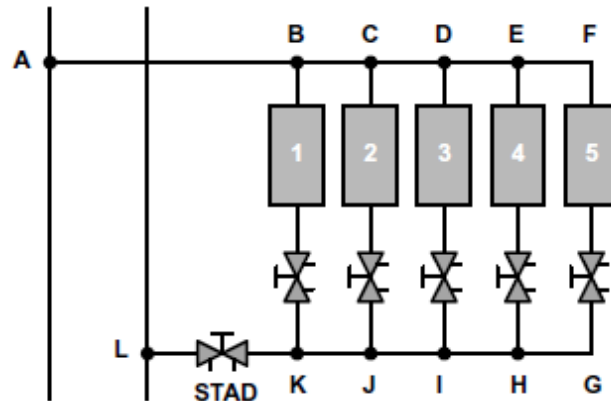
ESPECIFICACIONES DE LAS VÁLVULAS PARA EL EQUILIBRADO DE LAS REDES HIDRÁULICAS


Figura 1. Módulo de equilibrado formado por un ramal con varios terminales [87].



Figura 2. Válvulas de equilibrado y reguladores de presión [86].

Tabla 1. Relación Kv y número de vueltas de las válvulas STA-DR DN 15, 20 y 25 [86].

STA-DR

| Vueltas | DN 15, 20 | DN 25 |
|---------|-----------|-------|
| 0.5 | - | 0.210 |
| 1 | 0.107 | 0.361 |
| 1.5 | 0.172 | 0.520 |
| 2 | 0.362 | 1.02 |
| 2.5 | 0.645 | 1.85 |
| 3 | 1.16 | 3.00 |
| 3.5 | 1.78 | 3.70 |
| 4 | 2.00 | 4.01 |

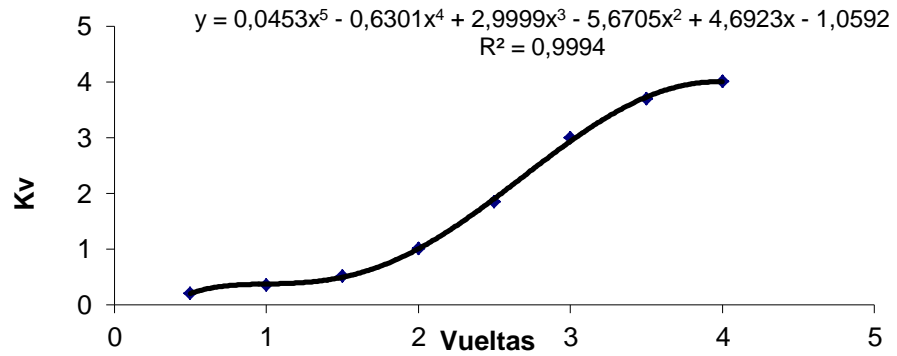


Figura 3. Relación Kv y número de vueltas de la válvula STA-DR DN 25.

Tabla 2. Relación Kv y número de vueltas de diferentes válvulas de equilibrado con diámetros nominales desde 10 hasta 50 mm [86].

| Valores Kv | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| STAD, STADA, STAD-C, STA | | | | | | | |
| Vueltas | DN 10/09 | DN 15/14 | DN 20 | DN 25 | DN 32 | DN 40 | DN 50 |
| 0.5 | - | 0.127 | 0.511 | 0.60 | 1.14 | 1.75 | 2.56 |
| 1 | 0.090 | 0.212 | 0.757 | 1.03 | 1.90 | 3.30 | 4.20 |
| 1.5 | 0.137 | 0.314 | 1.19 | 2.10 | 3.10 | 4.60 | 7.20 |
| 2 | 0.260 | 0.571 | 1.90 | 3.62 | 4.66 | 6.10 | 11.7 |
| 2.5 | 0.480 | 0.877 | 2.80 | 5.30 | 7.10 | 8.80 | 16.2 |
| 3 | 0.826 | 1.38 | 3.87 | 6.90 | 9.50 | 12.6 | 21.5 |
| 3.5 | 1.26 | 1.98 | 4.75 | 8.00 | 11.8 | 16.0 | 26.5 |
| 4 | 1.47 | 2.52 | 5.70 | 8.70 | 14.2 | 19.2 | 33.0 |

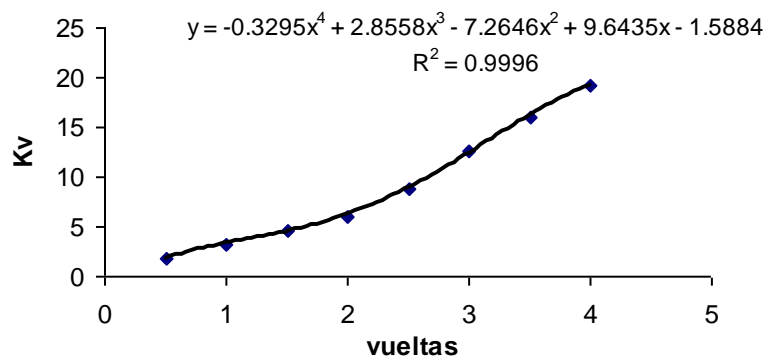


Figura 4. Relación Kv y número de vueltas de la válvula STAD DN 40.

Tabla 3. Relación Kv y número de vueltas de diferentes válvulas de equilibrado con diámetros nominales desde 20 hasta 80 mm [86].

| Valores Kv | | | | | | | |
|------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Pos. | DN | | | | | | |
| | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 65-2 | 80 |
| 0,5 | 0,511 | 0,60 | 1,14 | 1,75 | 2,56 | 1,8 | 2 |
| 1 | 0,757 | 1,03 | 1,90 | 3,30 | 4,2 | 3,4 | 4 |
| 1,5 | 1,19 | 2,10 | 3,10 | 4,60 | 7,2 | 4,9 | 6 |
| 2 | 1,90 | 3,62 | 4,66 | 6,10 | 11,7 | 6,5 | 8 |
| 2,5 | 2,80 | 5,30 | 7,10 | 8,80 | 16,2 | 9,3 | 11 |
| 3 | 3,87 | 6,90 | 9,50 | 12,6 | 21,5 | 16,3 | 14 |
| 3,5 | 4,75 | 8,00 | 11,8 | 16,0 | 26,5 | 25,6 | 19,5 |
| 4 | 5,70 | 8,70 | 14,2 | 19,2 | 33 | 35,3 | 29 |
| 4,5 | - | - | - | - | - | 44,5 | 41 |
| 5 | - | - | - | - | - | 52 | 55 |
| 5,5 | - | - | - | - | - | 60,5 | 68 |
| 6 | - | - | - | - | - | 68 | 80 |
| 6,5 | - | - | - | - | - | 73 | 92 |
| 7 | - | - | - | - | - | 77 | 103 |
| 7,5 | - | - | - | - | - | 80,5 | 113 |
| 8 | - | - | - | - | - | 85 | 120 |

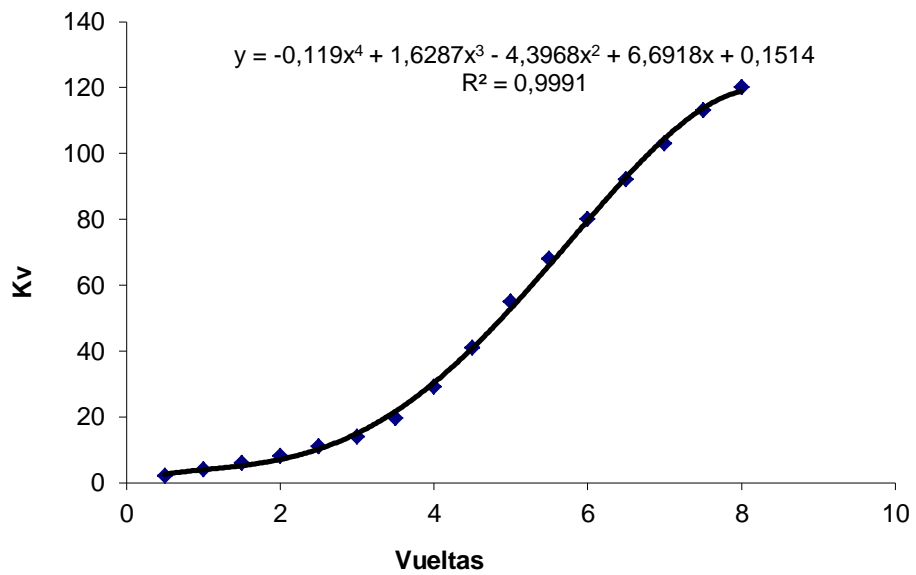


Figura 5. Relación Kv y número de vueltas de la válvula STAF DN 80.

ANEXO 5

SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDICIÓN UTILIZADO EN LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El SCADA escogido fue el EROS, un sistema de supervisión y control de procesos que se destaca por la facilidad con que puede ser operado y configurado, ofreciendo funcionalidades predeterminadas (estadísticas, alarmas, recetas, datos históricos). Posee una capa de red poderosa, que a través del protocolo TCP-IP, habilita la comunicación entre diferentes computadoras que ejecutan el EROS, lo que permite la operación remota. La estructura de red en estrella que se implementó en el hotel consta de los elementos que se aprecian en la Figura 1.

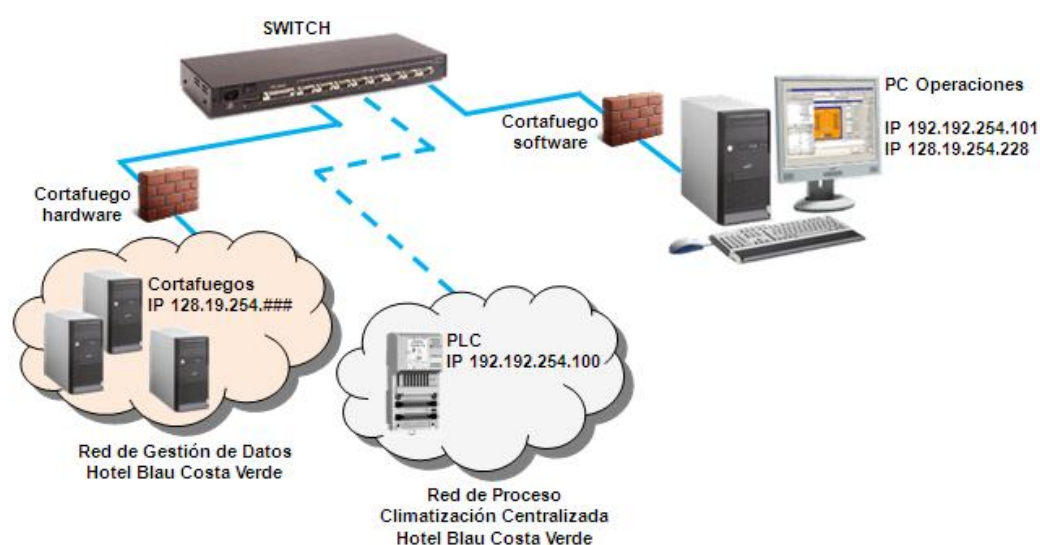


Figura 1. Estructura general del sistema automático de medición.

De forma general el sistema mide las variables presentes en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Principales variables medidas con el SCADA EROS en un CSAF y en el SCCAH.

| Nº | Nombre de la variable | Símbolo | Unidad |
|----|---|--------------------|--------|
| 1 | Presión de envío del circuito secundario de agua fría | p_{ecsaf} | Bar |
| 2 | Temperatura de envío del circuito secundario de agua fría | T_{ecsaf} | °C |
| 3 | Temperatura de retorno del circuito secundario de agua fría | T_{rcsaf} | °C |
| 4 | Presión de retorno del circuito secundario de agua fría | p_{rcsaf} | Bar |
| 5 | Temperatura ambiente | T_{amb} | °C |
| 6 | Temperatura de envío del circuito primario de agua caliente | T_{ecpac} | °C |
| 7 | Temperatura de retorno del circuito primario de agua caliente | T_{rcpac} | °C |
| 8 | Temperatura de envío de agua caliente | T_{eac} | °C |
| 9 | Temperatura de retorno de agua caliente | T_{rac} | °C |

Para la medición de esta variable se emplearon termo-resistencias PT 100 con convertidor en el cabezal, con rangos de medición 0 a 100°C y de 0 a 600°C. En el caso de la presión se utilizó el transmisor SITRANS P, Modelo DS III, Tipo: 7MF-4433-1DA00-1AA1-Z con rango de 1- 15 bar.

Para la visualización de las variables se diseñó la ventana que se muestra en la Figura 2 donde aparece el flujo tecnológico y visualiza las magnitudes. La resolución de la visualización de los gráficos de las variables puede ser de 1, 3, 5, 10, 30 s y de 1, 3, 6 min.

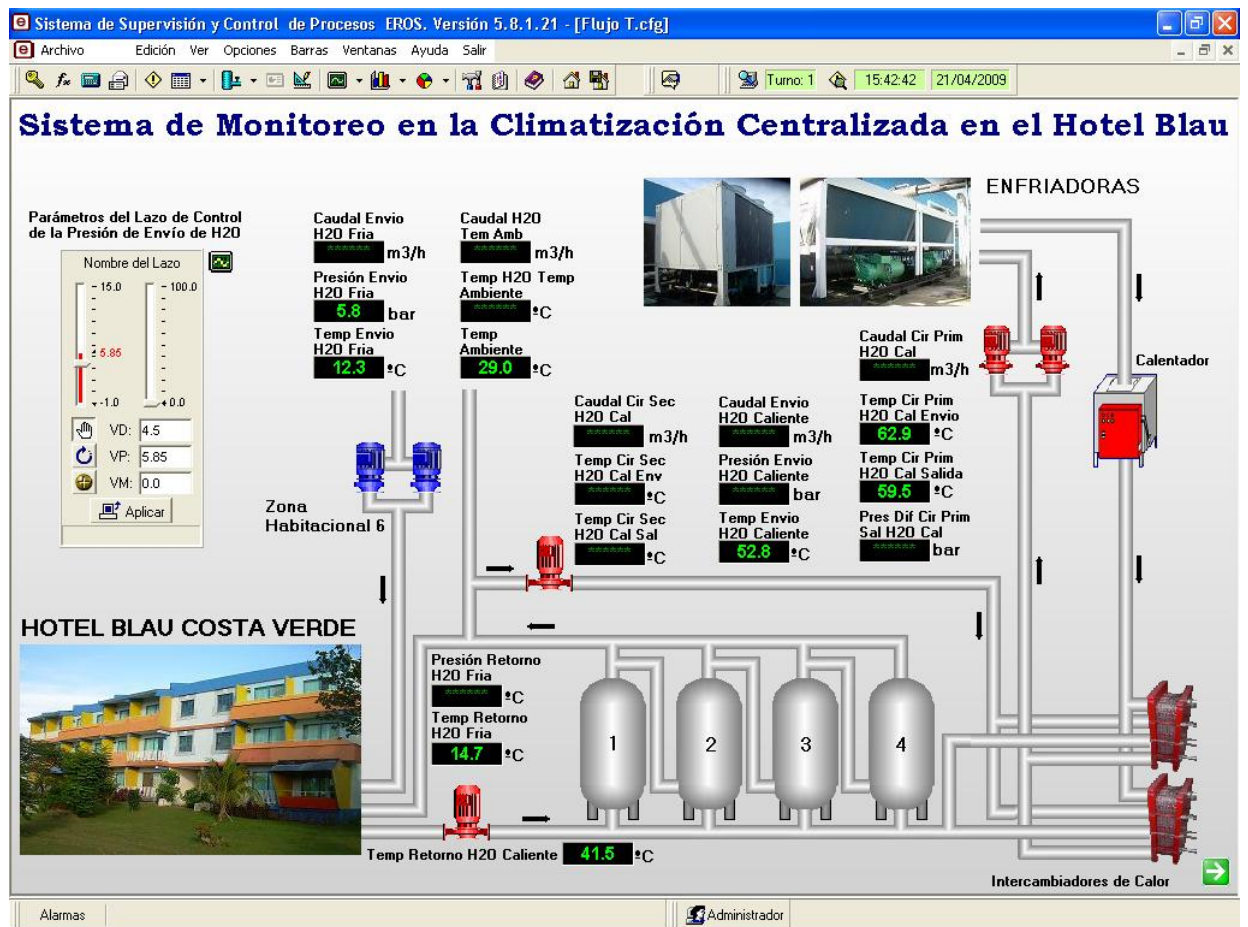


Figura 2. Ventana principal del SAM.

Las variables poseen un conjunto de etiquetas que permiten: ponerlas visibles; reflejarlas con una línea gruesa; y visualizar los valores puntuales, mínimos, máximos y filtrados según desee el operador. La comunicación del sistema es mediante Ethernet de tecnología 10 BaseT con una velocidad de transmisión de 10 Mbps y la frecuencia de muestreo empleada por el sistema fue de 250 ms.

A continuación se presentan determinadas pruebas realizadas con el SAM.

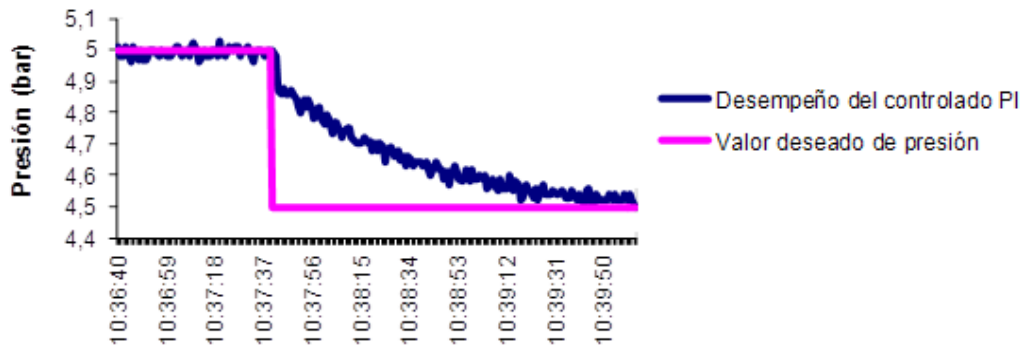


Figura 3. Desempeño del controlador del VV ante el cambio de consigna de 5 a 4,5 bar.

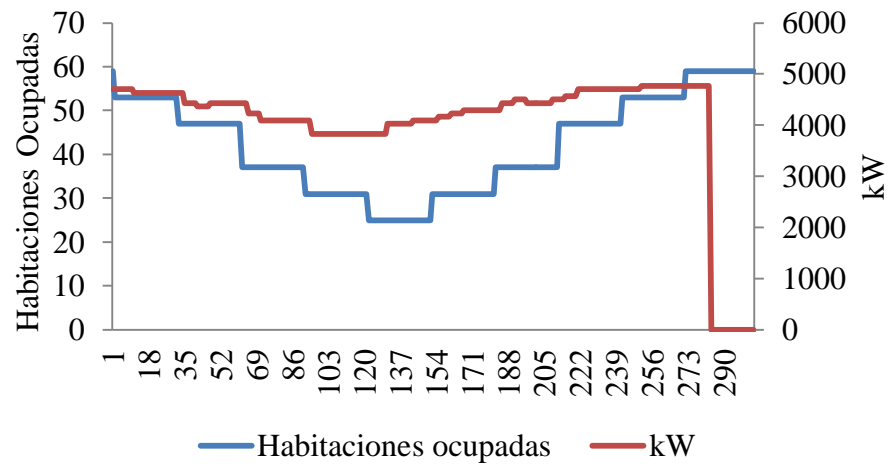


Figura 4. Prueba escalonada de cierre y apertura completa de patinejos y su efecto en la potencia del motor de inducción operando a presión constante el CSAF.

En esta prueba se comprobó el efecto del cambio de la cantidad de habitaciones ocupadas en la potencia de la bomba. Para ello por cuestiones de accesibilidad, se mantuvieron cerrados los patinejos tres, cuatro, seis y siete (Patinejos EF, GH, KL y MN de la Figura 3.2) de los nueve existentes, y el resto se fue conectando y desconectando escalonadamente (uno, dos, cinco, ocho y nueve, que representen los patinejos AB, CD, IJ, OP y RQ de la Figura 3.2). Las pruebas se realizaron a presión constante de 4,5 bar de presión (45,9 mca) con el correspondiente control del variador de velocidad.

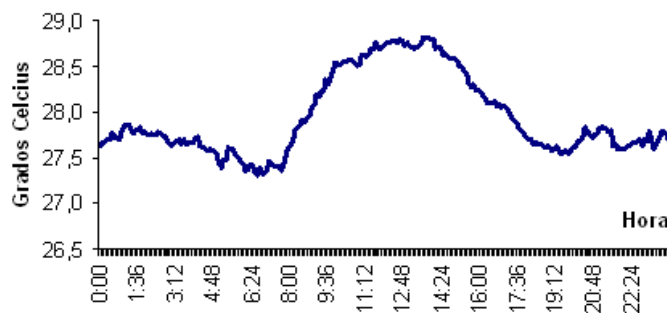


Figura 5. Comportamiento promedio de la temperatura ambiente durante 25 días.

ANEXO 6

METODOLOGÍA E INFORMACIONES UTILIZADAS POR EL SIMULADOR DE CARGAS TÉRMICAS

Los aspectos conceptuales y los procedimientos de cálculo que se utilizan en el presente trabajo están basados en la obra “Comportamiento Térmico de Edificios” [65], en la cual se resaltan los epígrafes relacionados con los *parámetros climatológicos y de la construcción, las ganancias de calor y la potencia enfriamiento*. Los aspectos teóricos se sustentan principalmente en manuales de la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE por sus siglas en inglés). Estos conceptos y procedimientos, así como la metodología que proponen en el método de Funciones de Transferencia, han sido adaptados a las condiciones y requerimientos regionales, instrumentados con sistemas computacionales e integrados con datos climatológicos y parámetros técnicos y económicos locales, de tal forma que permiten construir paquetes de simulación para casos específicos. El método de las funciones de transferencia es considerado uno de los más precisos para el cálculo térmico. Otros métodos están considerados como simplificaciones del mismo. La metodología requiere del uso de funciones de transferencia por conducción y de factores de ponderación, de coeficientes para el cálculo de transmitancia y absorbanza en vidrio y de coeficientes normalizados para funciones de transferencia al aire del espacio, entre otros. Estos factores y coeficientes son obtenidos de bases de datos y de manuales de ASHRAE.

Esta metodología ha sido aplicada a casos específicos, y sus resultados parciales y totales han sido validados mediante medición y monitoreo de campo. El esquema metodológico pretende adecuar los resultados proporcionados por esta metodología a las particularidades constructivas y económicas de cada región. En la Figura 1 se describe gráficamente la metodología general orientada a la evaluación de aislamientos para una zona geográfica particular pero su esquema general es válido para cualquier alternativa a analizar con referencia al uso del equipamiento de climatización. Los procedimientos de cálculo establecidos por el Método de Funciones de Transferencia por Conducción (MFTC) son ampliamente utilizados (en diferente grado) por una buena parte de los simuladores comerciales, en especial por aquellas firmas dedicadas a proyectar sistemas de acondicionamiento ambiental, bufetes de ingeniería, proveedores y fabricantes de equipos de aire acondicionado. Sin embargo, la metodología se puede adaptar para considerar las condiciones de las zonas de interés.

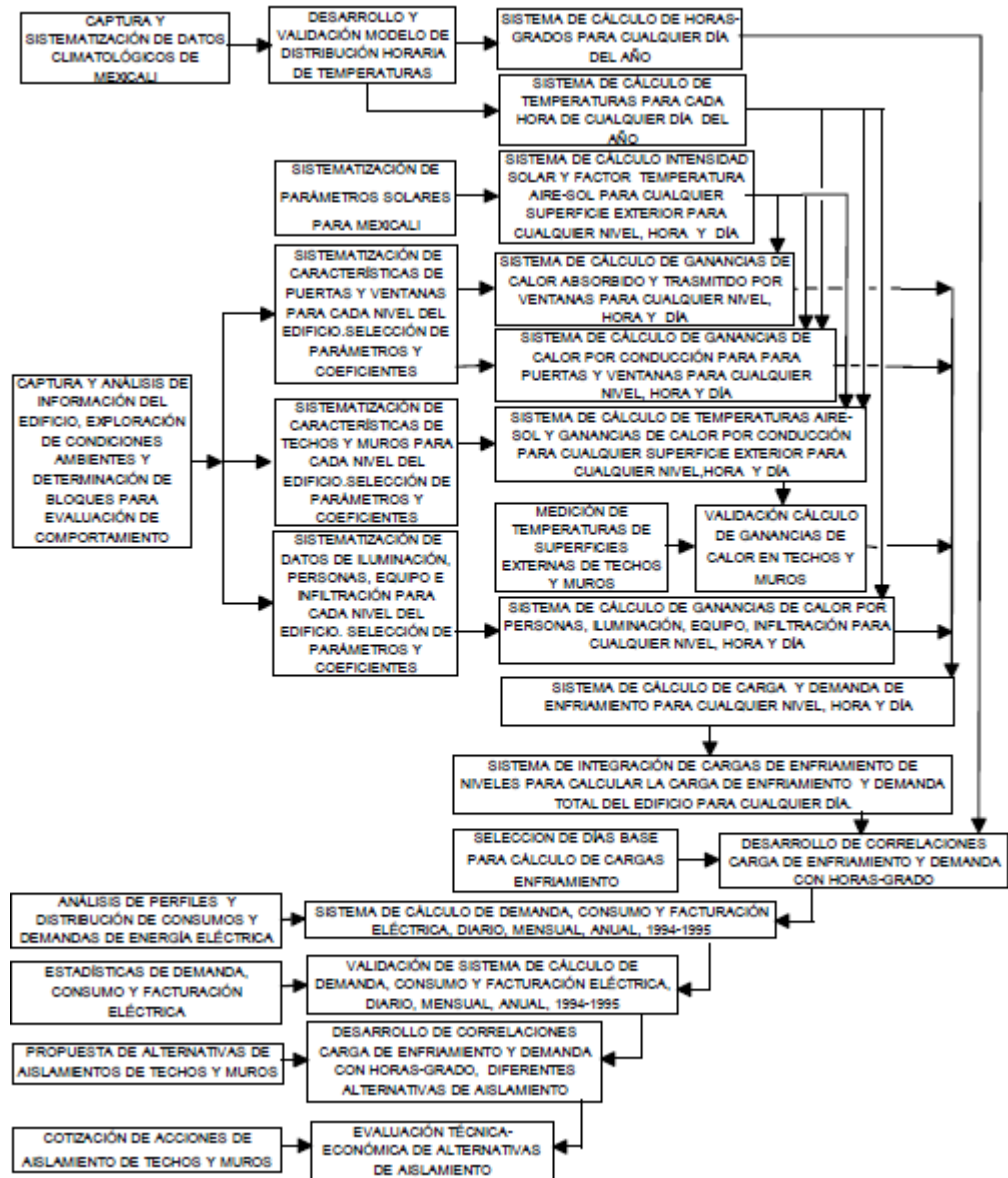


Figura 1. Esquema metodológico del simulador térmico de edificios de la UABC [65].

Generalidades para el cálculo de las cargas térmicas mediante el simulador térmico de edificios de la UABC.

Los cálculos fundamentales que realiza el simulador se concentran en determinar:

- Ganancias instantáneas de calor
- Potencia de enfriamiento
- Rapidez de retiro de calor

Ganancia instantánea de calor: Es la rapidez con que el calor entra o es generado en el espacio en un instante de tiempo dado. Se clasifica por la manera en que el calor entra al espacio y puede ser sensible o latente.

Potencia (o carga) de enfriamiento: Se define como la rapidez a la cual el calor debe ser removido desde el recinto para mantener la temperatura del aire del mismo a un valor constante.

Rapidez de retiro de calor: Es la rapidez a la cual la energía es removida del espacio acondicionado por el sistema de climatización.

Dentro de las hojas de cálculo con que cuenta el simulador térmico se destacan:

- Data2: Hoja de cálculo de los datos.
- GVP4SW: Ganancias instantáneas de calor por ventanas y pisos.
- GT4SW: Ganancias instantáneas de calor por el techo.
- GS4SW: Ganancias instantáneas de calor por la pared sur.
- GO4SW: Ganancias instantáneas de calor por la pared oeste.
- GN4SW: Ganancias instantáneas de calor por la pared norte.
- GE4SW: Ganancias instantáneas de calor por la pared este.
- MEX1TH: Cálculo de la temperatura ambiente horaria de un día a la vez.
- MEX2TAS: Temperaturas aire – sol.
- HG: Horas grado de la localidad.
- RCAA: Retiro de calor del aire acondicionado.
- SCR4W: Hoja de cálculo principal donde a través de macros y la iteración con las demás hojas de cálculo es posible obtener el RCAA, el RCAAmax, la Carga de enfriamiento horaria y máxima además de la capacidad frigorífica necesaria para las condiciones máximas de CE.
- CE4SW: Resumen del cálculo de la carga de enfriamiento en todas las variantes
- Resultados: Distribución de la carga de enfriamiento de la zona a analizar así como el comportamiento de la facturación eléctrica debida a la climatización.

Parámetros fundamentales correspondientes al edificio en análisis del caso de estudio

Datos que se introducen en Data2:

Área de zona: En esta tabla se introducen las dimensiones de la Zona en cada una de las paredes norte, sur, este y oeste de las cuales se especifican si tienen asolamiento directo o constituye una pared interior.

Tipo de muro: A partir de estos datos se determinan las resistencias térmicas de cada muro. El más común es el de tipo 5 (Block concreto pesado de 4" con 2", 3", 4" de aislamiento exterior ($R = 8.6$, o $R = 11.9$ o $R = 15.2$), Ladrillo común de 4" con 1" o 2" de aislamiento interior, Block de concreto pesado de 8" sin aislar ($R = 2.3$))

Tabla .1 Parámetros de los materiales de los muros [65]

| Material de muros | Código ASHRAE | R °F ft ² h/btu |
|--|---------------|-------------------------------|
| Resistencia externa | A0 | 0.33 |
| Cartón de yeso (prefabricado) | A6 | 0 |
| Acabado interior mortero 1.5 cm | E1 | 0.12 |
| Aislamiento, 2" de poliestireno | B6 | 0 |
| Acabado exterior 1" de mortero cemento-arena | E1 | 0.2 |
| Block de concreto pesado de 8 pulgadas | C8 | 1.11 |
| Ladrillo 8" | C9 | 0 |
| Resistencia interna | E0 | 0.69 |

Tipo de Clima: Se elige el clima seco o el húmedo.

Eficiencia del Sistema de Climatización (SEER), kBtu/kW·h: La eficiencia seleccionada es la 7 debido al tiempo de trabajo pronunciado con que cuentan las unidades terminales, fan-coil.

Dimensiones del techo: En este caso además se definen la absortividad en 0,75 y la emitancia en 0.9 de la superficie. Se calcula la resistencia térmica a partir de la selección adecuada del tipo de material según las tablas.

Coefficientes de ponderación del espacio: Se eligen en tablas y toman como referencia el tipo de construcción quedando definidos estos factores para la conducción, para la radiación solar, la iluminación y las personas.

Tabla 2. Coeficientes de ponderación de los espacios

| Zona sencilla | | | | |
|-----------------------------|------------|----------|-------------|----------|
| | Conducción | Solar | Iluminación | Personas |
| V0 | 0.74638 | 0.50938 | 0.76250 | 0.74364 |
| V1 | -0.85521 | -0.50975 | -0.83070 | -0.80510 |
| V2 | 0.17795 | 0.07234 | 0.15957 | 0.15283 |
| W1 | -1.24007 | -1.23424 | -1.15317 | -1.15317 |
| W2 | 0.30918 | 0.30621 | 0.24454 | 0.24454 |
| Planta alta sencilla | | | | |
| | Conducción | Solar | Iluminación | Personas |
| V0 | 0.75762 | 0.64714 | 0.77412 | 0.72296 |
| V1 | -0.82615 | -0.66489 | -0.83530 | -0.77445 |
| V2 | 0.19592 | 0.15042 | 0.18820 | 0.17888 |
| W1 | -1.18756 | -1.20650 | -1.16479 | -1.18756 |
| W2 | 0.31495 | 0.33917 | 0.29180 | 0.31495 |

| Planta intermedia sencilla | | | | |
|-------------------------------------|------------|----------|-------------|----------|
| | Conducción | Solar | Iluminación | Personas |
| V0 | 0.65175 | 0.44732 | 0.67638 | 0.64621 |
| V1 | -0.53539 | -0.32159 | -0.64743 | -0.51349 |
| V2 | 0.06284 | 0.04671 | 0.13093 | 0.05649 |
| W1 | -0.95883 | -1.03459 | -1.08659 | -0.94695 |
| W2 | 0.13803 | 0.20703 | 0.24647 | 0.13616 |
| Planta baja sencilla | | | | |
| | Conducción | Solar | Iluminación | Personas |
| V0 | 0.68978 | 0.51355 | 0.65949 | 0.63528 |
| V1 | -0.72759 | -0.54853 | -0.75400 | -0.72078 |
| V2 | 0.12275 | 0.10957 | 0.16741 | 0.16062 |
| W1 | -1.13188 | -1.22374 | -1.24573 | -1.21626 |
| W2 | 0.21682 | 0.29833 | 0.31855 | 0.29138 |
| Planta alta perimetral | | | | |
| | CONDUCC. | SOLAR | ILUMINAC | PERSONAS |
| V0 | 0.66899 | 0.41021 | 0.67804 | 0.67019 |
| V1 | -0.67904 | -0.32679 | -0.71093 | -0.67932 |
| V2 | 0.12434 | 0.04249 | 0.15065 | 0.14730 |
| W1 | -1.14230 | -1.26216 | -1.16748 | -1.16007 |
| W2 | 0.25659 | 0.38807 | 0.28524 | 0.29824 |
| Planta intermedia perimetral | | | | |
| | Conducción | Solar | Iluminación | Personas |
| V0 | 0.56769 | 0.36541 | 0.59787 | 0.55662 |
| V1 | -0.52299 | -0.25218 | -0.72240 | -0.47314 |
| V2 | 0.09305 | 0.03508 | 0.19604 | 0.06678 |
| W1 | -1.07790 | -1.03582 | -1.34898 | -1.01246 |
| W2 | 0.21565 | 0.18413 | 0.42049 | 0.16272 |

| Planta baja perimetral | | | | |
|-------------------------------|------------|----------|-------------|----------|
| | Conducción | Solar | Iluminación | Personas |
| V0 | 0.61675 | 0.42929 | 0.56869 | 0.57748 |
| V1 | -0.68518 | -0.46375 | -0.63699 | -0.63235 |
| V2 | 0.13231 | 0.09600 | 0.12348 | 0.11875 |
| W1 | -1.20074 | -1.27867 | -1.21902 | -1.20074 |
| W2 | 0.26462 | 0.34021 | 0.27419 | 0.26462 |

Estos tipos de construcción se traducen en:

- Una sola planta, todos muros exteriores
- Planta alta, todos muros exteriores
- Planta intermedia, todos muros exteriores
- Planta baja, todos muros exteriores
- Planta alta, al menos un muro exterior
- Planta intermedia, al menos un muro exterior

- Planta baja, al menos un muro exterior

Tabla 3. Ocupación e Iluminación.

| Hora | Personas | Iluminación % usado | Hora | Personas | Iluminación % usado |
|------|----------|---------------------|------|----------|---------------------|
| 1 | 2 | 10% | 13 | 0 | 10% |
| 2 | 2 | 10% | 14 | 0 | 10% |
| 3 | 2 | 10% | 15 | 0 | 10% |
| 4 | 2 | 10% | 16 | 0 | 10% |
| 5 | 2 | 10% | 17 | 2 | 60% |
| 6 | 2 | 10% | 18 | 2 | 60% |
| 7 | 2 | 60% | 19 | 0 | 10% |
| 8 | 0 | 10% | 20 | 0 | 10% |
| 9 | 0 | 10% | 21 | 0 | 10% |
| 10 | 0 | 10% | 22 | 0 | 10% |
| 11 | 2 | 10% | 23 | 2 | 40% |
| 12 | 0 | 10% | 24 | 2 | 20% |

Se introducen los equipos que se encuentran dentro del espacio a climatizar con sus respectivos parámetros de potencia, cantidades y el horario que regularmente trabajan.

Tabla 4. Fuentes de emisión de calor latente.

| Fuentes | Potencia (W) | Cantidad |
|--------------------------|--------------|----------|
| Lámparas | 15 | 3 |
| Televisor | 50 | 1 |
| Refrigerador | 78 | 1 |
| Secador de pelo | 900 | 1 |
| Bombillo del baño | 13 | 2 |
| Bombillo de aplique baño | 12 | 2 |
| Bombillo del pasillo | 12 | 1 |

Datos de la localidad

Tabla 5. Valores máximos y mínimos de temperatura ambiente para un año promedio.

| Día | Tmin | Tmax | Día | Tmin | Tmax | Día | Tmin | Tmax | Día | Tmin | Tmax | Día | Tmin | Tmax |
|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|
| 1 | 24.7 | 27.1 | 74 | 24.2 | 27.3 | 147 | 25.2 | 29.0 | 220 | 27.7 | 31.0 | 293 | 25.6 | 29.9 |
| 2 | 22.0 | 27.0 | 75 | 24.0 | 27.8 | 148 | 24.7 | 29.7 | 221 | 27.3 | 30.7 | 294 | 27.4 | 29.8 |
| 3 | 21.2 | 23.8 | 76 | 23.2 | 27.5 | 149 | 24.6 | 28.8 | 222 | 27.3 | 31.1 | 295 | 27.0 | 29.6 |
| 4 | 22.5 | 23.9 | 77 | 24.2 | 26.6 | 150 | 25.2 | 28.7 | 223 | 25.5 | 31.6 | 296 | 27.7 | 29.8 |
| 5 | 23.5 | 25.4 | 78 | 24.6 | 25.5 | 151 | 24.0 | 28.2 | 224 | 24.7 | 31.6 | 297 | 26.1 | 29.3 |
| 6 | 22.6 | 26.1 | 79 | 24.4 | 26.7 | 152 | 25.9 | 28.7 | 225 | 26.9 | 31.8 | 298 | 25.9 | 29.6 |
| 7 | 24.1 | 26.4 | 80 | 24.6 | 26.3 | 153 | 25.8 | 29.5 | 226 | 28.0 | 31.0 | 299 | 26.6 | 29.6 |
| 8 | 24.1 | 25.4 | 81 | 24.7 | 26.0 | 154 | 24.6 | 29.5 | 227 | 28.1 | 31.4 | 300 | 26.6 | 29.6 |
| 9 | 24.1 | 25.6 | 82 | 23.4 | 26.5 | 155 | 23.6 | 30.1 | 228 | 27.7 | 30.1 | 301 | 25.5 | 28.4 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|
| 10 | 23.4 | 25.6 | 83 | 22.8 | 27.4 | 156 | 26.4 | 29.5 | 229 | 27.0 | 29.4 | 302 | 26.0 | 26.9 |
| 11 | 24.4 | 26.1 | 84 | 22.0 | 26.2 | 157 | 27.4 | 29.7 | 230 | 28.1 | 30.7 | 303 | 25.1 | 26.6 |
| 12 | 21.9 | 26.8 | 85 | 24.0 | 24.8 | 158 | 26.6 | 28.4 | 231 | 27.4 | 30.3 | 304 | 26.0 | 26.6 |
| 13 | 21.1 | 26.8 | 86 | 24.3 | 26.1 | 159 | 26.8 | 29.5 | 232 | 27.3 | 30.5 | 305 | 25.5 | 27.2 |
| 14 | 24.5 | 26.8 | 87 | 24.5 | 26.2 | 160 | 26.2 | 29.6 | 233 | 27.5 | 31.0 | 306 | 24.9 | 27.5 |
| 15 | 24.4 | 26.8 | 88 | 24.7 | 27.5 | 161 | 25.3 | 29.3 | 234 | 27.3 | 30.7 | 307 | 23.8 | 28.6 |
| 16 | 24.5 | 26.4 | 89 | 25.0 | 27.2 | 162 | 25.3 | 29.6 | 235 | 25.5 | 31.0 | 308 | 23.9 | 27.7 |
| 17 | 24.9 | 26.8 | 90 | 23.0 | 26.1 | 163 | 25.8 | 29.3 | 236 | 25.2 | 30.0 | 309 | 25.7 | 27.4 |
| 18 | 25.4 | 26.9 | 91 | 23.8 | 26.6 | 164 | 24.6 | 29.1 | 237 | 27.1 | 30.7 | 310 | 26.2 | 27.6 |
| 19 | 25.6 | 27.9 | 92 | 24.7 | 26.4 | 165 | 25.3 | 29.4 | 238 | 27.0 | 30.5 | 311 | 26.5 | 27.8 |
| 20 | 25.4 | 27.0 | 93 | 25.3 | 26.5 | 166 | 25.9 | 29.2 | 239 | 28.3 | 30.7 | 312 | 26.0 | 27.0 |
| 21 | 25.0 | 27.1 | 94 | 25.0 | 26.8 | 167 | 24.9 | 29.8 | 240 | 27.9 | 30.4 | 313 | 25.5 | 26.7 |
| 22 | 25.4 | 26.7 | 95 | 25.1 | 26.8 | 168 | 26.2 | 30.0 | 241 | 27.3 | 30.2 | 314 | 24.9 | 29.0 |
| 23 | 25.2 | 27.2 | 96 | 25.1 | 27.7 | 169 | 26.6 | 29.8 | 242 | 27.2 | 30.5 | 315 | 24.7 | 28.0 |
| 24 | 24.8 | 27.2 | 97 | 24.0 | 28.5 | 170 | 26.2 | 29.8 | 243 | 26.4 | 30.4 | 316 | 26.4 | 27.7 |
| 25 | 25.0 | 26.9 | 98 | 22.0 | 28.5 | 171 | 27.6 | 30.4 | 244 | 25.9 | 30.2 | 317 | 26.5 | 27.6 |
| 26 | 25.0 | 26.4 | 99 | 25.1 | 28.1 | 172 | 27.2 | 30.2 | 245 | 26.1 | 29.2 | 318 | 26.5 | 27.5 |
| 27 | 24.9 | 26.8 | 100 | 25.0 | 28.3 | 173 | 27.3 | 30.0 | 246 | 27.6 | 29.8 | 319 | 24.3 | 27.6 |
| 28 | 23.4 | 25.0 | 101 | 25.4 | 28.2 | 174 | 27.9 | 30.1 | 247 | 26.5 | 31.6 | 320 | 22.5 | 27.7 |
| 29 | 23.2 | 24.6 | 102 | 24.8 | 27.7 | 175 | 28.0 | 29.9 | 248 | 25.5 | 30.3 | 321 | 25.6 | 27.0 |
| 30 | 22.8 | 25.1 | 103 | 25.1 | 27.8 | 176 | 28.1 | 30.4 | 249 | 25.3 | 31.2 | 322 | 25.5 | 26.8 |
| 31 | 23.6 | 25.7 | 104 | 22.4 | 28.2 | 177 | 27.6 | 29.5 | 250 | 25.3 | 31.0 | 323 | 24.2 | 26.5 |
| 32 | 24.7 | 26.5 | 105 | 22.6 | 27.1 | 178 | 26.0 | 30.6 | 251 | 23.5 | 31.6 | 324 | 24.6 | 26.5 |
| 33 | 22.3 | 27.4 | 106 | 22.9 | 24.6 | 179 | 26.5 | 29.5 | 252 | 27.6 | 30.7 | 325 | 25.1 | 26.6 |
| 34 | 24.0 | 27.2 | 107 | 23.6 | 26.2 | 180 | 26.4 | 30.5 | 253 | 28.7 | 30.7 | 326 | 25.2 | 26.7 |
| 35 | 25.4 | 27.1 | 108 | 24.4 | 26.6 | 181 | 26.9 | 30.3 | 254 | 28.2 | 30.7 | 327 | 24.9 | 25.9 |
| 36 | 23.7 | 27.0 | 109 | 25.0 | 28.4 | 182 | 26.2 | 30.3 | 255 | 26.1 | 30.8 | 328 | 25.1 | 26.4 |
| 37 | 24.3 | 26.3 | 110 | 25.0 | 28.2 | 183 | 26.3 | 30.3 | 256 | 26.3 | 31.1 | 329 | 24.2 | 26.0 |
| 38 | 24.6 | 26.3 | 111 | 22.4 | 28.9 | 184 | 26.3 | 30.4 | 257 | 28.2 | 32.0 | 330 | 23.3 | 26.5 |
| 39 | 22.1 | 26.8 | 112 | 22.0 | 27.6 | 185 | 27.7 | 30.1 | 258 | 26.9 | 30.2 | 331 | 25.3 | 26.9 |
| 40 | 24.8 | 26.8 | 113 | 22.0 | 28.0 | 186 | 28.0 | 29.7 | 259 | 25.7 | 29.8 | 332 | 24.9 | 26.5 |
| 41 | 24.3 | 26.6 | 114 | 20.5 | 28.3 | 187 | 27.9 | 30.1 | 260 | 24.2 | 30.3 | 333 | 22.9 | 26.9 |
| 42 | 24.0 | 26.6 | 115 | 24.3 | 27.8 | 188 | 28.0 | 29.7 | 261 | 24.4 | 30.0 | 334 | 22.6 | 27.1 |
| 43 | 24.5 | 26.4 | 116 | 24.8 | 27.8 | 189 | 27.9 | 29.9 | 262 | 24.7 | 30.3 | 335 | 24.0 | 26.9 |
| 44 | 21.6 | 27.9 | 117 | 24.2 | 28.5 | 190 | 27.8 | 30.4 | 263 | 25.1 | 30.6 | 336 | 23.9 | 27.3 |
| 45 | 21.1 | 28.2 | 118 | 25.8 | 28.0 | 191 | 27.9 | 30.5 | 264 | 25.9 | 30.4 | 337 | 24.6 | 26.4 |
| 46 | 23.0 | 27.8 | 119 | 25.0 | 28.2 | 192 | 27.9 | 30.2 | 265 | 26.2 | 30.9 | 338 | 22.7 | 26.2 |
| 47 | 23.5 | 27.2 | 120 | 23.6 | 28.2 | 193 | 28.0 | 30.2 | 266 | 26.3 | 30.2 | 339 | 21.7 | 25.7 |
| 48 | 23.7 | 25.8 | 121 | 25.0 | 27.9 | 194 | 27.7 | 30.2 | 267 | 27.7 | 30.7 | 340 | 23.4 | 26.4 |
| 49 | 23.4 | 25.7 | 122 | 24.7 | 28.6 | 195 | 27.7 | 30.2 | 268 | 26.1 | 30.5 | 341 | 24.4 | 25.7 |
| 50 | 21.3 | 25.1 | 123 | 24.0 | 27.5 | 196 | 28.0 | 30.4 | 269 | 25.9 | 30.4 | 342 | 25.5 | 26.1 |
| 51 | 24.2 | 26.2 | 124 | 23.5 | 28.5 | 197 | 27.8 | 30.5 | 270 | 25.8 | 30.9 | 343 | 25.5 | 26.8 |
| 52 | 24.7 | 26.9 | 125 | 25.6 | 28.7 | 198 | 27.0 | 30.4 | 271 | 26.2 | 31.0 | 344 | 25.3 | 27.0 |
| 53 | 22.1 | 27.4 | 126 | 24.4 | 28.8 | 199 | 27.9 | 30.2 | 272 | 26.6 | 30.0 | 345 | 25.7 | 27.2 |
| 54 | 24.6 | 27.0 | 127 | 24.7 | 28.8 | 200 | 26.9 | 29.6 | 273 | 25.3 | 28.8 | 346 | 23.1 | 26.0 |
| 55 | 24.6 | 26.8 | 128 | 24.4 | 28.7 | 201 | 27.9 | 30.2 | 274 | 24.5 | 30.4 | 347 | 24.9 | 26.4 |
| 56 | 24.0 | 27.0 | 129 | 25.2 | 30.4 | 202 | 27.0 | 29.7 | 275 | 25.2 | 30.0 | 348 | 24.5 | 26.5 |
| 57 | 24.3 | 27.8 | 130 | 23.8 | 30.1 | 203 | 26.1 | 30.5 | 276 | 25.3 | 29.8 | 349 | 25.6 | 26.8 |
| 58 | 21.3 | 27.7 | 131 | 24.9 | 29.4 | 204 | 26.2 | 30.6 | 277 | 26.1 | 29.5 | 350 | 24.0 | 26.3 |
| 59 | 23.6 | 27.1 | 132 | 24.4 | 29.9 | 205 | 28.0 | 30.2 | 278 | 26.3 | 29.9 | 351 | 22.9 | 26.2 |
| 60 | 25.3 | 27.4 | 133 | 23.2 | 27.0 | 206 | 28.0 | 30.5 | 279 | 25.2 | 29.9 | 352 | 24.9 | 26.5 |
| 61 | 25.5 | 27.5 | 134 | 24.3 | 28.5 | 207 | 27.9 | 30.7 | 280 | 25.7 | 29.8 | 353 | 24.7 | 26.3 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|
| 62 | 23.3 | 27.3 | 135 | 24.4 | 27.6 | 208 | 26.8 | 31.1 | 281 | 25.6 | 30.2 | 354 | 23.7 | 26.8 |
| 63 | 25.1 | 28.4 | 136 | 24.9 | 28.1 | 209 | 25.3 | 31.2 | 282 | 25.9 | 29.5 | 355 | 23.8 | 27.6 |
| 64 | 24.9 | 27.9 | 137 | 25.1 | 29.2 | 210 | 26.4 | 31.0 | 283 | 26.2 | 29.4 | 356 | 23.2 | 27.0 |
| 65 | 24.9 | 26.4 | 138 | 24.2 | 28.7 | 211 | 27.0 | 30.7 | 284 | 25.7 | 28.8 | 357 | 23.0 | 26.2 |
| 66 | 23.9 | 26.5 | 139 | 25.3 | 29.8 | 212 | 27.9 | 30.9 | 285 | 25.9 | 29.1 | 358 | 23.4 | 26.2 |
| 67 | 22.3 | 27.5 | 140 | 25.5 | 29.2 | 213 | 28.0 | 31.3 | 286 | 25.5 | 30.1 | 359 | 23.2 | 26.6 |
| 68 | 23.6 | 27.3 | 141 | 24.5 | 29.6 | 214 | 28.2 | 30.0 | 287 | 26.0 | 29.3 | 360 | 24.5 | 26.7 |
| 69 | 23.4 | 27.2 | 142 | 25.2 | 29.8 | 215 | 27.2 | 30.1 | 288 | 25.9 | 28.7 | 361 | 25.3 | 26.2 |
| 70 | 24.6 | 27.3 | 143 | 26.0 | 29.5 | 216 | 28.2 | 30.4 | 289 | 26.2 | 29.6 | 362 | 25.2 | 26.4 |
| 71 | 23.3 | 27.4 | 144 | 24.8 | 29.4 | 217 | 28.0 | 31.2 | 290 | 26.3 | 29.9 | 363 | 25.0 | 26.6 |
| 72 | 22.7 | 27.1 | 145 | 25.3 | 28.7 | 218 | 27.9 | 31.9 | 291 | 26.2 | 29.9 | 364 | 24.0 | 25.3 |
| 73 | 24.1 | 26.4 | 146 | 25.0 | 28.4 | 219 | 27.3 | 31.4 | 292 | 24.7 | 29.3 | 365 | 23.1 | 26.2 |

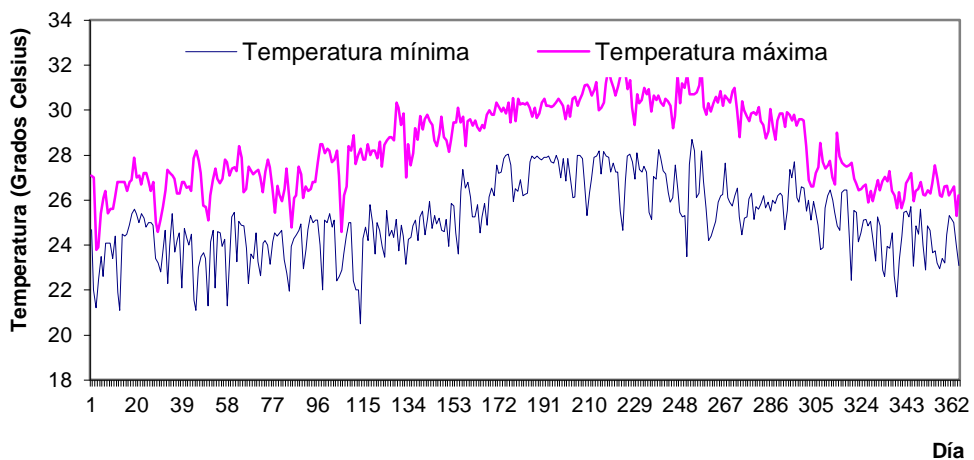


Figura 2. Gráfico de las temperaturas mínimas y máximas.

Climatología local

Se desarrolló un modelo que permite calcular la temperatura ambiental horaria para cualquier día del año a partir de las temperaturas máxima y mínima. Dicho modelo se obtuvo correlacionando registros históricos reportados y ha mostrado confiabilidad en su manejo [65]. El modelo consiste en una función de Fourier que adquiere las siguientes expresiones:

$$\hat{T}(t) = \langle m \rangle + A \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) + B \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right); t = 1,2,3...24 \tag{1}$$

$$\hat{T}(t) = \frac{T_{\max} - T(t)}{T_{\max} - T_{\min}} \tag{2}$$

Donde:

t: hora del día; adimensional

m, A, B : parámetros de ajuste de la función de Fourier; adimensional

Tmax: temperatura máxima; °C

Tmin: temperatura mínima; °C

Los parámetros de ajuste para el caso de estudio situado en la Playa Pesquero del municipio Rafael Freyre de la Provincia de Holguín, Cuba son:

Tabla 6. Datos de la localidad y de la función de Fourier para estimar las temperaturas

| | |
|----------|-----------|
| A | 0,4013772 |
| B | 0,2310791 |
| <m> | 0,5702869 |
| Latitud | 21,80 |
| Longitud | 79,99 |
| LST | 70,00 |

ANEXO 7

RNA24hFinal

Genera y prepara toda la data obtenida de la simulación térmica del edificio, para el proceso de aprendizaje de las RNA

```

% -----
% Programa para cargar los datos de la modelación térmica del edificio para
% ser usados en la modelación con redes neuronales artificiales.
% -----
clear,clc

% Function CCE
format short g
% "CCE_termica", CCE-Variable; Fichero con el que salvó la carga térmica
% completa (24 columnas, 365 días 59 matrices)
load CCE_termica
% Cargar ocupación promedio
ocp = xlsread('Datos Finales.xls','Hoja1','bm6:ds370');
% Cargar temperatura ambiente durante un año promedio cada 3 horas
Tamb8horas = xlsread('Datos Finales.xls','Hoja2','a1:h365');
% Cargar temperatura ambiente durante un año promedio
Tamb24horas =xlsread('Tamb24horasF.xls','Hoja1','a1:x365');
% Cargar los valores de las horas, meses y día.
Horas24 = xlsread('24horas','Hoja1','a1:x365');
Meses = xlsread('Meses','Hoja1','a1:x365');
Dia = xlsread('Dia','Hoja1','a1:x365');

% Para determinar el valor máximo de las CT del año
CCEMax = max(CCE,[],2); % Máximo de Qt(CCE) de cada hab. cada día del año
for H=1:59
    CCEMax1(:,H)=[CCEMax(:, :,H)]; % Matriz de máximo de CCE por cada
    % habitación los 365 días
end

CTmaxE = max(CCEMax1(:,H));
CTmaxEdif = max(CCEMax1(:,32));

% Para preparar las horas en valores PU para la modelación en RNA
Horas24pu = Horas24/24;
Hpu = permute(Horas24pu,[2 1]);
Hpu_columnapu = reshape(Hpu,[],1); % Matriz de carga de enfriamiento en un
    % vector columna
Hpu_filapu = reshape(Hpu,1,[]); % Matriz de carga de enfriamiento en una
    % fila en BTU/h

% Para preparar las temperaturas ambientes para la modelación en RNA
Tamb24horasmax = max(Tamb24horas(:));
Tamb24horaspu = Tamb24horas/Tamb24horasmax;
Tambpu = permute(Tamb24horaspu,[2 1]);
Tambpu_columna = reshape(Tambpu,[],1);
Tambpu_fila = reshape(Tambpu,1,[]);

% Para preparar los datos de los meses para la modelación en RNA
Mesespu = Meses/12;
M = permute(Mesespu,[2 1]);
Mesespu_columna = reshape(M,[],1);

```



```

Mesespu_filap = reshape(M,1,[]);

%Para preparar los datos de los días para la modelación en RNA
Diapu = Dia/365;
D = permute(Diapu,[2 1]);
Diapu_columna = reshape(D,[],1);
Diapu_filap = reshape(D,1,[]);

% Matrices de entrada de datos a las RNA
ERNA = [Tambpu_filap; Hpu_filap; Mesespu_filap];
ERNA1 = [Tambpu_filap; Hpu_filap];
ERNA2 = [Tambpu_filap; Hpu_filap; Mesespu_filap; Diapu_filap];
ERNA3 = [Tambpu_filap; Hpu_filap; Diapu_filap];
ERNA4 = [Tambpu_filap; Diapu_filap];

CT1_24h =CCE(:, :,1);
CT1_24hpu =CCE(:, :,1)/CTmaxEdif;
X1pu = permute(CT1_24hpu,[2 1]);
CT1_columnapu = reshape(X1pu,[],1);
CT1_filap = reshape(X1pu,1,[]);
.
.
.
CT59_24h =CCE(:, :,59);
CT59_24hpu =CCE(:, :,59)/CTmaxEdif;
X59pu = permute(CT59_24hpu,[2 1]);
CT59_columnapu = reshape(X59pu,[],1);
CT59_filap = reshape(X59pu,1,[]);

% valores en BTU
Total= CT1_24h + CT2_24h + CT3_24h + CT4_24h + CT5_24h + CT6_24h +...
CT7_24h + CT8_24h + CT9_24h + CT10_24h + CT11_24h + CT12_24h + CT13_24h +...
CT14_24h + CT15_24h + CT16_24h + CT17_24h + CT18_24h + CT19_24h +...
CT20_24h + CT21_24h + CT22_24h + CT23_24h + CT24_24h + CT25_24h +...
CT26_24h + CT27_24h + CT28_24h + CT29_24h + CT30_24h + CT31_24h +...
CT32_24h + CT33_24h + CT34_24h + CT35_24h + CT36_24h + CT37_24h +...
CT38_24h + CT39_24h + CT40_24h + CT41_24h + CT42_24h + CT43_24h +...
CT44_24h + CT45_24h + CT46_24h + CT47_24h + CT48_24h + CT49_24h +...
CT50_24h + CT51_24h + CT52_24h + CT53_24h + CT54_24h + CT55_24h +...
CT56_24h + CT57_24h + CT58_24h + CT59_24h;

% valores en kW
Total1=Total/12000*3024/360;

```

Find_Good_RNA3

Función que automatiza el proceso aprendizaje durante la búsqueda de la mejor RNA que se aproxime a los datos con los cuales se entrena.

```

% Función para la automatización del aprendizaje de las RNA...
function [Good_net,DE]=Find_Good_RNA(P,T,Epoch)

% Inicializando datos
Good_net=0;
Er_save=0;

% Ciclo con diferentes porcentajes de los datos aleatorios
for kk = 0.2:0.1: 0.5

```

```

% Calculando los datos aleatorios que participarán en el entrenamiento
Dmed=sort(fix(rand(1,length(T)*kk)*length(T)-1));
Dmed(find(Dmed==0))=[];
Te=T(:,Dmed);
Pe=P(:,Dmed);
fprintf('----- \n');
fprintf('Se escojerán aleatoriamente para el entrenamiento \n');
fprintf('un %3.0f',kk*100);fprintf('porcentaje de los datos \n');
fprintf('----- \n');

% Ciclo con diferentes tipos de entrenamientos
TFnc={'trainlm','trainRP','traingdm','traingda'};
for c=1:length(TFnc)
    % Ciclo con diferentes tipos de función de transferencia.
    FncTF={'tansig','logsig'};
    for m=1:length(FncTF)

% Ciclos con diferentes cantidades de neuronas en la capa intermedia
for k=3:1:50
    fprintf('-----\n');
    fprintf(' RNA %2.0f',k);
    fprintf(' Neuronas en la capa. Itmedia\n');
    fprintf([' Se utilizará fun. de transferencia (' FncTF{m} ')\n']);
    fprintf([' Se utilizará el tipo de entrenamiento(' TFnc{c} ')\n']);
    fprintf('-----\n');

    % Crea la RNA con las características deseadas
    net=newff(P,T,[k 1],{FncTF{m}, FncTF{m}, 'purelin'},TFnc{c});
    net.trainFcn=TFnc{c};
    net.trainparam.showwindow=false;

    % Ciclo variando los pesos iniciales de la RNA escogida
    for i=1:Epoch
        net=init(net);
        fprintf('RNA %3.0f',i);fprintf(' Entrenando\n');
        net=train(net,Pe,Te);
        fprintf('Entrenamiento finalizado \n');
        fprintf('Calculando el error\n');
        CT_RNA=sim(net,P);
        R=corrcoef(T,CT_RNA);
        R=abs(min(R));
        R=abs(R(1)*100);
        fprintf('Coeficiente de Correlación %3.2f',R);
        fprintf(' %% \n');
        if R -(k/30) > Er_save
            Good_net=net;
            fprintf('--> La mejor RNA ha sido cambiada <---\n',i);
            Er_save=R;
            DE=Pe;
        end
    end
end
end
end
end
end

```

Comprobación_RNA

Comprueba los coeficientes de correlación de los mejores modelos basados en RNA de la carga térmica de enfriamiento de los locales del edificio y el error cuadrático medio de los modelos. Ambos resultados se introducen en una sola variable.

```
% -----
% Programa para determinar los coeficientes de correlación de los mejores
% modelos basados en RNA de la carga térmica de enfriamiento de los locales
% del edificio y el error cuadrático medio. Ambos resultados se introducen
% en una sola variable.
% -----
load ( 'CTnet1.mat' );
R = CalCoefCorr(Good_net, ERNA3, CT1_filapu);
R1 = R;
C1=sim(Good_net,ERNA3);
e1=mse(CT1_filapu-C1);
CT1=C1';
.
.
.
load ( 'CTnet59.mat' );
R = CalCoefCorr(Good_net, ERNA3, CT59_filapu);
R59 = R;
C59=sim(Good_net,ERNA3);
e59=mse(CT59_filapu-C59);
CT59=C59';

RT=[R1; R2; R3; R4; R5; R6; R7; R8; R9; R10;...
    R11; R12; R13; R14; R15; R16; R17; R18; R19; R20;...
    R21; R22; R23; R24; R25; R26; R27; R28; R29; R30;...
    R31; R32; R33; R34; R35; R36; R37; R38; R39; R40;...
    R41; R42; R43; R44; R45; R46; R47; R48; R49; R50;...
    R51; R52; R53; R54; R55; R56; R57; R58; R59]
CTRNA = [CT1 CT2 CT3 CT4 CT5 CT6 CT7 CT8 CT9 CT10...
         CT11 CT12 CT13 CT14 CT15 CT16 CT17 CT18 CT19 CT20...
         CT21 CT22 CT23 CT24 CT25 CT26 CT27 CT28 CT29 CT30...
         CT31 CT32 CT33 CT34 CT35 CT36 CT37 CT38 CT39 CT40...
         CT41 CT42 CT43 CT44 CT45 CT46 CT47 CT48 CT49 CT50...
         CT51 CT52 CT53 CT54 CT55 CT56 CT57 CT58 CT59];
CTREAL= [CT1_columnapu CT2_columnapu CT3_columnapu CT4_columnapu...
         CT5_columnapu CT6_columnapu CT7_columnapu CT8_columnapu CT9_columnapu ...
         CT10_columnapu CT11_columnapu CT12_columnapu CT13_columnapu CT14_columnapu...
         CT15_columnapu CT16_columnapu CT17_columnapu CT18_columnapu CT19_columnapu...
         CT20_columnapu CT21_columnapu CT22_columnapu CT23_columnapu CT24_columnapu...
         CT25_columnapu CT26_columnapu CT27_columnapu CT28_columnapu CT29_columnapu...
         CT30_columnapu CT31_columnapu CT32_columnapu CT33_columnapu CT34_columnapu...
         CT35_columnapu CT36_columnapu CT37_columnapu CT38_columnapu CT39_columnapu...
         CT40_columnapu CT41_columnapu CT42_columnapu CT43_columnapu CT44_columnapu...
         CT45_columnapu CT46_columnapu CT47_columnapu CT48_columnapu CT49_columnapu...
         CT50_columnapu CT51_columnapu CT52_columnapu CT53_columnapu CT54_columnapu...
         CT55_columnapu CT56_columnapu CT57_columnapu CT58_columnapu CT59_columnapu];
ECMT = [e1; e2; e3; e4; e5; e6; e7; e8; e9; e10; e11; e12; e13; e14; e15; ...
        e16; e17; e18; e19; e20; e21; e22; e23; e24; e25; e26; e27; e28; e29; e30;...
        e31; e32; e33; e34; e35; e36; e37; e38; e39; e40; e41; e42; e43; e44; e45;...
        e46; e47; e48; e49; e50; e51; e52; e53; e54; e55; e56; e57; e58; e59];

Final = [RT ECMT];
```



```

fclose(B1);
.
.
.
B59 = fopen('LW3h59.txt','wt');
fprintf(B59,'%10.8f',LW3h59');
fclose(B59);
%-----
% Polarizaciones de la primera Capa.
%-----
C1 = fopen('b1h1.txt','wt');
fprintf(C1,'%10.8f\n',b1h1');
fclose(C1);
.
.
.
C59 = fopen('b1h59.txt','wt');
fprintf(C59,'%10.8f\n',b1h59');
fclose(C59);
%-----
% Polarizaciones de la segunda Capa.
%-----
X1 = fopen('b2h1.txt','wt');
fprintf(X1,'%10.8f',b2h1');
fclose(X1);
.
.
.
X59 = fopen('b2h59.txt','wt');
fprintf(X59,'%10.8f',b2h59');
fclose(X59);
%-----
% Polarizaciones Tercera Capa
%-----
Z1 = fopen('b3h1.txt','wt');
fprintf(Z1,'%10.8f',b3h1');
fclose(Z1);
.
.
.
Z59 = fopen('b3h59.txt','wt');
fprintf(Z59,'%10.8f',b3h59');
fclose(Z59);

```

Get_CT

Función que se le especifican los datos de entrada y el número de la habitación y devuelve el resultado de la carga térmica de enfriamiento.

```

%-----
% Función a la que se le introducen los datos de entrada al modelo
% especificado en RNA y el número de la habitación y devuelve el resultado
% de la carga térmica de enfriamiento
%-----
function [CT]=Get_CT(Data,Hab)
NHab=int2str(Hab);
FileName=['CTnet' NHab '.mat'];
load (FileName);
CT=sim(Good_net,Data);
end

```

procInps

Función para preparar las variables antes de entrar a la simulación de la RNA

```

% -----
% Función que realiza el procesamiento de las entradas
% -----

function [p]=procInps(net,x)

% Obtención de los valores máximos y mínimos de entradas de la RNA
ymax=1;
ymin=-1;
xmax=net.inputs{1}.processSettings{3}.xmax;
xmin=net.inputs{1}.processSettings{3}.xmin;

% Calcula los rangos de entrada
Q = size(x,2);
oneQ = ones(1,Q);
rangex = xmax-xmin;
rangex(rangex==0) = 1; % Avoid divisions by zero
rangey = ymax-ymin;

%% Cálculo de los valores de entradas modificados
p = rangey * (x-xmin(:,oneQ))./rangex(:,oneQ) + ymin;
end

```

procOuts

Función para preparar las variables antes de salir de la simulación de la RNA

```

% -----
% Función que realiza el procesamiento de las salidas
% -----

function [p]=procOuts(net,y)

% Obtención de los valores máximos y mínimos de salidas de la RNA.
ymax=1;
ymin=-1;
xmax=net.outputs{3}.processSettings.xmax;
xmin=net.outputs{3}.processSettings.xmin;

% Calcula los rangos de la salida
Q = size(y,2);
oneQ = ones(1,Q);
rangex = xmax-xmin;
rangey = ymax-ymin;
x = rangex(:,oneQ).* (y-ymin)*(1/rangey) + xmin(:,oneQ);

%% Cálculo de los valores de salidas modificados
p = rangex(:,oneQ).* (y-ymin)*(1/rangey) + xmin(:,oneQ);
end

```

RNA59

Programa que demuestra los cambios internos que sufren las variables antes de entrar y salir a la simulación de una RNA.

```

% -----
% Programa para probar resultados simulados mediante las expresiones
% matemáticas de los modelos en RNA y por la instrucción de simulación,
% llamando a la estructura de un modelo RNA ya creado.
% -----
clc
% -----
% Carga el modelo RNA de cualquier habitación y se obtienen los pesos y bias
% -----
load('CTnet25.mat');
T = CT25_filapu;

IW11 = Good_net.IW{1,1};
LW21 = Good_net.LW{2,1};
LW32 = Good_net.LW{3,2};
b1 = Good_net.b{1};
b2 = Good_net.b;
b3 = Good_net.b{3};

S=[];
P=ERNA3;
n=1000;
ERNA31=ERNA3(:, [1:n]);

% -----
% Cálculo de las RNA con las fórmulas convencionales
% -----

for I=1:n;
    p=procinps(Good_net,P(:,I));
    layer1=tansig(IW11*p+b1); % Capa Calculada con la formula
    layer2=tansig(LW21*layer1+b2);
    layer3=purelin(LW32*layer2+b3);
    S(I)=procOuts(Good_net,layer3);
end

% -----
% Cálculo de las RNA con las instrucciones de simulación de MATLAB
% -----

C1=sim(Good_net,ERNA31);

% -----
% Graficar datos de carga térmica de enfriamiento por ambos métodos y los
% valores reales de las mismas
% -----

plot(C1,'k'); % Datos simulados mediante instrucción
hold all
plot(T([1:n]),'b') % Datos reales de la simulación térmica inicial.
plot(S,'r') % Datos del modelo RNA corridos mediante ecuación.

```

ANEXO 8

CONFIGURACIÓN GENERAL DE LOS SCCAH A FLUJO VARIABLE Y PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL AGUA

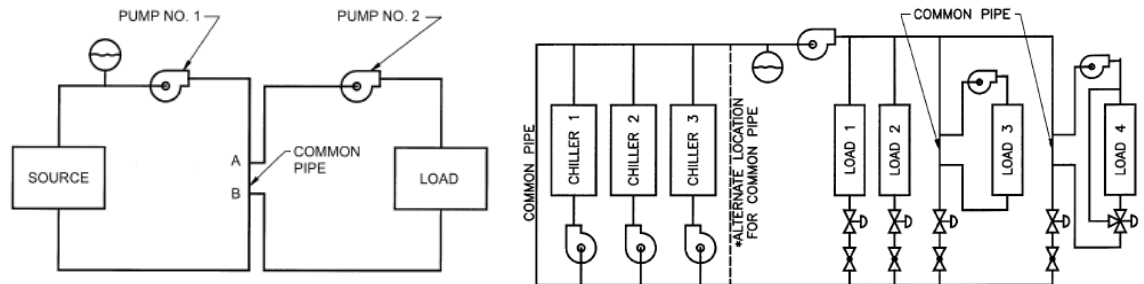


Figura 1. Configuración de los SCCAH a flujo variable en relación a los CSAF:

a) configuración sencilla; b) configuración compleja [46].

Tabla .1 Propiedades termo-físicas del agua para temperaturas admisibles en los CSAF [60].

| Temperatura (K) | Temperatura (°C) | Volumen específico (m ³ /kg) | Calor específico (kJ/kg·K) | Densidad (kg/m ³) |
|--------------------|---------------------|--|-------------------------------|----------------------------------|
| 273,15 | 0 | 0,001 | 4,217 | 1000 |
| 275 | 1,85 | 0,001 | 4,211 | 1000 |
| 280 | 6,85 | 0,001 | 4,198 | 1000 |
| 285 | 11,85 | 0,001 | 4,189 | 1000 |
| 290 | 16,85 | 0,001001 | 4,184 | 999,000999 |
| 295 | 21,85 | 0,001002 | 4,181 | 998,003992 |
| 300 | 26,85 | 0,001003 | 4,179 | 997,0089731 |
| 285,45 | 12,30 | 0,0010009 | 4,194 | 999,144852 |

*: Los valores de la última fila corresponden a los valores promedios.

ANEXO 9

EJEMPLO DE CAPACIDAD Y POTENCIA EN UN COMPRESOR Y GRÁFICO DE PROPIEDADES DEL REFRIGERANTE FREÓN 22

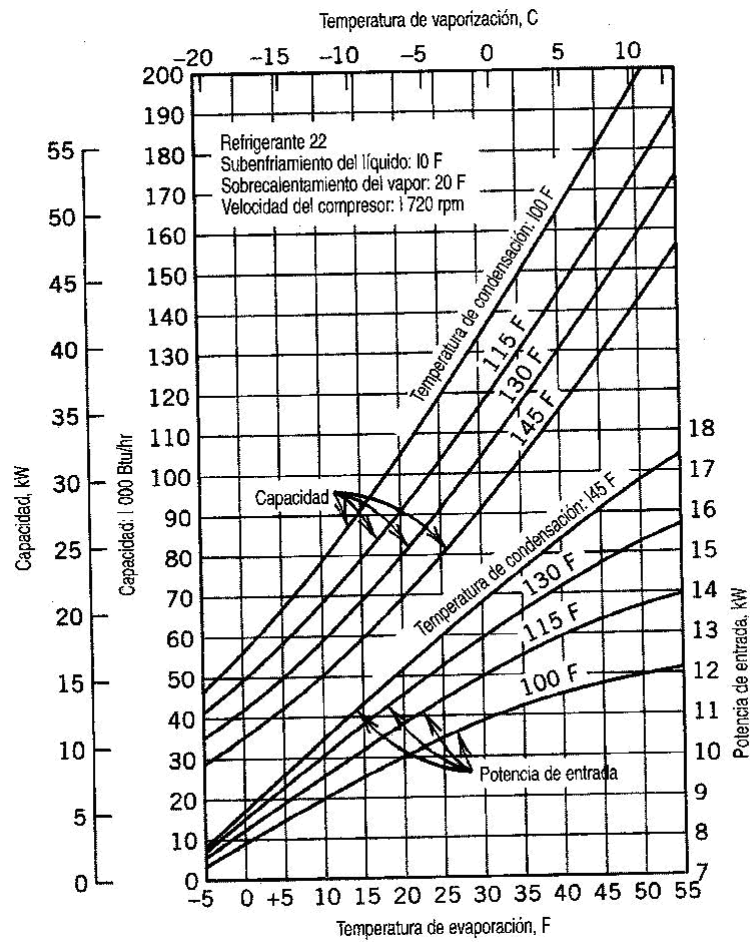


Figura 1. Ejemplo de curvas típicas de capacidad y potencia de un compresor [47].

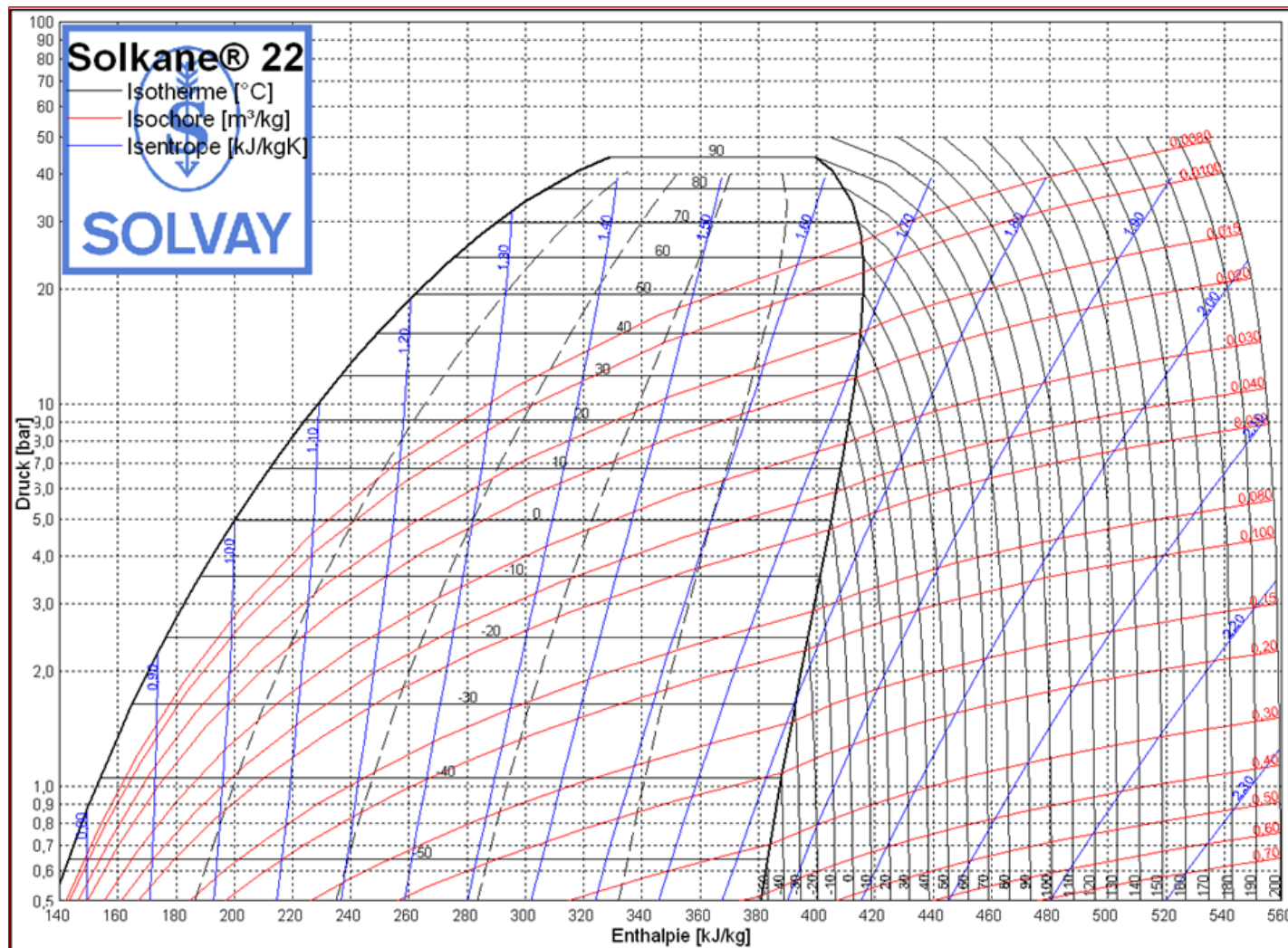


Figura 2. Gráfico de presión contra entalpía del refrigerante Freón 22 [167].

ANEXO 10

SEUDO-CÓDIGO DEL ALGORITMO PARA OBTENER EL CÓDIGO O_c DADO EL NÚMERO DE ORDEN DE LA COMBINACIÓN c Procedimiento INICIADATOS

Tipo de variable

vg: arreglo de enteros {Vector de enteros}

VARIABLES PRINCIPALES

v : arreglos de vg {Matriz de enteros}

s : cadena de caracteres

Datos de Entrada

D : total de habitaciones listas o disponibles

HAO: total de habitaciones a seleccionar

c : número de la combinación que se quiere ver el código

- A. Asignar a la variable **v** una longitud **HAO+1** o sea, eso significa que **v** contiene **HAO+1** vectores del tipo **vg**
- B. Asignar a **v[0]** una longitud **D+1** o sea que **v[0]** es un vector de **D+1** enteros.
- C. Para **i = 1** hasta **i = HAO**, asignar a **v[i]** longitudes iguales a: **D-i+2**
 Por ejemplo, si **D = 10** y **HAO = 3**
 $v[0] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$
 $v[1] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$
 $v[2] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$
 $v[3] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$
- D. Para **j = 1** hasta **j=D** hacer **v[1, j] = 1** y entonces queda en el ejemplo:
 $v[1] = [0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$
- E. Si **k>1** entonces para **j=1** hasta **j=D-1** hacer **v[2,j]=j** y queda para el ejemplo:
 $v[2]=[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9]$
- F. Para **i = 3** hasta **i = HAO** hacer
 $v[i,1] = 1$
 Para **j = 2** hasta **j=D-i+1** hacer:
 $h=0$
 Para **r = 1** hasta **r = j** hacer: $h = h + v[i-1,r]$
 $v[i,j]=h$
- G. Hacer: **s1 = 0; s2 = 0; i = 0** y **S = ''** (cadena vacía de caracteres)
 Repetir:
 $s1 = s1 + v[k,i]$
 $s2 = s2 + v[k,i+1]$
 Hasta que: $(s1 < c)$ y $(c \leq s2)$
 Aquí sale un valor de **i** que será utilizado en los pasos G o H.
 Si $c \leq \frac{s1 + s2}{2}$ entonces **ok = true**. En otro caso **ok = false**
 $S = ''$
- G. Si **ok = true** entonces:
 Mientras **longitud de S < HAO - 1** hacer: $S = S + '1'$

Para $j = 1$ hasta $j = i - 1$ hacer: $S = '0' + S$
 $S = '1' + S$
 Mientras longitud de $s < D$ hacer $S = '0' + S$

H. Si $ok = false$ entonces
 Mientras longitud de $s < i - 1$ hacer: $S = S + '0'$
 Para $j = 1$ hasta $j = HAO$ hacer: $S = '1' + S$
 Mientras longitud de $s < D$ hacer: $S = '0' + S$

I. $h = 0$
 $t = 1$
 Para $j = D$ hasta $j = 1$ hacer
 $h = h + S[j] * t$
 $t = t * 2$

Valores de Salida.
 $s1$: número de orden de la secuencia compacta inicial
 $s2$: número de orden de la secuencia compacta final
 ok : si es True: comienza en $s1$. si es False: comienza en $s2$
 h : número decimal que representa a la cadena binaria desde donde se comienza

Ejemplo:Procedimiento 1

$n = 10$

$HAO = 3$

$C = 5$

$v[0] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$

$v[1] = [0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$

$v[2] = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]$

$v[3] = [0, 1, 3, 6, 10, 15, 21, 28, 36]$

Como $c=5$, entonces:

$s1 = 0 + 1 + 3 = 4$

$s2 = 1 + 3 + 6 = 10$

Además, se establece que: $ok = true$ porque $c = 5 \leq (4 + 10) / 2 = 7$

Siendo $ok=true$, entonces se determina s :

$s = ''$

$s = '11'$

$s = '0011'$

$s = '10011'$

$s = '0000010011'$

Ahora se calcula h :

$h = 0$ $l = 1$

$h = 1 * 1 = 1$ $l = 2$

$h = 1 + 1 * 2 = 3$ $l = 4$

$h = 3 + 0 * 4 = 3$ $l = 8$

$h = 3 + 0 * 8 = 3$ $l = 16$

$h = 3 + 1 * 16 = 19$ $l = 32$

Luego: $h = 19$

ANEXO 11

PROCEDIMIENTO GENERA-CÓDIGO

Entrada: D: total de habitaciones disponibles

HAO: total de habitaciones a seleccionar

c: número de la combinación que se quiere ver el código

h: cadena desde donde se comienza

s1: Número de orden de la secuencia compacta inicial

s2: Número de orden de la secuencia compacta final

ok: Si es True: comienza en s1. Si es false: comienza en s2

h: Número decimal que representa a la cadena binaria desde donde se comienza

A - Si **ok = true** entonces

Repetir

i = h

res = 0

Repetir

r = i mod 2

res = res + r

i = i div 2

Hasta que **i < 2**

res = res + i

Si **res = HAO**, entonces: **s1 = s1 + 1**

h = h+1

Hasta que: **s1 = c**

S = ''

x = h - 1

j = 0

Repetir

r = x mod 2

Si **r = 1** entonces: **S='1'+S**. En caso contrario: **S='0'+S**

j = j + r

x = x div 2

Hasta que: **x < 2**

j = j + x

S = CadenaDeCaracteresDe(x) + S

Si **j = HAO** entonces

Mientras **longitud de S < D**, hacer: **S = '0'+ S**

B. Si **ok = false** entonces

Repetir

i = h

res = 0

Repetir

r = i mod 2

res = res + r

i = i div 2

Hasta que: **i < 2**

res = res + i

Si $res = HAO$, entonces: $s2 = s2 - 1$
 $h = h - 1$
 Hasta que: $s2 = c$
 $S = ''$
 $x = h + 1$
 $j = 0$
 Repetir
 $r = x \bmod 2$
 Si $r = 1$ entonces: $S = '1' + S$. En caso contrario: $S = '0' + 1$
 $j = j + r$
 $x = x \div 2$
 Hasta que: $x < 2$
 $j = j + x$
 $S = CadenaDeCaracteresDe(x) + S$
 Si $j = x$ entonces
 Mientras **longitud de s** < **n**, hacer: $S = '0' + S$

C. Salida: La cadena de caracteres S que contiene el código

Nota:

- A div B: el resultado es el cociente de la división entera de A entre B donde A y B son números enteros. Por ejemplo: $5 \div 2 = 2$
- A mod B: el resultado es el residuo de la división entera de A entre B. Por ejemplo: $5 \bmod 2 = 1$

Ejemplo:

Procedimiento 2

$n = 10$
 $HAO = 3$
 $c = 5$
 $h = 19$
 $s1 = 4$
 $s2 = 11$

$i = h = 19$
 $res = 0$

$r = i \bmod 2 = 19 \bmod 2 = 1$
 $res = res + r = 0 + 1 = 1$
 $i = i \div 2 = 19 \div 2 = 9$

$r = i \bmod 2 = 9 \bmod 2 = 1$
 $res = res + r = 1 + 1 = 2$
 $i = i \div 2 = 9 \div 2 = 4$

$r = i \bmod 2 = 4 \bmod 2 = 0$
 $res = res + r = 2 + 0 = 2$

$$i = i \text{ div } 2 = 4 \text{ div } 2 = 2$$

$$r = i \text{ mod } 2 = 2 \text{ mod } 2 = 0$$

$$\text{res} = \text{res} + r = 2 + 0 = 2$$

$$i = i \text{ div } 2 = 2 \text{ div } 2 = 1$$

$$\text{res} = \text{res} + i = 2 + 1 = 3$$

Como $\text{res} = \text{HAO} = 3$, entonces: $s1 = s1 + 1 = 4 + 1 = 5$

$$h = h + 1 = 19 + 1 = 20$$

Como $s1 = c = 5$, entonces:

$$S = ''$$

$$x = h - 1 = 20 - 1 = 19$$

$$j = 0$$

$$r = x \text{ mod } 2 = 19 \text{ mod } 2 = 1$$

Como $r = 1$ entonces: $S = '1' + S = '1'$

$$j = j + r = 0 + 1 = 1$$

$$x = x \text{ div } 2 = 19 \text{ div } 2 = 9$$

$$r = x \text{ mod } 2 = 9 \text{ mod } 2 = 1$$

Como $r = 1$ entonces: $S = '1' + S = '11'$

$$j = j + r = 1 + 1 = 2$$

$$x = x \text{ div } 2 = 9 \text{ div } 2 = 4$$

$$r = x \text{ mod } 2 = 4 \text{ mod } 2 = 0$$

Como $r = 0$ entonces: $S = '0' + S = '011'$

$$j = j + r = 2 + 0 = 2$$

$$x = x \text{ div } 2 = 4 \text{ div } 2 = 2$$

$$r = x \text{ mod } 2 = 2 \text{ mod } 2 = 0$$

Como $r = 0$ entonces: $S = '0' + S = '0011'$

$$j = j + r = 2 + 0 = 2$$

$$x = x \text{ div } 2 = 2 \text{ div } 2 = 1$$

$$j = j + x = 2 + 1 = 3$$

$$S = \text{IntToStr}(x) + S = '10011'$$

$$S = '0000010011' \quad \{\text{Resultado}\}$$

ANEXO 12

ALGORITMO PARA LAS MEJORAS ALEATORIAS, LOS CRUZAMIENTOS Y LAS MUTACIONES EN EL ALGORITMO GENÉTICO

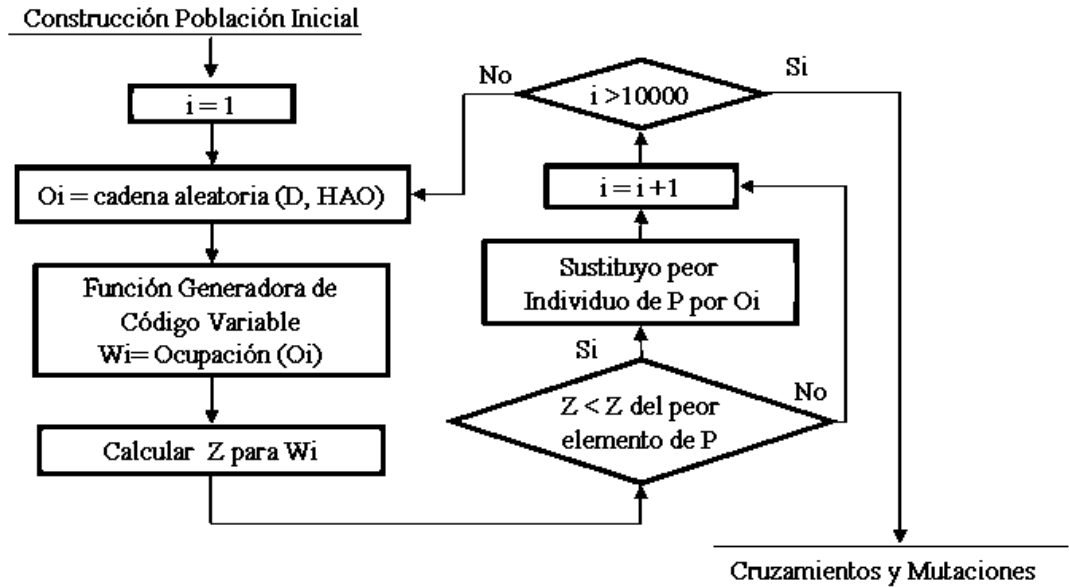


Figura 1. Algoritmo para las mejoras aleatorias de la población.

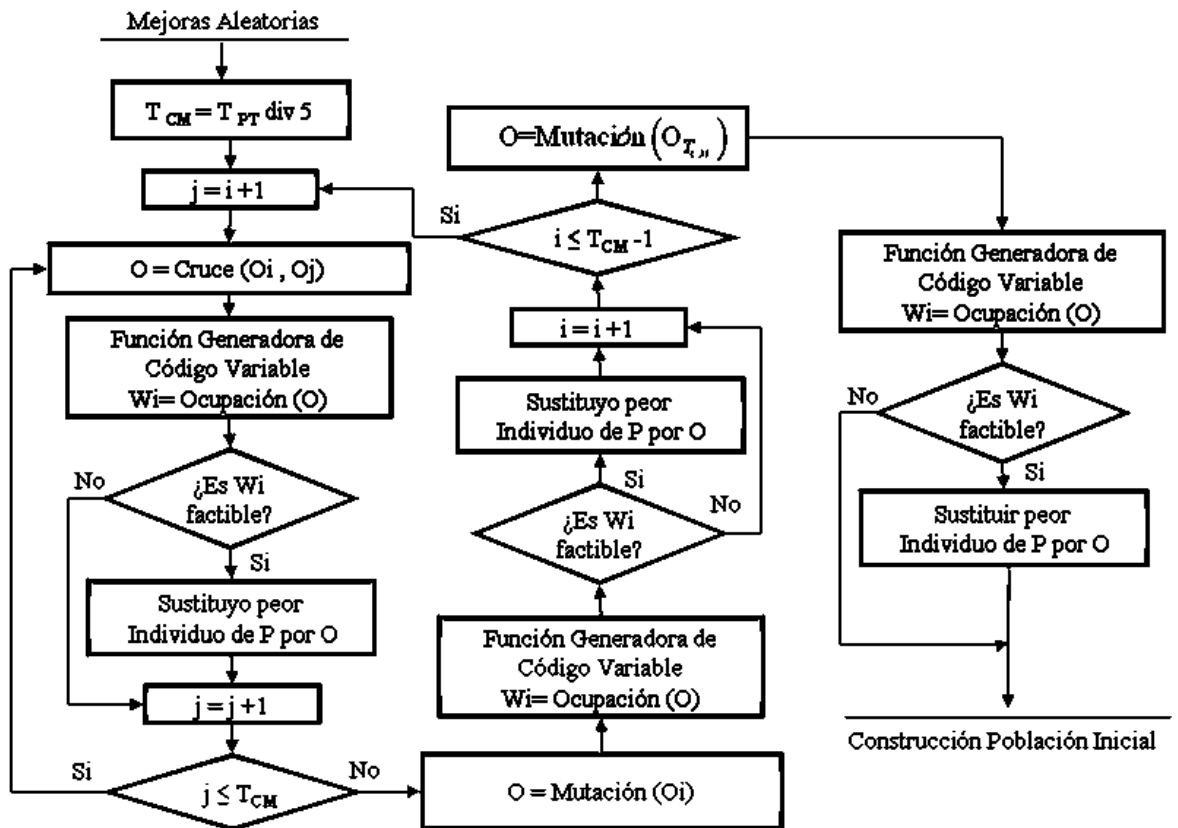


Figura 2. Algoritmo para los cruzamientos y las mutaciones.

ANEXO 13**INFORMACIONES DEL CIRCUITO SECUNDARIO DE AGUA FRÍA CASO DE ESTUDIO**

El hotel donde se encuentra el CSAF caso de estudio es de administración conjunta entre la cadena española Blau y la cubana Gaviota S.A. El hotel es de 4 estrellas y posee un total de 305 habitaciones.

El sistema constructivo empleado está constituido por una solución estructural. La estructura es de pórtico hormigonado in situ, con entrepisos y cubiertas viguetas y bovedillas. Los muros exteriores son de bloques de 0,15 m y los tabiques interiores son ligeros de yeso-cartón con armadura de perfiles canal de acero galvanizado y aislamiento acústico de lana de roca, exceptuando closet y patinejos que se levantaron con bloques de 0,10 m.

La solución de impermeabilización es con enrajonado y soldadura en las partes planas y mantas asfálticas. Las habitaciones cuentan con una distribución convencional en planta, los diferentes niveles están compuestos por:

- Primer nivel (19 habitaciones): cada una de las habitaciones se agrupan en, 11 típicas con un área de $35,75 \text{ m}^2$, cuatro culatas con un área de $41,10 \text{ m}^2$ y cuatro intercomunicadas con $35,9 \text{ m}^2$.
- Segundo Nivel (22 habitaciones): cada una de las habitaciones se agrupan en 14 típicas con un área de $35,75 \text{ m}^2$; cuatro culatas con un área de $41,10 \text{ m}^2$ y cuatro intercomunicadas con un área de $35,9 \text{ m}^2$.
- Tercer Nivel (18 habitaciones): cada una de las habitaciones se agrupan en 14 típicas con un área de $35,75 \text{ m}^2$ y cuatro intercomunicadas con un área de $35,9 \text{ m}^2$.

Se usa el falso techo de yeso en la parte del vestíbulo y en el baño. La carpintería interior es de madera pintada en color azul y la de la terraza es de aluminio en el mismo color. De forma general el color que predomina en la habitación es el azul en diferentes tonalidades combinados con amarillo. En las siguientes figuras se pueden apreciar los planos de planta de las habitaciones según el nivel, y una panorámica de las habitaciones típicas.

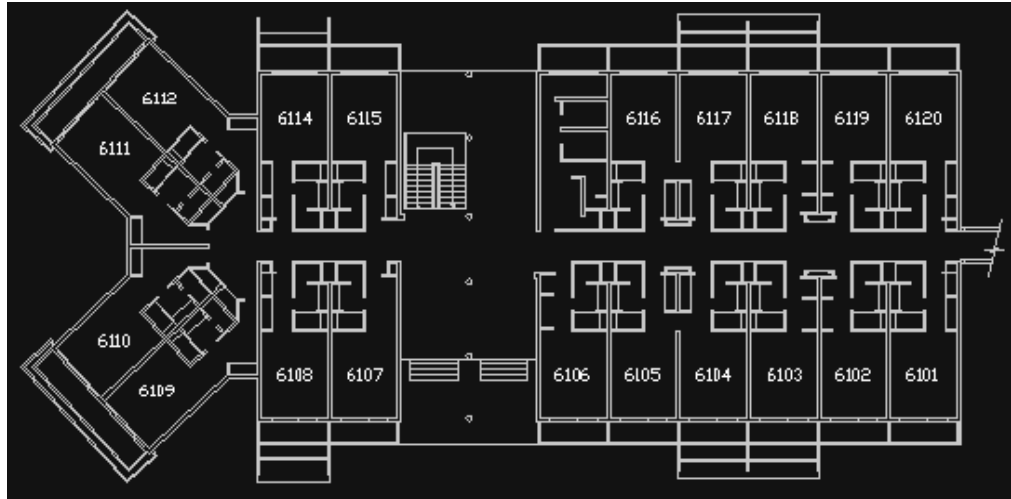


Figura 1. Primer nivel (tomado del expediente técnico del hotel).

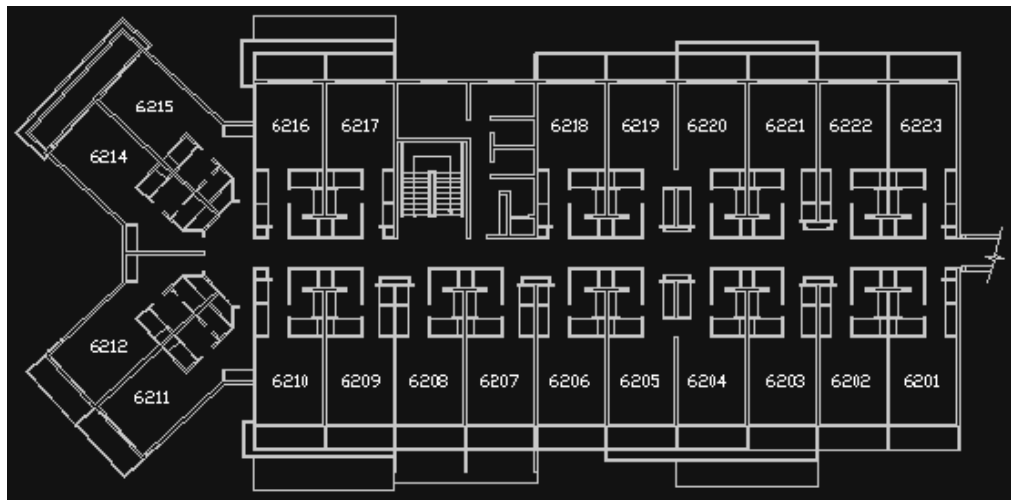


Figura 2. Segundo nivel (tomado del expediente técnico del hotel).

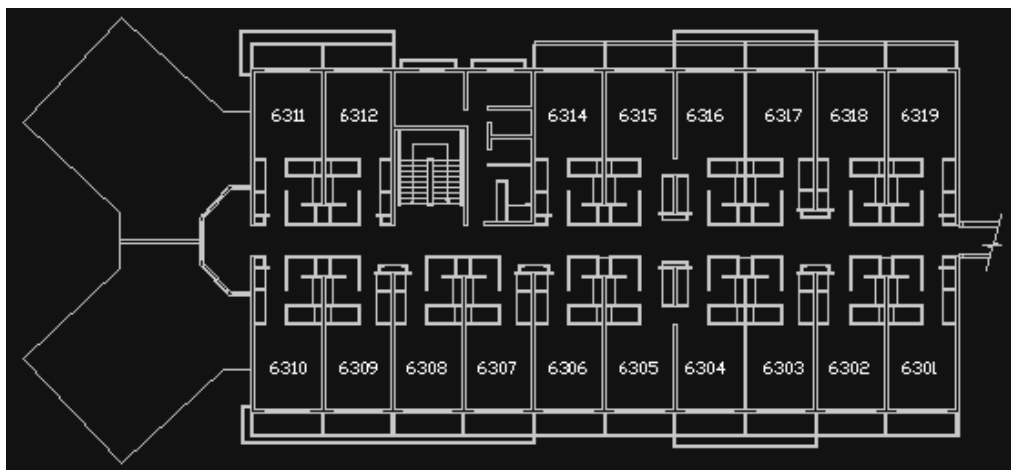


Figura 3. Tercer nivel (tomado del expediente técnico del hotel).



Figura 4. Imágenes de las habitaciones: a) interior de las habitaciones, b) entrada de las habitaciones donde se aprecia la succión y la descarga de aire de las unidades terminales c) vista parcial del baño y d) puerta corrediza de cristal y cortinas del balcón.

El sistema de climatización en la actualidad cuenta con tres unidades enfriadoras trabajando en paralelo, una es de la marca FRIOCLIMA modelo CHAWT 1602 con una capacidad frigorífica de 456 kW para una potencia de 167 kW y dos enfriadoras de la marca GREE de 250 kW de capacidad y 77 kW de potencia eléctrica cada una.

El CPAF está compuesto por cuatro bombas de 50 m³/h, 12 m de altura de carga y una potencia de 3,45 kW cada una (tres bombas trabajan en paralelo de forma continua y una es reserva).

El CSAF lo componen 14 bombas, las cuales se encuentran ubicadas en parejas por cada una de las siete zonas (la que está funcionando se le denomina principal y la otra reserva). En la figura 8 se presenta el SCCAH del hotel, las enfriadoras se representan mediante una sola unidad.

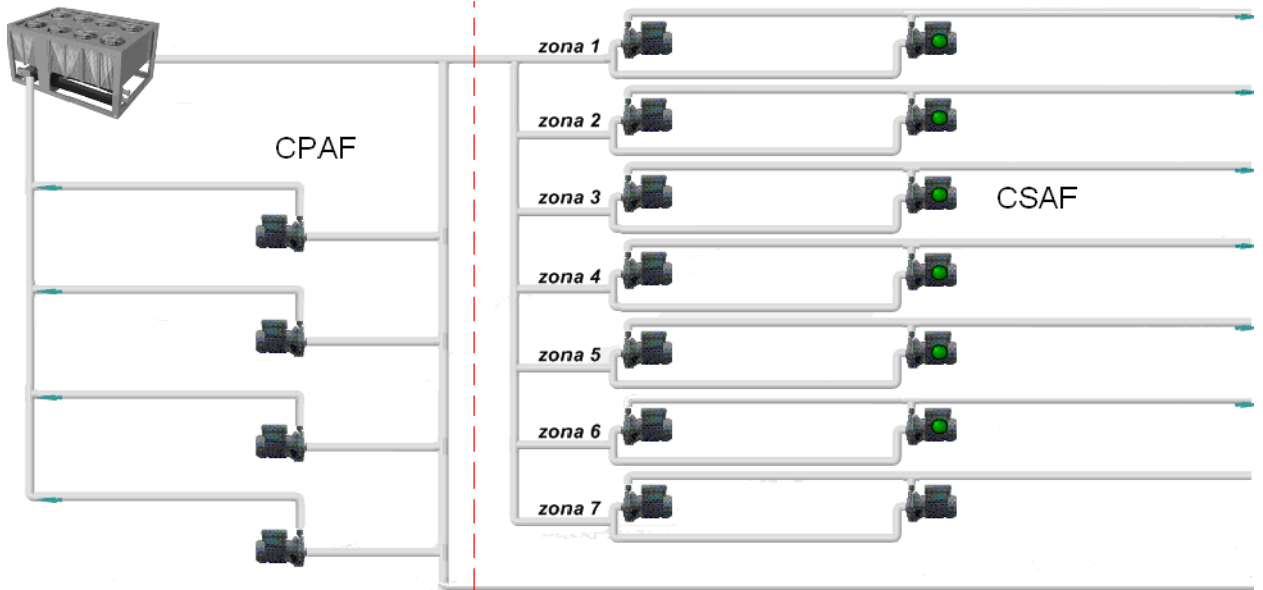


Figura 5. Esquema general simplificado del SCCAH del hotel Blau Costa Verde (tomado de la Automática del hotel).

Las características específicas de las bombas de la zona 6, su motor de inducción y el variador de velocidad se exponen a continuación:

Bomba centrífuga

| | | | | | | | |
|-------------------------------|------|---|------|------|--|---|--|
| SIHI <i>SuperNova</i> 032200B | | Nennrehzahl / nominal speed 3500 min ⁻¹ | | | |  | |
| Baureihe / series | ZLND | ZLKF | ZTND | ZTKD | | | |

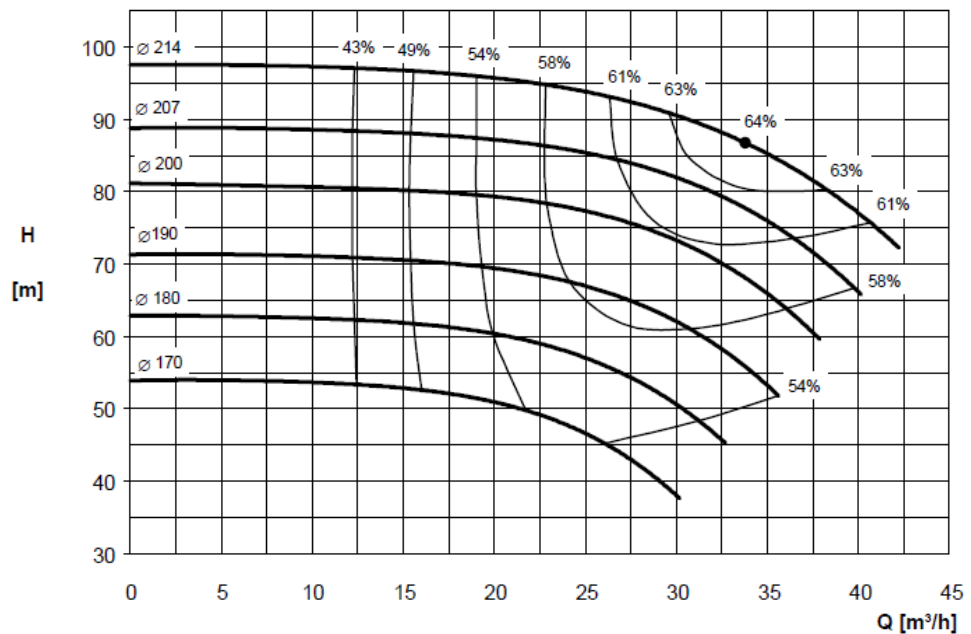


Figura 6. Curvas para diferentes diámetros del impelente de la bomba centrífuga [175].

Las bombas centrífugas de los CSAF de las zonas poseen un eje vertical y bocas de aspiración e impulsión en línea.

Datos de chapa del motor de inducción

- Modelo AM132 – SZA2
- IP 55
- 50 Hz : Δ/Y 400/690 V 7.5 kW
- 60 Hz : Δ 460 V 8.8 kW
- $\cos \varphi$: 0.89/0.90 2890/3490 rpm
- 50 Hz 380 – 420/ 655 – 725 V 14.6/ 8.4 A
- 60 Hz 440 – 480 V 14.1 A

Variador de velocidad

A continuación se presentan informaciones del variador de velocidad que incluyen las pruebas de ajustes como operación necesaria para la puesta a punto de la instalación. Se determinó que la ganancia proporcional (GP) y el tiempo de integración (TI) que permiten el mejor desempeño del controlador son $GP=1$ y $TI=1,3$ s, con tiempos de establecimiento de la presión entre 25 s y 31 s para el arranque y un error máximo de 1 kPa. La Figura 8 corrobora estas informaciones.

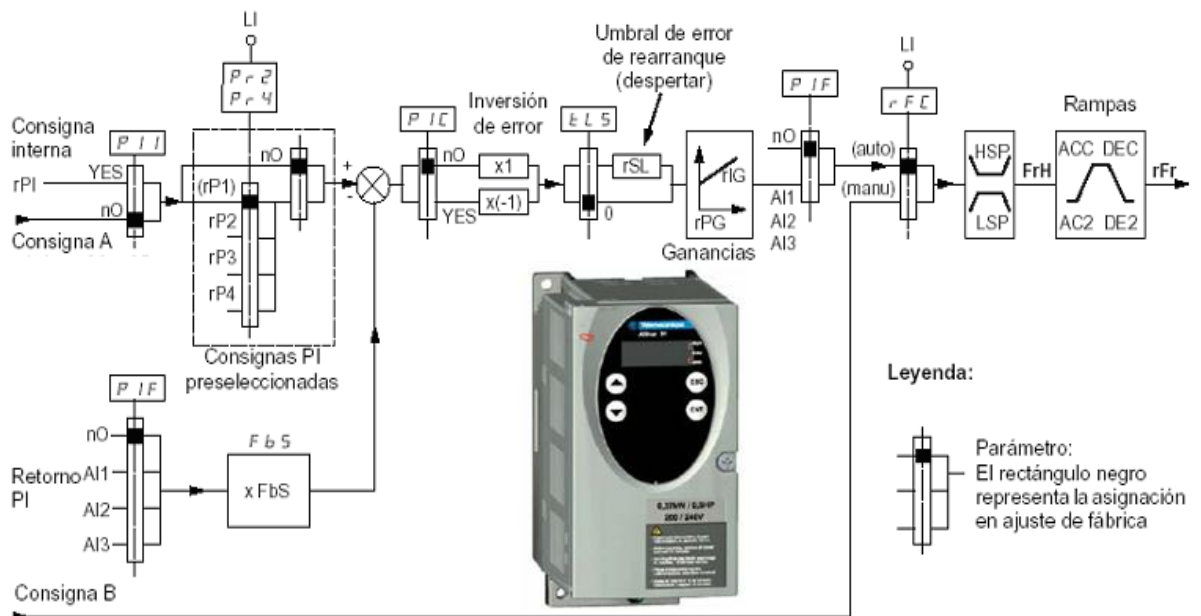


Figura 7. Variador de velocidad Altivar 31 empleado en el CSAF caso de estudio [52].

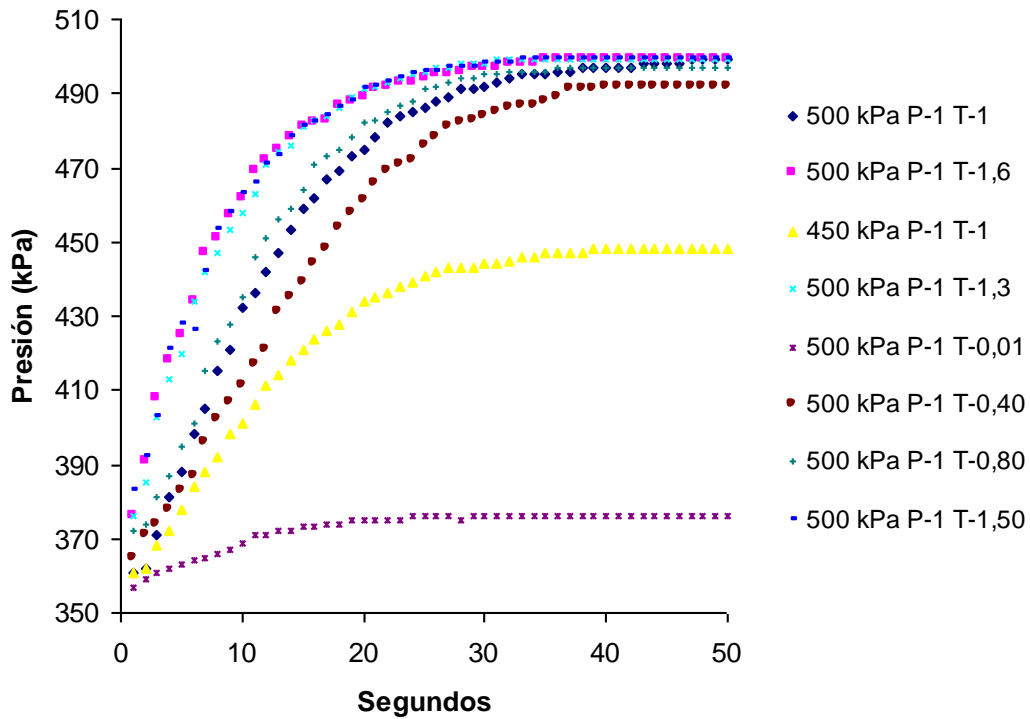


Figura 8. Pruebas de ajuste del controlador PI del VV ALTIVAR 31 [97].

Algunos componentes de la red hidráulica.

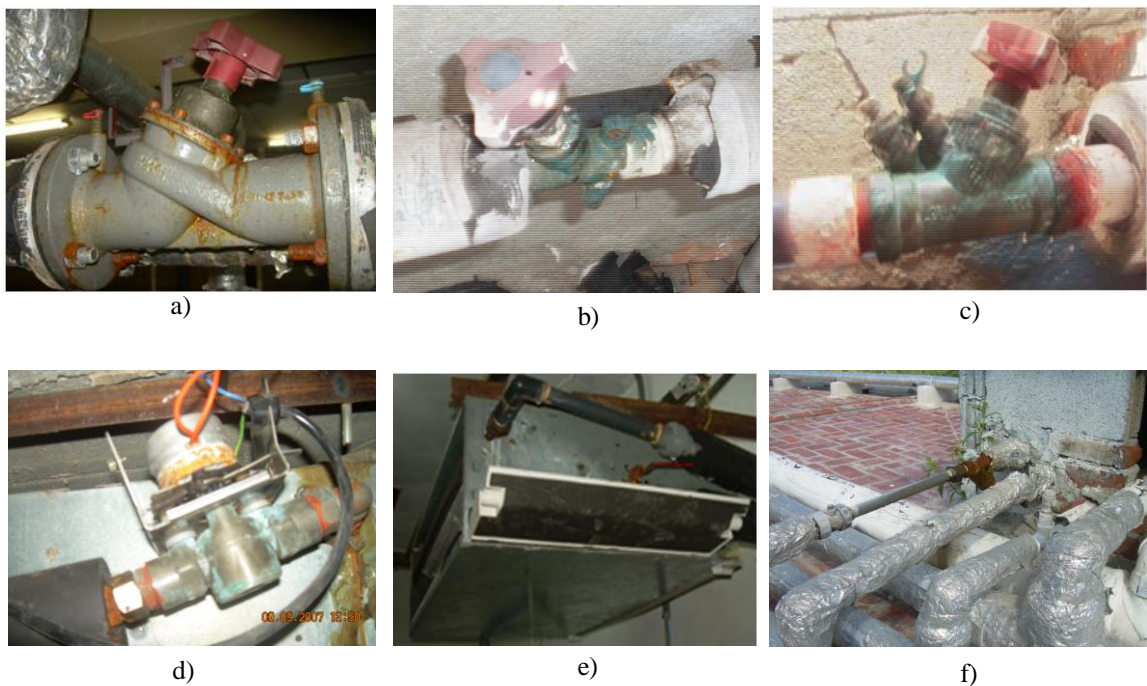


Figura 9. Componentes de la red hidráulica: a) válvula de equilibrio STAF, b) válvula de equilibrio STA-DR; válvula de equilibrio STAD d) válvula de control de dos vías on/off; e) *fan-coil* de la familia FCX y f) entrada a un patinejo.

Datos de los nodos y tramos de la red hidráulica de los patinejos AB y CD resultado de la validación del modelo matemático de la red en EPANET.

Tabla 1. Tramos de la red hidráulica

| Tramo | Longitud | Diámetro | Caudal | Velocidad | Tramo | Longitud | Diámetro | Caudal | Velocidad |
|---------|----------|----------|--------|-----------|---------|----------|----------|--------|-----------|
| | <m> | <mm> | <l/s> | <m/s> | | <m> | <mm> | <l/s> | <m/s> |
| 1-2 | 0,65 | 76,2 | 2,16 | 0,47 | C-C3 | 2,25 | 38 | 1,07 | 0,94 |
| 3-4 | 98,9 | 76,2 | 2,16 | 0,47 | C3-C31 | 2,5 | 12,7 | 0,37 | 2,94 |
| 2-3 | 2,35 | 76,2 | 2,16 | 0,47 | C31-C32 | 4,05 | 12,7 | 0,20 | 1,57 |
| 4-5 | 11,8 | 76,2 | 2,16 | 0,47 | C31-C33 | 5,4 | 12,7 | 0,17 | 1,37 |
| 5-6 | 7 | 76,2 | 2,16 | 0,47 | C3-C2 | 3,1 | 25,4 | 0,70 | 1,38 |
| 6-7 | 3,1 | 76,2 | 2,16 | 0,47 | C2-C1 | 3,1 | 19,05 | 0,34 | 1,19 |
| 7-A | 81 | 76,2 | 2,16 | 0,47 | C2-C21 | 2,5 | 12,7 | 0,36 | 2,82 |
| 12-13 | 2,35 | 76,2 | 2,16 | 0,47 | C21-C22 | 4,05 | 12,7 | 0,19 | 1,5 |
| 11-12 | 98,9 | 76,2 | 2,16 | 0,47 | C21-C23 | 5,4 | 12,7 | 0,17 | 1,32 |
| A-A3 | 2,25 | 25,4 | 1,09 | 2,15 | C1-C11 | 2,5 | 12,7 | 0,34 | 2,69 |
| A3-A2 | 3,1 | 25,4 | 0,71 | 1,4 | C11-C12 | 4,05 | 12,7 | 0,18 | 1,44 |
| A2-A1 | 3,1 | 19,05 | 0,35 | 1,22 | C11-C13 | 5,4 | 12,7 | 0,16 | 1,25 |
| B2-B3 | 3,1 | 25,4 | 0,71 | 1,4 | D32-D31 | 3,85 | 12,7 | 0,20 | 1,57 |
| B1-B2 | 3,1 | 19,05 | 0,35 | 1,22 | D33-D31 | 6,38 | 12,7 | 0,17 | 1,37 |
| A3-A31 | 2,5 | 12,7 | 0,38 | 2,99 | D31-D3 | 1,65 | 12,7 | 0,37 | 2,94 |
| A31-A33 | 5,4 | 12,7 | 0,18 | 1,39 | D22-D21 | 3,85 | 12,7 | 0,19 | 1,5 |
| A31-A32 | 4,05 | 12,7 | 0,20 | 1,6 | D23-D21 | 6,38 | 12,7 | 0,17 | 1,32 |
| A2-A21 | 2,5 | 12,7 | 0,36 | 2,88 | D21-D2 | 1,65 | 12,7 | 0,36 | 2,82 |
| A21-A22 | 4,05 | 12,7 | 0,19 | 1,53 | D2-D3 | 3,1 | 25,4 | 0,70 | 1,38 |
| A21-A23 | 5,4 | 12,7 | 0,17 | 1,35 | D1-D2 | 3,1 | 19,05 | 0,34 | 1,19 |
| A1-A11 | 2,5 | 12,7 | 0,35 | 2,74 | D12-D11 | 3,85 | 12,7 | 0,18 | 1,44 |
| A11-A12 | 4,05 | 12,7 | 0,18 | 1,46 | D13-D11 | 6,38 | 12,7 | 0,16 | 1,25 |
| A11-A13 | 5,4 | 12,7 | 0,16 | 1,28 | D11-D1 | 1,65 | 12,7 | 0,34 | 2,69 |
| B32-B31 | 3,85 | 12,7 | 0,20 | 1,6 | D3-DV1 | 1,05 | 38 | 1,07 | 0,94 |
| B33-B31 | 6,38 | 12,7 | 0,18 | 1,39 | DV2-D | 1,2 | 38 | 1,07 | 0,94 |
| B31-B3 | 1,65 | 12,7 | 0,38 | 2,99 | B3-BV1 | 1,05 | 25,4 | 1,09 | 2,15 |
| B22-B21 | 3,85 | 12,7 | 0,19 | 1,53 | D-B | 8 | 76,2 | 1,07 | 0,23 |
| B23-B21 | 6,38 | 12,7 | 0,17 | 1,35 | 10-11 | 11,8 | 76,2 | 2,16 | 0,47 |
| B21-B2 | 1,65 | 12,7 | 0,36 | 2,88 | 9-10 | 7 | 76,2 | 2,16 | 0,47 |
| B12-B11 | 3,85 | 12,7 | 0,18 | 1,46 | 8-9 | 3,1 | 76,2 | 2,16 | 0,47 |
| B13-B11 | 6,38 | 12,7 | 0,16 | 1,28 | B -8 | 81 | 76,2 | 2,16 | 0,47 |
| B11-B1 | 1,65 | 12,7 | 0,35 | 2,74 | B4-B | 1,2 | 25,4 | 1,09 | 2,15 |
| A-C | 8 | 76,2 | 1,07 | 0,23 | BV2-B4 | 0,01 | 25,4 | 1,09 | 2,15 |

Tabla 2. Nodos de la red hidráulica

| Nodo | Cota | Presión | Cota Piez. | Nodo | Cota | Presión | Cota Piez. |
|------|-------|---------|------------|------|-------|---------|------------|
| | <m> | <mca> | <m> | | <m> | <mca> | <m> |
| A | 12,05 | 21,98 | 33,99 | A12 | 5,10 | 23,17 | 28,26 |
| C | 12,05 | 21,97 | 33,98 | B12 | 5,10 | 21,30 | 26,39 |
| 7 | 12,05 | 22,31 | 34,32 | B13 | 5,10 | 21,68 | 26,77 |
| 6 | 15,15 | 19,22 | 34,33 | A13 | 5,10 | 23,12 | 28,21 |
| 5 | 15,15 | 19,25 | 34,36 | C32 | 11,30 | 17,74 | 29,03 |
| 4 | 3,35 | 31,10 | 34,41 | B31 | 11,30 | 13,31 | 24,60 |
| 3 | 3,35 | 31,50 | 34,81 | B21 | 8,20 | 16,64 | 24,83 |
| 2 | 0,50 | 34,36 | 34,82 | B11 | 5,10 | 19,98 | 25,07 |
| 1 | 0,50 | 34,36 | 34,82 | C33 | 11,30 | 17,68 | 28,97 |
| 8 | 12,05 | 3,86 | 15,87 | C31 | 11,30 | 19,33 | 30,62 |
| 11 | 3,35 | 12,47 | 15,78 | C3 | 11,30 | 22,62 | 33,90 |
| 12 | 3,35 | 12,07 | 15,38 | C2 | 8,20 | 25,33 | 33,52 |
| 13 | 3,35 | 12,06 | 15,37 | C1 | 5,10 | 28,00 | 33,09 |
| 14 | 3,35 | 11,71 | 15,06 | C21 | 8,20 | 22,31 | 30,50 |
| E0 | 0,50 | - | - | C11 | 5,10 | 25,25 | 30,34 |
| A3 | 11,30 | 22,06 | 33,34 | C22 | 8,20 | 20,85 | 29,04 |
| B3 | 11,30 | 11,08 | 22,36 | C23 | 8,20 | 20,78 | 28,97 |
| B | 12,05 | 4,19 | 16,20 | C12 | 5,10 | 23,90 | 28,99 |
| A2 | 8,20 | 24,75 | 32,94 | C13 | 5,10 | 23,86 | 28,95 |
| A1 | 5,10 | 27,41 | 32,50 | D32 | 11,30 | 15,68 | 26,97 |
| B2 | 8,20 | 14,56 | 22,75 | D33 | 11,30 | 16,11 | 27,40 |
| B1 | 5,10 | 18,10 | 23,19 | D22 | 8,20 | 18,86 | 27,05 |
| A31 | 11,30 | 18,65 | 29,94 | D23 | 8,20 | 19,28 | 27,47 |
| A21 | 8,20 | 21,60 | 29,79 | D12 | 5,10 | 22,10 | 27,19 |
| A11 | 5,10 | 24,56 | 29,65 | D13 | 5,10 | 22,46 | 27,55 |
| A32 | 11,30 | 17,00 | 28,29 | D31 | 11,30 | 14,17 | 25,46 |
| A33 | 11,30 | 16,95 | 28,24 | D21 | 8,20 | 17,48 | 25,67 |
| A22 | 8,20 | 20,09 | 28,28 | D11 | 5,10 | 20,83 | 25,92 |
| A23 | 8,20 | 20,01 | 28,20 | D3 | 11,30 | 12,01 | 23,29 |
| D | 12,05 | 4,2 | 16,21 | D2 | 8,20 | 15,48 | 23,67 |
| BV1 | 12,05 | 10,02 | 22,05 | D1 | 5,10 | 19,01 | 24,10 |
| BV2 | 12,05 | 4,52 | 16,55 | DV1 | 12,05 | 11,22 | 23,25 |
| B32 | 11,30 | 14,88 | 26,17 | DV2 | 12,05 | 4,22 | 16,25 |
| B33 | 11,30 | 15,32 | 26,61 | 9 | 15,15 | 0,75 | 15,86 |
| B22 | 8,20 | 18,08 | 26,27 | 10 | 15,15 | 0,72 | 15,83 |
| B23 | 8,20 | 18,52 | 26,71 | B4 | 12,05 | 4,52 | 16,55 |

ANEXO 14

VENTANAS DE LA APLICACIÓN “OCUPAHOTEL MTH”

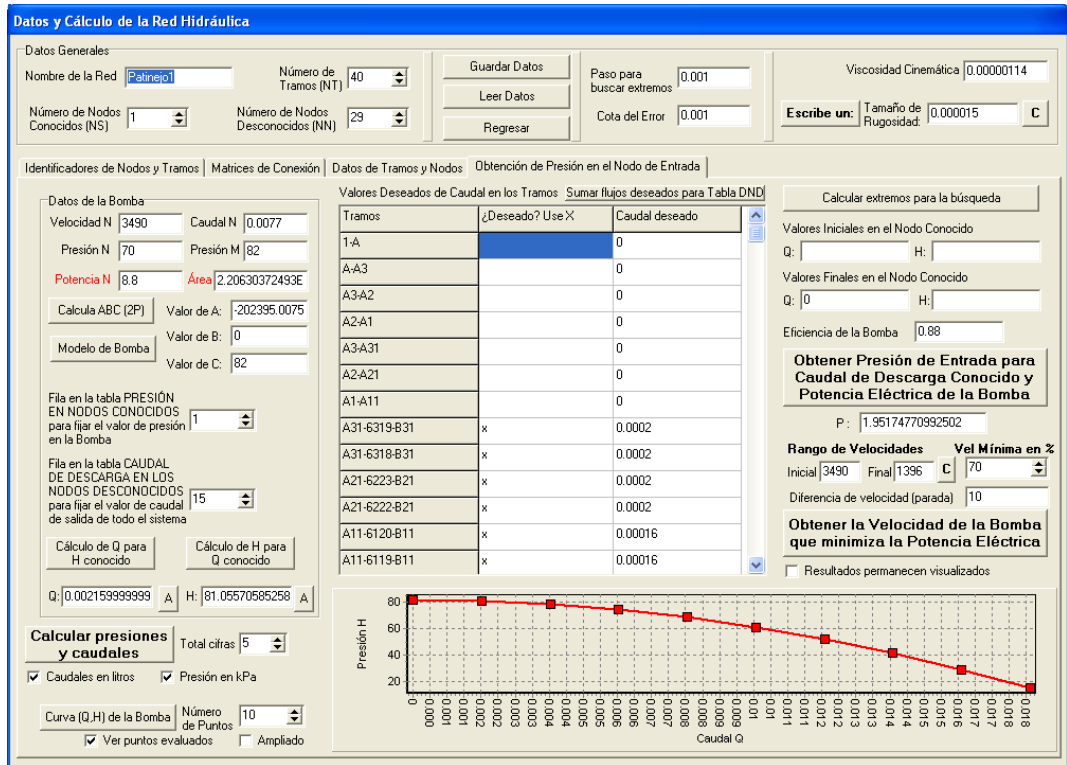


Figura 1. Modelación y simulación hidráulica: ventana para datos y cálculo de la red hidráulica.

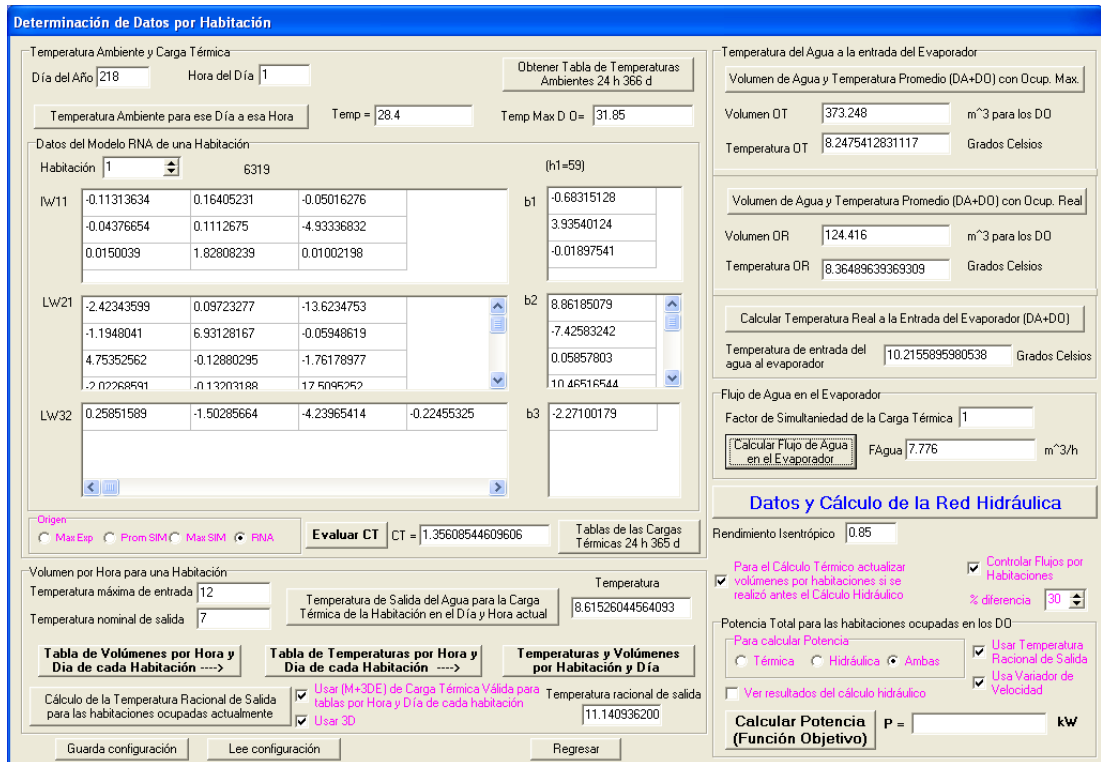


Figura 2. Modelación y simulación térmica.

OCUPAHOTEL MTH Ms.C. Reineris Montero Laurencio [Marzo del 2013] Diseño y Programación: Dr.C. A.A. Legrá Lobaina

Proyecto **Patinejo1** Total de Habitaciones: 12 Grabar HAB Leer HAB Blanquear Tablas Cargas Térmicas Origen: Max Exp Prom SIM Max SIM

Use. (punto) como separador decimal

| | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Datos de Habitaciones y de sus ocupaciones | ID H | 6319 | 6318 | 6223 | 6222 | 6120 | 6119 | 6317 | 6316 | 6221 | 6220 |
| Habitable | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Ocupación | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Carga Térmica | 1.8513732 | 1.6362891 | 1.4832999 | 1.2548313 | 1.510443 | 1.2645704 | 1.6793747 | 1.3554882 | 2.044707 | 1.8513732 | 1.6362891 |
| Grupo | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

Habitaciones Habitables= 12 Habitaciones Ocupadas= 4 Modelos Termo - Hidráulico Complejo Usa Modelo T-H Complejo FO = 0.410689125973585 (Velo)

Fecha de Reservación: Día 24 Mes 3 Año 2013 83 DO 2 Estilos de pre-selección: Todos Por grupos Los K de menor Potencia P

Tabla de Habitaciones Disponibles y Desocupadas Escribe los grupos (separe por comas) K = 6

| | | | | | | | | |
|---------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|
| IDk | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| IDh | 1 | 3 | 4 | 5 | 8 | 9 | 11 | 12 |
| Carga Térmica | 1.8513732 | 1.4832999 | 1.2548313 | 1.510443 | 1.3554882 | 2.044707 | 2.136785 | 2.0546473 |
| Grupo | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |

Reordenamiento (según Energía) de habitaciones a ocupar Habitaciones listas para ocupar = 8

| | | | | | | | | |
|---------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| IDk | 3 | 5 | 2 | 4 | 1 | 6 | 8 | 7 |
| IDh | 4 | 8 | 3 | 5 | 1 | 9 | 12 | 11 |
| Carga Térmica | 1.2548313 | 1.3554882 | 1.4832999 | 1.510443 | 1.8513732 | 2.044707 | 2.0546473 | 2.136785 |
| OD ord | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |

Total de Habitaciones a Seleccionar 3 Total de Combinaciones =56 (AlgGe) Máxima Combinatoria Exhaustiva 55 Máxima Combinatoria Por Escalón 7

Ver Combinación Número 2 00001011 (11) Eval = 1 FO = 0.690593906131 En: 3.609557098E-12 seg. Total: 9.143 seg.

Graba Exhaustivo Usa grabados (MExhaustivo) Una buena selección es tomar las habitaciones:
 Habitación 5 (6120)
 Habitación 9 (6221)
 Habitación 12 (6117)
 junto a las habitaciones 6318 6119 6317 6220

Total de habitaciones por escalón en la optimización escalonada 1 Valor máximo de escalones 3

Pop. Inicial 8 Mejoras Aleatorias 14

% Mutac-Cruzam. 40 Guarda Lee CCTP **Seleccionar Habitaciones** 100%

Figura 3. Ventana para las opciones combinatorias de la ocupación y la optimización.

ANEXO 15

INFORMACIONES CLIMATOLÓGICAS DE LA LOCALIDAD

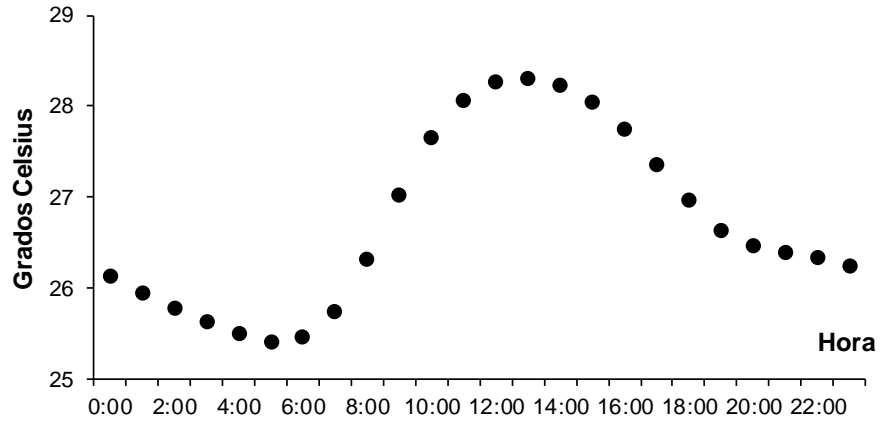


Figura 1. Comportamiento medio anual de la temperatura ambiente horaria.

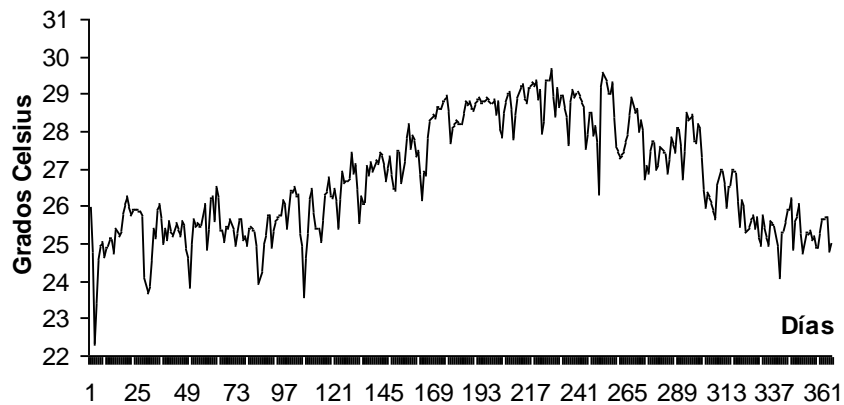


Figura 2. Comportamiento de la temperatura ambiente promedio diaria durante un año.

La humedad relativa presenta un rango promedio de valores entre 72 % y 82 %. Los valores superiores a 80 % se presentan entre las 10:00 pm y la 7:00 am. Otras variables climatológicas asociadas y de las cuales en alguna medida depende el intercambio térmico son: las lluvias, la velocidad del viento predominante y la nubosidad. Los valores promedio históricos mensuales se presentan en la Figura 3. Estos valores son el resultado del análisis de más de 30 años.

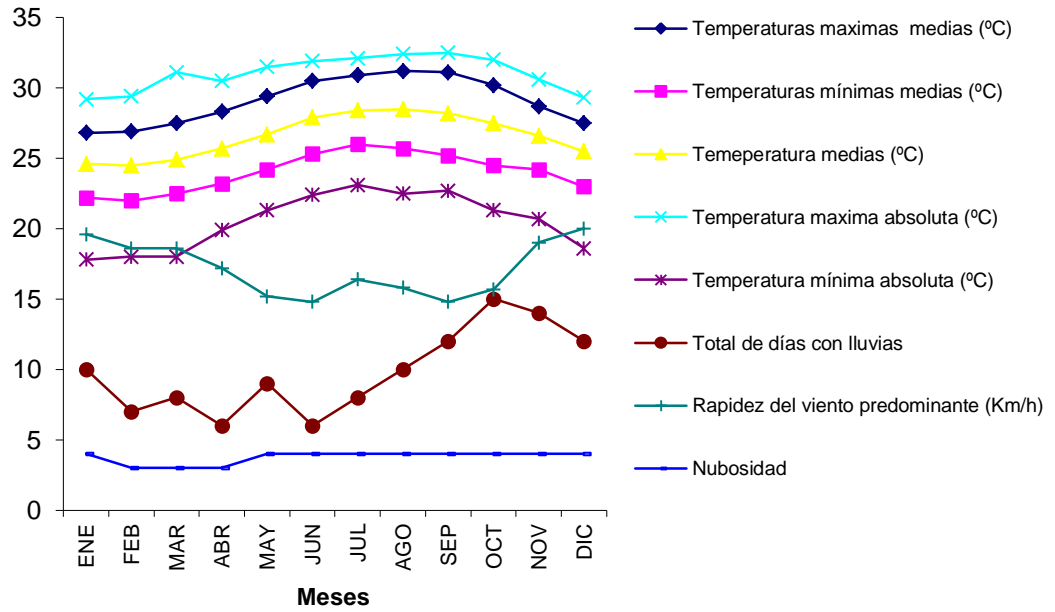


Figura 3. Comportamiento de los valores promedios mensuales históricos de la temperatura ambiente, días con lluvias, rapidez del viento y nubosidad.

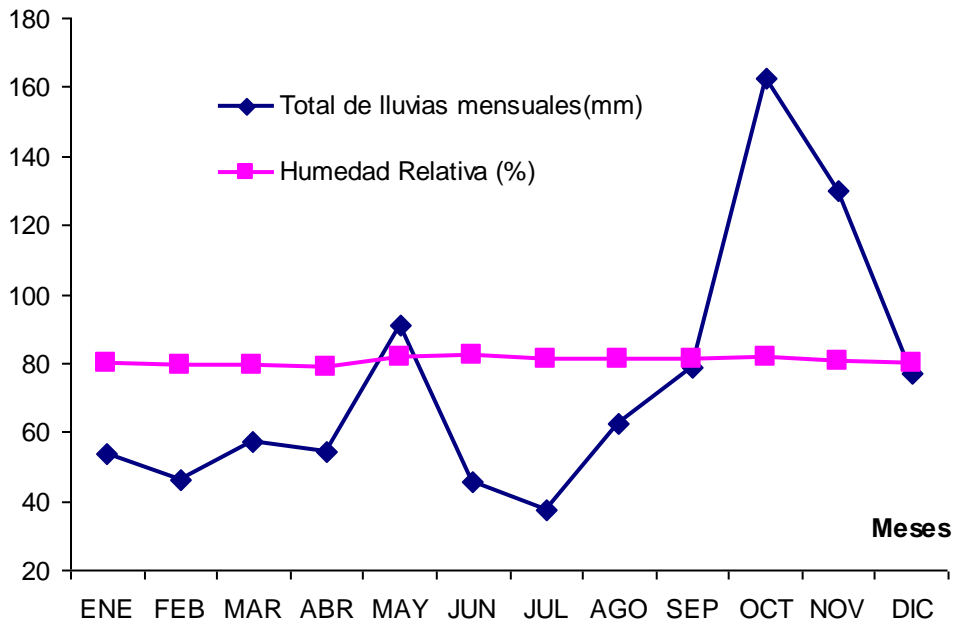


Figura 4. Comportamiento de los valores promedios mensuales históricos de la humedad relativa y del total de lluvias mensuales.

Holguín, 12 de abril de 2013.
 "Año 55 de la Revolución".

A quien pueda interesar:
 Por la presente se certifica que los datos climatológicos empleados en la tesis de doctorado "**Optimización de la operación de circuitos secundarios de agua fría a flujo variable en climatización de hoteles**", fueron revisados y validados por el "**Sistema Automatizado de Revisión de Observaciones Meteorológicas (SAROM)**". Esta información forma parte de la data climática de la estación meteorológica de Cabo Lucrecia.


 Lic. Axel Hidalgo Mayo.
 Especialista en Meteorología.



 MSc. Zulema Reyes Bermúdez.
 Jefe del Grupo Científico.



Figura 5. Certificación de los datos climatológicos utilizados en la investigación.

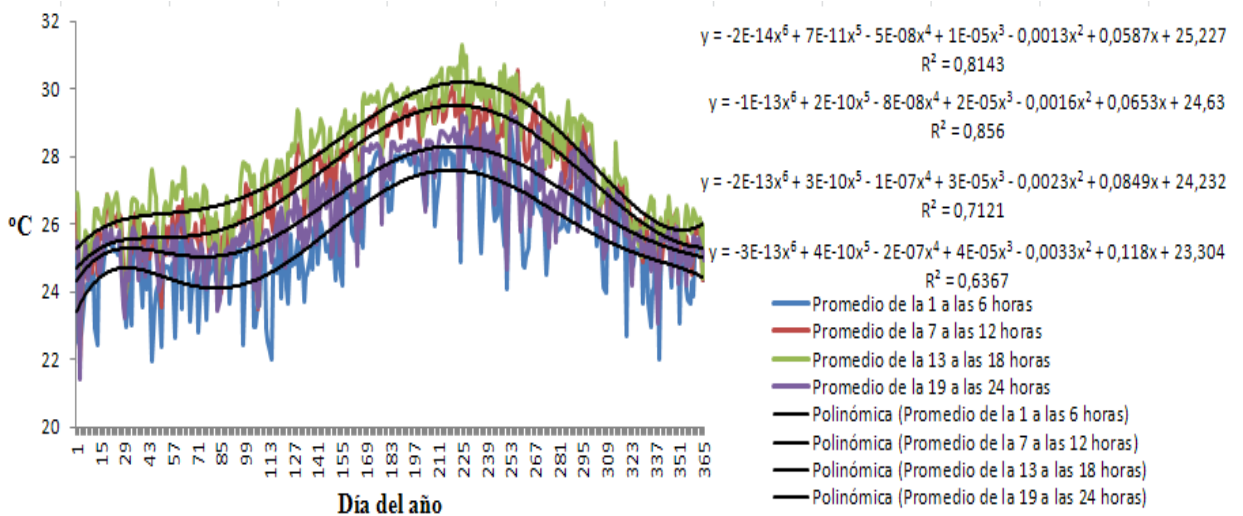


Figura 6. Temperatura ambiente promedio cada seis horas.

ANEXO 16

**RESULTADOS FUNDAMENTALES DE LA MODELACIÓN CON RNA DE LA CARGA
TÉRMICA DE ENFRIAMIENTO DE LAS 59 HABITACIONES DEL EDIFICIO**

| Habitación | Neuronas en capa intermedia | Coefficiente de correlación | Error | Habitación | Neuronas en capa intermedia | Coefficiente de correlación | Error | Habitación | Neuronas en capa intermedia | Coefficiente de correlación | Error |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|----------|------------|-----------------------------|-----------------------------|----------|------------|-----------------------------|-----------------------------|----------|
| 6101 | 15 | 0.92 | 0.000893 | 6202 | 15 | 0.95 | 0.000481 | 6223 | 19 | 0.94 | 0.000877 |
| 6102 | 11 | 0.95 | 0.000480 | 6203 | 17 | 0.90 | 0.000461 | 6301 | 11 | 0.96 | 0.001453 |
| 6103 | 13 | 0.91 | 0.000459 | 6204 | 27 | 0.91 | 0.000419 | 6302 | 9 | 0.95 | 0.001173 |
| 6104 | 16 | 0.91 | 0.000436 | 6205 | 16 | 0.95 | 0.000495 | 6303 | 9 | 0.96 | 0.001126 |
| 6105 | 10 | 0.94 | 0.000505 | 6206 | 14 | 0.95 | 0.000464 | 6304 | 12 | 0.96 | 0.001125 |
| 6106 | 11 | 0.92 | 0.000933 | 6207 | 23 | 0.91 | 0.000436 | 6305 | 13 | 0.95 | 0.001102 |
| 6107 | 20 | 0.89 | 0.000902 | 6208 | 11 | 0.90 | 0.000472 | 6306 | 13 | 0.95 | 0.001115 |
| 6108 | 14 | 0.90 | 0.000472 | 6209 | 30 | 0.96 | 0.000418 | 6307 | 7 | 0.96 | 0.001166 |
| 6109 | 12 | 0.92 | 0.001019 | 6210 | 14 | 0.95 | 0.000448 | 6308 | 8 | 0.96 | 0.001161 |
| 6110 | 25 | 0.91 | 0.000904 | 6211 | 8 | 0.97 | 0.001955 | 6309 | 9 | 0.96 | 0.001077 |
| 6111 | 9 | 0.93 | 0.001037 | 6212 | 11 | 0.96 | 0.001786 | 6310 | 8 | 0.96 | 0.001811 |
| 6112 | 13 | 0.93 | 0.000991 | 6214 | 6 | 0.97 | 0.002058 | 6311 | 4 | 0.97 | 0.001960 |
| 6114 | 12 | 0.90 | 0.000468 | 6215 | 6 | 0.97 | 0.002047 | 6312 | 7 | 0.97 | 0.001163 |
| 6115 | 20 | 0.90 | 0.001038 | 6216 | 14 | 0.94 | 0.000459 | 6314 | 10 | 0.96 | 0.001105 |
| 6116 | 12 | 0.93 | 0.000490 | 6217 | 13 | 0.90 | 0.001088 | 6315 | 9 | 0.96 | 0.001071 |
| 6117 | 23 | 0.91 | 0.000447 | 6218 | 12 | 0.94 | 0.000477 | 6316 | 6 | 0.97 | 0.001202 |
| 6118 | 16 | 0.90 | 0.000476 | 6219 | 10 | 0.93 | 0.000496 | 6317 | 6 | 0.97 | 0.001215 |
| 6119 | 10 | 0.93 | 0.000496 | 6220 | 17 | 0.90 | 0.000462 | 6318 | 9 | 0.96 | 0.001118 |
| 6120 | 10 | 0.93 | 0.000943 | 6221 | 16 | 0.90 | 0.000483 | 6319 | 8 | 0.95 | 0.001816 |
| 6201 | 13 | 0.93 | 0.000900 | 6222 | 11 | 0.93 | 0.000502 | - | - | - | - |

ANEXO 17

EJEMPLO DE LA LITERATURA QUE SE RESUELVE CON EL MÉTODO DEL GRADIENTE IMPLEMENTADO EN LA APLICACIÓN “OCUPAHOTEL MTH”

La red mostrada en la Figura 1 tiene una válvula en la tubería 2-3, la cual se encuentra parcialmente cerrada y produce una pérdida menor local de $10.0 V^2/2g$, la presión en el punto 1 es 100 mca. Se puede suponer que en todos los tubos, salvo en el tramo 2-3 las pérdidas menores son despreciables. Los demás datos se muestran en la Figura 1.

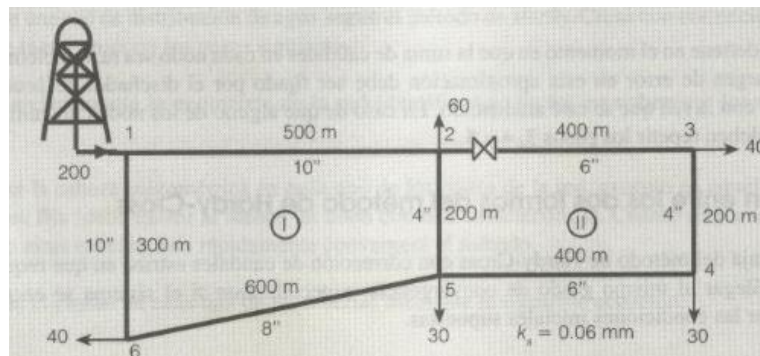


Figura 1. Red hidráulica para resolver mediante el Método del Gradiente [78].

Datos y Cálculo de la Red Hidráulica

Datos Generales

Nombre de la Red: Número de Tramos (NT):

Número de Nodos Conocidos (NS): Número de Nodos Desconocidos (NN):

Guardar Datos Paso para buscar extremos: Viscosidad Cinemática:

Leer Datos Cota del Error: Escribe un: Tamaño de Rugosidad:

Regresar

Resultados

Resultado del cálculo de Presiones y Caudales

Número de iteraciones: 7
Tiempo total de cálculo: 0.01 seg.

Presiones calculadas en los nodos desconocidos (mca)

2: 92.914
3: 81.242
4: 81.667
5: 89.746
6: 96.705

Caudales calculados en cada tramo (m³/seg)

1-2: 0.10665
2-3: 0.036537
3-4: 0.0034026
5-4: 0.033403
2-5: 0.010048
6-5: 0.053355
6-1: 0.093355

Porcentaje logrado de caudales deseados en tramos X

Velocidades calculadas en cada tramo (m/seg)

1-2: 2.1047
2-3: 2.0063
3-4: 0.4197
5-4: 1.8311
2-5: 1.2394
6-5: 1.6453
6-1: 1.8424

Figura 2. Resultados del cálculo de la red en una versión de la aplicación OcupaHotel MTH.

ANEXO 18

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS ENTRE EL EPANET Y LA APLICACIÓN OCUPAHOTEL MTH, TENIENDO EN CUENTA LAS OPERACIONES DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA BOMBA

Caudales

| Tramo | Caudal Esperado | Caudal Calculado | CE-CC | Error Porcentual |
|---------|-----------------|------------------|---------|------------------|
| | (l/s) | (l/s) | (l/s) | (%) |
| 1-2 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| 3-4 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| 2-3 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| 4-5 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| 5-6 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| 6-7 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| 7-A | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| 12-13 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| 11-12 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| A-A3 | 1,09 | 1,0910 | -0,0010 | 0,09 |
| A3-A2 | 0,71 | 0,7116 | -0,0016 | 0,22 |
| A2-A1 | 0,35 | 0,3469 | 0,0031 | 0,90 |
| B2-B3 | 0,71 | 0,7116 | -0,0016 | 0,22 |
| B1-B2 | 0,35 | 0,3469 | 0,0031 | 0,90 |
| A3-A31 | 0,38 | 0,3795 | 0,0005 | 0,14 |
| A31-A33 | 0,18 | 0,1767 | 0,0000 | 0,00 |
| A31-A32 | 0,20 | 0,2027 | -0,0027 | 1,36 |
| A2-A21 | 0,36 | 0,3647 | -0,0047 | 1,31 |
| A21-A22 | 0,19 | 0,1909 | 0,0029 | 1,50 |
| A21-A23 | 0,17 | 0,1709 | 0,0000 | 0,00 |
| A1-A11 | 0,35 | 0,3469 | 0,0031 | 0,90 |
| A11-A12 | 0,18 | 0,1849 | 0,0000 | 0,00 |
| A11-A13 | 0,16 | 0,1620 | 0,0000 | 0,00 |
| B31-B3 | 0,38 | 0,3795 | 0,0005 | 0,14 |
| B21-B2 | 0,36 | 0,3647 | -0,0047 | 1,31 |
| B11-B1 | 0,35 | 0,3469 | 0,0031 | 0,90 |
| A-C | 1,07 | 1,0690 | 0,0010 | 0,09 |
| C-C3 | 1,07 | 1,0690 | 0,0010 | 0,09 |
| C3-C31 | 0,37 | 0,3721 | -0,0021 | 0,58 |
| C31-C32 | 0,20 | 0,1984 | 0,0016 | 0,78 |
| C31-C33 | 0,17 | 0,1737 | -0,0037 | 2,18 |
| C3-C2 | 0,70 | 0,6968 | 0,0032 | 0,45 |
| C2-C1 | 0,34 | 0,3401 | 0,0000 | 0,01 |
| C2-C21 | 0,36 | 0,3568 | 0,0032 | 0,89 |

| | | | | |
|---------|------|--------|---------|------|
| C21-C22 | 0,19 | 0,1896 | 0,0004 | 0,19 |
| C21-C23 | 0,17 | 0,1672 | 0,0028 | 1,67 |
| C1-C11 | 0,34 | 0,3401 | 0,0000 | 0,01 |
| C11-C12 | 0,18 | 0,1815 | -0,0015 | 0,83 |
| C11-C13 | 0,16 | 0,1586 | 0,0014 | 0,90 |
| D31-D3 | 0,37 | 0,3721 | -0,0021 | 0,58 |
| D21-D2 | 0,36 | 0,3568 | 0,0032 | 0,89 |
| D2-D3 | 0,70 | 0,6968 | 0,0032 | 0,45 |
| D1-D2 | 0,34 | 0,3401 | 0,0000 | 0,01 |
| D11-D1 | 0,34 | 0,3401 | 0,0000 | 0,01 |
| D3-D | 1,07 | 1,0690 | 0,0010 | 0,09 |
| B3-B | 1,09 | 1,0910 | -0,0010 | 0,09 |
| D-B | 1,07 | 1,0690 | 0,0010 | 0,09 |
| 10-11 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| 9-10 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| 8-9 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |
| B-8 | 2,16 | 2,1600 | 0,0000 | 0,00 |

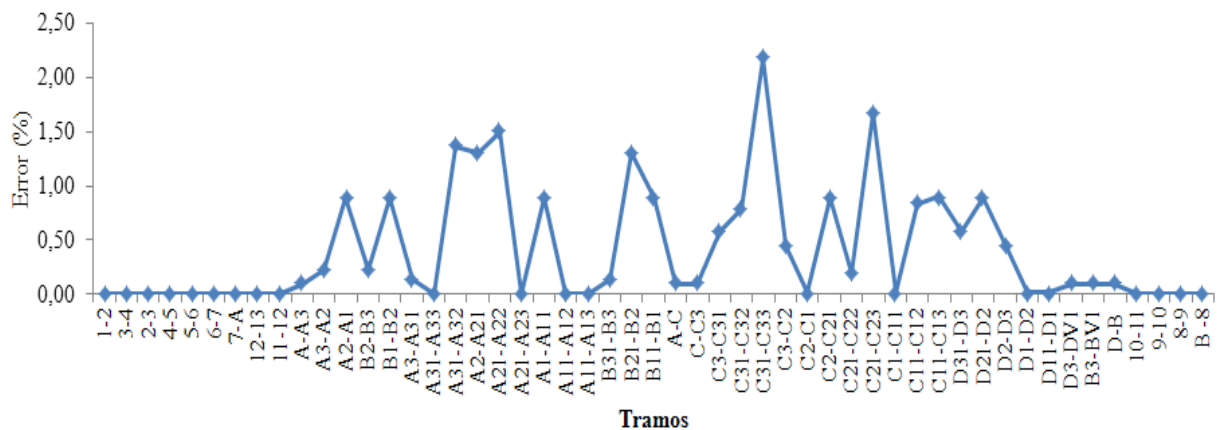


Figura 1. Gráfico de los errores porcentuales de los caudales para ocupación máxima.

Presiones

| Nodo | Presión Esperada (mca) | Presión Calculada (mca) | PE-PC (mca) | Error Porcentual (%) |
|------|---------------------------|----------------------------|----------------|-------------------------|
| 2 | 34,36 | 34,283 | 0,077 | 0,22 |
| 3 | 31,5 | 31,424 | 0,076 | 0,24 |
| 4 | 31,1 | 31,021 | 0,079 | 0,25 |
| 5 | 19,25 | 19,172 | 0,078 | 0,41 |
| 6 | 19,22 | 19,144 | 0,076 | 0,40 |
| 7 | 22,31 | 22,231 | 0,079 | 0,35 |
| A | 21,98 | 21,901 | 0,079 | 0,36 |
| A3 | 22,06 | 21,981 | 0,079 | 0,36 |
| A2 | 24,75 | 24,675 | 0,075 | 0,30 |
| A1 | 27,41 | 27,336 | 0,074 | 0,27 |

| | | | | |
|-----|-------|--------|---------|-------|
| A31 | 18,65 | 18,573 | 0,077 | 0,41 |
| A21 | 21,65 | 21,528 | 0,122 | 0,56 |
| A11 | 24,56 | 24,481 | 0,079 | 0,32 |
| B | 4,19 | 4,1018 | 0,0882 | 2,11 |
| B3 | 11,08 | 11,001 | 0,079 | 0,71 |
| B2 | 14,56 | 14,487 | 0,073 | 0,50 |
| B1 | 18,1 | 18,026 | 0,074 | 0,41 |
| B31 | 13,31 | 13,234 | 0,076 | 0,57 |
| B21 | 16,64 | 16,563 | 0,077 | 0,46 |
| B11 | 19,99 | 19,910 | 0,08 | 0,40 |
| C | 21,97 | 21,892 | 0,078 | 0,36 |
| C3 | 22,62 | 22,542 | 0,078 | 0,34 |
| C2 | 25,33 | 25,252 | 0,078 | 0,31 |
| C1 | 28 | 27,929 | 0,071 | 0,25 |
| C31 | 19,33 | 19,259 | 0,071 | 0,37 |
| C21 | 22,31 | 22,236 | 0,074 | 0,33 |
| C11 | 25,25 | 25,181 | 0,069 | 0,27 |
| D | 4,2 | 4,111 | 0,0891 | 2,12 |
| D1 | 19,01 | 18,952 | 0,058 | 0,31 |
| D2 | 15,48 | 15,430 | 0,05 | 0,32 |
| D3 | 12,01 | 11,960 | 0,05 | 0,42 |
| D31 | 14,17 | 14,109 | 0,061 | 0,43 |
| D21 | 17,48 | 17,420 | 0,06 | 0,34 |
| D11 | 20,83 | 20,766 | 0,064 | 0,31 |
| 8 | 3,86 | 3,772 | 0,0885 | 2,29 |
| 9 | 0,75 | 0,659 | 0,09119 | 12,16 |
| 10 | 0,72 | 0,630 | 0,08973 | 12,46 |
| 11 | 12,47 | 12,382 | 0,088 | 0,71 |
| 12 | 12,07 | 11,979 | 0,091 | 0,75 |
| 13 | 12,06 | 11,969 | 0,091 | 0,75 |
| 14 | 11,71 | 11,614 | 0,096 | 0,82 |

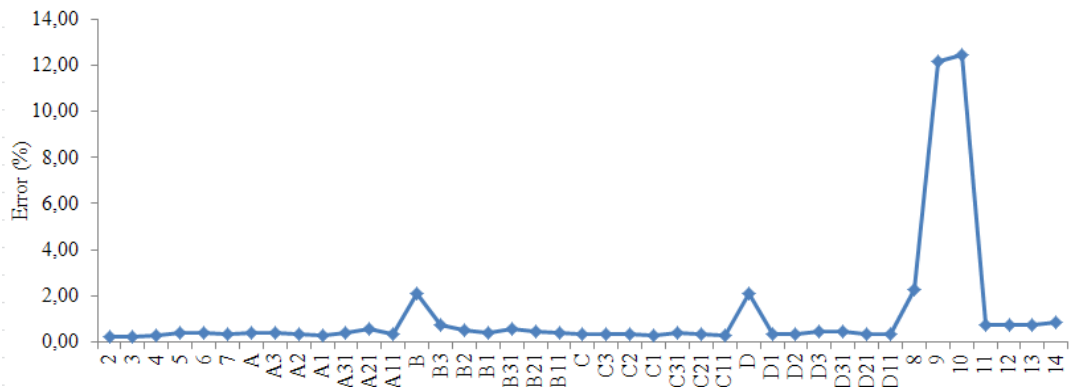


Figura 2. Gráfico de los errores porcentuales de las presiones para ocupación máxima.

ANEXO 19

TODAS LAS VARIANTES DE SOLUCIONES PARA LA BÚSQUEDA EXHAUSTIVA DEL CASO DE ESTUDIO

| Orden | Comb.(Bi) | Código(Oi) | IE(kW) | 6319 | 6318 | 6223 | 6222 | 6120 | 6119 | 6317 | 6316 | 6221 | 6220 | 6118 | 6117 |
|-------|-----------|------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 8 | 00000111 | 1,3117954 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 22 | 00010101 | 1,3693537 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 37 | 134 | 10000101 | 1,3702436 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 38 | 135 | 10000110 | 1,3709245 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 36 | 132 | 10000011 | 1,374413 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 12 | 38 | 00100101 | 1,3791984 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 13 | 39 | 00100110 | 1,3798793 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 11 | 36 | 00100011 | 1,3833675 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 23 | 00010110 | 1,38442 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | 20 | 00010011 | 1,3879086 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 14 | 00001101 | 1,4144161 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 15 | 00001110 | 1,4150971 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 2 | 12 | 00001011 | 1,4185861 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 42 | 146 | 10010001 | 1,4475019 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 43 | 147 | 10010010 | 1,4481817 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 17 | 50 | 00110001 | 1,456451 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 18 | 51 | 00110010 | 1,4571307 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 44 | 149 | 10010100 | 1,4572151 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 19 | 53 | 00110100 | 1,4661648 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 46 | 162 | 10100001 | 1,4719033 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 47 | 163 | 10100010 | 1,472583 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|----------|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 39 | 138 | 10001001 | 1,4769061 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 48 | 165 | 10100100 | 1,4824124 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 14 | 42 | 00101001 | 1,4863552 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 15 | 43 | 00101010 | 1,487035 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 41 | 141 | 10001100 | 1,4870981 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 8 | 26 | 00011001 | 1,4916768 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 9 | 27 | 00011010 | 1,4923567 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 40 | 139 | 10001010 | 1,4929305 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 16 | 45 | 00101100 | 1,4965478 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | 29 | 00011100 | 1,5016958 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 22 | 70 | 01000101 | 1,5199359 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 23 | 71 | 01000110 | 1,5206171 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 21 | 68 | 01000011 | 1,5241072 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 50 | 177 | 10110000 | 1,5633368 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 27 | 82 | 01010001 | 1,5831129 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 45 | 153 | 10011000 | 1,5837174 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 28 | 83 | 01010010 | 1,5837929 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 51 | 194 | 11000001 | 1,5843917 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 52 | 195 | 11000010 | 1,5850718 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 33 | 101 | 01100100 | 1,5881832 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 29 | 85 | 01010100 | 1,5931305 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 20 | 57 | 00111000 | 1,593159 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 31 | 98 | 01100001 | 1,5933363 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 32 | 99 | 01100010 | 1,5940163 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 53 | 197 | 11000100 | 1,5948984 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|----------|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 49 | 169 | 10101000 | 1,6102933 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 24 | 74 | 01001001 | 1,629329 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 25 | 75 | 01001010 | 1,630009 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 26 | 77 | 01001100 | 1,6401525 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 55 | 209 | 11010000 | 1,676191 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 35 | 113 | 01110000 | 1,6851273 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 56 | 225 | 11100000 | 1,6861172 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 54 | 201 | 11001000 | 1,7064356 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 34 | 105 | 01101000 | 1,7158713 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 30 | 89 | 01011000 | 1,7214339 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |

ANEXO 20

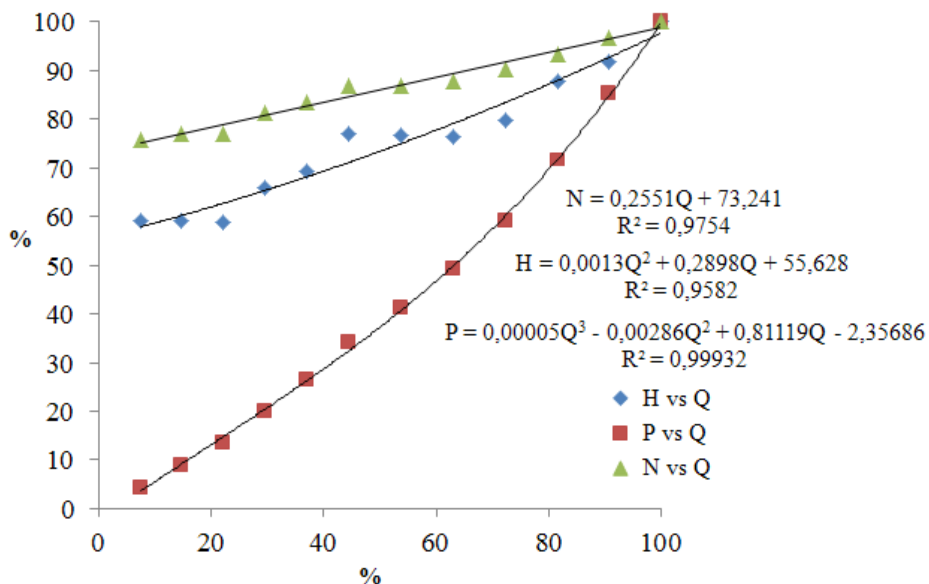
EXPRESIONES DE LA BOMBA CENTRÍFUGA Y DE LA RED HIDRÁULICA PARA LA OCUPACIÓN PATRÓN DEL CASO DE ESTUDIO


Figura 3.17. Expresiones de las leyes de proporcionalidad de la bomba centrífuga en valores porcentuales en correspondencia con la ocupación patrón.

Tabla 1. Expresiones de la bomba para la ocupación patrón de las habitaciones.

| Escalón | Q (m ³ /s) | H (m) | Ecuación de la Bomba |
|---------|-----------------------|-------|--|
| 6221 | 0 | 19,90 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 19,9029221$ |
| | 0,00379 | 16,99 | |
| | 0,00991 | 0 | |
| 6118 | 0 | 20,48 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 20,48355631$ |
| | 0,00384 | 17,49 | |
| | 0,01006 | 0 | |
| 6120 | 0 | 20,48 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 20,48355631$ |
| | 0,00384 | 17,49 | |
| | 0,01006 | 0 | |
| 6220 | 0 | 22,89 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 22,89454064$ |
| | 0,00407 | 19,54 | |
| | 0,01063 | 0 | |
| 6222 | 0 | 24,15 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 24,14777311$ |
| | 0,00418 | 20,61 | |
| | 0,01092 | 0 | |
| 6117 | 0 | 26,09 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 26,09553469$ |
| | 0,00434 | 22,28 | |
| | 0,01135 | 0 | |
| 6119 | 0 | 26,09 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 26,09553469$ |
| | 0,00434 | 22,28 | |
| | 0,01135 | 0 | |
| 6319 | 0 | 26,76 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 26,75978478$ |
| | 0,00439 | 22,84 | |
| | 0,01149 | 0 | |

| | | | |
|------|---------|-------|--|
| 6317 | 0 | 28,12 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 28,11608104$ |
| | 0,00451 | 24,00 | |
| | 0,01179 | 0 | |
| 6223 | 0 | 30,21 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 30,21196229$ |
| | 0,00467 | 25,79 | |
| | 0,01222 | 0 | |
| 6318 | 0 | 32,38 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 32,38317844$ |
| | 0,00484 | 27,64 | |
| | 0,01265 | 0 | |
| 6316 | 0 | 34,63 | $H = -202\,395,0075 \cdot Q^2 + 34,62972948$ |
| | 0,00500 | 29,56 | |
| | 0,01308 | 0 | |

Tabla 2. Expresiones de la Red Hidráulica para la ocupación patrón de las habitaciones.

| Escalón | Q (m ³ /s) | H (m) | Ecuaciones de la Red Hidráulica |
|---------|-----------------------|-------|---|
| 6221 | 0 | 15,15 | $H = 165\,097\,656,2500020 \cdot Q^2 + 3\,271,8750000 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00016 | 19,90 | |
| | 0,00032 | 33,10 | |
| 6118 | 0 | 15,15 | $H = 55\,844\,726,5625000 \cdot Q^2 - 3\,026,5625000 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00032 | 19,90 | |
| | 0,00064 | 36,09 | |
| 6120 | 0 | 15,15 | $H = 26\,727\,430,5555559 \cdot Q^2 - 3\,141,6666667 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00048 | 19,80 | |
| | 0,00096 | 36,77 | |
| 6220 | 0 | 15,15 | $H = 19\,112\,548,8281251 \cdot Q^2 - 1\,216,4062500 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00064 | 22,20 | |
| | 0,00128 | 44,91 | |
| 6222 | 0 | 15,15 | $H = 14\,408\,593,7500001 \cdot Q^2 - 1\,214,3750000 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,0008 | 23,40 | |
| | 0,0016 | 50,09 | |
| 6117 | 0 | 15,15 | $H = 11\,310\,221,3541667 \cdot Q^2 + 340,1041667 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00096 | 25,90 | |
| | 0,00192 | 57,50 | |
| 6119 | 0 | 15,15 | $H = 7\,693\,965,5172414 \cdot Q^2 + 256,0344828 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00116 | 25,80 | |
| | 0,00232 | 57,16 | |
| 6319 | 0 | 15,15 | $H = 6\,626\,027,2491349 \cdot Q^2 - 1\,254,0441176 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00136 | 25,70 | |
| | 0,00272 | 60,76 | |
| 6317 | 0 | 15,15 | $H = 5\,083\,620,9730440 \cdot Q^2 - 398,3974359 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00156 | 26,90 | |
| | 0,00312 | 63,39 | |
| 6223 | 0 | 15,15 | $H = 4\,610\,182,0764463 \cdot Q^2 + 96,3068182 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00176 | 29,60 | |
| | 0,00352 | 72,61 | |
| 6318 | 0 | 15,15 | $H = 4\,510\,041,3699204 \cdot Q^2 - 803,9667993 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00196 | 30,90 | |
| | 0,00372 | 74,57 | |
| 6316 | 0 | 15,15 | $H = 4\,020\,782,8712293 \cdot Q^2 - 96,9280389 \cdot Q + 15,1500000$ |
| | 0,00216 | 33,70 | |
| | 0,00392 | 76,56 | |

ANEXO 21

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO EN EL HOTEL BLAU COSTA VERDE

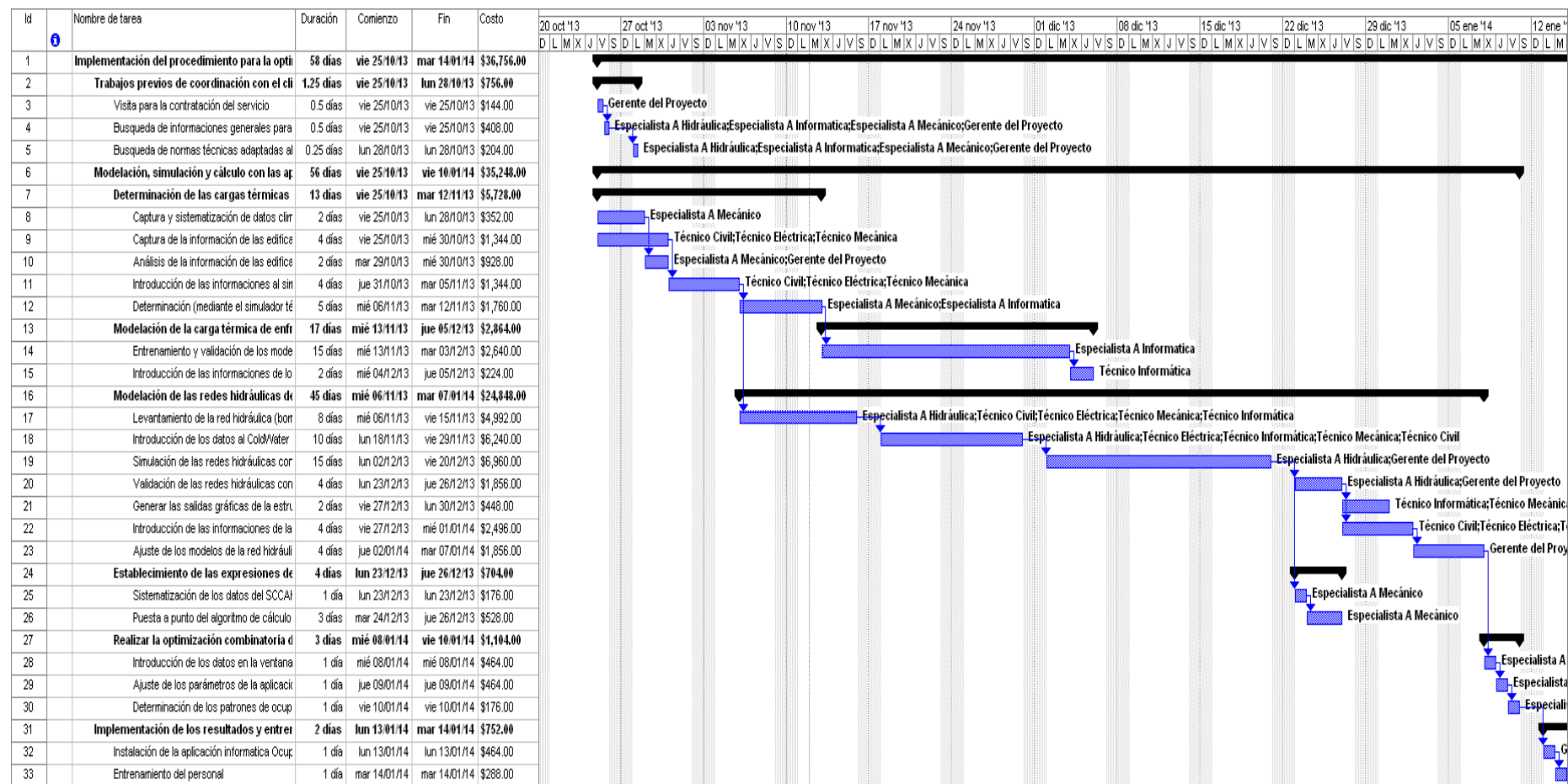


Figura 1. Descripción de los trabajos de ingeniería y la asignación de los recursos por tareas.

Tabla 1. Gastos específicos:

| Transporte, (distancia, Km).(2).(0,98\$/l)/(índice Km/l=7).(cantidad de viajes) | | | | CUC |
|--|-------------------|-----------------|----------------|----------------|
| | CUC/Viajes | Viajes | | |
| Diesel | 56,00 | 4 | 224,00 | |
| Sub-Total | | | | 224,00 |
| | | | | |
| Alimentación y Hospedaje | CUC/día | Cantidad | días | CUC |
| Hospedaje | 7,00 | 5 | 15 | 525,00 |
| Desayuno | 1,50 | 5 | 15 | 112,50 |
| Almuerzo | 4,00 | 5 | 15 | 300,00 |
| Comida | 4,00 | 5 | 15 | 300,00 |
| Sub-Total | 16,50 | 20 | 1237,50 | |
| | | | | |
| Total | | | | 2699,00 |

Tabla 2. Flujo de caja del proyecto: Implementación del procedimiento para la optimización de la operación del SCCAH del Hotel Blau Costa Verde.

Escenario 1: cuando se opera el SCCAH empleando el modelo termo-hidráulico, optimizando el sistema solo variando la ocupación.

| DESCRIPCIÓN | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | TOTAL |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|
| <u>Costos de operaciones del hotel en energía eléctrica</u> | | | | | | | |
| Costos sin inversión (2) M\$ | 334.490 | 334.490 | 334.490 | 334.490 | 334.490 | 334.490 | 2.006.940 |
| Costos con inversión (1) M\$ | 297.180 | 297.180 | 297.180 | 297.180 | 297.180 | 297.180 08.360 | 1.783.080 |
| Incremento de los Costos (1-2) M\$ | (26.130) | (26.130) | (26.130) | (26.130) | (26.130) | (26.130) | (223.860) |

| Resumen estado de resultado del proyecto, CUC\$x'000 | | | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| ESTADO DE RESULTADO | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | Total |
| Ingresos M\$ | 37.310 | 37.310 | 37.310 | 37.310 | 37.310 | 37.310 | 223.860 |
| Costo de Operación M\$ | 10.035 | 10.035 | 10.035 | 10.035 | 10.035 | 10.035 | 60.208 |
| Utilidad de Operaciones M\$ | 27.275 | 27.275 | 27.275 | 27.275 | 27.275 | 27.275 | 163.652 |
| Depreciación M\$ | 188 | 188 | 188 | 188 | | | 750 |
| Valor Residual M\$ | | | | | | | - |
| <u>Costos Financieros</u> M\$ | | | | | | | - |
| Utilidades Brutas M\$ | 27.088 | 27.088 | 27.088 | 27.088 | 27.088 | 27.088 | 162.902 |
| Reservas para contingencias (5 %) M\$ | 1.354 | 1.354 | 1.354 | 1.354 | 1.354 | 1.354 | 8.145 |
| Utilidades Imponibles M\$ | 25.733 | 25.733 | 25.733 | 25.733 | 25.733 | 25.733 | 154.757 |
| Impuestos | | | | | | | - |
| Sobre Utilidades M\$ | 9.007 | 9.007 | 9.007 | 9.007 | 9.007 | 9.007 | 54.165 |
| Utilidad Neta M\$ | 16.727 | 16.727 | 16.727 | 16.727 | 16.727 | 16.727 | 100.592 |

| UM:MCUC | | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | TOTAL |
|---|---------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------|--------|----------------|
| <u>Utilidad Neta del Proyecto</u> | M\$ | 16.727 | 16.727 | 16.727 | 16.727 | 16.727 | 16.727 | 100.592 |
| Más Depreciación | M\$ | 188 | 188 | 188 | 188 | - | - | 750 |
| Valor Residual | M\$ | | | | | | | - |
| Más Reservas para Contingencias | M\$ | 1.354 | 1.354 | 1.354 | 1.354 | 1.354 | 1.354 | 8.145 |
| Efectivo Neto | M\$ | 18.269 | 18.269 | 18.269 | 18.269 | 18.269 | 18.269 | 64.711 |
| Aumento o disminución capital de trabajo | M\$ | | | | | | | - |
| Inversiones | M\$ | 40.205 | | | | | | 40.205 |
| <u>Flujo de Caja Neto del Proyecto</u> | M\$ | (29.399) | 10.806 | 10.806 | 10.806 | 10.744 | 10.744 | 69.282 |
| <u>Flujo de Caja Acumulado</u> | M\$ | (21.936) | (3.668) | (14.601) | 32.869 | 51.076 | 69.282 | |
| - <u>Tasa Interna de Retorno,(TIR)</u> | 78.67% | 0,0% | 0,0% | 41.9% | 64,6% | 74,2% | 78,7% | |
| | <u>Tasa de Descuento</u> | <u>0,0%</u> | 5,0% | 10,0% | 15,0% | | | |
| <u>Valor Actualizado Neto, (VAN)</u> | | <u>\$69.282</u> | <u>\$54.340</u> | <u>\$42.941</u> | <u>\$24.118</u> | | | |
| <u>Periodo de Recuperación</u> | | 2 Años | 2 meses | | | | | |
| | | 0 | 0 | 2.40924 | 0 | 0 | 0 | |
| | | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |