



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO-METALÚRGICO
DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECÁNICA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero Eléctrico

Procedimiento para estimar y reducir el consumo de electricidad en un circuito secundario de agua fría en la climatización centralizada.

Autor: Miguel Angel Sánchez Pazos.



Tutor: M.Sc. Reineris Montero Laurencio.

Moa 2010

“Año 52 de la Revolución”



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Miguel Angel Sánchez Pazos, autor de este trabajo de diploma titulado: “Procedimiento para estimar y reducir el consumo de electricidad en un circuito secundario de agua fría en la climatización centralizada”, certifica su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

ISMM de Moa, 21 de junio del 2010

“Año 52 de la Revolución”

Miguel Angel Sánchez Pazos
Diplomante

M.Sc. Reineris Montero Laurencio
Tutor



Pensamientos:

"Invertir en conocimientos produce siempre los mejores beneficios".

Benjamín Franklin

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica:

La voluntad."

Albert Einstein



DEDICATORIA

Este trabajo que va a definir el curso de mi vida se lo dedico a las personas que se han consagrado más de 23 años a instruirme, guiarme, y darme todo el amor que se le puede dar a un hijo, A mis padres, Héctor Miguel Sánchez Rueda y Suset Antonia Pazos Guillén, por el amor profesado en toda mi vida.

Además de mi hermano Héctor José Sánchez Pazos, al resto de mi familia y amigos, por su ayuda incondicional bajo cualquier circunstancia.

A la memoria del Sr. José Pazos Pérez, principal inspirador de mis ideas.



AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por el amor y apoyo de siempre.

Agradecer especialmente al tutor Reineris Montero Laurencio por toda su ayuda y cooperación durante la realización de este trabajo.

A los trabajadores del ISMMM por su disposición ante el desarrollo de la presente investigación.

A todos los que de una forma u otra han formado parte de la realización de este trabajo y de mi vida profesional:

Muchas Gracias.



Resumen

Con los resultados de la simulación de la carga térmica de enfriamiento de una edificación, perteneciente a un hotel turístico, para un año promedio, se plantean las estrategias ocupacionales más racionales. Se determina la red neuronal artificial (RNA) que permite sustituir el simulador con las variables de entrada temperatura ambiente y las habitaciones días ocupadas (HDO). Mediante la predicción de los volúmenes de agua a transportar, a partir de la ecuación del calor, se establece el flujo de agua necesario para satisfacer las diferentes cargas parciales. A partir de la identificación del modelo de la bomba para el caso de estudio específico, se calcula la potencia activa necesaria para operar el sistema. Al unir los elementos anteriores se propone un procedimiento para la estimación del consumo de energía eléctrica en un Circuito Secundario de Agua Fría (CSAF). Para implementar los resultados se utilizaron los datos aportados por el simulador de carga térmica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California; aplicaciones desarrolladas en Matlab y el uso del Toolbox de identificación y el de RNA.



Summary

With the results of the simulation of the thermal load of cooling of a construction, belonging to a tourist hotel, for one year average, they think about the most rational occupational strategies. The net artificial neuronal is determined (RNA) that allows to substitute the pretender with the variables of entrance ambient temperature and the rooms occupied days (HDO). By means of the prediction of the volumes of water to transport, starting from the equation of the heat, the necessary flow of water settles down to satisfy the different partial loads. Starting from the identification of the pattern of the bomb for the case of specific study, the necessary active power is calculated to operate the system. When uniting the previous elements he/she intends a procedure for the estimate of the electric energy consumption in a Secondary Circuit of Cold Water (CSAF). to implement the results the data they were used contributed by the pretender of thermal load of the Institute of Engineering of the Autonomous University of Baja California; applications developed in Matlab and the use of the identification Toolbox and that of RNA.



Índice General

Carátula.....	0
Declaración de Autoridad.	1
Pensamiento.	2
Dedicatoria.	3
Agradecimiento.....	4
Resumen.....	5
Summary.....	6
Índice General.....	7
Introducción General.	8
Problema.....	11
Objeto de estudio.....	11
Campo de acción.	11
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos.....	11
Hipótesis.....	12
Tareas de la investigación.....	¡Error! Marcador no definido.
Capítulo 1. Marco teórico de la investigación.	¡Error! Marcador no definido.
1.1 Introducción.	¡Error! Marcador no definido.
1.2 Trabajos precedentes.....	¡Error! Marcador no definido.
1.3 Energía y Turismo.	20
1.4 Aspectos generales para la modelación de sistemas de fluidos para la climatización de zonas.....	24
1.5 Generalidades de los CSAF: estado actual.....	¡Error! Marcador no definido.
1.6 Carga térmica de edificios y su simulación.....	34
1.7 Propuesta de un esquema para el análisis de la eficiencia en los CSAF.....	37
1.8 Técnicas de Inteligencia Artificial.....	39
Capítulo 2. Materiales y métodos, modelación energética del objeto de estudio.	41
2.1 Introducción.	41
2.2. Instalación Experimental.	¡Error! Marcador no definido.
2.3 Técnica Empleada.....	48
2.3.1 Selección de las variables.....	50
2.4 Modelación térmica de la edificación.....	53
2.5 Modelo de carga térmica con ayuda de la RNA para valores diarios de HDO, temperatura ambiente máxima y temperatura ambiente mínima.....	58
2.5.1 Modelo estacionario anual con ayuda de la RNA para valores horarios de HDO, temperatura ambiente máxima y temperatura ambiente mínima.....	63
2.6 Balance de masa y energía en los CSAF, estimación del caudal de agua necesario.....	67
2.7 Modelo estadístico para estimar el consumo de energía del conjunto motor-bomba.....	68
Capítulo 3. Valoración técnico-económica y medioambiental.....	71
3.1 Introducción.....	71
3.2 Valoración técnica: Procedimiento para estimar y ahorrar energía en un CSAF.....	72
3.3 Valoración económica y medioambiental.....	75
Conclusiones.....	77
Recomendaciones.....	78
Bibliografía.....	79



Introducción general.

La energía posibilita y facilita toda la actividad humana, ella no significa nada si no se entrega lo que se necesita de ella: luz, frío, calor, fuerza, movimiento, transporte, comunicación, etc. Es el uso final donde se concreta el beneficio de la energía. Las necesidades del hombre no consisten en fuentes primarias de energía. No es carbón, petróleo, gas o uranio lo que requiere, sino la satisfacción de cuatro servicios energéticos básicos, en los que pueden agruparse todas sus necesidades energéticas: Calor / Frío, Iluminación, Potencia Mecánica y las Comunicaciones.

La actual crisis económica global tiene una incidencia significativa en todos los países. Uno de los renglones más afectados desde sus inicios ha sido el turismo. A finales del año 2009 existió una disminución de aproximadamente el 5 % a nivel mundial en esta actividad. El sector turístico concentra el 11,8 % de las inversiones y el 10,9 % de la fuerza de trabajo mundial. También es generalmente aceptado el hecho de que será el sector de mayor crecimiento en las dos primeras décadas del siglo XXI, a pesar de la crisis. *Torres Rodríguez, Holguín, 2008. [30].*

Los hoteles representan aproximadamente el 8% de las 1000 empresas más consumidoras de energía del país. En estas instalaciones se debe mejorar la racionalidad en el empleo de los energéticos, a pesar que el objetivo es brindar el servicio que desea el cliente. De esta forma, las instalaciones se utilizan según su constitución y las ofertas que incluyen. A partir de diagnósticos energéticos realizados en el sector turístico, 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%). *Montero Laurencio, III Convención, 2005. [23].*



Las estrategias para la racionalización energética deben centrarse en adaptar todos los consumos a las demandas reales. Es válido señalar que los costos energéticos constituyen la partida más elevada tras los gastos de personal y de alimentación.

El turismo en Cuba por ser un sector joven y dinámico, está obligado al uso de tecnologías que mejoren la eficiencia. Existen cuatro áreas fundamentales en las que se concentran las tecnologías en los hoteles: la climatización, la domótica, los servicios de alimentos y bebidas, los servicios telemáticos. Todos ellos 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. *Armas Valdez, Cienfuegos, 2008. [3].*

Para la climatización de hoteles se utilizan dos alternativas fundamentales: los aires de ventana o la climatización centralizada. Estos sistemas centralizados, se basan en la generación del fluido térmico a baja temperatura, el cual se transporta y distribuye a los locales a climatizar. Estos sistemas se dividen en: todo-aire, aire-agua y todo-agua. El sistema todo-agua es uno de los más utilizados en Cuba, conocido también como sistema de agua helada. A pesar de la diversificación de estas tecnologías todavía existen oportunidades para su uso más eficiente, basado en lo fundamental en el empleo de: los variadores de velocidad (VV), la acumulación térmica de hielo, 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, etc. Estas variantes no se explotan en todas sus potencialidades. *Montelier Hernández, Cienfuegos, 2008. [22].*



Un elemento representativo dentro de la Climatización Centralizada por Agua Helada (SCCAH) lo constituye el transporte del agua fría mediante los circuitos de bombeo. Estos representan aproximadamente el consumo del 10% de la energía eléctrica total. En la mayoría de las instalaciones con SCCAH se observa un régimen de explotación irracional. Ésto se debe en lo fundamental por no emplear los variadores de velocidad para lograr caudal variable adaptando el fluido a la demanda térmica real, por pérdidas de carácter térmico, la incidencia de factores ambientales, entre otros. Las bombas que garantizan la impulsión del agua operan los 365 días del año, las 24 horas del día, de aquí la importancia en mejorar su operación de conjunto con los demás elementos.

La climatización en espacios habitacionales en todos los ámbitos debe cumplir con un mínimo de requisitos de confort para sus ocupantes logrando aprovechar al máximo los recursos energéticos y considerando el mayor ahorro de energía manteniendo los estándares de confort. El complejo sistema electromecánico de los CSAF que garantiza la climatización tiene una dependencia directa de las características térmicas del edificio, su régimen de explotación y el clima de la región donde se desempeña el sistema. Por tanto, las generalidades de la presente investigación se centran en:



Problema

Insuficiente conocimiento de las potencialidades de ahorro en la impulsión de agua fría a flujo variable en hoteles con sistemas de climatización centralizada por agua helada.

Objeto de estudio

Circuitos Secundarios de Agua Fría de la Climatización Centralizada a flujo variable

Campo de acción

Eficiencia Energética

Objetivo general.

Proponer un procedimiento que permita predecir el consumo de energía eléctrica en un CSAF a caudal variable en la climatización centralizada de un hotel turístico a partir de las principales características termoenergéticas del sistema.

Objetivos específicos:

- Determinar el modelo matemático, basado en redes neuronales artificiales que permita estimar la carga térmica de un edificio en el hotel caso de estudio.
- Definir una estrategia ocupacional de las habitaciones de un edificio en un hotel turístico tomando como base los cálculos de carga térmica.
- Pronosticar el consumo de energía eléctrica de un CSAF para determinadas condiciones de la carga térmica.



Hipótesis

Si se realiza la modelación térmica de una edificación turística teniendo en cuenta el trabajo a caudal variable del CSAF que garantiza su climatización, entonces se pueden definir estrategias ocupacionales y pronosticar el consumo de energía eléctrica de este sistema.

Tareas de la investigación

- Análisis bibliográfico.
- Preparación de la data de la modelación térmica para la modelación basada en RNA.
- Determinar el modelo de carga térmica del edificio objeto de estudio mediante el empleo de las RNA.
- Preparar las herramientas necesarias en Matlab que permitan predecir el consumo de energía eléctrica de un CSAF a partir del modelo de carga térmica y de las ecuaciones de proporcionalidad de la bomba empleada.
- Realizar simulaciones de estados posibles del sistema a partir de situaciones reales de operación y estrategias de mejoras energéticas.
- Conformar el informe.



Capítulo I. Marco Teórico de la investigación.

1.1 Introducción

En este epígrafe se realiza un análisis bibliográfico de trabajos relacionados con el objeto de estudio y el tema de investigación. Aparece una valoración integral de los principales elementos que inciden en la eficiencia energética en el turismo en Cuba. Se abordan elementos inherentes a la modelación de los sistemas de impulsión de fluidos en climatización. Mediante un diagrama en bloques se especifican un conjunto de características que definen la estructura y la eficiencia energética en los CSAF. Se comentan la forma en que se obtuvieron los resultados de la simulación térmica del edificio caso de estudio, lo cual sirve de base a la investigación. Los aspectos de las RNA que permiten emplear esta herramienta para la modelación de sistemas complejos como es el caso de los CSAF son sintetizados.

1.2 Trabajos precedentes

El sector hotelero se caracteriza en general por su elevado, y en ocasiones poco racional, consumo energético. Ésto es así porque la principal función del hotel es dar el máximo confort a sus clientes y para ello, se necesita energía. A pesar de todo, existen muchas oportunidades de reducción del consumo, o lo que es lo mismo, de costos económicos, mediante la implantación y realización de mejoras tanto en la distribución como en la regulación.

Por características muy específicas de nuestra hermosa isla, ya se diga condiciones climatológicas, ubicación geográfica, amplia cultura, sorprendentes playas, encantadoras ciudades, amplio calor humano, etc., existe un flujo turístico que es por naturaleza estacional, a la inversa con el verano y las altas temperaturas, siendo para Cuba el mes de



mayor arribo de turistas el de diciembre y el de menor arribo junio. Creándose altos consumos de energía en meses donde la ocupación es baja como por ejemplo en verano.

Es por ello que en las instalaciones hoteleras, influye notoriamente en la reducción de los consumos energéticos la posibilidad de incluir mejoras tecnológicas en el equipamiento y sistemas. Las mayores potencialidades están en primer lugar en adaptar los consumos a la demanda en cada uno de los servicios y en particular en el flujo de agua fría para brindar el confort mínimo al huésped. Esta mejora se logra con la simple incorporación de variadores de velocidad en las bombas de los Circuitos Secundarios de Agua Fría (CSAF).

Algunos autores plantean que una instalación hotelera para que funcione eficientemente, desde el punto de vista energético debe garantizar menos de un 5% de sus costos totales para cubrir los gastos energéticos. *González García, Varadero, 1999. [10].*

En el mercado existe una tecnología de reciente aplicación mundial denominada Acumulación Térmica de Hielo (termoacumulación de frío por tanques de hielo) que puede desplazar por completo del horario pico el consumo de las enfriadoras las cuales representan el equipo de mayor demanda de los existentes. Un solo compresor en funcionamiento representa el consumo promedio de unos 50 kW. En nuestro país existe una sola experiencia en la explotación de esta tecnología de termoacumulación y se encuentra instalada desde el 18 de junio del 2003 en el *Hotel Iberostar Bella Costa* en Varadero. *Rodríguez Lozano, Varadero, 2006. [14].*

Se han realizado estudios que abordan el tema de los variadores de velocidad en la climatización centralizada. *Lozada Núñez, Universidad de Oriente, 2007. [15],* establece una metodología para el análisis del empleo de variadores de velocidad en sistemas de bombeo, pero sólo se relacionan las interacciones entre las características de la bomba, la red y el motor de inducción. A partir de las ecuaciones de proporcionalidad y las



ecuaciones del motor de inducción, estas leyes de afinidad tienen su análisis para sistemas de carga estática. A pesar de que se evalúa el comportamiento energético del accionamiento no se integra a este análisis las diferentes cargas parciales en las que pueden trabajar las zonas.

Los trabajos precedentes desarrollados en Cuba se centran en los climatizadores (chillers) sin considerar que las causas más importantes de los regímenes de explotación que pueden experimentar y se debe esencialmente a la termohidráulica de los Sistemas de Impulsión de Agua Fría y determinadas perturbaciones.

Estudios realizados en los hoteles “La Unión” y “Jagua” de la ciudad de Cienfuegos muestran que el consumo de potencia de los Sistemas Centralizados de Agua Fría tiene una dependencia mayor del clima que del estado ocupacional de la instalación. Ello se pone de manifiesto en la subordinación del consumo de potencia del chiller al valor de las Horas Grados de la ciudad, y no a la Habitación Día Ocupada, así como la variación de la temperatura ambiente.

Tomar ello en consideración durante la operación del chiller, redujo el consumo de potencia de estos equipos en más de un 15%. A lo largo del trabajo se demuestra la mayor influencia de la temperatura ambiental en el consumo eléctrico y se da la definición de “Habitación Día Ocupada Equivalente” la severidad de un clima puede ser caracterizado a partir de los conceptos de los “días – grado” y las “Horas- Grado”. Se comprobó también que el ciclo de trabajo de los chillers pasa de un 66% cuando trabaja a 8°C a un 85% cuando lo hace a 10°C en la temperatura de agua helada. Ésto lo realiza consumiendo una menor energía. *Molina González, Cienfuegos, 2008. [20].*

El consumo de energía en las instalaciones de climatización se puede reducir notablemente a partir de estrategias de control operacional que combinen los factores



climatológicos con otros factores como son la ocupación del hotel y el ajuste del set point del agua helada sin afectar las condiciones de confort. La temperatura exterior determina la presión de condensación de los sistemas enfriados por aire. El gasto de energía en las instalaciones hoteleras, especialmente la eléctrica, está influenciado sin lugar a dudas, por las condiciones climatológicas lo que es referido en. *González García, Varadero, 1999. [10]*.

Por estas razones un grupo de investigadores de Eficiencia Energética del Centro de Estudio de Combustión y Energía de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, tomaron como ejemplo el hotel “*Villa Lamar*” donde ejecutaron un trabajo referido a la influencia de la temperatura, la humedad relativa, el número de días lluviosos, la velocidad del viento y el número de habitaciones ocupadas por día, sobre el consumo de energía eléctrica de dicha instalación.

Por otra parte, en la referencia *BEECKMANS, 2003, [5]*, se concluye que las bombas de velocidad variable en las redes hidráulicas en la climatización, ofrecen un gran potencial de ahorro energético. Para esto es necesario optimizar la consigna. El procedimiento más seguro y fiable es hacerlo en la propia instalación durante la fase de puesta en marcha.

El método de Compensación y el método Balance proporcionan una técnica fácil y eficaz para equilibrar una red de distribución de agua, generando las mínimas pérdidas de carga posibles. Además señala que los costos de bombeo pueden reducirse entre un 15 % y un 25 %. Esto representa una fracción importante del costo global de explotación de una instalación de climatización, los costos de bombeo no son nada despreciables. No obstante, no aborda el carácter térmico de la red y habla de un modelo matemático, pero no expone las expresiones.



En el trabajo de *Montero Laurencio, Moa, 2004. [25]*, se realizó una evaluación mediante una metodología del comportamiento energético de los Circuitos Secundarios de Agua Fría (CSAF) exponiendo por separado parámetros del climatizador central, las redes hidráulicas, la carga térmica y del conjunto motor bomba, así como algunas variables climatológicas. Para este caso solo se establecieron modelos del conjunto motor-bomba mediante técnicas estadísticas y se proponen soluciones para la modificación de las condiciones de explotación sin el establecimiento de modelos matemáticos a partir de todos los aspectos analizados. Las soluciones planteadas son sobre la base del CSAF a caudal variable que es la tendencia que deberían seguir los hoteles en Cuba. Aparecen además un conjunto de expresiones que permiten evaluar el costo, caudal y energía adicional que ocasionan las principales deficiencias termoenergéticas en la red, carga térmica y el accionamiento de los CSAF. A pesar de estos resultados no se profundiza en el comportamiento del motor de inducción de conjunto con el sistema. . No se logra un procedimiento único para estos análisis.

El máximo consumo de energía de una habitación lo representa la climatización seguido por la iluminación y en ambos casos el consumo o no de la energía eléctrica depende del régimen de explotación a que es sometida, volumen de la habitación, la cantidad de turistas y el tiempo de estancia en ella, costumbres y hábitos de consumo de cada turista. *Cabrera Gorrín, Cienfuegos, 2006. [3]*.

Conociendo estas cuestiones en muchos hoteles se ha implementado la estrategia de trasladar la animación al horario de mayor demanda y pico del sistema electroenergético nacional, donde el precio de la energía casi se duplica, el objetivo es tratar de alejar a los clientes de los lugares de mayor consumo (habitación) y desplazar el consumo de forma general.



En trabajos precedentes se han obtenido modelos correlacionales de las variables climatológicas en correspondencia con el consumo energético de las enfriadoras de los SCCAH, pero solo dan una idea de esta influencia a través de expresiones lineales no debidamente validadas. *Montelíer Hernández, Cienfuegos, 2007, [21]*. A pesar que se analizan las variables climatológicas con respecto a la climatización, no se tiene en cuenta el trabajo de los CSAF y el análisis se realiza en un sistema a flujo constante.

El autor *Uribazo Arzuaga, Universidad de Oriente, 2007. [31]* mediante una identificación experimental se obtiene un modelo aproximado del sistema de Climatización Centralizado del Hotel Santiago, el modelo paramétrico obtenido es estructura ARMAX de segundo orden. Mediante el modelo se controla el número de cilindros de los compresores a partir del comportamiento de la temperatura de retorno del agua fría, la temperatura de envío y como variable perturbadora la temperatura ambiente. Las acciones de control se realizan sobre parámetros de las enfriadoras y no sobre el sistema de impulsión de agua fría. No se realiza una modelación térmica adecuada del edificio. Luego estos autores, en otro trabajo, proponen un sistema de control borroso del clima del mismo hotel, a través de las mismas variables y técnica de identificación estableciéndose las bases y las reglas para este tipo de control.

La gran mayoría de los hoteles cubanos son instalaciones con determinados tiempo de operación, esto hace que algunos CSAF en ocasiones se desajusten. En trabajos como los de *Rodríguez Lozano, Varadero, 2006. [14]*, mediante cálculos hidráulicos con las expresiones de Bernoulli demuestra que es insuficiente el caudal que garantice el trasiego correcto del agua por todas las ramas de la red. Se da solución a un problema de suministro de agua y el sistema analizado es a caudal constante. Algo similar sucedió en la villa del hotel Las Brisas en Guardalavaca, realizándose el cambio a caudal variable del sistema de impulsión. *Hernández Velásquez, Universidad de Oriente, 2005. [12]*. En



ambos casos no se consideraron las perturbaciones del clima y modelo térmico de la edificación.

Se presentan en el 2009 un conjunto de 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 de las variables que inciden en su operación eficiente. *Delgado Velásquez, Moa, 2009. [7]*. Se expone un análisis crítico sobre las insuficiencias presentes al no aplicar las normativas cubanas vigentes. *NC-45-1-3. y NC -220-1, 2,6-9, [26,27]*. Mediante un enfoque sistémico se proponen cambios para la automatización de tareas basados fundamentalmente en tener en cuenta no sólo los aspectos hidráulicos de la instalación si no además, el resultado del intercambio térmico del agua con la edificación. Aparecen críticas y soluciones aún no implementadas.

Mediante un enfoque multivariable de un CSAF en *Aguilar Bermúdez, 2009. [1]* se determinó el modelo paramétrico que mejor relaciona las Habitaciones Días Ocupadas (HDO), temperatura ambiente y caudal con respecto a las salidas, potencia activa del conjunto motor bomba, temperatura de retorno del agua y presión en el retorno. El modelo resultante fue una estructura de autorregresión con variable exógena ARX221. Los ajustes de las salidas fueron superiores al 80%. A partir de estas mismas variables se mejoró el modelo con una RNA Feed Foaard Back Propagation con 3 neuronas en la capa de entrada y 3 en la de salida, el ajuste mejoró considerablemente hasta un 98%.

Como se conoce la operatividad del caudal variable en los CSAF se logra con el empleo de los variadores de velocidad en *Sergio Montelier, Cienfuegos, 2007. [21]*, se muestra la implementación de una aplicación prototipo que enlaza el software supervisión de procesos EROS y el control a lazo cerrado de este sistema permitiendo la recolección de datos bajo distintas condiciones. Esta aplicación permite operar el sistema bajo cualquier parámetro admisible de la presión de descarga de la bomba y además se puede ajustar el



controlador PI que gobierna al variador desde la computadora. Se obtuvieron buenos resultados experimentales, pero aún no se integra a la operación del accionamiento, los aspectos térmicos del edificio ni los parámetros ambientales para lograr un modelo de la planta más acertado.

Un método que racionaliza el consumo de energía en una red de distribución de agua para la climatización resulta el de compensación y balance. Un estudio basado en este método logra las mínimas pérdidas de cargas posibles en un sistema de caudal variable. El estudio 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 cada ramal en función de las mediciones preliminares realizadas. Estos modelos no fueron divulgados y no se tienen en cuenta los aspectos térmicos del sistema. *BEECKMANS, 2003 [5]*. Se obtienen reducciones del consumo energético entre el 15 y 20%, pero la instrumentación empleada para poder mantener estas condiciones implican una inversión considerable no siempre posible.

A pesar que se han realizado varios trabajos, relacionados con el objeto de estudio son insuficientes los resultados, se necesita una mejor estimación del consumo de electricidad teniendo en cuenta las principales variables incidentes.

1.3 Energía y turismo.

A pesar de la crisis energética y económica global se continúa apostando por el desarrollo del turismo en nuestro país como uno de los principales renglones de la economía. Se han establecido un conjunto de estrategias para incrementar la actividad tales como, la promoción de empresas mixtas para construcción o reconstrucción de toda una variedad de instalaciones turísticas, renovación de los productos hoteleros por valor de 170 millones de CUC en más de 200 instalaciones, creación de los hoteles Encanto ubicados en edificios antiguos, inversión de 150 millones de de CUC en instalaciones extrahoteleras,



entre otras acciones. *Discurso, MINTUR, Habana, 2007, [24]*. Todos estos cambios obligan a un incremento del consumo de portadores energéticos por lo que se necesita una sinergia entre los diseños, el uso de las tecnologías, la satisfacción del cliente, y un incremento de las ventas al menor costo posible.

El turismo es una rama que aporta recursos financieros importantes, pero que requiere de recursos tecnológicos competitivos y de un fuerte trabajo de investigación más desarrollo en función de que el producto ofertado compita en un mercado internacional. La temática energética no está ajena a la competitividad en el turismo, se plantea que una gestión tecnológica para aumentar la efectividad del uso de la energía reviste una gran importancia. *Montero Laurencio, Moa, 2008. [24]*.

Todas las intenciones de incrementar la actividad turística implicarán la demanda de mucho más energía y por lo tanto, un nivel de compromiso en crear infraestructuras o rehabilitar otras en las que el componente energético debe de prevalecer como elemento que proporciona a cualquier entidad la disminución de los costos de operación.

Dentro de las estrategias de la eficiencia energética a nivel de país que guardan estrecha relación con el desempeño energético del turismo se encuentran. *M. d. I. I. Habana, Habana, 2008. [16]*:

- Modificación de la Tarifa Eléctrica en el Sector Estatal.
- Proyectos de automatización en la industria y el sector comercial.
- Instalación de bancos de capacitores en clientes con bajo factor de potencia
- Cambio de motores ineficientes.
- Uso eficiente de la climatización, producción de calor y refrigeración.
- Mejora del aislamiento térmico en las edificaciones y en la industria.
- Aplicación de la NC 220 en las nuevas edificaciones de manera obligatoria.
- Certificación de la eficiencia energética de los nuevos proyectos durante el proceso inversionista.



En los hoteles y principalmente los que prestan servicio al turismo internacional existe una gestión energética responsable en la cual incide significativamente los Servicios Técnicos (SS.TT) y en particular las acciones relacionadas con el control de los portadores energéticos. A pesar de este control que se realiza diario, en las cadenas hoteleras de Cuba los energéticos sobrepasan en varias ocasiones el 10% de los costos totales. Existen irregularidades que se presentan desde los proyectos de inversión hasta la puesta en explotación. No siempre se tienen en cuenta el empleo de tecnologías eficientes.

Otro elemento que aporta sustancialmente a la eficiencia energética es la automatización de los procesos. En el caso específico del turismo, generalmente se automatizan los hoteles de 4 y 5 estrellas que tienen mayor complejidad operacional. No obstante dentro de los tres niveles por los que pasa la automática, el estado medio de hoteles estudiados indica un primer nivel. Es decir, no se cumplen en su totalidad las funciones correspondientes. Las funciones que se realizan parcialmente son: La emisión instantánea de informaciones estadísticas, las operaciones remotas y los registros automáticos de los consumos. De forma general si se cumple: la emisión de información necesaria para que el operador proceda en consecuencia y la supervisión cíclica automática y sobre límites permisibles. *Marrero Ramírez, Moa, 2000, [18].*

A pesar de que en el 2008 los principales indicadores económicos reflejaron un crecimiento del 13,5 % en relación al 2007, las utilidades un 16,7% y los aportes a la economía nacional un 16,3%, aún existen posibilidades de incrementar estos indicadores. Para este incremento se hace necesario trabajar en los problemas que persisten, dentro ellos se señalan las dificultades con los sistemas de climatización centralizada. *Discurso del MINTUR, Habana, 2008. [9].*

La no existencia de un indicador representativo del consumo de energía eléctrica que permita verificar los cambios de la eficiencia energética en el turismo, obliga a seguir trabajando en este sentido. Se ha mencionado y demostrado en varios trabajos que el



indicador energía eléctrica/ habitaciones día ocupadas (kWh/HDO) no tiene relación lineal entre sus componentes. *Montero Laurencio, Cienfuegos, 2005, [23]*.

Un elemento que enfatiza el párrafo anterior es que, a pesar de brindar un mismo servicio las diferentes cadenas hoteleras del país se rigen por indicadores de kWh/HDO distintos. *Cabrera Gorrín, Habana, 2006. [6]*. En la tabla se pueden observar estas diferencias y otros indicadores.

Cadena Hotelera	kWh/HDO	m ³ /HDO	Diesel Lts/HDO	GLP Lts/HDO
Gran Caribe S.A.	14-30	0.8-1	0.65-0.7	1.9
Horizontes S.A.	35-40	0.8-1	2.5	1.9-2
Gaviota S.A.	35-40	0.8-1	2-3.5	1.9-2
Cubanacan S.A.	30-60	0.8-1	--	1.5-2
Islazul	27-60	0.8-1	2-2.5	1.5-2

Tabla. 1 Indicadores energéticos y del consumo de agua en hoteles cubanos

Las temporadas turísticas representan una de las informaciones más importantes para enmarcar los regímenes de explotación de los hoteles. A continuación se reflejan los períodos en que se enmarcan las temporadas, los cuales inciden en el comportamiento del consumo de los portadores energéticos:

- Temporada alta: del 8 de enero al 6 de abril y del 17 de diciembre al 7 de enero.
- Temporada media: del 16 de abril al 31 de mayo y del 1 de agosto al 16 de diciembre.
- Temporada baja: del 7 al 15 de abril y del 1 de junio al 30 de julio.



1.4 Aspectos generales para la modelación de sistemas de impulsión de fluidos para la climatización de zonas.

La modelación y simulación de los sistemas de impulsión de agua se tienen menos en cuenta que las que se realizan entorno a regímenes y parámetros de las enfriadoras. Por lo general los resultados de las investigaciones se centran en los análisis termodinámicos en relación a mejorar la eficiencia del ciclo de compresión del gas refrigerante justificado por la potencia instalada en estos equipos.

Esto ha permitido establecer parámetros de operación adaptados a las condiciones de operación a cargas parciales, ya sea en sistemas centralizados todo agua, todo aire o de agua -aire.

Es por esto, que existen grandes potencialidades para racionalizar el consumo de energía eléctrica en los CSAF estableciendo una sinergia entre, las redes hidráulicas, los espacios térmicos, las bombas y los motores mediante un trabajo a flujo variable. A partir de la mecanización puesta a punto del sistema y la integración de los parámetros ambientales, el régimen ocupacional y el bioclima de la edificación, se puede establecer un procedimiento que disminuya el consumo de energía eléctrica manteniendo el confort.

Hasta el momento la tendencia en el análisis de los sistemas de impulsión de agua para la climatización se centran más en el aspecto hidráulico y menos en la parte térmica. Sin embargo la edificación a climatizar constituye un intercambiador de calor de gran complejidad y muy difícil de modelar a través de las ecuaciones de la física. Conocer mejor estos sistemas permitiría proponer mejoras sustantivas.

En la Fig. 1 se muestra como se relacionan los distintos modelos que componentes de la climatización. Las líneas puntuales muestran los senderos de la interacción de control. Los límites de la capacidad y las características del sistema, en la forma de un perfil del



control, afectan la carga del espacio acondicionado y la temperatura del aire. Además los límites de la capacidad y las características de control de la planta central pueden provocar variaciones en la eficiencia del sistema secundario, lo cual a su vez afecta las cargas.

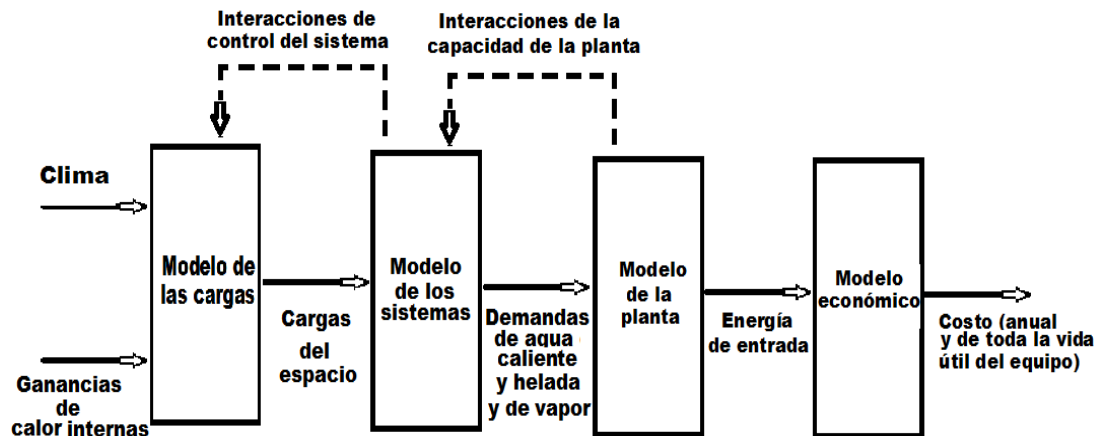


Figura (1) Diagrama de flujo para la simulación del edificio, de sistemas secundarios, de los sistemas primarios y de la economía.

El modelo económico que se muestra en la figura, calcula los costos de la energía con base en el consumo de energía computado. Tal modelo, que puede o no formar parte del programa de análisis energético de edificio, incluye no sólo la estructura de las tarifas diarias y otras sofisticaciones, sino también la suma de los resultados para estimar los costos mensuales y anuales del consumo de energía. *Montero Laurencio, Moa, 2004. [25].*

En el caso de los edificios en etapa de diseño, los modelos de simulación generalmente sólo son útiles para comparar alternativas y tendencias pronosticadas, ya que los factores desconocidos como el clima del futuro, y los parámetros difíciles de predecir con precisión, como la tasa de infiltración, generalmente impiden predecir los costos de la energía. En cambio, en los edificios que ya están en operación si es posible calibrar el modelo de simulación para mejorar significativamente su precisión.

Después de ejecutadas las inversiones, los sistemas mecánicos de la climatización centralizada deben quedar calibrados. No pasa mucho tiempo en el que se muestran



irregularidades principalmente el desempeño de las redes hidráulicas en su conjunto y en otros aspectos de naturaleza térmica. Muchas decisiones se toman al calor del proceso inversionista y es cuando los cálculos ingenieriles dejan de ser exactos. Adicionalmente la dinámica de explotación va marcando las regularidades de los sistemas.

En los últimos años la variante con mayor impacto energético asociada al trabajo de los CSAF resulta el empleo de variadores de velocidad. Muchos programas de estimación de ahorros mediante el uso de esta técnica, suministrados por los fabricantes de sistemas de climatización, indican las posibilidades de ahorro de electricidad entre un 20 y 50%. Este porcentaje está en dependencia de las características de ocupación de la carga térmica y la relación existente entre las condiciones de diseño interior y la exterior.

Asociado al trabajo de los VV se encuentran los controles que lo gobiernan, estos controles asimilan los modelos de la planta y las regulaciones de los algoritmos, pero en ocasiones es difícil estudiar suficientemente los sistemas para calibrarlos en función de una repuesta rápida y energéticamente validada como la mejor. Con la experiencia acumulada estos controles no sólo imponen un caudal en función de la variable controlada si no que además pueden tener incorporados procedimientos de diagnostico de la funcionalidad de las instalaciones.

A pesar de que los VV se comercializan con los filtros, cableado y otros dispositivos para la instalación el accionamiento genera armónicos en la onda de corriente y de tensión que pueden dañar a otros equipos que forman parte del sistema eléctrico en donde estas deformaciones obligan a vigilar estos parámetros. Entre mejor sea la energía que consumen las bombas mejores serán sus prestaciones. Una mejor calidad de la energía permite una operación y control de los motores más eficiente y de las restantes cargas asociadas.



Para entregarle toda la energía al fluido el elemento clave es el motor eléctrico, este motor como máquina compleja debe de adaptarse a las condiciones de explotación continua. No obstante, la eficiencia promedio que se presenta en ellos es de alrededor del 85 %. La existencia en el mercado de motores de alta eficiencia permite incorporar estos dispositivos en los CSAF mejorando su desempeño en un 5%.

Un elemento importante lo constituyen las redes hidráulicas. Hay que señalar tres aspectos de las mismas, su configuración, el material de fabricación y el aislamiento térmico. La configuración en malla es la que brinda el buen desempeño de la red, el no control de este aspecto puede provocar pérdidas hasta de un 20% de la energía eléctrica. Se debe realizar primero una elección del espesor más económico además de los materiales que recubren el aislamiento para mejorar la emisividad y la absorptividad de las superficies. Menos ganancia térmica a través de las redes significa menos trabajo de compresión y de bombeo. Aún existen instalaciones hoteleras en Cuba cuyas redes son de tuberías metálicas, las cuales pueden ser sustituidas por las plásticas o de PVC con la posibilidad de ahorrar la energía eléctrica mediante la disminución de la fricción del fluido.

Un aspecto que casi no se tiene en cuenta son las estrategias ocupacionales. Se ha planteado la variante de ocupación de los hoteles en función de las cargas térmicas de cada local. Dicho aspecto no siempre funciona, debido a que todos los hoteles no tienen las mismas características constructivas y esto hace que la configuración de la red hidráulica también influya notoriamente en la energética de la instalación. Esta estrategia de ocupación no se ha evaluado en sistemas a caudal variable asociando la energía al accionamiento del CSAF.



1.5 Generalidades de los CSAF: estado actual.

El sistema de climatización es el encargado de controlar las variables que definen el ambiente térmico: temperatura seca, humedad relativa, velocidad del aire y calidad del aire interior. La climatización en los hoteles se realiza por zonas independientes que se pueden clasificar en: zonas individuales como habitaciones y las tiendas, y zonas comunes como: hall, salones, salas de conferencia, cafetería, comedores y gimnasios. El sistema de gestión centralizado de las instalaciones térmicas está formado por un conjunto de equipos de control unitarios que realizan su labor directamente sobre los equipos que controlan. Están comunicados con el puesto central de control, lo que permite gobernar las instalaciones y recopilar datos para mejorar la eficacia del sistema, aunque no siempre sucede así.

Aproximadamente el 95% de los hoteles en Cuba que cuentan con SCCAH, el flujo de agua fría es constante. Esto implica un uso innecesario de energía eléctrica. El cambio a realizar para obtener un flujo variable representa una inversión con amortización inferior a los dos años, con la posibilidad de disminuir el consumo de energía eléctrica hasta en un 50%. *Aguirre, C, Habana. 2002. [2].*

El clima es uno de los aspectos de importancia que se debe tener en cuenta para el análisis del consumo de energía eléctrica en los países del trópico. En la gran mayoría de los casos no se integran las condiciones climatológicas a la operación tecnológica de los hoteles. En nuestro país, los meses de julio y agosto son los de mayor calor y meses como mayo, junio, septiembre y octubre, la temperatura promedio son inferiores debido al efecto de incremento de la lluvia. Con estas lluvias ocurre un descenso de la temperatura exterior. *Montelíer Hernández, Cienfuegos. 2008, [22].* Lo anterior indica la importancia de conocer la climatología de cada región y su interrelación con el uso de los portadores energéticos y el funcionamiento de la climatización.



A pesar de que están normadas un conjunto de características sobre las cuales se deben diseñar y explotar las instalaciones turísticas no siempre los diseños corresponden a enfoques energéticos. Esto provoca en la etapa de post - inversión consumos superiores a las marcas de calidad establecidas por las cadenas hoteleras aumentando de esta forma los costos de operación. *NC-45-1-3. Habana, [26].*

Además los procesos termohidráulicos de la impulsión del agua en los SCCAH son complejos, poseen severas no linealidades y variabilidad con el tiempo. La obtención de modelos a partir de las leyes de la física sería tremendamente complicado. Esto obliga a utilizar herramientas que faciliten la modelación y evaluación del sistema donde se inserta de manera adecuada el empleo de las técnicas de Inteligencia Artificial. *Uribazo Arzuaga, Universidad de Oriente, 2007. [31].*

En toda la etapa inversionista de los últimos 15 años en Cuba, ha prevalecido el criterio de utilizar los SCCAH en la construcción de hoteles independientemente del estilo constructivo. Esto se debe a la eficiencia que ha alcanzado esta tecnología de unos 0,5 kW/tn y las posibilidades de recuperación de calor para el ACS, en el proceso de condensación del gas refrigerante. *ASHRAE, EE.UU, 2001, [4].*

El sistema consiste en una unidad central, compuesta por cuatro elementos principales que son: el evaporador, el condensador, el elemento expansivo o válvula de expansión, y el compresor. La unidad absorbe el calor generado por el edificio por medio del evaporador, que es un intercambiador de calor donde se enfría el agua que luego es distribuida por medio de tuberías a las zonas con temperaturas de envío y retorno generalmente de 7°C y 13°C respectivamente. *Improve Chiller, EUA, 2004. [13].*

Como sustancias de trabajo se utilizan, el refrigerante primario el R22 y como secundario el agua. Las propiedades de estas sustancias aparecen bien descritas en la literatura. La impulsión del agua fría hacia las enfriadoras y hacia la carga térmica (fan-coils) se logra a



través del Circuito Primario de Agua Fría (CPAF) y el Circuito Secundario de Agua Fría (CSAF) respectivamente. Ver anexo 1 par mayor comprensión del sistema de climatización centralizada.

La funcionalidad de los circuitos de agua fría es la misma independientemente de que se regule el caudal a través de válvulas de estrangulamiento o con variadores de velocidad. Este flujo debe estar en correspondencia con la potencia de enfriamiento de cada equipo en particular y con las características de las redes hidráulicas que se distribuyen por todo el edificio. No es común apreciar el empleo de variadores de velocidad en el CPAF, pero existen referencias que divulgan la eficiencia de emplear esta técnica. *Peter Sabeff, EE.UU., 2001. [29]*. El caudal variable se emplea cuando la carga térmica es muy cambiante y la potencia de enfriamiento es muy grande. A pesar de que las cargas térmicas de enfriamiento por lo general se comportan de esta forma, en los hoteles cubanos no se ha generalizado el uso de los variadores de velocidad en los CSAF.

Lo común es encontrar que los SCCAH trabajen a flujo constante y con bombas en el CPAF y en el CSAF debido a la operatividad que se logra con este esquema. La ventaja de los dos lazos, es que las bombas secundarias pueden circular el agua por el resto del sistema y sin restricciones de presión de flujo mínimo, por la estabilidad que produce el lazo primario debido al desacople con el secundario.

A continuación se relacionan unas de las principales desventajas de los sistemas a flujo constante existentes en los CSAF: *Pérez Ajo, Cienfuegos, 2002. [28]*.

- Para demandas inferiores a la máxima no es necesario usar todo el volumen de agua disponible, sin embargo, este sistema no lo tiene en cuenta, perdiendo una cantidad considerable de energía con el paso del agua constantemente por las tuberías.
- La unidad enfriadora (chillers) deberán enfriar toda el agua, aunque la demanda no lo exija así.



- Los dispositivos del sistema, bombas, válvulas, etc., trabajan continuamente a máxima capacidad sufriendo un desgaste innecesario.
- Los costos de mantenimiento y reposición aumentan con el trabajo excesivo.
- Para niveles de ocupación de las instalaciones menores a los máximos, el sistema está obligado a operarse como en el caso de máxima ocupación para no deteriorar el confort, lo que ocasiona elevados gastos sin un respaldo en los ingresos, bajando hasta niveles insostenibles, la rentabilidad de la instalación.

La reducción del consumo de energía eléctrica mediante la regulación de flujo de agua hacia el evaporador y hacia el retiro de calor de las zonas se ha logrado, pero aún son escasas las aplicaciones de este método. La tendencia actual para el mejoramiento de la eficiencia en la impulsión de agua fría de forma general está en la sustitución de caudal constante a caudal variable. De esta forma se consigue un consumo de energía racional en las bombas y en las enfriadoras al bombearse solamente la cantidad de agua necesaria para cubrir la carga térmica instantánea. Esto significa un cambio de un sistema con volumen variable y velocidad constante a un sistema con volumen variable y velocidad variable. *Guopeng Liu, EE.UU. 2008 [11].*

En el caso de los CSAF se presentan bombas que trabajan de forma individual para cada zona habitacional o bombas que trabajan en paralelo para toda la infraestructura hotelera distribuidas en grandes extensiones de terreno. Lograr la eficiencia en estos sistemas por cualquier vía representa no sólo menor consumo de electricidad en el accionamiento sino también menos trabajo de compresión al tener que enfriar menos el agua de retorno. Existen investigaciones que han estimado el consumo de energía del bombeo referida al trabajo de compresión y el costo asociado, *Marrero Ramírez, Moa, 200. [19]*, indicando valores de 0.15 kWh/Ton y 0,39 \$/Ton.día. 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 de la bomba.



Normalmente las bombas se calculan para una potencia que está entre un 15% y un 25% por encima de la necesaria para prevenir cambios en las instalaciones. Pero al emplear variadores de velocidad se produce un ahorro adicional debido a que no son necesarias válvulas de mariposa, arrancadores suaves, bancos de condensadores para elevar el factor de potencia y protecciones adicionales. El variador de velocidad asume estas funciones y presenta otras ventajas y es que los variadores de velocidad tienen incorporados un controlador PI diseñado especialmente para estos usos, lo que elimina la necesidad de instalar equipos adicionales para el control de la operación. *Pérez Ajo, Cienfuegos, 2002. [28].*

Debido a que el flujo es variable en el secundario, puede mantenerse la mínima presión necesaria para reducir el ruido en el sistema y mejorar la eficiencia. El set point 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 un 33% aunque hay otros autores que refieren un rango 12 - 32%. *Vilaragut Llanes, Habana, 2008. [32].*

Las redes de conductos y tuberías constituyen una parte importante del diseño de un sistema de climatización. Los demás componentes del sistema generalmente se clasifican en cinco grupos: manipuladores o administradores de aire y ventiladores, fuentes de calor, dispositivos de refrigeración o enfriamiento, bombas y los controles e instrumentación.

El equipamiento que incide directamente en el confort de las edificaciones es el accionamiento encargado de la impulsión del agua fría. Independientemente del tipo de flujo que experimentan los CSAF (constante o variable), existen componentes comunes cuyas interrelaciones definen la eficiencia operativa.

En el diagrama de bloques de la figura 2 se presentan cada uno de esos elementos. Mediante su análisis individual se facilita el estudio de todo el sistema y se pueden determinar mejor la dependencia entre los parámetros.

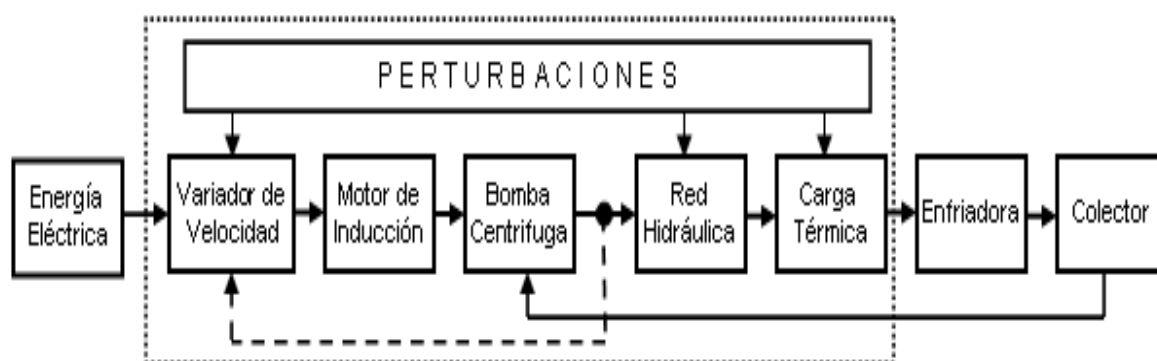


Fig. 2 Diagrama en bloques del bombeo a flujo variable empleado en los CSAF.

Es de vital importancia tener en cuenta las perturbaciones que influyen sobre los diferentes elementos del sistema, de manera individual y de manera sistémica. Estas perturbaciones la constituyen en el caso del motor y la bomba la dinámica de la carga, la calidad de la energía eléctrica y las propiedades físicas del fluido. En la red hidráulica y en la carga térmica inciden, el régimen de explotación de las zonas, el comportamiento del clima y la bioclimática del edificio. Estos elementos generan calor y ganancias adicionales en las zonas e influyen en el aislamiento térmico de las tuberías.

Esta variable de referencia es la presión de descarga de la bomba cuyo valor debe permitir vencer como mínimo la altura geométrica del sistema más las diferentes impedancias hidráulicas de los estados cambiantes de la red. Los (VV) cuentan con algoritmos de control vectorial para motores de inducción que cada vez incorporan nuevas y mejores funciones.

El control de los CSAF a flujo variable generalmente se realiza con los parámetros de fábrica del lazo de control incorporado al VV. La mayoría de los sistemas de climatización responden de una manera relativamente lenta a los cambios en la salida del controlador,



así que los sistemas PID pueden mejorar su control. Aún cuando muchos controladores electrónicos pueden funcionar en el modo PID los buenos sistemas de control para la climatización generalmente no requieren de la parte derivativa. *Montelier Hernández, Cienfuegos, 2007, [21].*

En el caso del motor, se utilizan los de inducción de características probadas para el trabajo conjunto con los (VV). No obstante los sistemas que no cuentan con (VV), se pueden analizar estudiando los demás elementos de la figura. 2. El motor es el encargado de mover la bomba para garantizar el caudal que demande la carga térmica. Estos sistemas son cerrados, en donde el agua de impulsión es de aproximadamente 7°C. El agua retorna entre 10 y 15 °C después de la transferencia de calor por convención forzada en las zonas cuando el sistema se encuentra en trabajo continuo.

Cuando el sistema está en estado de reposo y se enciende de forma escalonada toda la zona, el agua de retorno para las condiciones atmosféricas de Cuba puede llegar a alcanzar 3°C y 4°C menos que la temperatura ambiente. Esto se debe a la inercia térmica del edificio. Al incorporar cargas de enfriamiento los cambios de temperatura observables en el retorno del sistema se aprecian entre los 3 y 6 minutos en dependencia de la complejidad de la red hidráulica, aunque puede ser de tiempos menores en función del controlador que utilice el VV, en esencia la capacidad de conmutación y modulación PWM. *Aguilar Bermúdez, Moa, 2009. [1]*

1.6 Carga térmica de edificios y su simulación.

En todos los proyectos de diseño para determinar la carga térmica se tienen en cuenta gran cantidad de parámetros. El no respetar los valores de ciertas magnitudes incide notablemente en que se sobredimensionen el equipamiento y el valor de la inversión. Para obtener las condiciones deseadas en una instalación de climatización se deben de estudiar



los factores que influyen en éstas, además de los métodos para la selección de dichas condiciones ya sean exteriores o interiores. La simulación térmica de edificios es una valiosa y poderosa herramienta que permite tomar decisiones, evaluar alternativas técnicas y económicamente. Además permite predecir resultados de forma rápida con posibles cambios en los sistemas constructivos y combinaciones de eficiencia energética, planificación y administración de la energía y la demanda.

En la actualidad el uso de los programas automatizados para la simulación del comportamiento térmico de las edificaciones no es una novedad, sin embargo, en Cuba su aplicación se puede considerar incipiente. Su uso en el diseño de instalaciones hoteleras tiene lugar mayormente en las empresas de proyectos dedicadas al diseño de este tipo de programa con un gran componente arquitectónico y electromecánico. *Montelier Hernández, Cienfuegos, 2008. [22].*

Existen programas para la simulación térmica de edificaciones, tales como el TRNSYS, el DOE-2, el ENERGY PLUS, el COOL PACK, etc. Los precios de estos paquetes oscilan entre 3000,00 USD y 10 000, USD sin contar el pago por importaciones, entrenamientos y las actualizaciones. Estos paquetes posibilitan simular el comportamiento térmico del edificio y determinar la carga térmica de enfriamiento. Sin embargo, en algunos casos sólo tienen incorporada la información meteorológica de algunas localidades, y en general no permiten el cambio de algunas variables que influyen en el cálculo de cargas térmicas. *Montelier Hernández, Cienfuegos. 2008. [22]*

Los resultados de la carga térmica que se tomaron como base para esta tesis fueron del simulador desarrollado por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Este simulador presenta las características y potencialidades siguientes:

- Brinda las horas-grado en días representativos de una temporada.
- Permite determinar la facturación mensual y anual debida a la climatización.



- Tiene la flexibilidad de que el usuario lo adapte a las necesidades de su región, país o características constructivas sin demérito de la potencia del cálculo.
- Los resultados de salida en comparación con simuladores comerciales, tales como el TRNSYS y el DOE-2 no difieren en más de un 5%.
- Realiza todas las corridas pertinentes variando los datos que se quieran y obteniendo diferentes comportamientos de las cargas de enfriamiento.

En el trabajo de *Cabrera Gorrín, Habana, 2006. [6]*, se muestra un rango en el que pueden variar la carga térmica acumulada de acuerdo a decisiones de diseño y decisiones económicas. Además se clasifican en dependencia a la contribución en el ahorro energético de una instalación hotelera:

Variables de diseño que influyen en la carga de climatización:

- Variables que dependen de decisiones de diseño: Orientación, dimensiones de ventanas, tipología, desplazamientos proporción y ubicación de ventanas forma de cubierta y color exterior de cubierta.
- Variables que dependen de decisiones económicas: Materiales de pared, materiales de cubierta, materiales de ventanas y elementos de protección.

La mayor parte de las variables de diseño relacionadas dependen de decisiones de diseño, es decir, resultan de la acción creadora del proyectista o arquitecto. Otras, sin embargo, son el resultado de decisiones económicas generalmente tomadas por la entidad inversionista. A continuación se menciona la influencia relativa de las variables de diseño en la carga de climatización

Las variables de diseño pueden clasificarse en tres grupos: Las que pueden permitir reducciones superiores a 13 kWh diarios por habitación (orientación y uso de elementos de protección solar), las que producen ahorros entre 5 y 13 kWh diarios por habitación



(tipología, dimensiones y materiales de las paredes exteriores, materiales de las ventanas y color de la superficie exterior de la cubiertas), las que ocasionan reducciones inferiores a 5 kWh diario por habitación (desplazamientos de los volúmenes de las habitaciones, proporciones y ubicación de las ventanas, formas, orientación y materiales de la cubierta).

1.7 Propuesta de un esquema para el análisis de la eficiencia energética en los CSAF.

En la Fig. 3 se muestran los elementos componentes de la impulsión del agua fría de la climatización centralizada bajo un enfoque que muestra la interrelación de los elementos para lograr mejoras energéticas. La presente investigación se centra en los CSAF debido a que el trabajo conjunto de cada uno de sus elementos define la eficiencia del retiro de calor de los espacios térmicos para cada situación específica.

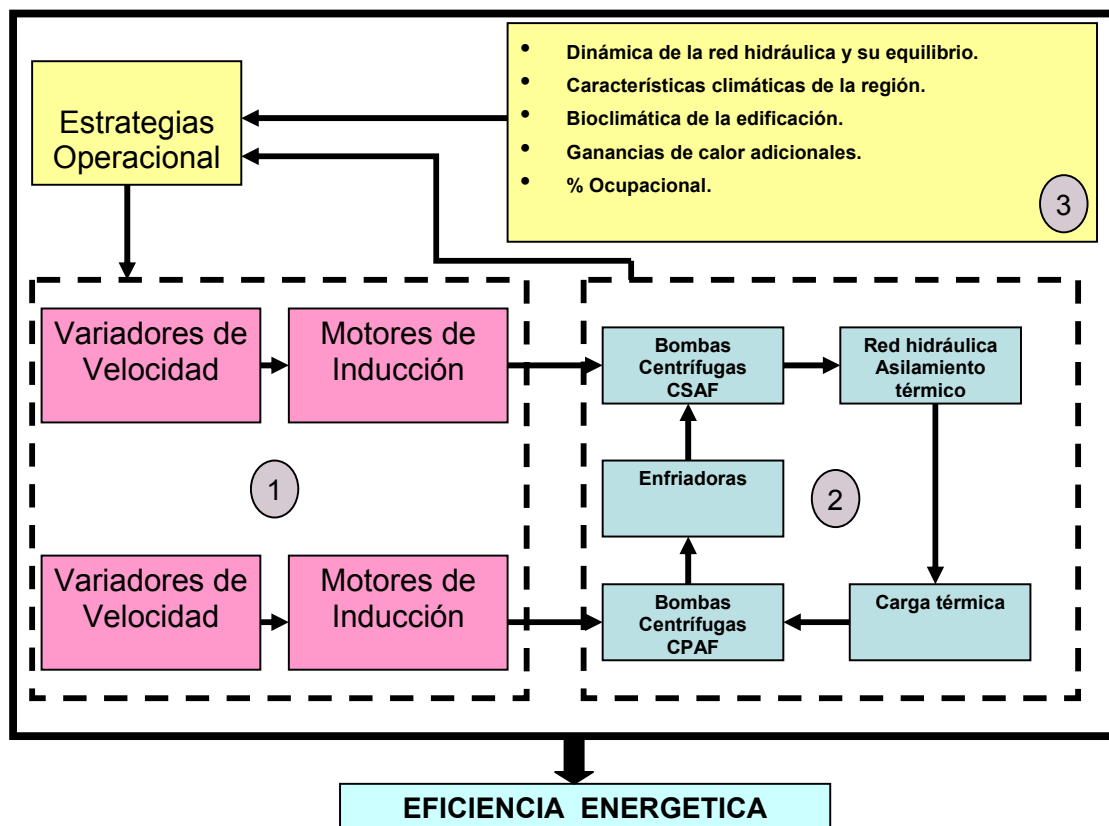


Fig.3. Interrelación de los componentes del SCCAH para lograr mejoras energéticas en los CSAF

Para enfocar de manera energética y desde el punto vista operacional la impulsión de agua fría se definen los siguientes subsistemas.

1. Subsistema de potencia.
2. Subsistema termohidráulico.
3. Perturbaciones y regímenes de explotación de los espacios térmicos.

El subsistema de potencia está compuesto por los VV y los motores tanto del Circuito Primario de Agua Fría (CPAF) como del CSAF, este subsistema recibe las señales de mando correspondiente a una estrategia de operación definida. En el subsistema



termohidráulico se localizan las enfriadoras, las bombas, la red hidráulica y la carga térmica. Todas las características de los elementos anteriores, unidas a las perturbaciones y regímenes de explotación de los espacios térmicos deciden el comportamiento energético de los CSAF.

La impulsión del AF hacia las enfriadoras y hacia la carga térmica se logra a través del circuito primario y el circuito secundario respectivamente. Por lo general siempre se le da mayor importancia a los CSAF, debido a que, en varios diseños estructurales el mismo circuito que impulsa el agua hacia las edificaciones también tiene la función de retornarla al evaporador de las enfriadoras.

Esta funcionalidad es la misma, independientemente de que se regule a través de válvulas de estrangulamiento o con variadores de velocidad el caudal que debe ir al evaporador. Este flujo debe estar en correspondencia con la potencia de enfriamiento de cada equipo en particular.

Las perturbaciones y regímenes de explotación de los espacios térmicos se centran en, la dinámica de la red hidráulica y su equilibrio, las características climáticas de la región, la bioclimática de la edificación, las ganancias de calor adicionales y el % ocupacional. No obstante pudieran resumirse en carga térmica, ocupación y las variables termohidráulicas que caracterizan los circuitos de impulsión.

1.8 Técnicas de Inteligencia Artificial.

La inteligencia de un edificio tiene la tarea prioritaria de lograr un balance óptimo entre el consumo energético y sus prestaciones. Esta capacidad depende de las tecnologías incorporadas en donde juegan un papel fundamental las herramientas informáticas, dentro de las que se encuentra la Inteligencia Artificial. Las técnicas más difundidas en la actualidad son las Redes Neuronales Artificiales (RNA), la lógica difusa y los algoritmos



genéticos, las cuales permiten identificar sistemas y a la vez formar parte de las técnicas de control. *Pérez Ajo, Cienfuegos, 2002. [28].*

Las redes neuronales artificiales (RNA) constituyen la forma más genérica de Inteligencia Artificial para emular al pensamiento humano. La gran ventaja de las RNA es precisamente, la orientación al procesamiento distribuido, al tener en su estructura elementos de cálculo más simples interconectados entre sí, lo que trae como consecuencia mucha mayor rapidez y mayor confiabilidad, pues si falla uno de sus elementos el sistema continúa trabajando adecuadamente.

Dentro de las habilidades con que cuentan las RNA están: el aprendizaje, capacidad de realizar múltiples funciones como resultado de un entrenamiento, elevada velocidad de procesamiento, auto-organización, capacidad de ajustar su organización interna a la experiencia recibida del exterior, pueden “aprender” de la experiencia acumulada durante su aplicación, en teoría su error puede ser cero, fácil aplicación a tecnologías disímiles, fácil inserción en software PLC y microchips para el control de sistemas en tiempo real, poco tiempo de experimentación, reducido número de investigadores y bajo costo. *Marcos A, Cienfuegos, 2008. [17].*

En el caso general de procesos dinámicos no lineales pueden distinguirse básicamente dos tipos de modelos de funcionamiento normal: los modelos físicos y los modelos de caja negra. Los primeros aplican leyes físicas para ligar las variables que intervienen en el proceso. Sin embargo la obtención y utilización de estos modelos no siempre es posible. Una herramienta que resuelve esta problemática es las RNA. Estas redes están compuestas por elementos matemáticos, denominados neuronas, que han sido inspirados y en cierta medida, tratan de imitar la actividad funcional del sistema nervioso central humano. *Marcos A, Cienfuegos, 2008. [17].*



La complejidad de los procesos que hay que modelar hace que su modelado físico sea muy costoso e incluso una vez obtenido, el tiempo de cálculo necesario para su evaluación puede hacerlos inutilizables para una aplicación en tiempo real. Por otro lado, los modelos físicos requieren datos de diseño que no siempre están a la mano y el comportamiento de los componentes dista mucho de la realidad prevista. En este contexto y para dar soluciones a estos problemas es que se han desarrollado las técnicas de inteligencia artificial. *Montero Laurencio, Moa, 2004. [25].*

Capítulo 2. Materiales y métodos, modelación energética del objeto de estudio

2.1 Introducción

Con la modelación térmica de las edificaciones se puede estimar el caudal de agua necesario para extraer este calor en caso de utilizar un SCCAH. Los datos de la carga de enfriamiento de cada local también permiten predecir la ocupación que garantiza la menor ganancia de calor del edificio. En este capítulo se presenta el resultado de una RNA capaz de predecir la carga de enfriamiento a partir de los valores de HDO y temperatura ambiente. Con la expresión del calor se estima el flujo de agua necesario para que el CSAF a caudal variable mantenga el confort en las zonas. Con los valores que caracterizan las ecuaciones de proporcionalidad se determina el modelo de regresión entre la potencia eléctrica y el caudal de agua, además de la relación entre la frecuencia y el caudal. Estos elementos en su conjunto permiten caracterizar las necesidades energéticas del objeto de estudio.



2.2 Instalación experimental.

Como instalación experimental se seleccionó un edificio y los resultados de su simulación térmica. El edificio lo constituye la zona habitacional # 6 del Hotel Blau Costa Verde. Una vista parcial de esta construcción, se aprecia en la figura 2.1. Los valores de la carga térmica, debidamente calculados, unidos a otros parámetros y expresiones permiten estimar el consumo de energía eléctrica asociada al CSAF.



Fig. 2.1 Edificio del cual se tomó los resultados de la simulación térmica.

En el hotel de referencia se escogió la zona habitacional # 6 de 7 existentes, la cuál es una de las más alejadas de la Sala de Máquinas. No se manifiestan ramificaciones intermedias antes de llegar a los patinejos.

Este edificio está compuesta por tres niveles habitacionales, y cada uno de ellos cuenta con el siguiente número de habitaciones.

- Nivel 1: 19 habitaciones
- Nivel 2: 22 habitaciones
- Nivel 3: 18 habitaciones

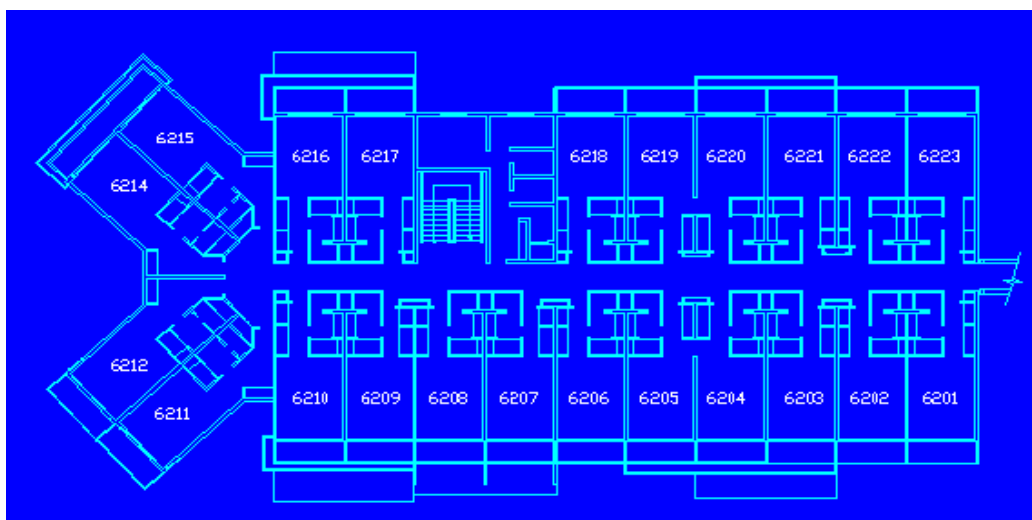


Fig. 2.2 Plano de planta del nivel 2.

De un total de 59 habitaciones a climatizar, 16 habitaciones se ubican en las esquinas del edificio entre los tres niveles, donde se efectúa la mayor transferencia de calor por tener dos de sus paredes laterales expuestas al sol. Se resaltan además las 18 habitaciones del tercer nivel las cuales reciben por el techo directamente la radiación solar más fuerte.

Uno de los parámetros a señalar, es el calor generado por las diferentes fuentes térmicas, en la tabla 2.1 se puede encontrar los equipos con que cuenta cada una de las habitaciones analizadas.

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

Tabla 2.1 Fuentes de emisión de calor.



El fancoil se encuentra ubicado en la parte superior del pasillo de entrada de la habitación (Ver Fig. 2.3). De esta forma se garantiza una mejor climatización al ser el aire frío más denso que el aire caliente, logrando así una temperatura de confort en un corto periodo de tiempo.

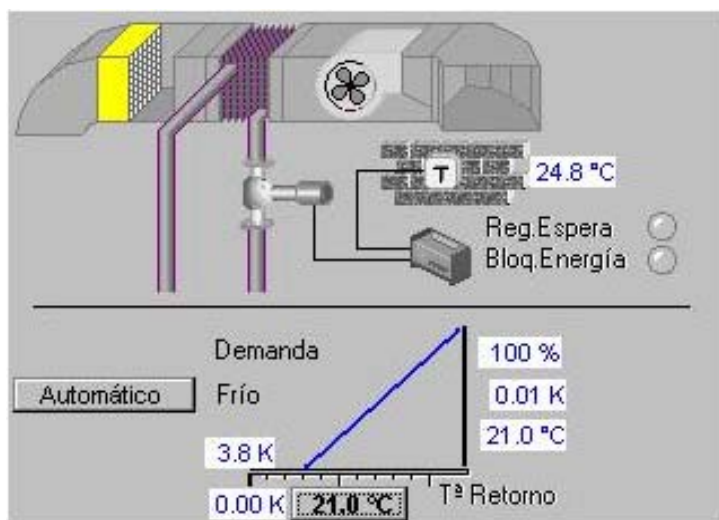


Fig. 2.3 Esquema de los fancoils de las habitaciones.

El sistema de bombeo, se realiza a flujo variable, consta con una bomba en funcionamiento y una de reserva. Estas son bombas centrífugas de eje vertical con las bocas de aspiración e impulsión en línea, y motor normalizado, con un caudal de 42 m³/h y una altura de presión o carga de 60 m. El fluido se succiona desde un colector al cual llega toda el agua del retorno de las diferentes zonas de bombeo en el que se produce un intercambio de fluidos para garantizar que el agua de retorno alcance nuevamente los 7 °C. Este colector está situado por encima del nivel de la bomba a 1,60 m.

Los datos del motor son los siguientes:

- Modelo I2A7163 – 2AA61
- n: 3515 rpm
- f: 60 Hz
- In: 21.2 A – 21.4 A



- $P: 12,5 \text{ kW}$
- $\cos \varphi: 0.87$
- $U_{\Delta}: 440\text{V} - 480 \text{ V}$



Fig. 2.4 Bombas del Circuito Secundario de Agua Fría.

En el anexo 2 se exponen una serie de medidas a tomar en cuenta para lograr una reducción del consumo de energía en los sistemas de bombeo, ya que los mismos representan aproximadamente el 10% del consumo energético total de la instalación.

El variador de velocidad (V.V) que se encuentra instalado es de la firma TELEMECANIQUE (Altivar 31) para motores asíncronos, los mismos presentan las siguientes características de funcionamiento.

- El Altivar 31 es preajustado de fábrica para las condiciones de uso más habituales.
- Tensión de motor: 230 V ó 400 V, según el modelo.
- Rampas (ACC, dEC): 3 segundos.
- Mínima velocidad (LSP): 0 Hz.
- Máxima velocidad (HSP): 60 Hz.
- Funcionamiento a par constante con control vectorial de flujo sin captador.



- Adaptación automática de la rampa de desaceleración cuando hay sobretensión en el frenado.
- En caso de que los valores mencionados sean compatibles con la aplicación puede utilizarse el variador sin modificar los ajustes.
- Una configuración de la frecuencia del motor en caso de que no sea de 50 Hz.
- Tiene rampas de aceleración y desaceleración.
- Ajustes de velocidad mín. y máx.
- Ganancia proporcional del regulador.
- Ganancia integral del regulador.
- Potencia de 15 kW.
- Sin arranque automático después de un fallo.



Fig. 2.5 Variador de velocidad.



El Sistema de Climatización Centralizada conocido también como Sistema de Agua Helada, consiste en una unidad central que suministra agua a una temperatura de aproximadamente 7°C, la cual es distribuida por medio de tuberías a las habitaciones y las áreas comunes.

La unidad adsorbe el calor generado por el edificio (zonas habitacionales) por medio del evaporador que es un intercambiador de calor donde circula agua fría por un lado, y refrigerante por el otro. El agua sale del evaporador aproximadamente a 7°C, y regresa al mismo con una temperatura entre 10°C y 12°C. El diferencial de temperatura entre el envío y retorno no debe superar los 5°C. El agua al ser un líquido se comporta anormalmente, su presión de vapor crece con rapidez a medida que la temperatura se eleva y su volumen ofrece la particularidad de ser mínimo a 4°C.

Debemos resaltar algunas características físicas importantes del agua:

- Densidad a 7 °C : 999.82 Kg/m³
- Viscosidad dinámica (a 7°C): 1,4*10⁻³ Pa · s
- Viscosidad cinemática (a 7°C): 1,4 *10⁻⁶ m²/s
- Calor específico de agua (a 7°C) 4.198 kJ/kg*K

La red hidráulica está compuesta por una compleja red de tuberías de PVC que viaja a través de las azoteas de los edificios. Estas tuberías tanto en el envío como en el retorno no tienen ramificaciones y poseen una distancia aproximada en ambos casos de 260 m. Estas tuberías tienen un diámetro de 3 pulgadas. A partir de la reducción del diámetro de la tubería se producen las ramificaciones en los patinijos hasta llegar a los fancoils en cada habitación. Esta red de tuberías constituye una malla compleja por lo que la impedancia hidráulica de la red varía en función de la carga térmica que se esté utilizando.



Fig. 2.6 Red de tuberías en malla del CSAF de la edificación.

2.3 Técnica empleada

Para obtener el resultado de la investigación, se partió de lograr que una estructura de RNA identificara la relación entre las variables HDO y temperatura ambiente con respecto a la carga de enfriamiento máxima y horaria del edificio caso de estudio. Se resalta que estos valores de entrada son de carácter aleatorio, el modelo a obtener es de naturaleza estocástica. Para lograr estos resultados se utilizaron los datos provenientes de la simulación térmica. Luego con la herramienta de las RNA del programa computacional MATLAB se determinó la estructura neuronal que reprodujera estas variables.

El modelo obtenido se basó en la prueba y error utilizando diferentes capas de neuronas, funciones de activación, funciones de transferencias y números de neuronas. Con los datos validados que nos aporta la RNA, al sustituir en la ecuación del calor los valores de carga de enfriamiento se puede determinar el flujo necesario para extraer este calor:

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



Donde

- . $Q \rightarrow$ flujo de calor.
- . $m \rightarrow$ flujo másico.
- . $C_p \rightarrow$ calor Específico del Agua.
- . $\Delta t \rightarrow$ diferencia de temperatura entre el envío y el retorno de la zona

La expresión demuestra que se utiliza un modelo determinístico para hallar el flujo de agua necesario y extraer todo el calor almacenado en la edificación. Apoyándose en las potencialidades del software de estadística **StatGrafic** se determinó las propiedades de las variables utilizadas en el modelo de carga térmica de enfriamiento de RNA. A continuación tomando como referencia también las facilidades computacionales que nos brinda este software, se utilizó una regresión lineal, encontrándose las ecuaciones y los coeficientes característicos que relacionan el caudal y la potencia demandada por el motor utilizado en la estación física real.

En este caso se establece la relación entre el caudal que maneja la bomba, para una prueba escalonada del CSAF caso de estudio y la potencia activa que demanda la misma trabajando a una presión constante de 5 bar. Esta expresión permite predecir la potencia para cada caudal específico en correspondencia con las HDO y las cargas de enfriamiento parciales. Los tres modelos antes mencionados se pueden integrar para tener una idea de la eficiencia energética de la instalación para cada caso particular.



2.3.1 Selección de las variables

A continuación se presenta la descripción de las variables más importantes presentes en los CSAF:

Caudal de envío: El caudal de agua fría (AF) que se maneja en los circuitos secundarios es de vital importancia para conocer cuál es la masa de agua que se encarga de extraer todo el calor contenido en los espacios térmicos (habitaciones). En el caso de los sistemas que tienen variadores de velocidad este caudal total se distribuye por toda la batería de los fancoil. El valor puntual del caudal depende fundamentalmente de las disímiles combinaciones que se logran al conectarse y desconectarse la climatización de las habitaciones. Esta variable también está en función del valor de set point de la presión del CSAF que se prefija en el sistema.

Presión de envío: Esta presión es una manifestación de la variación de impedancia de la red como consecuencia de la conexión y desconexión de los fancoil de las habitaciones. Cuando el sistema trabaja a lazo cerrado las pequeñas variaciones con respecto al set point también dependen del controlador de esta variable. No siempre la presión a lazo cerrado es la más racional. En caso del sistema estar trabajando a lazo abierto o frecuencia constante, esta presión se vuelve muy cambiante durante todo el día y esta en dependencia de la ocupación instantánea.

Temperatura de envío: Esta temperatura se puede considerar como una variable de entrada al sistema, aunque también puede considerarse como perturbación pues depende en primer lugar de los parámetros de explotación de las enfriadoras.

Temperatura de retorno: Esta variable depende fundamentalmente de intercambio térmico que haya tenido el fluido durante su paso a través de toda la red hidráulica. Esta temperatura no sólo está influenciada por la convección forzada que ocurre en los fancoils



sino que también por todos los procesos de transferencia de calor que ocurren a lo largo de la red hidráulica. A pesar que la red hidráulica tiene aislamiento térmico siempre existe un flujo que atraviesa de forma unidireccional hacia el agua y en este proceso esta implícito la transferencia de calor por radiación y convección en lo fundamental.

Temperatura Ambiente: Esta variable es la principal magnitud climatológica que caracteriza en gran medida las variaciones que se producen en la carga térmica. Es de naturaleza aleatoria y muy incidente convirtiéndose en una perturbación para el sistema analizado.

Potencia activa del accionamiento: La potencia que demanda el motor es la variable dependiente más significativa pues la eficiencia de la instalación depende que se cumpla los parámetros de confort con el menor consumo energético posible. Esta variable es la información primaria que permite relacionar las operaciones con los costos de explotación.

Variables Climatológicas	Min.	Máx.
Temp. Máximas Medias (°C)	26.8	31.2
Temp. Mínimas Medias (°C)	22.0	26.0
Temp. Medias (°C)	24.5	28.5
Temp. Máxima Absoluta (°C)	29.2	32.5
Temperatura Mínima Absoluta (°C)	17.8	23.1
Lluvias Mensuales (mm.)	37.7	162.6
Días con Lluvias	6.0	14.8
Rapidez del viento predominante (Km-h)	14.8	20.0
Humedad Relativa (%)	78.9	82.4

Tabla 2.2 Comportamiento medio de las principales variables climatológicas.

Anteriormente se presentan un resumen de las principales variables climatológicas promedio históricas que caracterizan la región en donde se encuentra el edificio caso de estudio.



En el caso de la temperatura se resumen las magnitudes de: temperaturas máximas medias, temperaturas mínimas medias, temperatura media temperatura máxima absoluta y temperatura mínima absoluta. Históricamente estas variables se han movido desde 1970 - 2007 entre los valores mínimos de 17.8 °C y máximas de 32.5 °C a partir de los valores promedios históricos. En el caso específico de las lluvias los meses más lluviosos fueron octubre y noviembre con 62 y 129 mm de agua respectivamente y el más seco es el de julio con un valor promedio histórico de 37.7 mm.

Los días con más lluvias históricos son los meses de abril y junio, aparecen igualados con un valor promedio de 6 días sin embargo los meses de octubre y noviembre ocurren lluvias en 15 y 14 días respectivamente. Un fenómeno interesante que ocurre en esta región es que en los meses de más calor la rapidez de los vientos predominantes alcanzan los menores valores aproximadamente 15 Km/h entre los meses de mayo y octubre la circulación de los vientos alrededor de los edificios permiten refrescar el entorno y que la ganancia de calor de la carga térmica sea menor lógicamente en esto influyen otras variables.

En el caso de la humedad relativa, históricamente los valores promedios de esta magnitud oscilan entre 78.9-82.4 % durante todo el año esta humedad relativa por citar un ejemplo influye en la cantidad de calor que se transfiere y se filtra en la carga térmica aunque se puede apreciar que los valores promedios tienen una variabilidad de 4 %.

2.4 Modelación térmica de la edificación

Los valores de la carga térmica de enfriamiento que se tomaron para la realización de la investigación, se utilizaron de los resultados de un simulador de carga térmica basado en la metodología ASHRAE.



Entre los elementos que se tuvieron en cuenta podemos mencionar:

- Las temperaturas máximas y mínimas para todo un año característico.
- Los elementos que aportan calor sensible y latente que afectan la carga térmica.
- La característica física de la edificación en relación a los elementos componentes y sus características termofísicas.
- Las características técnicas de los fancoils.
- La orientación solar de la instalación así como las coordenadas exactas de ubicación.
- El régimen de ocupación de los espacios térmicos.

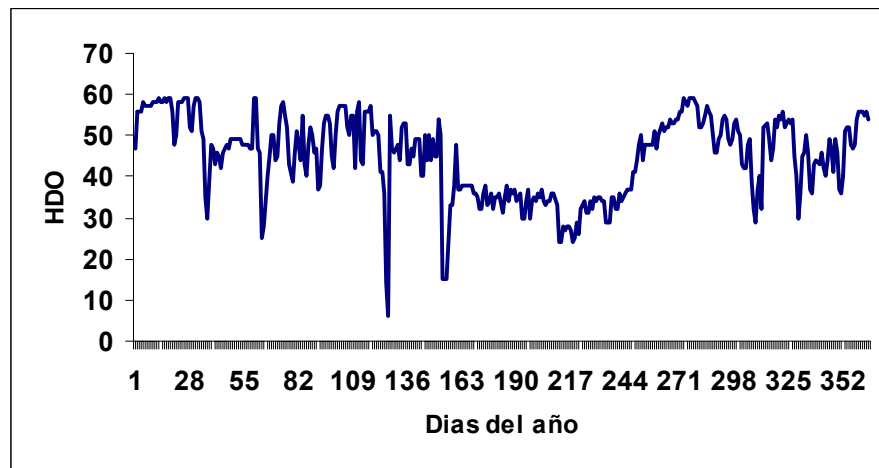


Fig. 2.7 Ocupación promedio para todo un año característico.

El gráfico anterior muestra la ocupación promedio que se tomó en cuenta en el simulador. Las curvas de ocupación reflejadas nos dan la medida de los niveles de estancia en la edificación, esto nos muestra las características de las temporadas bajas, media, y alta. Así como los regímenes de operación a los que fue sometido el SCCAH. También se puede apreciar que los primeros y últimos meses del año la curva característica tiende a crecer, esta información nos permite prepararnos con el objetivo de calibrar adecuadamente el sistema para no presentar fallas y lograr adecuadamente una sinergia entre los niveles de ocupación y la reducción de portadores energéticos.



La temperatura ambiente es otra variable esencial, de ella dependen mucho los estados operacionales de los CSAF. Este sin lugar a dudas es un dato de mucha utilidad. A continuación se presentan los gráficos de la temperatura ambiente máxima y la temperatura ambiente mínima.

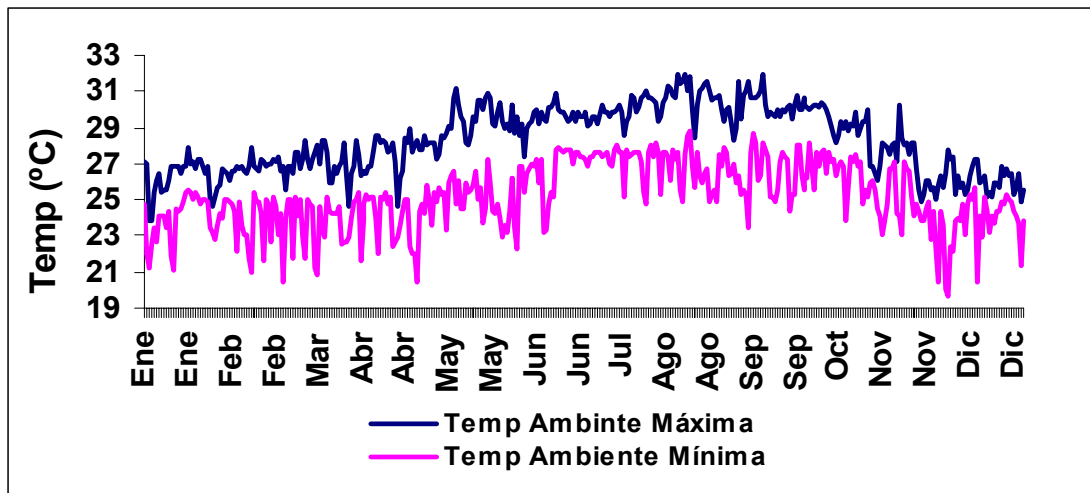


Fig. 2.8 Temperaturas máximas y mínimas para todo un año característico.

Como se puede observar la fig. 2.8 los meses más calurosos son julio y agosto y las bajas temperaturas están presentes en los primeros y últimos meses del calendario.

Un elemento que indica que en los meses de mayor calor, la temperatura ambiente sigue de forma más lineal a la carga de enfriamiento aparece reflejado en la figura 2.9. En esta figura los valores que aparecen vienen expresados en valores por unidad, para el caso de la temperatura ambiente el valor máximo es de 32 °C y para las HDO 59. La ocupación en los meses del verano son las más inferiores del año, en total correspondencia con la temporada baja. A pesar de esto la carga de enfriamiento se encuentra por encima de la curva de ocupación, siendo a la inversa en los primeros meses del año cuando son registrados los valores más bajos de temperatura y estando presente la mayor acumulación de clientes.

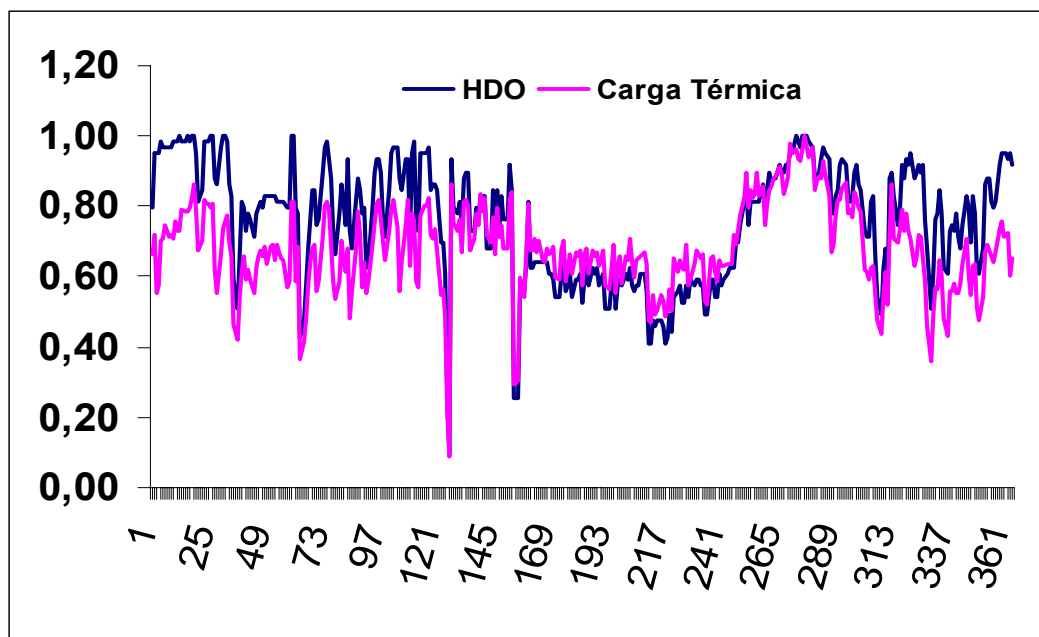


Fig.2.9 Ocupación y Carga de Enfriamiento en valores por unidad para todo un año característico.

Después de analizar los datos de la Carga Térmica de Enfriamiento anual de cada habitación, se realizó una categorización en cuatro rangos que distinguen los diferentes grupos de habitaciones las cuales se muestran a continuación.



Fig. 2.10 Representación de las habitaciones y sus niveles de Carga Térmica.

La figura 2.10 muestra los cuatro grupos de habitaciones en los que se encuentran debidamente organizados en correspondencia con las KJ/Kg.K año. Estas agrupaciones están caracterizadas por unas que poseen las mínimas cargas térmicas, en las cuales



podemos encerrar un reducido grupo de diez habitaciones con 1.5 millones KJ/Kg.K, el segundo grupo está integrado por las 21 habitaciones que se encuentran entre 1.5 millones y 2 millones KJ/Kg.K, un tercer conjunto nos refleja un total de 18 que generan entre 2 millones KJ/Kg.K y 3 millones KJ/Kg.K y por último aparecen las que cuentan con más de 3 millones KJ/Kg.K y en ocasiones sobrepasan estos rangos. Esto está dado por la fuerte incidencia solar a la que están sometidas durante todo el año.

En el anexo.3 se hace una representación en orden ascendente de las habitaciones que poseen menor carga térmica anual hasta la que tienen mayor. Esta información nos permitió crear una estrategia ocupacional, la cuál puede ser utilizada por el personal de recepción, con el objetivo de ubicar a los clientes por ese orden en la medida que realicen el arribo a la instalación. La ocupación propuesta sigue criterios termoenergéticos, lo cual representará un menor trabajo de los CSAF y por consiguiente un ahorro de energía eléctrica.

Utilizando una aplicación en Matlab se pudo conocer de forma rápida cual sería la ocupación anual de las habitaciones que permitieran que la carga de enfriamiento del edificio fuera la menor para cada porcentaje ocupacional. Para que se tenga una idea de esta variante se presenta el gráfico de la figura 2.11.

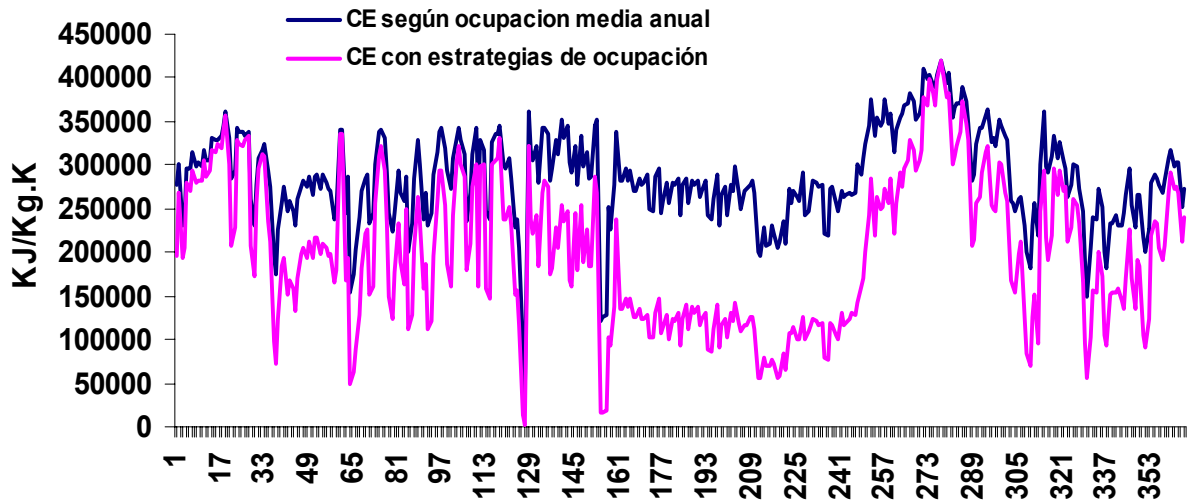


Fig. 2.11 Cargas de enfriamiento para una ocupación promedio y para estrategia ocupacional para disminuir carga de enfriamiento.

A partir de esta estrategia ocupacional puede existir una diferencia entre las cargas de enfriamiento promedio anual real y la carga de enfriamiento con estrategia ocupacional de un 30%.

Si se realiza un gráfico de correlación entre la ocupación y los valores de carga de enfriamiento promedio anual y la carga de enfriamiento con estrategias ocupacional se obtiene en el primero de los casos como mejor expresión $y = 0.8219X^{0.6922}$ con coeficiente de correlación 0,76. En el segundo caso $y = 0.9906x^2 - 0.2603x + 0.0719$ con coeficiente de correlación 0,94. Esto explica que cuando se utiliza estrategia ocupacional según la propuesta se puede estimar con mayor confianza la carga de enfriamiento (ver figura 2.12).

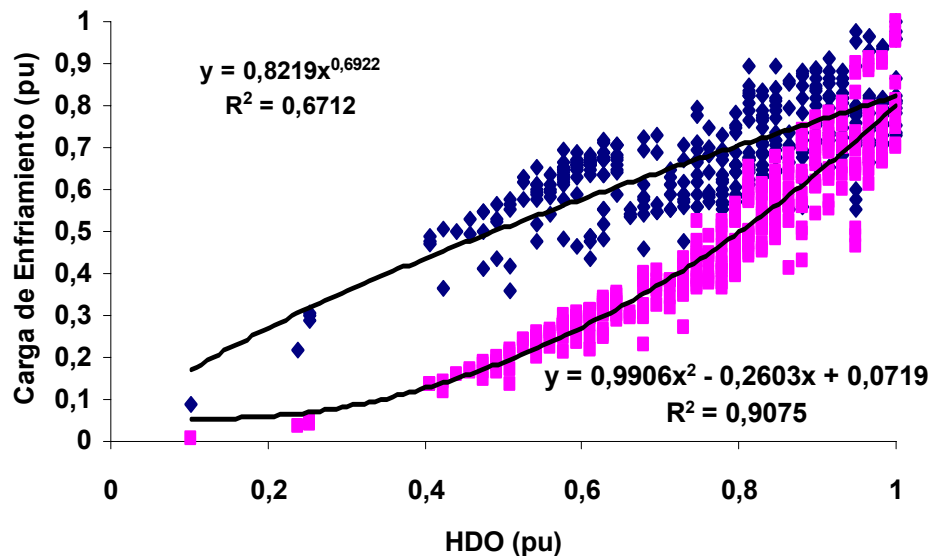


Fig. 2.12 Gráficos de correlación entre las HDO la carga de enfriamiento en valores por unidad.

2.5 Modelo de carga térmica con ayuda de las RNA para valores diarios de HDO, temperatura ambiente máxima y temperatura ambiente mínima.

Inicialmente se aprovechó las potencialidades del Toolbox de Identificación del Matlab, una excelente herramienta para determinar modelos paramétricos. A continuación se presenta la estructura del modelo de regresión que más se ajusta a los datos:

$$A(q)y(t)=B(q)u(t)+e(t) \quad (2)$$

Las expresiones que acompañan las variables de entrada para el modelo en tiempo continuo son las siguientes:

$$A(s) = s^4 + 4.025 s^3 + 8.133 s^2 + 9.505 s + 0.2209$$

$$B1(s) = 1.326e004 s^4 + 5.305e004 s^3 + 1.092e005 s^2 + 1.178e005 s + 2141$$

$$B2(s) = 6250 s^4 + 2.328e004 s^3 + 4.965e004 s^2 + 5.607e004 s - 1374$$



$$B3(s) = 5845 s^4 + 2.259e004 s^3 + 4.794e004 s^2 + 5.379e004 s + 836.2$$

$$C(s) = s^4 + 4.889 s^3 + 11.1 s^2 + 14.4 s + 6.129$$

Aprovechando las instrucciones [num,den]=th2tf(thc) y printsys(num,den,'s') del Matlab se llega a obtener una función de transferencia única para el sistema.

$$\frac{13259.8 s^4 + 53047.9 s^3 + 109184.3 s^2 + 117812 s + 2141}{s^4 + 4 s^3 + 8.1 s^2 + 9.5 s + 0.22086} \quad (3)$$

En este modelo de la función de transferencia (3), se aprecia que tanto el numerador como el denominador son de cuarto orden. Para que se tenga una idea de la precisión se presenta el gráfico de la figura 2.13 el cual arroja como resultado que con la expresión del modelo se pueden estimar los valores de la carga térmica con un 74% de ajuste.

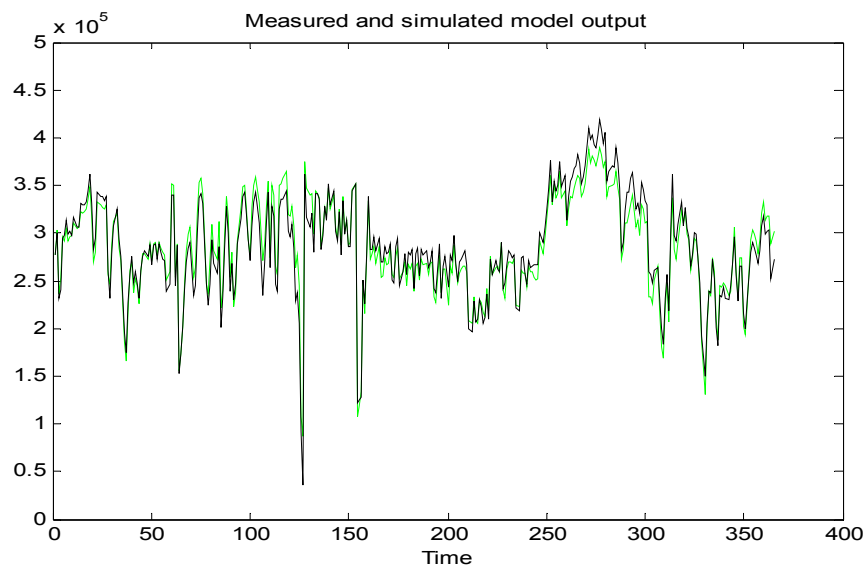


Fig. 2.13 Predicción mediante modelación paramétrica para predecir los valores máximos de carga de enfriamiento para un año característico.

Como el valor de ajuste del modelo no fue suficiente, entonces se buscó una forma de que los resultados de las predicciones fueran más acertados y se decidió utilizar la modelación

basada en redes neuronales artificiales. A partir del método de prueba y error se fue buscando la mejor estructura de la Red Neuronal Artificial que prediga la carga térmica de enfriamiento del edificio caso de estudio con el menor error posible. Los datos primeramente fueron filtrados y luego normalizados para mantenerlos en el intervalos de [0; 1]. La función de aprendizaje escogida para esta red fue trainlm y se empleó el método de los mínimos cuadrados. Luego de múltiples pruebas se define que utilizando una RNA Feedforward Backpropagation es la que mejor se adapta a los datos (ver figura 2.14).

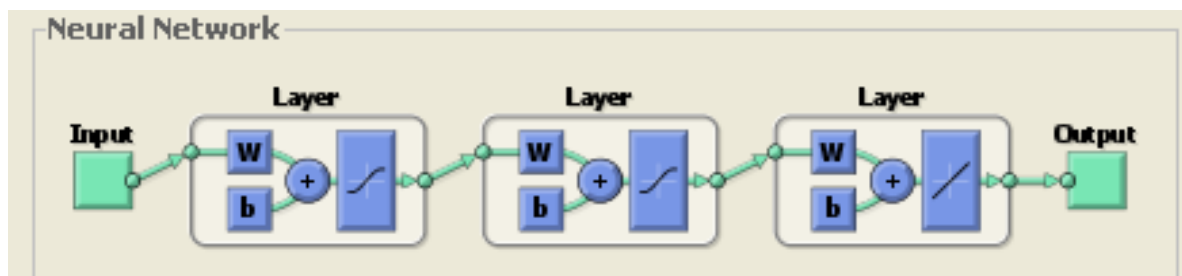


Fig. 2.14 Estructura de la red neuronal artificial para predecir los valores máximos de carga de enfriamiento para un año característico

Se empleó para esto, tres capas de neuronas. La primera capa cuenta con tres neuronas, con la función de transferencia tansig (tangencial sigmoidal). La capa intermedia es de 9 neuronas con la misma función tansig y la última capa es de una neurona con la función de transferencia pureline. Para este aprendizaje sólo se necesitó de 11 iteraciones, con un error de validación de 0,00073. En la figura 2.15 se puede apreciar el proceso de aprendizaje de la red.

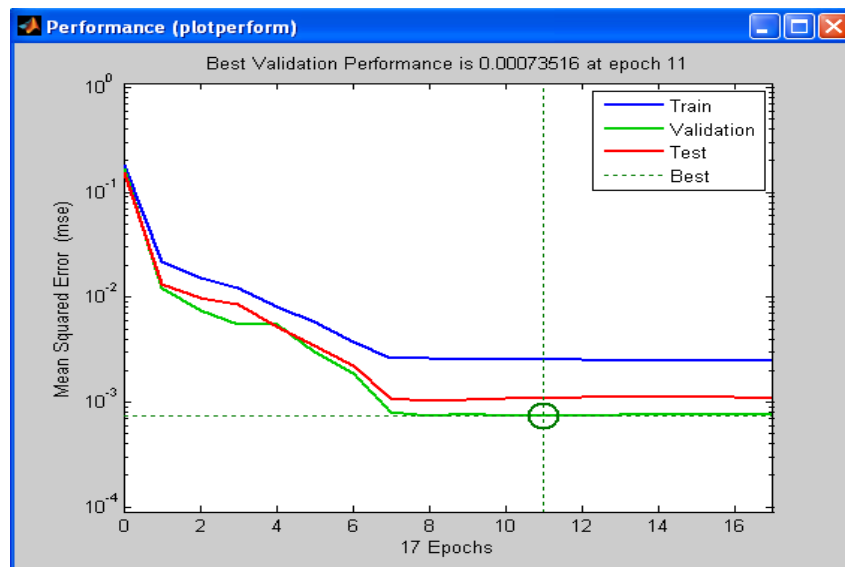


Fig. 2.15 Proceso de aprendizaje de la Red Neuronal Artificial para predecir los valores máximos de carga de enfriamiento para un año característico.

Según el manual de RNA del Matlab la notación simplificada de una red de tres capas se puede expresar como sigue a través de los pesos y las polarizaciones.

$$a^3 = f^3(LW_{3,2}f^2(LW_{2,1}f^1(IW_{1,1}p + b^1) + b^2) + b^3 = Y \quad (4)$$

Esta expresión adaptada al modelo específico de nuestro objeto de estudio sería:

$$Qt = \text{pureline}(LW32 * \text{tansig}(LW21 * \text{tansig}(Lw11 * \text{entrada} + b1) + b2) + b3) \quad (5)$$

Donde Qt = Carga Térmica de Enfriamiento.

LW43, LW32, LW21, Lw11 = matrices de peso

b1, b2, b3, b4 = polarizaciones

Pureline y Tansig – son las funciones de transferencias utilizadas en la RNA

Los términos para este caso particular son:



Rangos de entrada [0.74375 1; 0.64063 0.89687; 0.10169 1]

$$IW_{1,1} \begin{bmatrix} 0.73775 & 0.079555 & -1.4086 \\ -0.39893 & -0.1751 & -0.89941 \\ -1.2104 & 1.1364 & -0.58183 \end{bmatrix} \quad b^1 \begin{bmatrix} -1.979 \\ 0.034307 \\ -2.5675 \end{bmatrix}$$

$$LW_{2,1} \begin{bmatrix} 1.3265 & -1.8625 & 1.8036 \\ 0.2451 & -2.8347 & 1.079 \\ 1.5399 & -1.917 & 1.5504 \\ -2.5219 & 1.6078 & 0.11344 \\ 1.2797 & -2.2723 & 0.74717 \\ 0.50485 & 2.3662 & -1.1799 \\ -2.0445 & -1.6306 & 0.030848 \\ 0.88374 & -1.8698 & -0.0062 \\ 1.94 & 1.2043 & -1.7917 \end{bmatrix} \quad b^2 \begin{bmatrix} -2.9128 & 0.77775 & -1.5008 \\ -2.0313 & 0.029495 & 2.2993 \\ -1.4418 & 0.59084 & 2.9341 \end{bmatrix}$$

$$LW_{3,2} \begin{bmatrix} -0.60364 & 0.69141 & 0.41585 \\ 0.54449 & 0.72625 & 0.43917 \\ 0.52017 & -0.0051595 & -0.077216 \end{bmatrix} \quad b^3 [-0.06176]$$

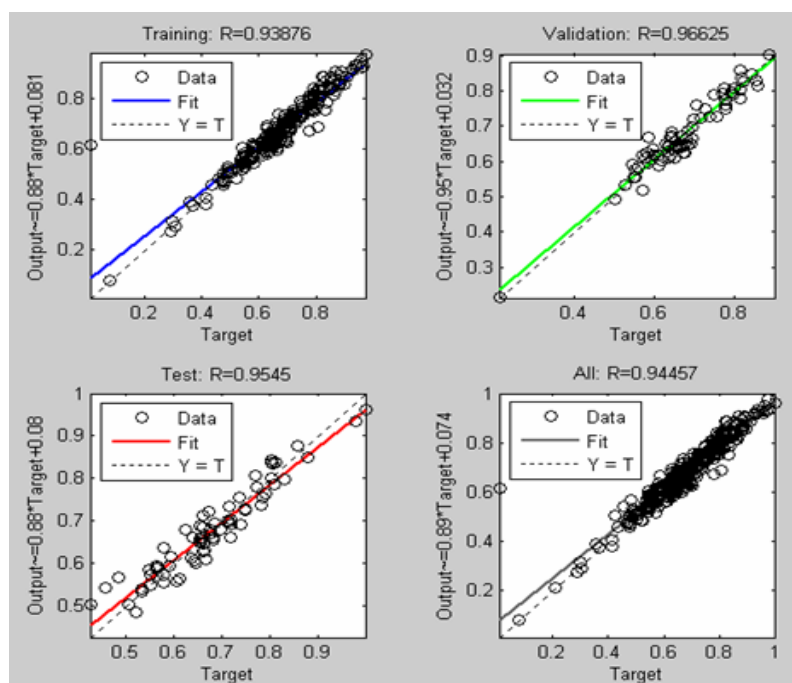


Fig. 2.16 Resultados del proceso entrenamiento, pruebas y validación de la RNA para predecir los valores máximos de carga de enfriamiento para un año característico.

Como se puede apreciar, en la figura anterior, el coeficiente de correlación entre los datos de la carga de enfriamiento y estos mismos valores predichos por la red es de 0,94 de forma general para los datos de entrenamiento, prueba y validación.

2.5.1 Modelo estacionario anual con ayuda de las RNA para valores horarios de HDO, temperatura ambiente máxima y temperatura ambiente mínima.

En busca de una variante que permita la predicción de la carga de enfriamiento que siga el comportamiento de la temperatura ambiente se tomaron los valores de esta variable según son registrados en la estación climatológica, cada tres horas (1:00 a.m, 4:00 am, 7:00 am, 10:00 am, 1:00 pm, 4:00 pm, 7:00 pm y 10:00 pm). Se tomaron los mismos datos de las HDO y como datos de salida los valores de carga de enfriamiento que corresponden a las mismas horas de la temperatura ambiente.



Para este caso la estructura de la RNA que mejor predijo estos resultados es la misma que para el caso anterior, una RNA tipo Feedfoward Backpropagation con tres capas de neuronas. La función de aprendizaje escogida para esta red fue trainlm y se empleó el método de los mínimos cuadrados. Se empleó una RNA de tres capas de neuronas. En la figura 2.17 se puede apreciar el proceso de aprendizaje de la red.

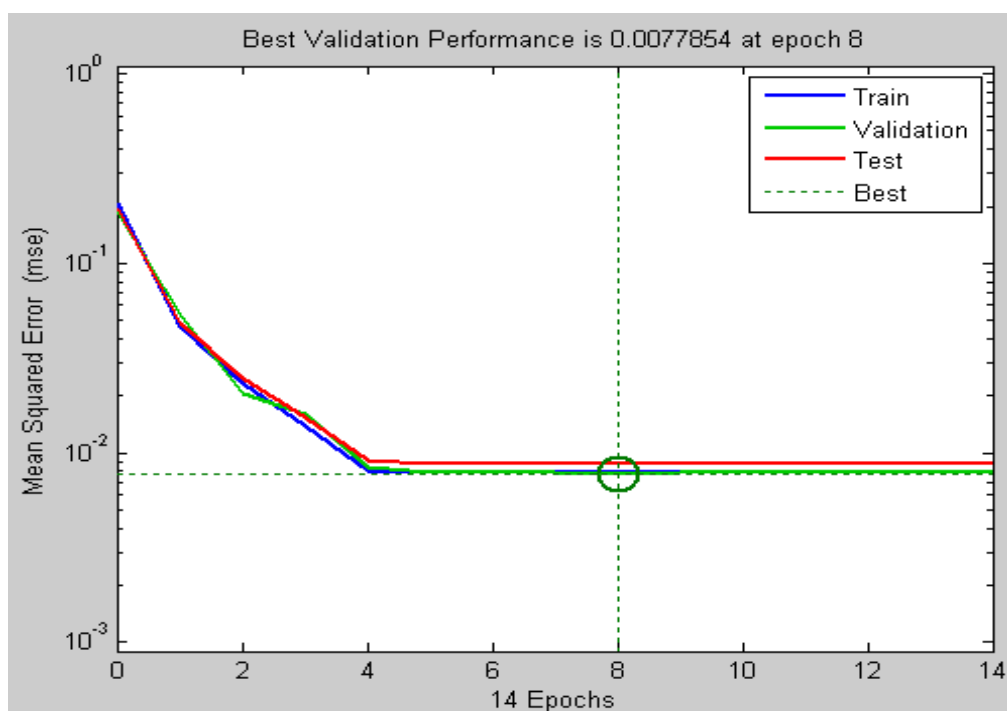


Fig. 2.17 Proceso de aprendizaje de la Red Neuronal Artificial.

La primera capa cuenta con tres neuronas, con la función de transferencia tansig (tangencial sigmoidal). La capa intermedia es de 9 neuronas con la misma función tansig y la última capa es de una neurona con la función de transferencia pureline. Para este aprendizaje solo se necesitó de 8 iteraciones, con un error de validación de 0,0077.

Para tener una mejor precisión de las características de la RNA, se presentan a continuación los valores correspondientes a los pesos y las polarizaciones.



Rangos de entrada [0.64063 1; 0.10169 1].

$$IW_{1,1} \begin{bmatrix} 0.28096 & -0.18014 \\ 0.06543 & -0.17329 \\ -2.1602 & -0.47195 \end{bmatrix} \quad b^1 \begin{bmatrix} -1.5143 \\ 0.023959 \\ -1.8942 \end{bmatrix}$$

$$LW_{2,1} \begin{bmatrix} -0.37914 & 2.1714 & 1.9399 \\ -0.99292 & 1.7235 & 2.3854 \\ -2.8162 & 0.0442 & 0.51279 \\ 1.1533 & 3.1999 & -0.55409 \\ 1.1533 & -2.1354 & 3.1888 \\ -0.0254 & -1.7117 & 0.62934 \\ 1.2511 & -2.7226 & -0.56005 \\ 1.2511 & 1.4567 & 1.4829 \\ -2.336 & -1.922 & -1.2602 \end{bmatrix} \quad b^2 \begin{bmatrix} 3.0472 & -0.87193 & 1.5297 \\ 2.0126 & 0.37017 & 2.2954 \\ 1.5059 & -0.65421 & -2.951 \end{bmatrix}$$

$$LW_{3,2} \begin{bmatrix} -0.0549 & 0.67561 & -0.1411 \\ 0.35538 & 1.5075 & 0.15598 \\ 0.2103 & 1.7065 & 0.20458 \end{bmatrix} \quad b^3 [0.69713]$$

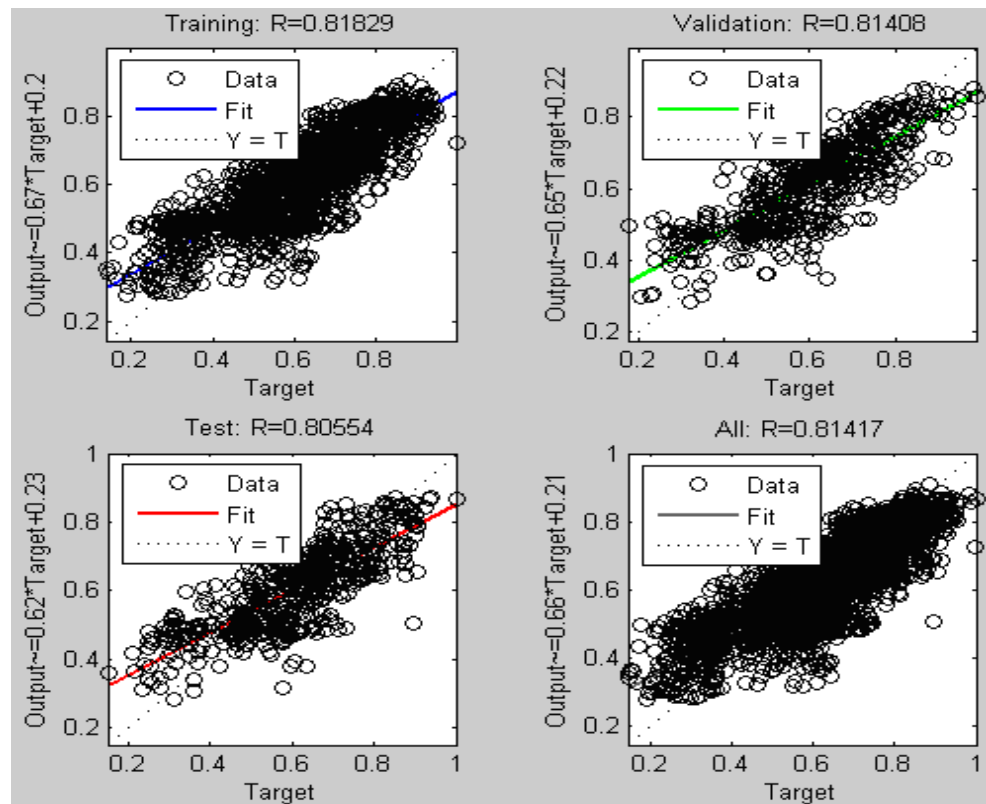


Fig. 2.18 Resultados del proceso entrenamiento, pruebas y validación de la RNA para predecir los valores de carga de enfriamiento horaria para un año característico.

En la figura anterior, el coeficiente de correlación entre los datos de la carga de enfriamiento y estos mismos valores predichos por la red es de 0,81 de forma general para los datos de entrenamiento, prueba y validación. A pesar de que el modelo no es tan preciso como en la RNA para predecir la carga de enfriamiento máxima del día, existe la posibilidad de variar las características del accionamiento para las cargas parciales.



2.6 Balance de masa y energía en los CSAF, estimación del caudal de agua necesario.

Considerando que el edificio objeto de estudio, constituye un gran intercambiador de calor se utiliza la ecuación número (1) del capítulo 2. Asignando la carga de enfriamiento al valor de Q como la cantidad de calor que es necesario extraer del edificio y teniendo en cuenta una diferencia de temperatura entre envío y retorno promedio de dos grados celsius, se puede entonces despejar y encontrar el flujo másico necesario. En la figura 2.19 se aprecia el flujo de agua necesario para cada situación de las cargas parciales de todo un año característico.

En el anexo. 4 aparecen los datos del flujo necesario para cada valor diario del año. Se utilizó el dato del calor específico del agua para 7 grados celsius pues este valor es el más predominante a la salida de las enfriadoras, otros valores de temperatura cercanos poseen calor específico muy similar.

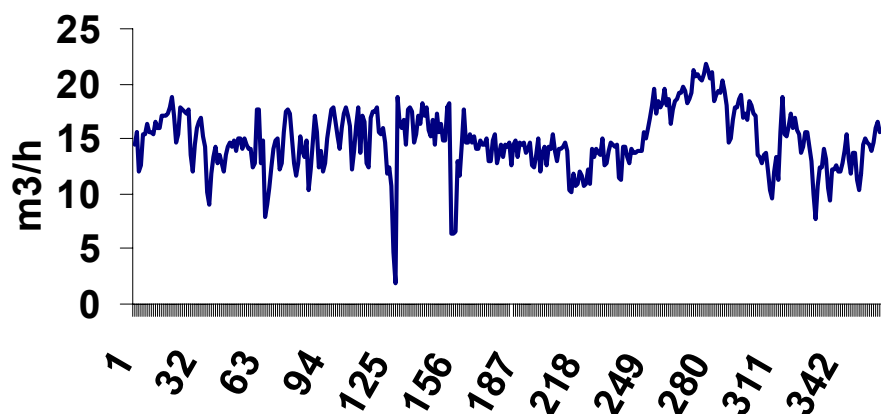


Fig. 2.19 Caudal de agua necesario para extraer la cantidad de calor de la carga de enfriamiento para un año característico.



Cuando se comparan estos resultados con las características de la bomba existente se concluye que la misma puede operar los caudales necesarios.

2.7 Modelo estadístico para estimar el consumo de energía del conjunto motor-bomba.

La bomba centrífuga es el tipo de bomba más utilizado en los sistemas de CVAA. Las partes esenciales de una bomba centrífuga son el miembro giratorio (el impulsor) y la caja que lo contiene. El impulsor generalmente es movido por un motor eléctrico montado sobre el mismo eje (acoplamiento rígido) o conectado con un acoplamiento flexible. El fluido entra por el centro del impulsor giratorio, es lanzado hacia la voluta y fluye hacia fuera a través del difusor de la manera más eficiente posible. Aún cuando existen varios tipos de impulsores de caja el principio de operación es el mismo.

Para determinar el modelo de la bomba que se encuentra en operación, se tomaron los datos que aparecen en el anexo 5 con los cuales se realizó la prueba escalonada de la bomba. Para obtener estos datos se operó la bomba a lazo cerrado con el variador de velocidad a una presión constante de 5 bar. Además se fueron encendiendo de forma aleatoria y escalonada las 59 habitaciones de la edificación.

Con el apoyo del programa computacional StatGrafic de excelentes prestaciones para obtener modelos estadísticos se determinó la expresión que mejor relaciona el caudal de agua con la potencia eléctrica que demanda el accionamiento. La ecuación resultante fue la siguiente:

$$P = 6104.29 - 72.6521 * Q_{agua} + 0.303696 * Q_{agua}^2 \quad (6)$$



Dado que el valor P en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, hay relación estadísticamente significativa entre P y Qagua para un nivel de confianza del 99%.

- R-cuadrado = 99.9974 porcentaje
- R-cuadrado (ajustado para d.f.) = 99.9972 porcentaje
- Error Estándar de la Est. = 5.54005
- Error absoluto medio = 4.37889
- Estadístico Durbin-Watson = 0.672255 (P=0.0000)
- autocorrelación de residuos en Lag 1 = 0.518275

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 99.9974% de la variabilidad en P. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferente números de variables independientes, es 99.9972%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 5.54005. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones. El error absoluto medio (MAE) de 4.37889 es el valor medio de los residuos.

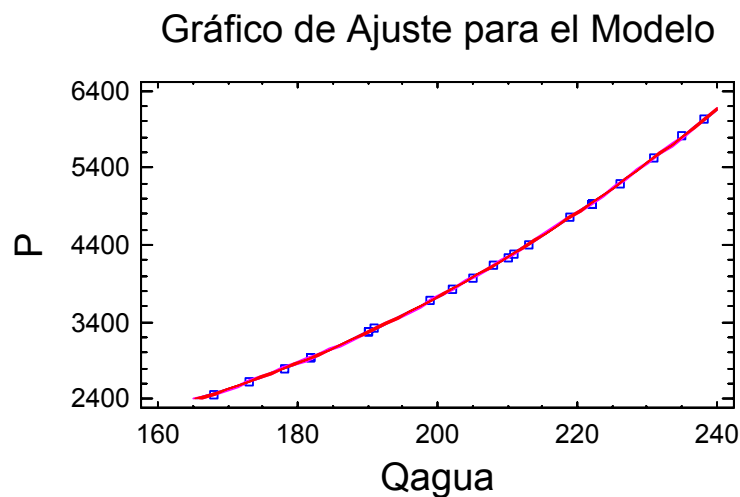


Fig. 2.20 Gráfico del ajuste para el modelo de Regresión Polinomial entre la Potencia (kW) y el Qagua (m3/h).



A continuación se presenta en el gráfico de la figura 2.21 los resultados de estimación de la potencia necesaria para impulsar el caudal de agua, para la carga de enfriamiento promedio anual y la carga de enfriamiento utilizando estrategias ocupacionales.

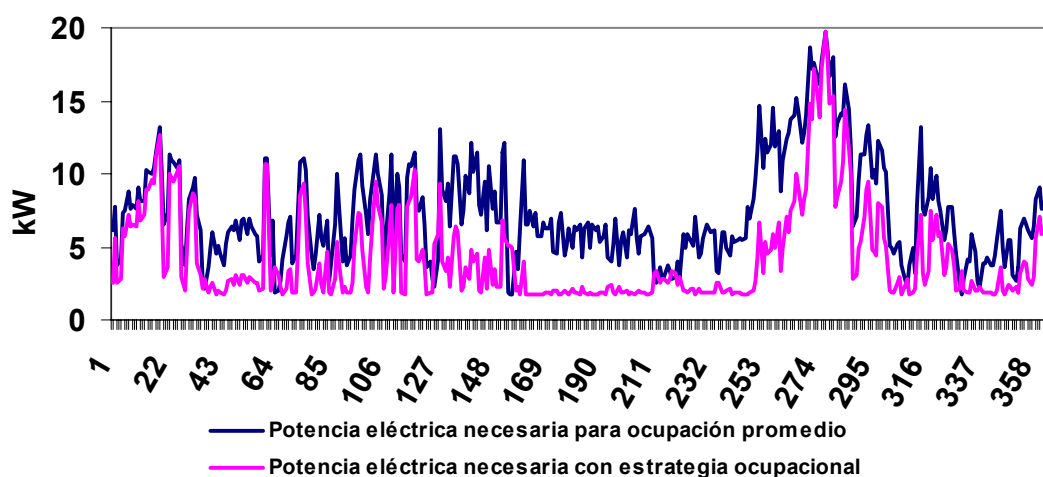


Fig. 2.21 Diferencias de demanda de potencia para el accionamiento trabajando con carga de enfriamiento anual y carga de enfriamiento con estrategia ocupacional.

Realizando una comparación entre la potencia que demanda la bomba para carga de enfriamiento promedio anual y la carga de enfriamiento con estrategia ocupacional, se tiene que para esta última variante de ocupación se pueden obtener ahorros de un 42 %. Este porcentaje se calcula sobre la base de los valores promedios 7.3 kW y 4.3 kW respectivamente.

Para tener una idea más aceptada de los rangos de operación de la bomba, también se determinó la expresión que relaciona la frecuencia de operación del motor en relación con los mismos valores de caudal, resultando la siguiente expresión:

$$f=25.8097+0.0521683*Q_{agua} \quad (7)$$



Dado que el p es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre f y Q_{agua} para un nivel de confianza del 99%. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 92.3389% de la variabilidad en f . El coeficiente de correlación es igual a 0.960931, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0.31407. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones

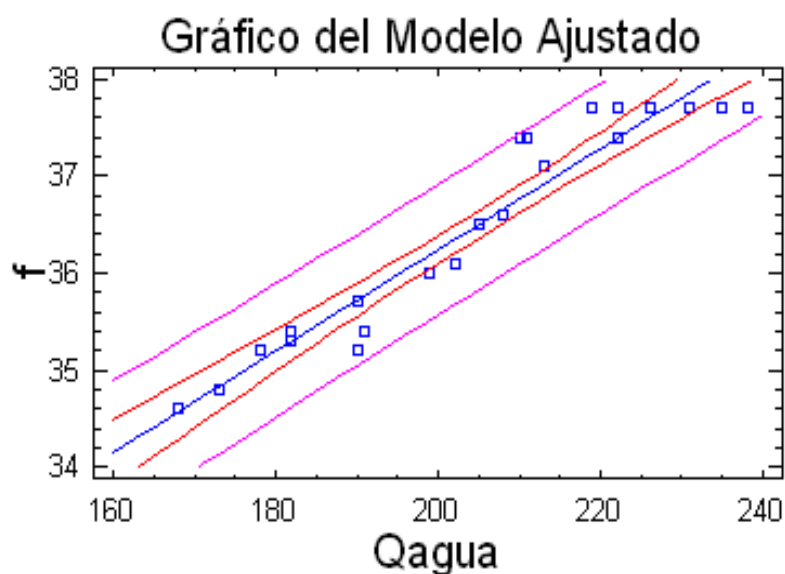


Fig. 2.22 Gráfico del ajuste para el modelo de Regresión Polinomial – entre la Frecuencia (Hz) y el Q_{agua} (m³/h).

Capítulo. 3. Valoración, técnico-económica y medio ambiental.

3.1 Introducción

El inicio del tercer milenio representa para la humanidad la encrucijada de una nueva elección energética, frente al agotamiento de los combustibles fósiles por una parte, pero sobre todo, por la amenaza de una catástrofe ecológica, al rebasarse los límites de capacidad del planeta para asimilar sus negativos impactos. Es muy importante establecer un procedimiento que posibilite mejorar el funcionamiento de los CSAF cumpliendo sus



prestaciones y en relación directa con el ahorro de energía eléctrica. Un elemento, en el cual se puede trabajar para disminuir los costos de operación en una instalación hotelera lo constituye la eficiencia energética, es por ello, que este trabajo constituye una oportunidad dentro del sector.

3.2 Valoración técnica: Procedimiento para estimar y ahorrar energía en un CSAF.

Una vez aplicadas las propuestas de modelación y cálculo de parámetros de un CSAF en función de mejorar sus condiciones termoenergéticas se propone un procedimiento que permite desde el conocimiento de la carga térmica de enfriamiento anual, modelar su comportamiento. El procedimiento incluye la estimación del consumo de energía eléctrica del conjunto motor – bomba y la estrategia ocupacional para mejorar este aspecto.

A continuación se comentan por pasos la propuesta del procedimiento:

1. Captura de datos de la simulación térmica del edificio.
2. Diseño del modelo de la RNA para valores máximos de carga de enfriamiento diaria y valores de carga de enfriamiento horaria.
3. Balance de masa y energía de los CSAF para la determinación del caudal de agua necesario.
4. Modelación energética de la bomba del CSAF.
5. Evaluación de los impactos energéticos, económicos y ambientales.

Para entender la interrelación entre los elementos que forman parte del procedimiento se presenta en la figura 3.1 el algoritmo correspondiente.

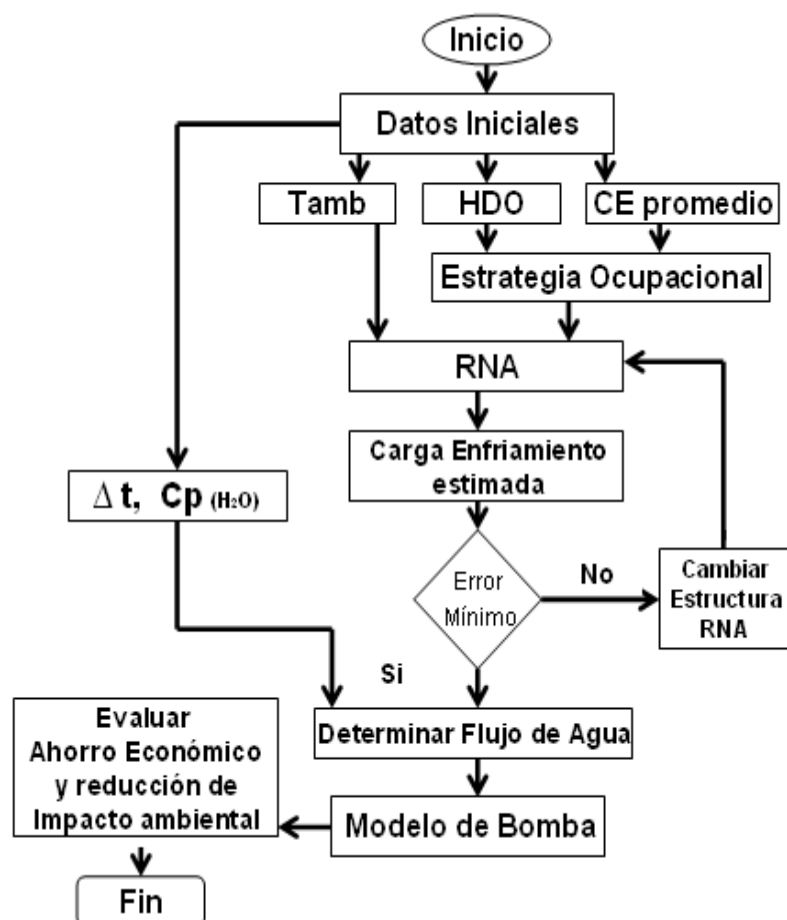


Fig. 3.1 Diagrama de bloques del procedimiento general para estimar y mejorar el consumo de energía en los CSAF.

En el epígrafe 2.3 se describe la técnica empleada para obtener los resultados finales del procedimiento y durante el desarrollo de todos los restantes epígrafes del capítulo 2 aparecen los requerimientos específicos.

El programa desarrollado en Matlab que permite el tratamiento de los datos, que se utilizaron como base en la investigación, así como las instrucciones que permitieron dar una respuesta automatizada para definir una estrategia ocupacional se presentan a continuación:



```
load CCE_termica
CCEMax = max(CCE,[],2); % Maximo de cada habitación cada día del año
for H=1:59
    CCEMax1(:,H)=[CCEMax(:,H)]; % Matriz de máximo de CCE por cada habitación los 365 días
end
load Ocupacion
CTR = CCEMax1.*ocp; % Carga térmica real anual
SumCTR =sum(CTR,2); % Suma por por fila de las CCE Máxima
MaxSumCTR = max(SumCTR); % Maximo
SumCTRpu = SumCTR/MaxSumCTR; % Carga Térmica Real en pu
CCE_S = sum(CCE,3); % Suma de todas las matrices por columnas
CCE_8h=[CCE_S(:,1) CCE_S(:,4) CCE_S(:,7) CCE_S(:,10) CCE_S(:,13) CCE_S(:,16)...
    CCE_S(:,19) CCE_S(:,21)];
MaxCCE_8h = max(CCE_8h(:)); %Valor m'aximo de la carga de enfriamiento
CCEfinal = CCE_8h/MaxCCE_8h; % Valores de CCE_8h en por unidad
B = permute(CCEfinal,[2 1]); %Permuta fila por columna
CCE2 = reshape(B,[],1); % Matriz de carga de enfriamiento en un vector columna
CCE1 = reshape(B,1,[]); % Matriz de carga de enfriamiento en una fila
load HDOdos
C = permute(HDO2,[2 1]);
HDO = reshape(C,[],1); % Matriz de HDO en una columna
HDO1 = reshape(C,1,[]); % Matriz de HDO en una fila
load Tamb8h
MaxTamb8h = max(Tamb8horas(:));
Tamb8h = Tamb8horas/MaxTamb8h;
D = permute(Tamb8h ,[2 1]);
Tamb = reshape(D,[],1); % Matriz de Temp Amb en una columna
Tamb1 = reshape(D,1,[]); % Matriz de Temp Amb en una fila
Tmax = max(Tamb8h,[],2); % determina el valor max de Tamb de los 8 datos de cada día
Tmin = min(Tamb8h,[],2); % determina el valor min de Tamb de los 8 datos de cada día
ERNA1 = [Tmax; Tmin; HDO2(:,1)'];
HDO2sim1 = HDO2(:,1)';
save ERNA1 Tmax Tmin HDO2sim1
save SRNA1 SumCTRpu
```



```
A = CCEMax1
Z = ocp
Z1 =sum(Z,2);
AH=A.*Z; % Multiplicación punto a punto
AHsuma = sum(AH,2); % Suma de la multiplicación
[W,K]=sort(CCEMax1,2); % Ordenada de menor a mayor y lugar que ocupa
G = size(A);
for J = 1:G(1); % 365
for I=1:G(2); %
F(I,J)= sum(W(J,1:I),2); % Suma de carga termica
end
end
SER = ['SCT1 SCT2 CT1 CT2 OCT1 OCT2']
CEopt=F';
```

3.3 Valoración económica y medio ambiental

Como se conoce las bombas de los CSAF trabajan los 365 días del año, las 24 horas del día por lo que cualquier acción que represente una disminución pequeña de la demanda constituye cantidades significativas de energía. Un kWh ahorrado en eje de motor, cada día, durante un año, supone 1 054 kWh anuales ahorrados en energía primaria, lo que permitiría dejar de quemar más de 0.4 ton de petróleo de mediana calidad y una reducción en las emisiones contaminantes de 1686.4g de NO_x, 4848.4g de SO₂ y 864280g de CO₂.

De la simulación térmica del edificio caso de estudio se tomaron los valores máximos diarios de la carga de enfriamiento. Para estas condiciones máximas que debe satisfacer el CSAF se realizaron los cálculos de la demanda de potencia eléctrica. Este cálculo de potencia arrojó como resultado que para el uso que se le da al edificio en todo un año característico la demanda del conjunto motor bomba es de 7 kW como promedio.



Si el hotel empleara la estrategia ocupacional que se propone en el capítulo 2, la cual permite ubicar a los clientes en las habitaciones con menores cargas térmicas de enfriamiento, entonces la demanda eléctrica sería aproximada a 4 kW. Esta diferencia de 3 kW representa para un día de trabajo unos 72 kWh y en un año 26280 kWh. Como los cálculos se realizaron para condiciones máximas, se aplica un coeficiente de 0,50 arrojando como resultado el ahorro aproximado de unos 13140 kWh año lo que significa aproximadamente unos 1445,00 CUC. En materia de combustible para generar esta electricidad que se ahorra, significa dejar de quemar 28,8 tn.

Considerando que esta situación pueda ser similar en las restantes 4 zonas con bombas y motores de estas dimensiones, entonces se podría pensar en un ahorro de energía de 65700 kWh/ año (7227,00 CUC/ año).

Las emisiones gases de efectos invernadero se traducen en un aumento de la temperatura ambiental, lo que ocasiona cambios apreciables en el planeta. Al calcular los niveles que se pueden eliminar en relación al combustible que se ahorra, equivale a 121420,8 g de NO_x, 349084,8 g de SO₂ y 62228160 g de CO₂.



Conclusiones

- Se puede sustituir el simulador térmico de edificios para el caso de estudio por una red neuronal artificial feedforward back propagation de tres capas para determinar el valor máximo para cada día de la carga de enfriamiento, a partir de las variables temperatura ambiente máxima, temperatura ambiente mínima y las habitaciones días ocupadas. La primera capa cuenta con tres neuronas, con la función de transferencia tangsig (tangencial sigmoideal). La capa intermedia es de 9 neuronas con la misma función tangsig y la última capa es de una neurona con la función de transferencia pureline. El error de la predicción es de 0,00073.
- Considerando el CSAF como un gran intercambiador de calor, mediante la ecuación del calor se puede determinar el flujo de agua necesario para lograr el confort.
- Reestablece una relación polinómica de segundo orden mediante la expresión P contra caudal de agua, $P = 6104.29 - 72.6521 \cdot Q_{\text{agua}} + 0.303696 \cdot Q_{\text{agua}}^2$ que permite estimar el consumo de energía eléctrica del conjunto motor bomba del CSAF caso de estudio.
- A partir de los valores de la carga de enfriamiento anual de cada habitación, se puede trazar una estrategia ocupacional de la zona # 6 del Hotel, ubicando a los clientes según un criterio termoenergético. Esta medida puede representar el ahorro de unos 13140 kWh/año, 1445,00 CUC y unas 28,8 tn de combustible en la generación de la electricidad.
- Se puede predecir las cargas térmicas parciales para ocho horas del día mediante una RNA a partir de la temperatura ambiente y las HDO con un 81% de ajuste.



Recomendaciones

- Proponer a las cadenas hoteleras aplicar este resultado incluyendo la simulación térmica de las edificaciones que permitan mejorar la eficiencia energética de la climatización centralizada.
- Optimizar el valor del set point de la presión de descarga de la bomba, atendiendo a las distintas estaciones climáticas y a los niveles ocupacionales en correspondencia con las temporadas y los resultados preliminares de esta investigación.
- Aplicar una estrategia ocupacional similar a la propuesta, para las demás zonas del hotel y en otras instalaciones que posean climatización centralizada.
- Perfeccionar la aplicación en Matlab con la integración de los resultados del procedimiento propuesto en la tesis en función de automatizar las tareas en cuanto a la toma de decisiones de cómo operar los CSAF.



Bibliografía.

- [1] Aguilar Bermúdez, José Carlos. Herramientas para la predicción energética en el hotel Blau Costa Verde. Tesis de Grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2009.
- [2] Aguirre, C. *Ahorros de Energía en Sistemas HVAC de Hoteles mediante el uso de Variadores de Velocidad*, Habana, 2002, [2003-10-20] Disponible en: <http://www.conae.gob.mx/ahorro/escos.html#inicio>.
- [3] Armas Valdez, Juan Carlos. Procedimiento para la optimización de sistemas de Climatización Centralizados por Agua Helada desde la etapa de diseño conceptual. Tesis Doctoral. Universidad de Cienfuegos. 2008.
- [4] ASHRAE., "Improving the Efficiency of Chilled Water Plants - Avery", Gil ASHRAE, EE.UU, May, 2001
- [5] BEECKMANS, V; J. DE LARA. Optimización de la altura manométrica de la bomba y ahorro energético. [2003-3-3]. Disponible en: <http://www.energuia.com>.
- [6] Cabrera Gorrín, Osmel. Reflexiones sobre el consumo del sector turístico Cubano. Disponible en www.monografia.com, Habana, 10 de Abril de 2006.
- [7] Delgado Velásquez, Orlando. Componentes de la climatización centralizada en hoteles: propuestas para racionalizar el consumo energético. Tesis de Grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2009.
- [8] Discurso del ministro del turismo Manuel Marrero Cruz el 8 de mayo de 2007
- [9] Discurso del ministro del MINTUR en la asamblea Nacional del PP 2008.
- [10] González García, Juan Manuel. [Sistema](#) de [gestión](#) integrada de [servicio](#) energético. Gestión de hoteles. Varadero. Sep.- octubre-1999. Pág. 7-14.
- [11] Guopeng Liu, Mingshen Liu. Application Study of the Pump Water Flow Station for Building Energy Consumption Monitoring and Control Optimization. HVAC Technologies for Energy Efficiency, 2008. Vol. V-1-1.
- [12] Hernández Velásquez, Jorge (2005). Cambio a caudal variable del sistema de clima central de la villa del Hotel Brisas Guardalavaca. Tesis en opción del título de Master en Automática. Universidad de Oriente. 135p.



- [13] Improve Chiller Plant Efficiency", Atlanta, Georgia, EUA. Disponible:<http://www.automatedbuildings.com>. Visitado: Febrero 2004.
- [14] Rodríguez Lozano, Marlene Orama Ortega, José Luís Sánchez Ávila. Evaluación y propuesta de solución del sistema de suministro de agua para la climatización de habitaciones de un hotel de varadero. Revista Retos Turísticos 2006.
- [15] Lozada Núñez, Dayana (2007). Tecnología para dinamizar la cooperación en la innovación en el producto turístico del destino Holguín. Tesis de Maestría. Universidad de Oriente. facultad de Ciencias Económicas y Empresariales.
- [16] M. d. I. I. Básica., "La Revolución Energética. Resultados y Perspectivas", Habana, Cuba, 2008.
- [17] Marcos A, de Armas Teira, Julio Gómez Sarduy, Carlos Pérez Tello y otros. Inteligencia Artificial Aplicada al análisis de sistemas energéticos con Matlab. Cienfuegos, 2008.
- [18] Marrero Ramírez, S, R.; [et]. Diagnóstico Energético Hotel Sol Club Río de Mares. Grupo de Eficiencia Energética de Moa, ISMMM, 2000. 69p.
- [19] Marrero Ramírez, R.; [et]. Diagnóstico Energético Hotel Súper Club Breezes Costa Verde. Grupo de Eficiencia Energética de Moa, ISMMM, 2001. 58p.
- [20] Molina González, Arnaldo... [et al.]. Metodología de gestión tecnológica para aumentar la efectividad en el uso de la energía en instalaciones turísticas. 5^{to} Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente. Cienfuegos, 2008, 9
- [21] Montelíer Hernández, Dr. Aníbal Borroto Nordelo, Dra. Margarita Lapido Rodríguez, Dr. José Monteagudo Yáñez, Dr. Mario Álvarez Guerra Plasencia, MSc. Juan. C. Armas. Cienfuegos, 2007.
- [22] Montelíer Hernández, Sergio. Reducción del consumo de energía en instalaciones con sistemas de C.C todo agua a flujo. Tesis Doctoral. Cienfuegos, 2008.
- [23] Montero Laurencio, R.;[et]. Diagnósticos Energéticos y su influencia en la Gestión Empresarial en Hoteles. III Convención "Entorno Agrario 2005".
- [24] Montero Laurencio, R. La asimilación de tecnologías en el turismo y su impacto en el consumo energético. 23p. PSCT. Moa, 2008.

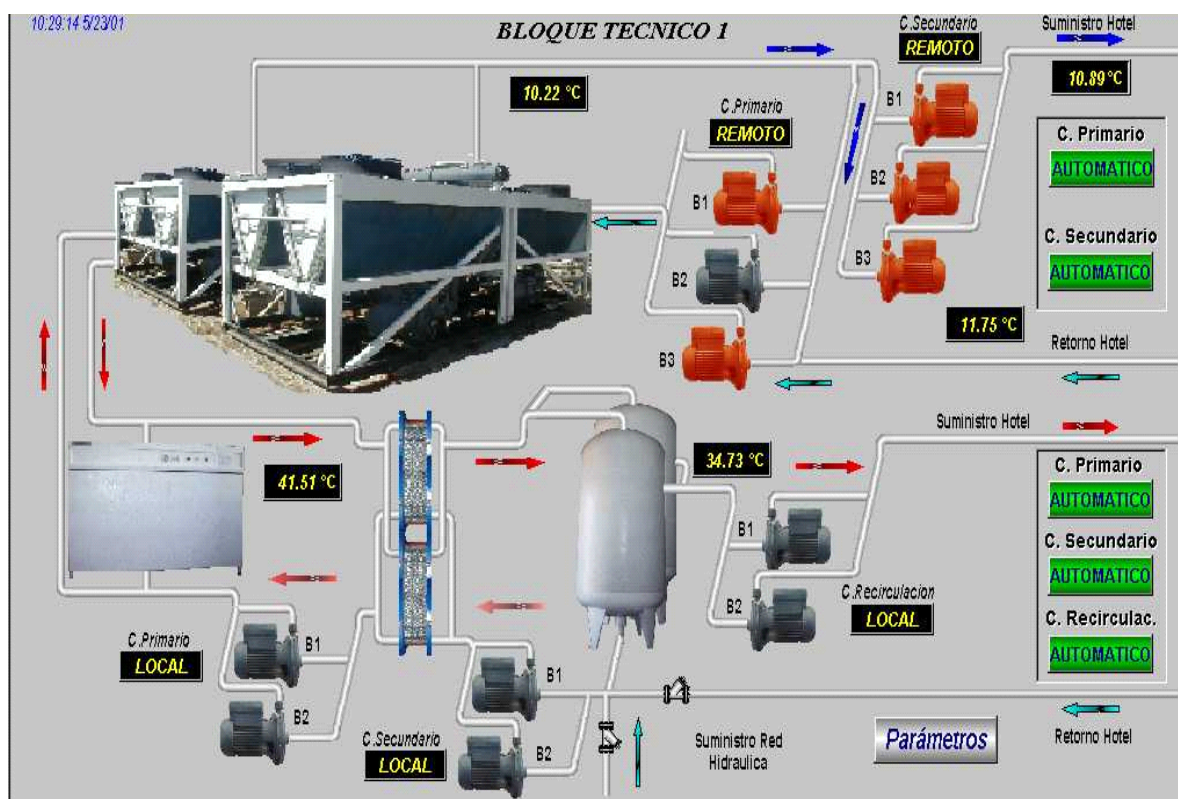


- [25] Montero Laurencio, Reineris. Disminución del consumo energético en los circuitos secundarios de agua fría de la climatización centralizada de hoteles. Tesis de Maestría. I S M M de Moa. 2004.
- [26] NC-45-1-3. Requisitos de diseño para la eficiencia energética.
- [27] NC -220-1, 2,6-9. Bases del diseño para el turismo.
- [28] Pérez Ajo, Pablo. Raúl Mario del Toro Matamoros, Héctor Martínez Ochoa. Ahorro Energético en los Sistemas Climatización y Refrigeración. Cienfuegos 2002.14p.
- [29] Peter Sabeff. Primary-Secondary Pumping Design Considerations. National Conference on Building Commissioning. Mayo. 9-11.2001. 15 p.
- [30] Torres Rodríguez, Roberto Manuel. Tecnología para la gestión de los servicios técnicos en hoteles de sol y playa: Aplicación de hoteles de Holguín. Tesis de Doctorado. 2008. Universidad de Holguín. 196 p.
- [31] Uribaz Arzuaga, E. R...[et.al.]. Control Borroso del clima de un hotel. Centro de Estudios de Automatización (CEA). Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. 2007.
- [32] Vilaragut Llanes, M.; Costa Montiel, A. Análisis y simulación de accionamientos de velocidad variable con optimización de la eficiencia utilizando lógica difusa. Convención Internacional de Ingeniería en Cuba, 2008. 10p.



Anexo 1

Esquema general de la climatización centralizada, en la parte superior se encuentra el sistema de impulsión de agua fría y en la inferior el sistema de impulsión de agua caliente.





Anexo 2

Algunas medidas a tomar en cuenta para la reducción del consumo de energía en el sistema de bombeo.

- Sacar de servicio bombas innecesarias.
- Restaurar las holguras internas de las bombas.
- Recorte o cambio de impelentes si la carga es excesiva.
- Reemplazo de bombas sobredimensionadas.
- Uso de bombas múltiples conectadas en paralelo ofrece una alternativa a los métodos de control de capacidad por estrangulamiento, recirculación o variación de velocidad.
- Usar una bomba (Booster) para suministrar el flujo a altas presión que requiere un consumidor específico.
- Cambio de velocidad de la bomba. Acoplamientos o transmisiones con relación de velocidad variable, Motores eléctricos de dos velocidades, variadores de frecuencia.
- Reparar sellos y empaquetaduras para minimizar desperdicio de agua.
- Balancear el sistema para minimizar flujos y reducir requerimientos de potencia.
- Usar el efecto sifón si es posible.



Anexo 3

Representación en orden ascendente de las habitaciones que poseen menor carga térmica anual hasta la que tienen mayor. Esta información permite crear una estrategia ocupacional, la cuál puede ser utilizada por el personal de recepción, con el objetivo de ubicar a los clientes por ese orden en la medida que realicen el arribo a la instalación.

1er grupo de habitaciones.

orden	# de Habit	KJ/Kg.K
1	6220	1295370
2	6221	1295370
3	6114	1310820
4	6117	1310820
5	6118	1310820
6	6207	1315367
7	6208	1315367
8	6103	1337605
9	6104	1337605
10	6108	1337605

2do grupo de habitaciones.

orden	# de Habit	KJ/Kg.K
11	6107	1530196
12	6203	1576240
13	6204	1576240
14	6115	1641015
15	6217	1671734
16	6102	1760418
17	6105	1760418
18	6210	1760418
19	6202	1838492
20	6205	1838492
21	6206	1838492
22	6209	1838492
23	6116	1919037
24	6119	1919037
25	6216	1919037
26	6218	1954102
27	6219	1954102
28	6222	1954102
29	6106	1956576
30	6101	1982141
31	6110	1989069

3er grupo de habitaciones.

orden	# de Habit	KJ/Kg.K
32	6109	2014575
33	6201	2045287
34	6120	2282578
35	6223	2322222
36	6112	2338627
37	6301	2408959
38	6111	2441550
39	6302	2625895
40	6305	2625895
41	6306	2625895
42	6314	2711540
43	6315	2711540
44	6318	2711540
45	6303	2735795
46	6304	2735795
47	6307	2735795
48	6308	2735795
49	6309	2735795

4to grupo de habitaciones.

orden	# de Habit	KJ/Kg.K
50	6319	3094349
51	6310	3237412
52	6211	3469566
53	6212	3585144
54	6312	3588151
55	6316	3588151
56	6317	3588151
57	6215	4053272
58	6311	4090695
59	6214	4169062



Anexo 4

Valores del flujo de agua mas racional a transportar para ocupación promedio.

Días	Flujo necesario	Días	Flujo necesario	Días	Flujo necesario	Días	Flujo necesario	Días	Flujo necesario
1	14,40902432	33	16,86502454	65	9,027638732	97	17,79449645	129	16,43956983
2	15,62771428	34	15,21185578	66	10,50617725	98	16,56545829	130	15,904015
3	12,00691353	35	14,32881034	67	12,49562646	99	15,25631588	131	16,66247191
4	12,51480698	36	10,15786269	68	14,00788595	100	14,11472198	132	14,56766195
5	15,33432947	37	9,111585404	69	14,77512426	101	15,95127093	133	17,76191362
6	15,42804355	38	11,79920185	70	15,07612329	102	17,24543804	134	17,76998934
7	16,31925401	39	13,32038097	71	12,15582155	103	17,83003714	135	17,45180079
8	15,53479223	40	14,31078293	72	12,72980238	104	17,02102062	136	14,66394059
9	15,68831734	41	12,84830808	73	15,59265224	105	16,17256732	137	15,43191983
10	15,46394684	42	13,47201897	74	17,50671123	106	12,19453931	138	17,01977899
11	16,45581108	43	12,84370728	75	17,71547891	107	13,97939591	139	16,26752735
12	15,89288657	44	12,04929774	76	17,21293307	108	16,20848028	140	18,23267736
13	15,91115706	45	13,58099972	77	15,08050263	109	17,84079025	141	17,15926332
14	17,18241436	46	14,30137521	78	12,76023689	110	13,69551067	142	17,8880827
15	17,13752506	47	14,64444247	79	11,64386146	111	17,02612624	143	15,70881546
16	17,08839834	48	14,32276828	80	12,7687913	112	16,51450067	144	15,15927605
17	17,29553678	49	14,92412759	81	15,24855812	113	12,79294962	145	16,76771236
18	17,91254162	50	13,86387048	82	13,91477294	114	12,39350144	146	14,42606621
19	18,81953797	51	14,95584731	83	13,40153913	115	16,9132347	147	17,37457302
20	17,17304251	52	15,01678509	84	14,86684126	116	17,42863321	148	15,52433979
21	14,72793303	53	14,13779834	85	10,42512513	117	17,41280642	149	16,30477876
22	15,32144248	54	15,00499947	86	12,14166676	118	17,89242238	150	14,83402763
23	17,82183338	55	14,55326737	87	14,73371799	119	15,6717111	151	14,84242304
24	17,61341256	56	14,15937819	88	17,06903686	120	15,41334406	152	17,88004045
25	17,54701888	57	14,06444279	89	15,64172753	121	16,03276186	153	18,27789032
26	17,32223684	58	12,39258858	90	12,38632387	122	14,73419765	154	6,335275743
27	17,59875526	59	12,81561758	91	13,95153068	123	11,89130297	155	6,483837464
28	13,5334325	60	17,64531689	92	11,99717179	124	12,3246924	156	6,66447476
29	12,04992852	61	17,64531689	93	12,773484	125	10,65806616	157	13,02475536
30	14,456484	62	12,7344786	94	15,00650029	126	4,784929589	158	11,74416008
31	15,95970545	63	14,89491679	95	16,39722069	127	1,874684278	159	14,41258629
32	16,46231855	64	7,973297616	96	17,60550488	128	18,77700009	160	17,60889472



Días	Flujo necesario	Días	Flujo necesario	Días	Flujo necesario	Días	Flujo necesario	Días	Flujo necesario	Días	Flujo necesario
161	14,66460254	193	12,57026456	225	13,64443543	257	19,48889762	289	15,05950348	321	15,86987813
162	14,69320913	194	12,33418787	226	13,45348511	258	18,09832294	290	16,82274424	322	15,40336462
163	15,41401272	195	13,5273714	227	15,103749	259	18,69332225	291	17,8402945	323	13,74677423
164	14,59769732	196	15,00986985	228	12,57842016	260	16,31072653	292	17,82639346	324	14,36191977
165	15,31789613	197	12,01486014	229	12,87383723	261	17,63087599	293	18,54068044	325	15,61303318
166	14,04121969	198	13,76452553	230	13,86576074	262	18,43313732	294	18,89166981	326	15,55064549
167	14,00495845	199	14,30747787	231	14,65288462	263	18,61646018	295	16,92989769	327	14,23039296
168	14,83444136	200	12,61605371	232	14,50541927	264	19,11180111	296	17,22957574	328	12,89917365
169	14,43511871	201	14,37762344	233	14,23922619	265	19,23903689	297	16,69068874	329	9,963552961
170	14,53773158	202	14,10351761	234	14,41947912	266	19,82803041	298	18,33293871	330	7,799334564
171	14,97461041	203	15,46327137	235	11,51502804	267	19,37138291	299	17,95981998	331	10,68156079
172	13,00557745	204	13,93460755	236	11,36295319	268	18,23942244	300	17,31602286	332	12,41737942
173	12,88511438	205	12,95340629	237	14,21493779	269	18,62241244	301	17,1073512	333	12,34116466
174	14,84405333	206	14,03666482	238	14,29698913	270	19,25099475	302	13,45644273	334	14,12691677
175	15,33008482	207	14,19097355	239	13,33998531	271	21,32794944	303	13,3167798	335	13,10222757
176	12,74634424	208	14,37770063	240	12,79823092	272	20,70324219	304	12,87223615	336	10,46756753
177	13,46733231	209	14,60586413	241	14,07327021	273	20,89963912	305	13,59423889	337	9,451780413
178	14,48022596	210	13,87251594	242	13,74238913	274	20,40257713	306	13,72782757	338	12,17103131
179	13,29189951	211	10,37977055	243	13,76992275	275	20,22068136	307	12,02407133	339	12,13289755
180	14,54643238	212	10,23026421	244	13,87759924	276	20,9367571	308	10,38619144	340	12,61337609
181	14,37966072	213	11,91590803	245	13,84282905	277	21,77955919	309	9,497638272	341	12,04121681
182	14,7243523	214	10,72189123	246	13,89358349	278	21,25722049	310	12,00468179	342	11,99493326
183	12,57673779	215	10,91857438	247	15,62345743	279	20,45314333	311	13,32350236	343	12,70422285
184	14,44810987	216	11,97118405	248	15,0426152	280	21,07389697	312	11,3280598	344	13,83110195
185	14,79570069	217	11,5642853	249	15,93707182	281	18,44450294	313	15,64032279	345	15,36899021
186	13,26667925	218	10,64568718	250	16,88661674	282	18,97644715	314	18,81878546	346	13,24611877
187	14,70459122	219	10,98382745	251	17,95468246	283	19,27672738	315	15,46634862	347	11,87472807
188	14,38137938	220	12,27088445	252	19,5350984	284	19,20045142	316	15,17264228	348	13,76995549
189	14,59560795	221	10,92571502	253	17,29897721	285	20,24081233	317	16,07479492	349	13,79468616
190	13,74445146	222	14,18234527	254	18,43811559	286	19,41866846	318	17,26043359	350	11,21241345
191	14,04095091	223	13,33802115	255	17,90480774	287	18,03030634	319	15,95420658	351	10,37489298
192	14,64769691	224	14,1088793	256	18,18638625	288	14,59742555	320	16,9659101	352	11,80538328

Flujo necesario	Días	Flujo necesario	Días	Flujo necesario
14,53747931	357	13,96678184	361	15,52885571
15,04978253	358	14,6233995	362	15,7030605
14,73387597	359	15,96630434	363	15,77132845
14,38471896	360	16,51228544	364	13,11427979
			365	14,17371854



Anexo 5

Conjunto de datos con los cuales se realizó la prueba escalonada de la bomba.

No	Hora	Tret (°C)	V(m/s)	Q (L/min)	f (Hz)	Hab	Tamb (°C)	No. Hab	Pret (bar)	Penv (bar)
1	2:45 pm	13,5	0,84	168	34,6	6301	28,5	1	1,10	5
2	2:49 pm	13,1	0,86	173	34,8	6319	28,5	2	1,14	5
3	2:53 pm	13,7	0,88	178	35,2	6302	28,5	3	1,14	5
4	2:55 pm	13,5	0,94	190	35,7	6318	28,5	4	1,14	5
5	2:58 pm	13,8	0,95	191	35,4	6303	28,5	5	1,17	5
6	3:01 pm	13,8	0,9	182	35,4	6317	28,5	6	1,17	5
7	3:04 pm	13,8	0,9	182	35,3	6304	28,5	7	1,15	5
8	3:06 pm	14,2	0,94	190	35,2	6316	28,5	8	1,16	5
9	3:09 pm	14,6	0,99	199	36	6305	28,5	9	1,18	5
10	3:11 pm	14,7	1	202	36,1	6315	28,5	10	1,19	5
11	3:15 pm	14,9	1,02	205	36,5	6306	28,5	11	1,21	5
12	3:18 pm	15,1	1,04	208	36,6	6314	28,7	12	1,21	5
13	3:20 pm	15,1	1,06	213	37,1	6307	28,6	13	1,21	5
14	3:24 pm	15,4	1,05	210	37,4	6308	28,7	14	1,21	5
15	3:27 pm	15,6	1,04	211	37,4	6312	28,7	15	1,28	5
16	3:30 pm	15,9	1,1	222	37,4	6309	28,6	16	1,28	5
17	3:32 pm	16,1	1,1	222	37,4	6311	28,6	17	1,28	5
18	3:34 pm	16,3	1,08	219	37,7	6310	29	18	1,31	5
19	3:40 pm	16,7	1,1	222	37,7	6201	29,4	19	1,31	5
20	3:49 pm	16,9	1,14	231	37,7	6202 - 6206	29,3	24	1,33	5
21	3:56 pm	17,6	1,12	226	37,7	6207 - 6212	29,4	30	1,40	5
22	4:09 pm	17,6	1,17	238	37,7	6214 - 6223	28	40	1,48	5
23	4:26 pm	18,1	1,15	235	37,7	todas	27,7	59	1,50	5