

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

“CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ”

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CENTRO DE ESTUDIOS DE ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO CIENTÍFICO DE DOCTOR EN
CIENCIAS TÉCNICAS**

**REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN
INSTALACIONES CON SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN
CENTRALIZADOS TODO-AGUA A FLUJO CONSTANTE**

Autor: M. Sc. Sergio Montelíer Hernández

Tutores: Dr. CT. Aníbal Borroto Nordelo

Dr. CT. Marcos de Armas Teyra

Consultante: Dr. CT. Julio Gómez Sarduy

Cienfuegos 2008

AGRADECIMIENTOS.

Especialmente, extendiendo mis más sinceros agradecimientos a mi familia, la cual, durante mi vida profesional me ha brindado todo el apoyo y comprensión, a pesar del tiempo y la distancia, que en ocasiones importantes de nuestra vida, con frecuencia nos separan.

A mis tutores **Dr.C. Aníbal Borroto Nordelo**, quien con su experiencia, capacidad profesional y dedicación me condujo a la terminación de este trabajo. A los doctores, **Dr.C. Marcos de Armas Teyra y Dr.C. Julio Gómez Sarduy** por su ayuda, esfuerzo, y dedicación, la cual contribuyó definitivamente a la culminación de esta tesis.

A todas aquellas personas del Departamento de Mecánica y del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente que siempre estuvieron al tanto del desarrollo de este trabajo.

A mis amigos, que siempre me apoyaron, especialmente a mi excelente compañero de estudio, y hermano **Eniel Lorenzo Suárez**.

SÍNTESIS

El trabajo aborda el desarrollo de un procedimiento para establecer la temperatura más adecuada del agua helada en los sistemas de climatización centralizados del tipo todo-agua a flujo constante, con el objetivo de reducir el consumo de energía bajo determinadas condiciones climatológicas y nivel de ocupación de una instalación dada. El estudio se desarrolla y se valida sobre un caso experimental en el Hotel Jagua de la Provincia de Cienfuegos. El trabajo se fundamenta en los principios físicos fundamentales de estos sistemas, de donde se derivan un grupo de incertidumbres y dificultades que conducen a la búsqueda de nuevas herramientas para modelarlos y alcanzar con ellas resultados que posibiliten reducir el consumo de energía en estos complejos sistemas.

A partir de bases de datos obtenidas de la simulación térmica del edificio y la experimentación, se diseña una red neuronal y se obtiene un modelo neuronal que posibilita determinar con gran exactitud la carga térmica de enfriamiento en función de las características constructivas de la edificación, las variables climatológicas y el nivel de ocupación. Partiendo de la carga térmica de enfriamiento obtenida mediante este modelo y las temperaturas extremas diarias, se diseña un sistema neuro difuso mediante el cual se determina el consumo de energía eléctrica del sistema de climatización en función de la temperatura de agua helada, conservando las condiciones de confort en las diferentes áreas y locales de la instalación. El análisis estadístico y el diseño de experimento validan la predicción del Sistema de Inferencia Difuso Neuro-Adaptivo (“ANFIS”) desarrollado y corroboran la existencia de un mínimo consumo en función de la temperatura de agua helada y el tiempo de trabajo del compresor.

Finalmente un algoritmo genético se encarga de encontrar el valor de ajuste de la temperatura del agua helada que posibilita reducir el consumo energético del sistema de climatización para las condiciones reales de explotación dadas.

Los resultados demuestran que con el nuevo procedimiento propuesto, de aplicación general en instalaciones de climatización todo-agua a flujo constante, se pueden obtener ahorros de energía del orden del 11 %, con la consecuente reducción de impacto ambiental asociado .

Palabras clave: agua helada, climatización centralizados, consumo de energía

TABLA DE CONTENIDOS

CONTENIDOS	Pág.
TABLA DE CONTENIDOS	
NOMENCLATURA DE LA TESIS	
INTRODUCCIÓN	1
1. ESTADO DEL ARTE	6
1.1- Situación energética mundial	6
1.1.1- La eficiencia energética	9
1.1.2- Eficiencia energética en Cuba	10
1.1.3- La eficiencia energética en el sector turístico cubano	11
1.2- Sistemas de climatización	12
1.2.1- Caracterización de los sistemas de climatización centralizados todo-agua utilizados en la hotelería cubana	14
1.3- Eficiencia energética de los enfriadores de agua helada	15
1.4- Simulación térmica de edificaciones. Uso de la inteligencia artificial	16
1.5- Simulación de los sistemas de climatización por agua helada Análisis crítico de los modelos	17
1.6- Aplicación de la inteligencia artificial en la gestión energética	29
1.6.1- Fundamentos básicos de las redes neuronales artificiales	29
1.6.2- Algoritmos Genéticos	30
1.7- Estrategias de operación de sistemas de climatización centralizados por agua helada. Métodos y herramientas para su implementación	32
1.7.1- Estrategias para incrementar la eficiencia de los sistemas de climatización centralizados del tipo todo-agua a cargas parciales	32
1.7.1.1- “ <u>Chillers</u> ” múltiples de diferentes capacidades	32
1.7.1.2- Sistemas con flujo variable de agua helada	33
1.7.1.3 - “ <u>Chillers</u> en serie y paralelo”	33
1.7.1.4- Control de la presión de condensación.	34
1.7.1.5- Ajuste de la temperatura del agua helada	36
2. PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS DEL TIPO TODO-AGUA A FLUJO CONSTANTE	40

2.1- Modelación termodinámica de los sistemas de climatización	40
2.2- Obtención del modelo de consumo de la instalación	41
2.3- Caracterización climatológica de la región	42
2.3.1- Caracterización climatológica de la región de Cienfuegos	44
2.3.2- Horas - Grado de la localidad	45
2.3.2.1- Horas - Grado de la región de Cienfuegos.	46
2.4- Características constructivas de las edificaciones	47
2.5- Características del caso de estudio "Hotel Jagua".	47
2.5.1- Características constructivas	48
2.5.2- Características del sistema de climatización	48
2.6- Simulación térmica de la edificación	51
2.6.1-Simulación térmica del Hotel Jagua Provincia de Cienfuegos	51
2.6.2- Estrategia de ocupación utilizada para la simulación térmica.	52
2.7- Modelo neuronal de las cargas de enfriamiento en la edificación	53
2.7.1- Modelación neuronal de las cargas de enfriamiento del hotel Jagua	55
2.7.2- Entrenamiento de la RNA y obtención del modelo neuronal resultante para el Hotel Jagua Provincia Cienfuegos	56
2.7.3- Validación de los resultados	59
2.8- Modelación del consumo energético del "chiller"	60
2.8.1- Base de datos experimentales	62
2.8.2- Modelo "ANFIS" del consumo del "Chiller"	63
2.8.3- Modelo general de consumo energético.	66
2.8.4- Validación del modelo	67
2.9- Análisis de la influencia de las variables del modelo sobre el consumo de energía.	69
2.9.1- Diseño de experimento	69
2.9.2- Generación de los datos a partir del prototipo numérico "RNA-ANFIS"	70
2.9.3- Modelo estadístico obtenido	70
3- PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE AGUA HELADA PARA REDUCIR EL CONSUMO DE ENERGÍA.	74
3.1- Fundamentos de los algoritmos genéticos.	74
3.2- Implementación del algoritmo	76
3.2.1- Función de aptitud empleada.	76
3.2.2- Tamaño de la población y población inicial.	76

3.2.3- Opciones de reproducción y operadores genéticos.	77
3.2.4- Criterios de parada y tratamiento de las restricciones	78
3.2.5- Algoritmo de optimización	78
3.3- Resultados de la optimización	80
3.3.1- Comparación entre criterios de operación actual y el criterio de operación con consumo reducido.	80
3.3.2- Valoración económica para los días de pruebas evaluados en este estudio	82
3.3.2.1- Reducción del impacto ambiental asociado	83
3.4- Descripción general del procedimiento	84
CONCLUSIONES GENERALES.	90
RECOMENDACIONES	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXOS	

NOMENCLATURA UTILIZADA

Término	Significado	Unidades
Q_e	Calor absorbido en el evaporador	kW
Cp_{agua}	Calor específico del agua	$\frac{kJ}{kg.K}$
Cp_{aire}	Calor específico del aire	$\frac{kJ}{kg.K}$
Q_c	Calor rechazado en el condensador	kW
Q_{ap}	Capacidad de refrigeración del sistema	kW
Q_T	Carga de enfriamiento	Toneladas de Refrigeración (ton)
COP	Coeficiente de trabajo del ciclo	-
c_4	Coeficiente de traspaso de calor por el lado del aire	$\frac{W}{K}$
c_5	Coeficiente de traspaso de calor por el lado del refrigerante	$\frac{W}{K}$
UA_c	Coeficiente global de traspaso de calor del condensador	$\frac{W}{K}$
UA_e	Coeficiente global de traspaso de calor del evaporador	$\frac{W}{K}$
COP_{nom}	Coeficiente nominal de funcionamiento del ciclo	-
R_0	Constante del gas refrigerante	$\frac{kJ}{kg.K}$
$c_1...c_3$	Constantes que se deben determinar a partir de los datos de trabajo del "chiller"	-
CA	Consumo de energía anual	kWh/año
E_{ch}	Consumo del "chiller"	kW
$Desv_{prom}$	Desviación promedio	%
X	Desviación individual	%
ΔH_c	Diferencia de entalpía del refrigerante en el condensador	kW
$LMDT$	Diferencia media logarítmica de temperatura	K
ε_c	Efectividad del condensador	-
ε_e	Efectividad del evaporador	-
Ei	Efecto ambiental indirecto	$kgCO_2/año$

η_{isen}, η_c	Eficiencia isoentrópica y mecánica del compresor respectivamente	%
α	Eficiencia volumétrica del compresor	%
EA	Energía ahorrada	kWh/año
$h_{1,2}$	Entalpía específica del refrigerante	$\frac{kJ}{kg}$
H_3, H_4	Entalpía refrigerante a la entrada y salida de la válvula de expansión.	$\frac{kJ}{kg}$
T_{ec}	Temperatura de entrada del agua al condensador	K
T_{ee}	Temperatura de entrada del agua al evaporador	K
γ	Exponente isentrópico	-
$Temp_{adj}$	Factor de ajuste de la temperatura	K
Z	Factor de compresibilidad	-
m_c	Flujo de agua de enfriamiento	$\frac{kg}{s}$
v_a	Flujo volumétrico de aire	$\frac{m^3}{s}$
m_r	Flujo másico refrigerante	$\frac{kg}{s}$
V	Flujo volumétrico del compresor	$\frac{m^3}{s}$
ΔS_T	Generación de entropía total del sistema	$\frac{kW}{K}$
W_o	Humedad relativa del aire exterior	(%)
e_{CO_2}	Índice de emisiones.	$\frac{kgCO_2}{kWh}$
$b_0 \rightarrow$	Intercepto de la curva	-
Lw43, LW32, LW21, IW11.	Matrices de peso para la RNA	-
Ocup	Nivel de ocupación	%
n	Número de observaciones	-
b_1	Pendiente de la curva	-
Q_p	Pérdidas de calor equivalente	kW

W_{lo}	Porción constante de las pérdidas electromecánicas del motor	kW
α_0	Porción de las pérdidas electromecánicas proporcionales al trabajo del compresor	-
P_{ch}	Potencia consumida por el "chiller"	kW
$P_{Chiller}$	Potencia consumida por el "chiller"	kW
P_{Comp}	Potencia consumida por el compresor	kW
$P_{ventiladores}$	Potencia consumida por los ventiladores	kW
W	Potencia real demandada por el compresor	kW
W_t	Potencia teórica del compresor	kW
P_{des}	Presión en la descarga	Pa
P_{suc}	Presión en la succión	Pa
p_1, p_2	Presiones de succión y descarga del compresor	Pa
PLR_{adj}	Razón de trabajo a cargas parciales.	-
RI	Reducción del impacto ambiental asociado	$\frac{kgCO_2}{año}$
R	Resistencia térmica total del intercambiador	$\frac{W}{m^2 * K}$
T_{ac}	Temperatura de entrada del agua de condensación	K
T_o	Temperatura del aire exterior	$^{\circ}C$
T_{ev}	Temperatura del evaporador	K
T_1	Temperatura del gas en la succión del compresor	K
T_{max}, T_{min}	Temperatura máxima y mínima diaria	$^{\circ}C$
T_r, T_s	Temperaturas de retorno y salida del agua helada	K
T_{sa}, T_{ea}	Temperaturas de salida y entrada del aire al condensador	K
W_{is}	Trabajo isoentrópico del compresor	kW
\bar{X}	Valor medio del conjunto de las desviaciones individuales	%.
V_1	Volumen específico del vapor en la succión del compresor	$\frac{m^3}{kg}$
CEtotal	Carga de enfriamiento total	ton
V_{suc}	Volumen específico en la succión del compresor	$\frac{m^3}{kg}$

INTRODUCCIÓN

Toda actividad entraña el uso de energía; no se exagera al decir que la historia de la energía se confunde con la historia de la humanidad. En Cuba, una gran parte de la labor técnica, científica e intelectual de la nación se ocupa en realizar una revolución energética para asegurar la producción y reafirmar la independencia y seguridad nacional. Esta revolución se materializa en la práctica mediante profundas transformaciones estructurales, indispensables para el desarrollo y el crecimiento económico. Desafortunadamente, la producción, conversión y el uso final de la energía generan productos indeseables y emisiones, sobre lo que es necesario actuar para reducir la carga medioambiental asociada a la acción del hombre para satisfacer sus necesidades energéticas.

Es indiscutible que el actual modelo energético, basado fundamentalmente en la producción de energía a partir de combustibles fósiles, es insostenible. Insostenible por la injusta distribución del acceso a los servicios energéticos, por su dependencia casi exclusiva de recursos limitados, y finalmente, por los negativos impactos sobre el medio ambiente que ocasionan daños irreversibles y de incalculables consecuencias futuras. La tendencia al encarecimiento de la energía, el agotamiento de los recursos naturales y el impacto ambiental, está presionando social y económicamente a la humanidad. También el costo y la carencia de alimentos están asociados a estos problemas energéticos.

Las vías fundamentales para transformar el esquema energético actual y avanzar hacia el desarrollo sostenible son la introducción de fuentes renovables de energía y el incremento de la eficiencia energética en todos los sectores. La eficiencia constituye una herramienta rentable en la lucha por alcanzar un futuro energético sostenible y un medio ambiente más saludable. Las mejoras en la eficiencia energética pueden reducir la necesidad de inversión en infraestructura energética, los gastos de combustibles, aumentar la competitividad y mejorar el bienestar de los consumidores [1].

En Cuba el turismo es uno de los sectores más dinámicos y una de las principales fuentes de ingresos de divisas del país [2], [3]. Este sector se caracteriza, en general, por su elevado, y en ocasiones poco racional consumo energético. No obstante, existe la posibilidad de reducir el consumo y los costos energéticos, sin afectar el nivel ni la calidad de los servicios prestados, mediante una efectiva gestión energética en los

principales procesos y equipos de uso final, respetando, por supuesto el confort de los ocupantes y el medio ambiente.

El consumo de electricidad representa la mayor partida dentro de los costos de energía del sector turístico, donde el sistema de climatización es responsable de aproximadamente el 65% de los gastos energéticos totales del hotel, debido fundamentalmente, a las condiciones climáticas características de las regiones tropicales [4], [5], [6], [7].

Por esta razón, es necesario implementar programas de ahorro energía en estas instalaciones, dirigidos a la reducción de los costos energéticos, priorizando el área de climatización, donde existen importantes potencialidades de ahorro a partir de diseños adecuados o de la implementación de estrategias operacionales enfocadas en este sentido.

En la literatura se reportan diversas estrategias de operación en los diferentes sistemas de climatización centralizados todo-agua, tanto con condensadores enfriados por agua como por aire [8]. Autores de prestigiosas compañías como TRANE [6], ARTI [9], YORK [10], POWERSAV ITT INDUSTRIES [11], HARTMAN [12] reportan que no existe una estrategia única para la operación eficiente de los “chillers”, ya que la misma depende de las características de la instalación y el equipamiento, así como de los parámetros exteriores y de operación que garanticen la seguridad, la vida útil de los equipos y el mantenimiento de las condiciones de confort.

Una de las variables que mayor influencia tiene sobre el consumo de energía de un sistema de climatización todo-agua es la temperatura del agua helada que sale del “chiller” y que se distribuye a las áreas y locales a climatizar [13], [14], [15], [16], [17]. Una mayor temperatura del agua helada conlleva, por una parte, a la elevación de la temperatura y presión en el evaporador, y por consecuencia, a la reducción de la potencia demandada por el compresor. Pero por otra parte, una mayor temperatura del agua helada extenderá el tiempo de trabajo del sistema necesario para vencer la carga de enfriamiento dada, y por tanto, tenderá a incrementar el consumo de energía de los compresores, bombas de agua y ventiladores de las manejadoras [13].

El uso de esta estrategia requiere de un especial cuidado debido a que un excesivo aumento en la temperatura de suministro del agua helada puede provocar que no se alcancen las condiciones de temperatura y humedad del aire en los locales climatizados, afectando las condiciones de confort y tampoco se logre el ahorro previsto [18], [6]. En general, el ajuste de la temperatura se realiza empíricamente por el personal de operación, sin lograr el aprovechamiento máximo del potencial de ahorro alcanzable mediante el control adecuado de esta variable, considerando las particularidades del sistema para las diferentes condiciones climatológicas y de ocupación del hotel. Puede incluso ocurrir que se vean afectadas las condiciones de confort.

En muchos de los sistemas donde es posible tomar esta medida, no se contempla el ajuste de la temperatura del agua helada como estrategia para la reducción del consumo de energía, o se considera una estrategia de limitada aplicación, dadas las afectaciones que puede implicar para el confort y el efecto adverso que tiene sobre el tiempo de trabajo del sistema para vencer una carga de enfriamiento dada [19].

Es así, que no se reporta en la literatura un análisis completo ni herramientas que permitan establecer la temperatura más adecuada del agua helada para lograr un consumo mínimo de energía, considerando tanto su influencia sobre la potencia que demanda el compresor, como sobre el tiempo que debe trabajar el sistema para vencer la carga de enfriamiento dada, y su dependencia de la propia carga de enfriamiento y de las condiciones del aire exterior.

Por tanto, constituye un **problema científico** el hecho de que los procedimientos utilizados actualmente para el ajuste de la temperatura del agua helada en sistemas de climatización centralizados todo-agua a flujo constante (**SCCAH**) no posibilitan minimizar el consumo de energía, manteniendo las condiciones de confort, al no considerar integralmente la influencia de las características constructivas de la edificación, la ocupación del hotel y la temperatura exterior sobre dicha variable.

En la presente investigación se ha partido de la **hipótesis** de que si se contara con un procedimiento para determinar la temperatura adecuada del agua helada, que considere integralmente los factores climáticos, constructivos, ocupación del hotel y comportamiento energético de los “chillers”, se podría reducir el consumo de energía y el impacto ambiental asociado en los sistemas de climatización centralizados del tipo todo-agua.

Es por ello que el **Objetivo General** de la presente investigación ha sido la elaboración de un procedimiento y un programa informático asistente, mediante la utilización de herramientas de inteligencia artificial para establecer la temperatura del agua helada más adecuada que posibilite reducir el consumo de energía y el impacto ambiental asociado en los sistemas de climatización centralizados del tipo todo-agua, en determinadas condiciones climatológicas y para un nivel de ocupación dado, sin afectar las condiciones de confort en la instalación.

Objetivos específicos

- 1- Caracterizar técnica y operacionalmente los **SCCAH** utilizados en Cuba, en particular en la industria hotelera cubana.
- 2- Obtener el modelo matemático de carga de enfriamiento de un hotel tomado como caso base, en función de sus características constructivas, el clima y la ocupación, mediante la simulación térmica y la aplicación de redes neuronales artificiales, RNA.
- 3- Desarrollar el modelo de comportamiento para determinar el consumo de energía del sistema de climatización del hotel seleccionado, en función de la carga de enfriamiento y la temperatura de agua helada, mediante la aplicación de sistemas neuro difusos.
- 4- Determinar el grado de influencia de la temperatura del agua helada sobre el consumo de energía del “chiller” y determinar la existencia de un valor de temperatura que posibilita obtener un consumo mínimo de energía, dentro del rango que garantiza el mantenimiento de las condiciones de confort.
- 5- Desarrollar una herramienta que permita determinar la temperatura de agua helada que implica un mínimo consumo de energía del “chiller”, mediante la aplicación de algoritmos genéticos.
- 6- Integrar los modelos anteriores en un procedimiento y un programa informático asistente que permita a la gerencia técnica de estas instalaciones realizar el ajuste de la temperatura del agua helada para reducir el consumo de energía y el impacto ambiental asociado, sin afectar la calidad del servicio que se presta.

Novedad Científica

- 1- La demostración de la existencia de un valor de la temperatura del agua helada en un “chiller”, dentro del rango que garantiza las condiciones de confort, que posibilita minimizar el consumo de energía para unas condiciones de temperatura exterior y ocupación dadas.
- 2- El procedimiento para determinar el valor de ajuste de esa temperatura de agua helada en condiciones reales de explotación que permite reducir el consumo de energía en sistemas de climatización centralizados del tipo todo-agua a flujo constante.

Aportes prácticos.

- 1- El procedimiento para establecer el modelo matemático de carga de enfriamiento de edificaciones, en función de sus características constructivas, el clima y la ocupación, utilizando simuladores térmicos y redes neuronales artificiales.
- 2- El procedimiento para establecer una estrategia de ocupación de las habitaciones de un hotel que posibilita la reducción del consumo energético del sistema de climatización
- 3- El procedimiento para establecer el modelo de comportamiento para determinar el consumo de energía de sistemas de climatización centralizados del tipo todo-agua, en función de la carga de enfriamiento, la temperatura exterior y la temperatura de agua helada, mediante la aplicación de sistemas neuro difusos.
- 4- El programa de computación para determinar el valor de ajuste de esa temperatura de agua helada en condiciones reales de explotación que permite reducir el consumo de energía en sistemas de climatización centralizados del tipo todo-agua a flujo constante.
- 5- La aplicación de los procedimientos anteriores y la obtención de los modelos correspondientes para el caso de estudio del Hotel Jagua de la provincia de Cienfuegos.

CAPITULO I – ESTADO DEL ARTE

1.1- Situación energética mundial

El modelo energético del mundo contemporáneo está basado en la generación del 80 % aproximadamente de la energía a partir de combustibles fósiles, dentro de los cuales, el petróleo y sus derivados representan la mayor proporción. A pesar de los elevados precios actuales del petróleo, y del evidente y grave deterioro ambiental que este modelo ocasiona, el consumo global de energía seguirá creciendo y descansando en el futuro inmediato sobre combustibles fósiles.

En la Figura 1.1 se observa según algunos pronósticos [20], que el consumo global de energía podrá aumentar en el Año 2030 alrededor de un 57 % con respecto el año 2004.

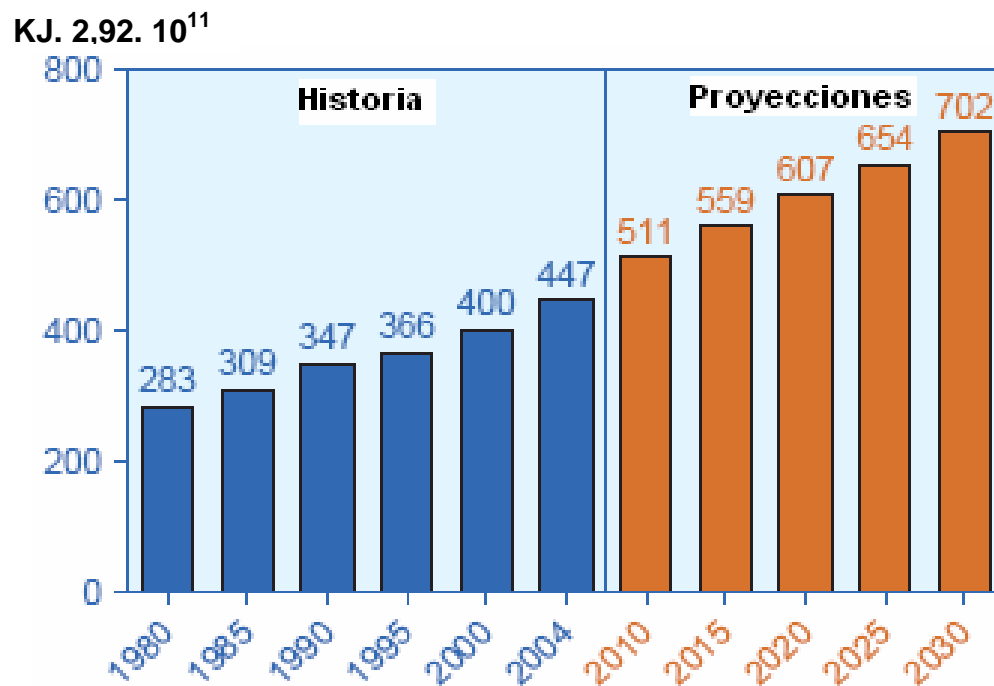


Figura 1.1. Consumo de energía a nivel mundial [20]

Y tal como se muestra en la Figura 1.2 [20], los combustibles fósiles seguirán teniendo el peso fundamental en la producción de energía a mediano plazo.

KJ. 2,92. 10¹¹

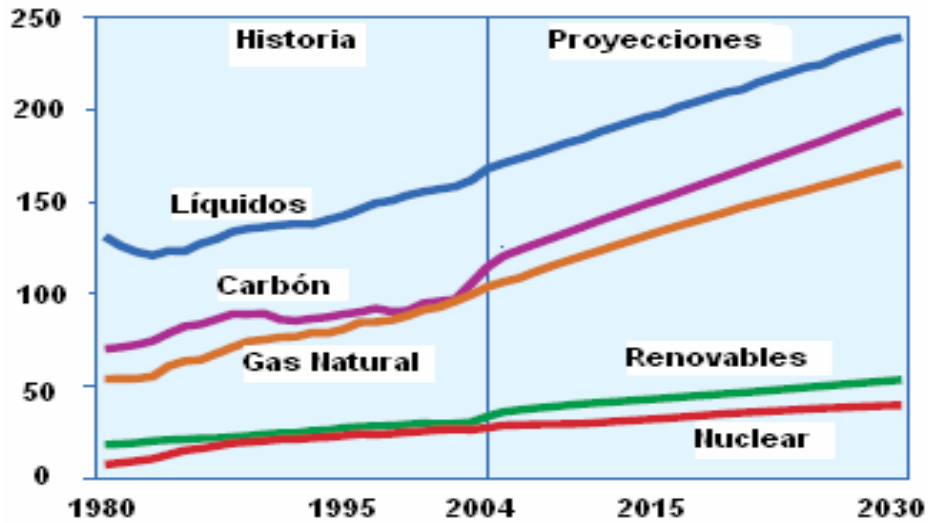


Figura 1.2. Producción de energía a nivel global por tipo de fuente [20]

Se pronostica que el incremento fundamental del consumo de energía se producirá en los países subdesarrollados, no pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD). Como se muestra en la Figura 1.3 [20], se proyecta que en estos países el consumo de energía crecerá casi al doble en el 2030 con relación al año 2004, lo cual está influenciado en alto grado por el incremento de la demanda en la India y China.

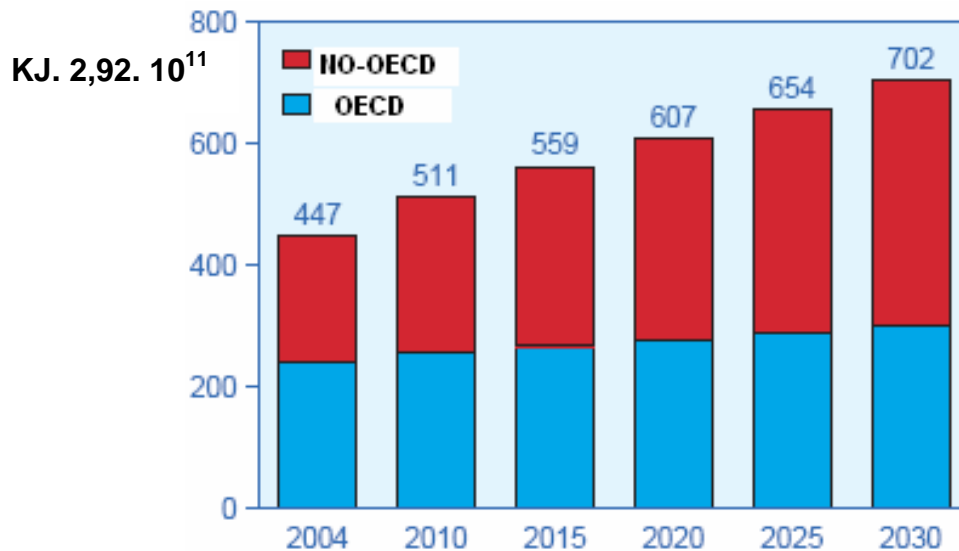


Figura 1.3. Consumo de energía por regiones [20]

El año 2007 y lo que va del actual 2008, fue marcado por diversos acontecimientos relevantes que enrarecieron aún más el entorno económico mundial, como la devaluación del dólar norteamericano, la continuidad de los eventos bélicos y el alza sin precedentes de los precios del petróleo, factor determinante en la esfera energética mundial. Así se tiene que en julio del 2008 el barril de crudo superó la cota de los 140 USD [21], [22], quedando atrás para siempre el petróleo barato.

Dentro de los factores que influyen en los elevados precios actuales del petróleo los más importantes son: el vertiginoso desarrollo de los países asiáticos, (China e India en primer plano), la devaluación del dólar estadounidense, los conflictos geopolíticos en el Medio Oriente (invasión de USA a Irak y amenazas a Irán), conflictos laborales en las empresas trasnacionales vinculadas con el sistema petrolero, convenios de producción de petróleo de la OPEP, especulaciones en las bolsas de valores internacionales, variaciones climáticas en el hemisferio norte, etc. Todo esto hace del panorama energético una situación compleja y de puntual seguimiento para todas las naciones.

Es indiscutible que el actual modelo energético, basado fundamentalmente en la producción de energía a partir de combustibles fósiles, es insostenible e injusto. Es un modelo injusto por la desigualdad en el consumo y en el acceso a la energía comercial. Hoy en día un 15 % de la población mundial, los 1000 millones de habitantes de los países desarrollados, consume más del 50 % de los recursos energéticos del planeta, mientras que 2000 millones de personas no tienen acceso a la energía comercial y otros 3000 millones tienen un suministro insuficiente, imposibilitando su desarrollo y condenándolas a la pobreza [23].

Es un modelo energético insostenible, ya que descansa en un 80 % en la utilización de los combustibles fósiles; recursos que son limitados y no renovables, que son contaminantes en alto grado, que están concentrados en pocas regiones de la tierra, que serán cada vez más escasos y caros, provocando inseguridad energética, razón de tensiones económicas y conflictos armados, que están en manos de grandes consorcios trasnacionales y que son utilizados de forma muy ineficiente.

Finalmente, se trata de un modelo totalmente insostenible por sus repercusiones medioambientales negativas de enormes proporciones, como son el calentamiento global y los cambios climáticos [24], ya hoy aceptados por la mayoría de la comunidad científica

internacional, evidentes a escala planetaria y que ponen en riesgo la propia supervivencia de la especie humana.

Frente a esta situación se requiere un nuevo modelo de desarrollo energético, basado en dos pilares principales:

1. Sustitución de fuentes de energía, en particular por fuentes renovables, tales como energía solar, energía eólica, energía geotérmica, hidroenergía, biomasa, energía de los océanos, etc.
2. Elevación de la eficiencia energética, fomentando una cultura de uso racional de la energía, eliminando esquemas de consumo irracionales, implementando sistemas de gestión energética efectivos, utilizando equipos de alta eficiencia, reduciendo la intensidad energética en los procesos industriales, aprovechando las fuentes secundarias de bajo potencial, utilizando sistemas de cogeneración y trigeneración, y empleando, en general, la energía con eficacia y de acuerdo a su calidad.

1.1.1- La eficiencia energética

La eficiencia energética, entendida como la eficiencia en la producción, distribución y uso racional de la energía [25], constituye sin dudas uno de los pilares fundamentales del desarrollo energético sostenible. Eficiencia energética significa lograr un nivel de producción o de servicios, con los requisitos establecidos por el usuario, con el menor consumo y gasto energético y la menor contaminación ambiental posible.

Las mejoras en la eficiencia energética pueden reducir la necesidad de inversión en infraestructura energética, los gastos de combustible, y aumentar la competitividad de las empresas [1].

La eficiencia energética no consiste en racionar o reducir el consumo de energía, sino en utilizarla mejor. Los aumentos de productividad y la reducción de los consumos energéticos por unidad de producto constituyen, en realidad, fases de un mismo proceso con aportes significativos al crecimiento, la protección del medio ambiente y la equidad social.

Dado que la energía cada día se encarece más, en muchos casos una de las principales partidas del costo total es el costo energético. Pero aún en aquellas instalaciones donde la

energía no representa una de las principales partidas, es importante la administración eficiente de la energía, ya que es el apartado que crece más rápidamente y uno de los pocos costos que pueden ser realmente controlados [1].

1.1.2- Eficiencia energética en Cuba

En el período 80-89 en Cuba se decía que existía un adecuado balance oferta - demanda de portadores energéticos, en esta etapa crecía el consumo de energía a una tasa promedio anual de un 4 %. Quizás no se había tomado conciencia exacta del consumo energético nacional.

En el período 90-93, con el derrumbe del campo socialista, el incremento del bloqueo y la crisis económica que comenzó a sufrir el país, la disponibilidad de generación eléctrica decreció desde el 78 % hasta el 53 % y la de combustibles, en prácticamente 2 años, se redujo a menos del 50 %. El consumo promedio de energía eléctrica en este período en el país decreció en más de un 6 % anual [1].

Entre 1994 y 1997 la intensidad energética muestra una tendencia creciente, asociada a la recuperación gradual de los niveles de actividad, con un incremento del consumo de energía por encima del crecimiento del producto interno bruto. Sin embargo, a partir de 1998-1999 la intensidad energética comienza a decrecer producto de una serie de acciones y programas desarrollados para disminuir el consumo energético [26], [27].

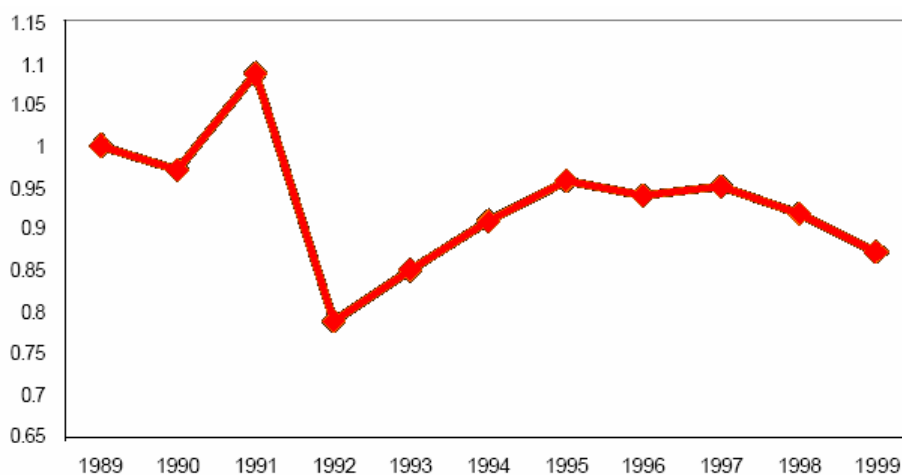


Figura 1.4. Dinámica de la intensidad energética en Cuba (año 1989 = 1.0)

Particular importancia en el comportamiento de la eficiencia energética en Cuba tiene la “Revolución Energética”, iniciada a finales el año 2005 y desarrollada con toda fuerza a

partir del 2006. Esta transformación ha conllevado la puesta en práctica de nuevos conceptos para el desarrollo de un sistema electroenergético nacional más eficiente y seguro, y un uso racional y eficiente de la energía en todos los sectores de la sociedad cubana, haciendo del ahorro de energía el sustento fundamental del desarrollo del país [1], [28].

El ahorro total alcanzado con los programas de la Revolución Energética entre el 2006 y el 2007 asciende a 2 795 GWh, equivalente a 961 419 toneladas de combustible convencional [1], [28]. La estructura de los ahorros en los diferentes programas se muestra en la Figura 1.5.

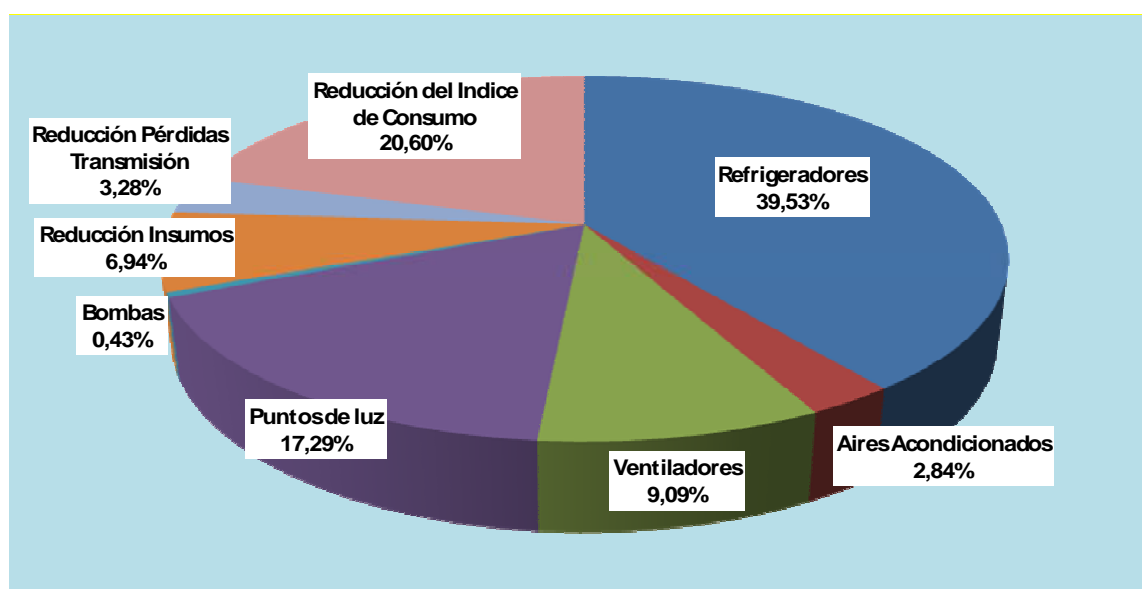


Figura 1.5. Estructura de los ahorros alcanzados en los programas de la Revolución Energética en Cuba [1]

1.1.3- La eficiencia energética en el sector turístico cubano

En la actualidad el turismo representa uno de los más importantes y dinámicos sectores de la economía cubana, y se prevé un crecimiento sostenido del mismo para los próximos años [3], [27]. Constituyen tareas claves dentro de este sector la elevación de la calidad de los servicios, la reducción de los costos, y la conservación del medio ambiente.

El sector hotelero se caracteriza en general por su elevado, y en ocasiones poco racional, consumo energético [29]. Esto es así, porque se absolutiza el concepto de que la principal función del hotel es dar el máximo confort a sus clientes y para ello, se necesita

energía [3]. Sin embargo, existen oportunidades de reducción de consumos y costos energéticos, sin afectar el nivel ni la calidad de los servicios prestados, mediante una efectiva gestión energética.

El costo energético oscila normalmente entre el 3 y 10 % de los costos globales del hotel, siendo a la vez la partida de presupuesto más elevada tras los gastos de personal y de alimentación [3]. Este indicador varía en función del tipo y la categoría de hotel, así como del tipo de servicios que preste.

En Cuba en hoteles de las cadenas hoteleras Cubanacán, Gran Caribe, Islazul y Horizonte este indicador alcanza valores que oscilan del 8 al 16 % de los gastos, y pueden llegar hasta el 20 % dependiendo de su infraestructura y los niveles de comercialización. La comparación con indicadores internacionales indica que la eficiencia energética promedio en los hoteles cubanos está por debajo de la media y que existen, por tanto, considerables potenciales de ahorro [30].

Dentro de los costos energéticos en un hotel turístico la electricidad representa la mayor partida, siendo las áreas que consumen más energía eléctrica las de climatización y alumbrado. Para hoteles del Caribe, en particular, el consumo en el área de climatización puede llegar a representar alrededor del 65 % del total del consumo de electricidad, debido fundamentalmente a las temperaturas ambientales existentes, mientras que el consumo en equipos de refrigeración representa alrededor de un 14%, el alumbrado un 11%, los ventiladores y bombas un 12% y la producción de agua caliente un 7% aproximadamente [30].

Es por ello que cualquier programa de ahorro de energía y reducción de costos energéticos en un hotel debe enfocarse, en primer plano, a reducir el consumo del sistema de climatización [31]. Para ello, existen potenciales de ahorro alcanzables tanto mediante un diseño adecuado del sistema, como con la aplicación de estrategias operacionales enfocadas al ahorro de energía [32].

1.2 - Sistemas de climatización

Existen dos alternativas de sistemas de climatización utilizadas en las edificaciones climatizadas, incluidas las instalaciones hoteleras. La primera alternativa es el empleo de unidades tradicionales de climatización localizada, unidades de ventana o de tipo “split”,

que son equipos pequeños para enfriar locales de no muy grandes dimensiones. Estas unidades requieren de una inversión inicial pequeña y su instalación es relativamente fácil. Poseen la desventaja, desde el punto de vista de la gestión energética, que aunque tienen determinadas funciones de autodiagnóstico para ahorrar energía, no es posible su control desde una unidad central de mando.

Una segunda alternativa la constituyen los sistemas de climatización centralizados, en los que se concentra 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 para la climatización de grandes hoteles, conocido también como sistema de agua helada. Este tipo de 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 habitaciones y a las áreas comunes con temperaturas de envío y retorno generalmente de 7°C y 13°C respectivamente [33], [13], [34]. Este diferencial de temperaturas está determinado por la absorción de la carga térmica del edificio y depende de varios factores como son las características constructivas del edificio, la climatología de la región y el nivel ocupacional del hotel.

La inversión inicial en estos sistemas centralizados es alrededor de 2.2 veces mayor que el de unidades de ventana, pero el confort que se logra es superior tanto por su operación mas silenciosa, como desde el punto de vista estético interior y exterior de la edificación, aspecto importante para cumplir con las exigencias de los hoteles de mayor categoría.

Los sistemas centralizados de aire acondicionado, se emplean en grandes hoteles, restaurantes, cines, teatros, centros comerciales, hospitales y en otros edificios públicos. Estos sistemas suelen instalarse durante la construcción del edificio, aunque en algunos casos se instalan durante remodelaciones de edificios existentes.

La eficiencia energética de estos sistemas depende en gran medida de su control operacional, de las estrategias operacionales que se apliquen, tomando en consideración todos los factores involucrados para lograr a la postre consumos mínimos de energía [7].

1.2.1- Caracterización de los sistemas de climatización centralizados todo - agua utilizados en la hotelería cubana.

La hotelería cubana se caracteriza por el uso de sistemas de climatización centralizados en los principales hoteles del país. Inicialmente, los sistemas de climatización utilizados, eran del tipo localizado, con unidades de ventana independientes. En estas unidades resulta difícil desarrollar una estrategia operacional desde un área central que permita controlar el sistema de forma efectiva y reducir los gastos por concepto de climatización.

Para superar esta desventaja se ha generalizado la instalación de sistemas de climatización centralizados por agua helada en los nuevos hoteles del país. Estos sistemas son flexibles desde el punto de vista de control central y permiten establecer estrategias operacionales que reducen considerablemente los costos de energía, manteniendo las condiciones de confort en las habitaciones y otras áreas de hotel.

Las principales características de los sistemas de climatización centralizados instalados en Cuba son las siguientes:

- Compresores recíprocos y de tornillo.
- Sistemas con recuperación del calor de condensación y condensadores adicionales enfriados por aire.
- Configuración simétrica de las unidades y los compresores.
- Esquemas de conexión en paralelo.
- Capacidades de refrigeración instaladas que oscilan desde las 60 hasta 1000 toneladas de refrigeración.
- Unidades terminales de “fan coil”.
- Bombas de flujo constante y válvulas de tres vías.
- Control de la capacidad manual.
- Refrigerante R-22.

Para hacer un uso eficiente de este tipo de instalaciones, con el objetivo de reducir los consumos energéticos se requiere desarrollar procedimientos y herramientas de control operacional, de acuerdo a la posibilidad específica que brinden los sistemas existentes.

El estudio de caracterización realizado muestra que los sistemas de climatización con recuperación del calor de condensación y condensadores adicionales enfriados por aire y de flujo constante de agua helada, son los que predominan en el país y en muchas regiones del mundo, y los mismos solo permiten la implementación de ciertas estrategias operacionales encaminadas al ahorro de energía [35].

1.3 - Eficiencia energética de los enfriadores de agua helada

En 1970 los enfriadores de agua helada, comúnmente conocidos como “chillers”, operaban con una demanda de 0,8 - 0,9 y hasta 1 kW/ton y consumían alrededor del 73 % de la potencia de la instalación. La eficiencia de estos equipos, al igual que la de muchos equipos energéticos, se ha incrementado sensiblemente en los últimos años y ya en el 2000 se disponía de equipos con un consumo inferior a 0,50 kW/ton [35], [10, 36].

Al evaluar los consumos energéticos de los “chillers” es necesario tomar en consideración las condiciones de operación de los mismos en relación a las de diseño. Asfaww [37], plantea que con frecuencia los “chillers” operan por debajo del 50 % de su carga máxima, y otros autores [38], [39] señalan que en un 99 % de las horas de operación éstos lo realizan fuera de las condiciones de diseño, debido fundamentalmente al sobredimensionamiento o a la influencia de factores climatológicos y a la ocupación del hotel.

Esta tendencia regularizada a trabajar a cargas parciales tiene un significativo impacto en los consumos energéticos, afectándose su rendimiento (kW/ton) [39], [8], [15]. Esto ha inducido a la investigación de diferentes estrategias que conduzcan a una operación más eficiente, y por tanto, a la reducción del consumo de energía.

El progreso hacia nuevas estrategias, junto a la aplicación de herramientas modernas desarrolladas bajo conceptos de ahorro energético, es sin dudas un camino adecuado a seguir para lograr reducción de los gastos de energía en instalaciones de este tipo. Dentro de estas herramientas están la simulación térmica de edificaciones, las redes neuronales artificiales, la lógica difusa, y los algoritmos genéticos, entre otros.

1.4- Simulación térmica de edificaciones. Uso de la inteligencia artificial

Uno de los recursos disponibles actualmente para la investigación científica de edificaciones se sustenta en metodologías integradas en paquetes de programas, tanto para la parte del diseño como para operación. Estos programas permiten reducir el tiempo de ejecución de las tareas y analizar un gran número de posibles soluciones con el mínimo de recursos.

En el mercado existen un conjunto de paquetes para la simulación térmica de edificaciones, tales como el TRNSYS [40], el DOE-2 [41], el ENERGY PLUS [42], el COOL PACK [43], etc. Estos paquetes posibilitan simular el comportamiento térmico del edificio y determinar la carga térmica de enfriamiento. Sin embargo, en algunos casos solo 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. Además del costo inicial de adquisición de la licencia, conllevan un costo adicional debido a las actualizaciones periódicas necesarias.

Tomando en consideración estos aspectos, en la presente investigación se ha utilizado el simulador desarrollado por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por cortesía del Instituto de Ingeniería en el marco de los programas de colaboración entre esa universidad y la Universidad de Cienfuegos.

Este simulador presenta las características y potencialidades siguientes:

1. Brinda las horas-grado en días representativos de una temporada, lo que permite calcular ganancias instantáneas de calor, potencia de enfriamiento y rapidez de retiro de calor de la temporada completa sin tener que hacerlo día por día y los resultados son equivalentes. Esto reduce el tiempo de cómputo y simplifica grandemente la tarea de simulación y cálculo.
2. Permite determinar la facturación mensual y anual y, sobre todo, adaptándose a la tarifa de cualquier lugar o región sin mayores problemas. Su potencia radica en que no emplea valores promedios de costo o estimaciones de precios de energía, simplemente incorpora la tarifa vigente al agregarla al archivo correspondiente.
3. 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.

4. Los resultados de salida en comparación con simuladores comerciales, tales como el TRNSYS y el DOE-2 no difieren en más de un 5% [44].

Este simulador permite entrar en los archivos de datos primarios en el fichero de datos DATA 2 y se pueden configurar todos los parámetros climatológicos de la localidad y constructivos del edificio, así como hacer todas las corridas pertinentes variando los datos que se quieran y obteniendo diferentes comportamientos de las cargas de enfriamiento [44].

El uso de este simulador, constituye sin lugar a dudas una herramienta de gran utilidad, pues permite analizar un elevado número de variantes importantes en la toma de decisiones, tanto en etapa de diseño de una edificación como en cálculos de comprobación. Por lo general en una edificación este proceso es largo y engorroso, y requiere de un personal calificado, además de un tiempo de investigación que no siempre está disponible.

La aplicación de las técnicas de inteligencia artificial de conjunto con el simulador térmico, posibilita desarrollar modelos y programas que simplifican grandemente el proceso de determinación de las cargas de enfriamiento en una edificación, sin la necesidad de un nivel experto elevado, reduciendo el tiempo de ejecución y facilitando la toma de decisiones.

1.5 - Simulación de los sistemas de climatización por agua helada. Análisis crítico de los modelos

En los modelos tradicionales para el estudio del comportamiento de un “chiller” [45], [46], [47], se parte de las relaciones termodinámicas fundamentales de cada componente del sistema en cuestión, tales como los que se describen a continuación:

Modelos termodinámicos de los componentes fundamentales de un “chiller”.

Evaporador.

$$Q_e = m_a * C_{p_a} * \epsilon_{ev} (T_R - T_s) \quad (kW) \quad (1.1)$$

$$Q_e = m_r (h_1 - h_4) \quad (kW) \quad (1.2)$$

$$Q_e = LMDT_{ev} * UA_{ev} \quad (kW) \quad (1.3)$$

$$\mathcal{E}_e = 1 - e^{-\frac{UA_e}{m_{agua} C_{p_{agua}}}} \quad (1.4)$$

$$LMDT = \frac{T_R - T_S}{Ln \left[\frac{T_R - T_{ev}}{T_S - T_{ev}} \right]} \quad (K) \quad (1.5)$$

$$UA_{ev} = \frac{1}{c_1 * m_{agua}^{-0.8} + c_2 * Q_{ev}^{-0.745} + c_3} \quad \left(\frac{W}{K} \right) \quad (1.6)$$

Donde:

$UA_e \rightarrow$ Coeficiente global de traspaso de calor del evaporador; $\frac{W}{K}$

$T_r, T_s \rightarrow$ Temperaturas de retorno y salida del agua helada; K

$\mathcal{E}_e \rightarrow$ Efectividad del evaporador

$T_{ev} \rightarrow$ Temperatura del evaporador; K

$Q_e \rightarrow$ Calor absorbido en el evaporado; kW

$C_{p_{agua}} \rightarrow$ Calor específico del agua; $\frac{kJ}{kg / K}$

$LMDT \rightarrow$ Diferencia media logarítmica de temperaturas; K

$h_{1,2} \rightarrow$ Entalpía específica del refrigerante; $\frac{kJ}{kg}$

$c_1 \dots c_3 \rightarrow$ Constantes que se deben determinar a partir de los datos de trabajo del “chiller”.

La carga de enfriamiento de un sistema debe ser satisfecha por el evaporador del sistema de refrigeración para lograr la correcta temperatura del agua helada en el caso de los “chillers”, que a la postre garantiza las condiciones de confort del recinto climatizado.

El calor absorbido por el evaporador se puede determinar desde el punto de vista teórico a partir de las relaciones (1.1), (1.2), (1.3), en dependencia de la información disponible del sistema en cuestión. En la ecuación (1.1) aparece el término efectividad térmica del evaporador descrito en la ecuación (1.4).

En la etapa de diseño de un sistema resulta fácil determinar la efectividad térmica del intercambiador debido a que se cuenta con los detalles constructivos del intercambiador de calor, además de las condiciones nominales de operación que se esperan del mismo y los datos del fabricante. Un aspecto diferente se presenta durante la operación del sistema, cuando por razones de tiempo de trabajo, de variaciones del clima, de variaciones en los regímenes de operación y flujo, así como el ensuciamiento y deterioro de las superficies de intercambio de calor, cambian los coeficientes de transmisión de calor, y por tanto, la efectividad del mismo. De modo que resulta necesario utilizar métodos de experimentación en los sistemas para caracterizar las nuevas condiciones de operación que son constantemente cambiantes, lo cual requiere prolongado tiempo e introduce ciertas incertidumbres.

Condensador enfriado por aire

$$Q_c = m_{aire} * Cp_{aire} * \varepsilon_{ec} (T_{sa} - T_{ea}) \quad (kW) \quad (1.7)$$

$$\varepsilon_c = 1 - e^{-\frac{UA_c}{m_{aire} Cp_{aire}}} \quad (1.8)$$

$$Q_c = Q_{ev} + W_{comp} \quad (kW) \quad (1.9)$$

$$Q_c = \Delta H_c \quad (kW) \quad (1.10)$$

$$UA_c = \frac{1}{c_4 * v_a^{-0.5} + c_5 m_r^{-0.8} + c_6} \quad \left(\frac{W}{K}\right) \quad (1.11)$$

$$LMDT = \frac{T_{sa} - T_{ea}}{\ln \left[\frac{T_c - T_{ea}}{T_c - T_{sa}} \right]} \quad (K) \quad (1.12)$$

Donde:

\mathcal{E}_c → Efectividad del Condensador

Cp_{aire} → Calor específico del aire; $\frac{kJ}{kg.K}$

UA_c → Coeficiente global de traspaso de calor del condensador; $\frac{W}{K}$

T_{sa}, T_{ea} → Temperaturas de salida y entrada del aire al condensador; K

Q_c → Calor rechazado en el condensador; kW

ΔH_c → Diferencia de entalpía del refrigerante en el condensador; kW

c_4 → Coeficiente de traspaso de calor por el lado del aire; $\frac{W}{K}$

c_5 → Coeficiente de traspaso de calor por el lado del refrigerante; $\frac{W}{K}$

v_a → Flujo de aire; $\frac{m^3}{s}$

m_r → $\frac{kg}{s}$

Una situación similar a la del evaporador se presenta en el caso del condensador, donde también en la etapa de diseño del sistema es factible el uso de datos del fabricante y datos esperados de operación de los componentes del mismo. La ecuación (1.8) se utiliza para determinar la efectividad térmica del condensador, el área de transferencia de calor puede ser un dato disponible en algún sistema real instalado si se cuenta con la información del fabricante, en caso contrario se complica el procedimiento de cálculo.

El coeficiente global de traspaso de calor en este caso depende de la velocidad del aire de enfriamiento, del grado de ensuciamiento de la superficie y de la transferencia de calor por el lado del refrigerante, entre otras cosas.

La modelación de un sistema que tenga cierto tiempo de operación presupone la determinación de algunas de estas variables influyentes, cuestión esta como se planteó anteriormente que no resulta sencilla.

Compresor del “chiller”

$$P_{Chiller} = P_{Comp} + P_{ventiladores} \quad (1.13)$$

$$P_{Comp} = m_r \frac{W_{is}}{\eta_{isen} * \eta_c} \quad (1.14)$$

$$W_{is} = m_r * Z * R_0 * T_1 \left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{k-1}{k}} \quad (1.15)$$

$$m_r = \frac{V}{v_1} \quad (1.16)$$

$$v_1 = \frac{Z * R_0 * T_1}{P_1} \quad (1.17)$$

$$P_{comp} = w_{lo} + (1 + \alpha_0)W_{is} \quad [48] \quad (1.18)$$

Donde:

$V \rightarrow$ Flujo volumétrico del compresor; $\frac{m^3}{s}$

$v_1 \rightarrow$ Volumen específico del vapor en la succión del compresor; $\frac{m^3}{kg}$

$W_{is} \rightarrow$ Trabajo isoentrópico del compresor; kW

$m_r \rightarrow$ Flujo de refrigerante; $\frac{kg}{s}$

$p_1, p_2 \rightarrow$ Presiones de succión y descarga del compresor; Pa

$W_{lo} \rightarrow$ Porción constante de las pérdidas electromecánicas del motor; kW

$\alpha_0 \rightarrow$ Porción de las pérdidas electromecánicas proporcionales al trabajo del compresor.

$T_1 \rightarrow$ Temperatura del gas en la succión del compresor; K

$\eta_{isen}, \eta_c \rightarrow$ Eficiencia isoentrópica y mecánica del compresor respectivamente; %

$Z \rightarrow$ Factor de compresibilidad

$R_0 \rightarrow$ Constante del gas refrigerante; $\frac{kJ}{kg.K}$

$P_{Chiller} \rightarrow$ Potencia consumida por el chiller; kW

$P_{ventiladores} \rightarrow$ Potencia consumida por los ventiladores; kW

$P_{Comp} \rightarrow$ Potencia consumida por el compresor; kW

La ecuación (1.14) permite calcular la potencia del compresor a partir del trabajo isentrópico del compresor definido por (1.15). Para el cálculo de la potencia real, es necesario conocer el rendimiento mecánico del motor, el rendimiento isentrópico del compresor, así como el rendimiento volumétrico del mismo. Estos valores de eficiencia varían con el tiempo de explotación del equipamiento y con las condiciones de operación del sistema.

De forma similar la ecuación (1.18) introduce un coeficiente de pérdidas electromecánicas que se considera constante desde el punto de vista teórico, pero que cambia en función de las condiciones de explotación [48].

Dispositivo de expansión

Se considera un proceso a entalpía constante

$$H_3 = H_4 \quad (kW) \quad (1.19)$$

Donde:

$H_3, H_4 \rightarrow$ Entalpía del refrigerante a la entrada y salida de la válvula de expansión.

Las ecuaciones (1.6) para intercambiadores de calor de tubo y coraza [49] y (1.11) son ecuaciones se obtienen a partir de la aplicación del método de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMDT) para el caso de los condensadores. Los coeficientes $c_1...c_3$ son constantes que se deben determinar a partir de los datos de trabajo del “chiller” en operación. Por otra parte las constantes $c_4...c_5$ son los coeficientes de transmisión de calor por ambos lados del condensador, los que son cambiantes con las condiciones de operación.

Existen diversos trabajos enfocados a modelación termodinámica de los chillers, tomando como base, en su gran mayoría las expresiones definidas desde (1.1) hasta la (1.19).

Según Parise (2001), Jones [54] en 1975 fue uno de los primeros que utilizó los datos de los fabricantes para simular sistemas de refrigeración mediante el modelado de sus componentes. Sus estudios se basan en el algoritmo recomendado por Stoecker (1971).

Río [50] referencia datos de la evaluación de la vida útil y el rendimiento (COP) a cargas parciales y a carga total en “chillers” de compresión de vapor, con compresores de pistón, centrífugos y de tornillo y sobre el desarrollo de un modelo de simulación para ciclos de compresión de vapor, dando como resultado un sistema de ecuaciones no lineales, que se resolvió numéricamente.

Tan [51] presentó un estudio sobre una simulación de un “chiller”, utilizando un modelo matemático para la recuperación de calor. El modelo fue probado utilizando las especificaciones de un “chiller” instalado en China, con las condiciones climáticas de ese país, y por tanto, no es generalizable a otros equipos y otras condiciones climatológicas.

T.T. Chow, Z. Lin y C.L. Song [52], desarrollaron un estudio acerca de la aplicación de redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos para “chillers” de absorción y con enfriamiento por agua. El estudio se basa en determinar las soluciones más ventajosas, combinando el COP del “chiller”, consumo de combustible y costos de bombeo.

A partir de las relaciones establecidas en los componentes fundamentales de un sistema de refrigeración, se han desarrollado varios modelos enfocados hacia el ahorro de energía

en “chillers”, tanto para los componentes individuales como para la eficiencia energética del sistema [53], [4], [54].

Stoecker desarrolló modelos de los componentes basados en parámetros empíricos bajo un gran número de suposiciones y flujo constante de aire y agua. Estos modelos son difíciles de aplicar a sistemas de climatización modernos, debido a que los mismos han cambiado sensiblemente en los últimos años [55].

Rabelh [56] desarrolló modelos basados en el análisis detallado de los componentes del sistema, estos modelos son complicados, dependen de algunos parámetros nominales de los equipos, que normalmente no son suministrados por el fabricante.

Algunos investigadores [53], [54], [8] sólo consideran sistemas simples de análisis, y en condiciones nominales de operación, y señalan que es difícil lograr el estudio simultáneo de las variables del sistema que más influyen en su comportamiento para tareas de optimización de la energía. Es por eso que se realizan estudios basados en ciertas partes del sistema y bajo una serie de condiciones de frontera que caracterizan a cada modelo y variables de interés.

Para “chillers” que se encuentran en operación sólo una cierta cantidad de datos se corresponden con las curvas de eficiencia del fabricante [47], y esto depende de la capacidad a la cual se encuentra operando, ya que su eficiencia se reduce grandemente en condiciones de cargas parciales [57]. Además de esto, existen otras variables que tienen efecto directo en la eficiencia del “chiller” y que afectan la validez de esta relación [45], [58].

En Europa se definieron indicadores particulares del rendimiento de los “chillers” a cargas parciales, diferentes a los Estados Unidos [59], en este caso los sistemas no experimentan el mismo comportamiento, y la dependencia entre las variables no permanece exactamente igual a lo establecido por la ARI. La propia ARI sugiere a los fabricantes de “chillers” experimentar y establecer los propios índices de comportamiento de “chillers” a cargas parciales de acuerdo al clima, a la carga de enfriamiento y el consumo de los equipos auxiliares en cuestión [60].

A continuación se muestran algunos modelos desarrollados para determinar el consumo de energía en sistemas de climatización. Es importante señalar la importancia del

establecimiento de las condiciones de frontera y acotar el modelo de acuerdo a las variables de interés a modelar y flexibilidades del sistema instalado.

Uno de los modelos más antiguos, que relaciona el consumo de energía en “chillers” con otros parámetros influyentes, fue el desarrollado por Stoecker en 1975 [47], [54]. A continuación aparecen las ecuaciones fundamentales que soportan dicho modelo.

$$P_{ch} = Q_{cap} * COP_{nom} * (PLR_{adj}) * (Temp_{adj}) \quad (1.20)$$

$$PLR_{adj} = a_0 + a_1 \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right) + a_2 \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right)^2 \quad (1.21)$$

$$Temp_{adj} = b_0 + b_1 T_s + b_2 T_s^2 + b_3 T_{ac} + b_4 T_{ac}^2 + b_5 T_s T_{ac}^2 \quad (1.22)$$

Donde: $a_0, a_1, a_2, b_1, \dots, b_5$ se obtienen de los catálogos del fabricante o por medio de la experimentación y el ajuste de curvas.

COP_{nom} → Coeficiente nominal de funcionamiento del ciclo.

PLR_{adj} → Razón de trabajo a cargas parciales.

T_s → Temperatura de salida del agua helada; °C

T_{ac} → Temperatura de entrada del agua de condensación; °C

$Temp_{adj}$ → Factor de ajuste de la temperatura; °C

P_{ch} → Potencia consumida por el “chiller”; kW

Q_{ap} → Capacidad de refrigeración nominal del sistema; kW

Este modelo, solo es válido para el caso de “chiller” enfriados por agua, con torres de enfriamiento. Posee una serie de coeficientes que dependen de las características del equipamiento, y por tanto, de los datos del fabricante que no siempre están disponibles.

Investigadores de la facultad Ingeniería del Campus de Darcy Ribeiro, Universidad de Brasilia [48] desarrollaron un software para la simulación de sistemas de refrigeración por

compresión de vapor, teniendo en cuenta los tipos de compresores más comercializados en el mercado brasileño en esos momentos. Para el estudio los autores se basaron en las siguientes expresiones termodinámicas desarrolladas anteriormente por otros autores.

$$W = W_t + W_{lo} + \alpha W_t \quad (1.23)$$

$$W_t = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot m_r \cdot P_{suc} \cdot V_{suc} \left[\left(\frac{P_{des}}{P_{suc}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (1.24)$$

Donde:

W_t → Potencia teórica; kW

W → Potencia real demandada por el compresor; kW

γ → Exponente isentrópico

m_r → Flujo refrigerante; $\frac{m^3}{s}$

V_{suc} → Volumen específico en la succión; $\frac{m^3}{kg}$

P_{des} → Presión en la descarga; Pa

P_{suc} → Presión en la succión; Pa

α → Eficiencia volumétrica del compresor.

W_{lo} → Pérdidas electromecánicas; kW

Este modelo está basado en los datos de los fabricantes de distintos tipos de compresores recíprocos y se utilizan las relaciones establecidas en las ecuaciones (1.1), (1.4), (1.15), (1.8), y (1.19) para el modelado de los intercambiadores de calor.

En la actualidad los “chillers” utilizan fundamentalmente compresores de tornillo o centrífugos, lo cual limita la aplicabilidad de este modelo.

Además, el modelo tomado como base para la simulación en este caso no considera los grados de subenfriamiento del refrigerante a la entrada del dispositivo de expansión, lo que lo aleja en cierta medida de las condiciones reales de operación.

A partir del estudio de un hotel hipotético Chan [4] desarrolló un modelo basado en la temperatura del aire exterior y la humedad relativa, a partir de un análisis regresión lineal y de datos experimentales en un “chiller” enfriado por aire, obteniendo la siguiente relación para determinar la energía consumida:

$$E_{ch} = b_1(T_o W_o) + b_0 \quad (1.25)$$

Donde:

E_{ch} → Consumo del “chiller”; kW

T_o → Temperatura del aire exterior; $^{\circ}C$

W_o → Humedad relativa del aire exterior; %

Este modelo solo considera la temperatura del medio ambiente, así como la humedad relativa. Aunque no está basado directamente en las características del fabricante, si está basado en la experimentación y no aparecen en el modelo algunas otras variables de interés, como es el caso de la temperatura del agua helada del “chiller”, la cual puede ser ajustada en función de la carga térmica del “chiller”, los parámetros del aire exterior y el nivel de ocupación para obtener consumos mínimos bajo las condiciones dadas.

NG - Gordon desarrolló en 1995 un modelo basado en la Primera y la Segunda Ley de la termodinámica [61]. Este modelo relaciona el COP con parámetros comúnmente medibles, como son las temperaturas de entrada y salida a los intercambiadores de calor y la carga del evaporador.

$$\frac{T_{ee}}{T_{ec}} \left(1 + \frac{1}{COP} \right) - 1 = \frac{T_{ee}}{Q_e} \Delta S_T + Q_p \frac{(T_{ec} - T_{ee})}{T_{ec} * Q_e} + \frac{R * Q_e}{T_{ec}} \left[1 + \frac{1}{COP} \right] \quad (1.26)$$

Donde:

T_{ee} Es la temperatura de entrada del agua al evaporador; K

T_{ec} Es la temperatura de entrada del agua al condensador; K

COP → Coeficiente de trabajo del ciclo.

Q_e → Calor absorbido en el evaporador; kW

Q_p → Pérdidas de calor equivalente; kW

ΔS_T → Generación de entropía total del sistema; $\frac{kW}{K}$

R → Resistencia térmica total del intercambiador; $\frac{W}{m^2 * K}$

$$R = \frac{1}{\varepsilon_c * m_c * c_p} + \frac{1}{\varepsilon_e * m_e * c_p} \quad (1.27)$$

ε_c → Efectividad del condensador

ε_e → Efectividad del evaporador

m_c → Flujo de agua de enfriamiento; $\frac{kg}{s}$

c_p → Calor específico; $\frac{kJ}{kg * ^\circ C}$

Sin embargo, este modelo solo es aplicable a “chillers” centrífugos y enfriados por agua. Además, para los efectos de la presente investigación el modelo presenta las limitaciones siguientes:

- Las efectividades térmicas de los intercambiadores de calor son datos que en operación están cambiando constantemente, ya que varían con las temperaturas, flujos de aire y de refrigerante, y con las condiciones de limpieza de los intercambiadores.
- Se necesitan datos del fabricante que no siempre están disponibles, sobre todo en equipamientos existentes con un determinado tiempo de explotación. Estas variables, aunque no son imposibles de determinar, para el caso de la operación son difíciles de obtener en tiempo real e introducen cierta incertidumbre al ser determinadas por métodos de cálculos de transferencia de calor.

En cuanto a los algoritmos de optimización, los métodos clásicos derivativos son ampliamente utilizados, pero poseen algunas limitaciones en la resolución de problemas

no lineales con un elevado número de restricciones. En el modelado de sistemas de climatización participan muchas variables y parámetros, por lo que normalmente se convierten en problemas de optimización no lineal enteros-mixtos [53], que no son resueltos de forma eficiente por los métodos tradicionales. En esta situación, es donde los métodos heurísticos, como son los algoritmos genéticos, colonia de hormigas, y otros tienen una fortaleza marcada, posibilitando soluciones rápidas y adecuadas a estos problemas.

1.6 - Aplicación de la inteligencia artificial en la gestión energética.

La Inteligencia Artificial es actualmente una rama de la ciencia con extensa aplicación en diversos campos del conocimiento, en particular para reproducir patrones, optimizar, controlar y dirigir complejos sistemas donde las soluciones analíticas son en extremo complicadas, poseen incertidumbres, son tediosas, difíciles o requieren de un personal experto y de largos períodos de investigación, etc.

Los procedimientos más generalizados actualmente de estas técnicas son las redes neuronales artificiales (RNA), los algoritmos genéticos (AG), la lógica difusa y la combinación de éstas.

Como se sabe, hay tareas para las cuales no existen algoritmos adecuados o para las que es virtualmente imposible desarrollar una serie de pasos lógicos aritméticos que den solución sin tener que asumir o suponer determinados comportamientos. También en muchos casos las variables poseen incertidumbre o vaguedad de términos, no sólo intrínseca sino además por carencia de sensores apropiados o debido a sistemas muy extensos o a datos incompletos o al propio desgaste que produce la explotación del sistema a través del tiempo.

En estos casos es ventajoso abordar la modelación de forma híbrida incorporando ecuaciones tradicionales fundamentadas en las leyes termodinámicas y físicas a los modelos de las técnicas de inteligencia artificial.

1.6.1- Fundamentos básicos de las redes neuronales artificiales (RNA).

Como una alternativa para el procesamiento automatizado de la información se tienen las redes neuronales artificiales capaces de desarrollar o reproducir asociaciones o patrones entre variables o sistemas no ligados linealmente. En lugar de un procedimiento

tradicional paso a paso para encontrar las relaciones entre las informaciones disponibles o necesarias, la red neuronal genera sus propias reglas internas que gobiernan la asociación y las refina por un proceso de entrenamiento comparando cada vez sus resultados con la información conocida reduciendo el error al valor mínimo necesario [62], [63], [64], [65], [66].

Una red es configurada para una aplicación específica y sólo responde a ella. En la figura 1.4 se observa una RNA en forma general y su similitud con una neurona biológica, donde las entradas X_i representan las señales que provienen de otras neuronas y que son capturadas por las dendritas; los pesos W_i son la intensidad de la sinápsis que conecta dos neuronas, y " θ " es la función umbral en la cual se evalúan las entradas ponderadas arrojando una salida J en correspondencia con la experiencia en el comportamiento del sistema modelado.

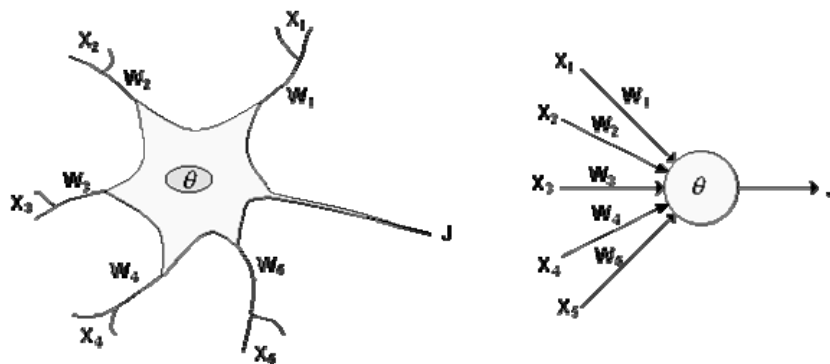


Figura 1.4. Similitud de una red neuronal biológica y una RNA.

1.6.2- Algoritmos Genéticos (AG)

Un modelo que explica la destreza de los organismos vivos para perpetuarse a través de una descendencia exitosa es el proceso de evolución natural [67]. Este modelo ha servido para proponer soluciones novedosas a diversos problemas en el campo de la ingeniería y la energética a partir de métodos de computación evolutiva, dentro de los que se encuentran los algoritmos genéticos; AG.

Los AG son técnicas estocásticas de optimización cuyo método de búsqueda constituye una analogía del modelo evolutivo, de manera que un problema específico representa al medio ambiente dentro del cual se desempeña una población formada por individuos que son soluciones candidatas del problema en cuestión [68].

Similarmente a como ocurre en la evolución natural, los AG tienden a encontrar mejores soluciones al problema de manera progresiva, gracias a la “renovación del material genético” en la población por medio de los llamados operadores genéticos.

Como se conoce, la mecánica de los AG es sorprendentemente sencilla y sus soluciones potentes. La simplicidad de las operaciones y la gran capacidad de resolución son las mejores motivaciones para utilizar los AG y su utilidad como estrategia para resolver problemas se corrobora con los excelentes resultados experimentales que producen.

En general, su orientación se enfoca a la resolución de problemas que no son solubles por técnicas de optimización convencionales, como son problemas con carácter no lineal, combinatorio, no diferenciables, de gran dimensión, con gran número de restricciones, etc.

Los elementos de búsqueda que se combinan en los AG (búsqueda determinística y estocástica) presentan algunas ventajas con relación a otros métodos basados en gradientes, aleatorios, exhaustivos, etc.

Entre las ventajas de los AG se pueden mencionar las siguientes:

- No necesitan un conocimiento auxiliar del problema, tales como derivadas o buenas suposiciones iniciales.
- Exploran simultáneamente muchos puntos del espacio de búsqueda y por tanto, evitan más fácilmente la convergencia hacia un óptimo local.
- Alcanzan un buen equilibrio entre la explotación de las mejores soluciones y la exploración del espacio de búsqueda.
- Son capaces de resolver una variedad de problemas muy difíciles de forma rápida y confiable.
- Son extensibles y fáciles de hibridar con otras técnicas de inteligencia artificial.

El uso de AG en la toma de decisiones energéticas y de ingeniería en condiciones reales constituye una herramienta que conduce a soluciones adecuadas.

1.7- Estrategias de operación de sistemas de climatización centralizados por agua helada. Métodos y herramientas para su implementación.

En la literatura se reportan diversas estrategias de operación en los diferentes sistemas de climatización por agua helada, tanto con condensadores enfriados por agua como por aire. Muchos autores [10], [6], [3], [9], [69] reportan que no existe una variante absoluta para la operación eficiente de los “chillers”, ya que la misma depende de las características de la instalación y el equipamiento, así como de los parámetros exteriores y de operación que garanticen la seguridad y la vida útil del “chiller” y el mantenimiento de las condiciones de confort.

1.7.1- Estrategias para incrementar la eficiencia de los sistemas de climatización centralizados del tipo todo- agua a cargas parciales.

Dentro de las estrategias posibles, las más generalizadas en la práctica son las siguientes:

- “Chillers” múltiples de diferentes capacidades
- “Chillers” con múltiples compresores
- Sistemas con flujo variable
- Operación en serie o paralelo
- Control de la presión de condensación
- Ajuste de la temperatura del agua helada.

1.7.1.1- “Chillers” múltiples de diferentes capacidades

Es difícil lograr mantener los requerimientos de carga con el uso de “chillers” múltiples, ya que ello requiere de un adecuado sistema de control y supervisión que actúe ante las frecuentes variaciones de la demanda de frío [69]. En estos casos, la estrategia de configuración asimétrica ha sido muy utilizada, ya que el hecho de emplear “chillers” de diferentes capacidades permite lograr un ajuste más eficiente del sistema ante las variaciones de carga.

Un caso de estudio desarrollado por la CARRIER [70] expone el uso de 3 “chillers”, dos de igual capacidad con una distribución de la carga de 40% cada uno y uno de menor capacidad de 20 % de la carga. Esta distribución garantiza que para bajas cargas por debajo del 20 % se trabaje con el de menor capacidad, y en función del incremento de la necesidad de frío entran en funcionamiento los otros dos “chillers”, actuando el de menor capacidad como un equipo de arranque y reserva.

La implementación de esta estrategia brinda mejores resultados desde el punto de vista energético cuando los “chillers” tienen diferentes capacidades y se puede ajustar el número de “chillers” en operación de acuerdo a la demanda térmica del edificio en un amplio rango de operación.

1.7.1.2- Sistemas con flujo variable de agua helada

Este método utiliza un variador de velocidad en las bombas de agua helada que permite la reducción del consumo de energía en las condiciones de cargas parciales al circular menos agua por el sistema [16], [12]. Los ahorros de energía reportados pueden llegar hasta un 30 % con respecto al consumo de un sistema con flujo constante [18].

Un caso desarrollado por la Compañía YORK, en el cual se cambia un sistema de flujo constante por uno variable en un sistema enfriado por agua, logra una reducción del consumo de energía de 28 %. Esta estrategia ha tenido una amplia aceptación en los últimos años, múltiples experiencias se han materializado obteniendo incrementos de eficiencia con su aplicación [10], [6], [9] , [71].

La inversión inicial para introducir estos sistemas es relativamente alta, por lo que en todos los casos es necesario evaluar adecuadamente la relación costo beneficio, resultando más viable su empleo en nuevas instalaciones.

1.7.1.3- Operación de los “chillers” en serie o paralelo.

No existe un criterio generalizado acerca de cuál disposición es la mejor a utilizar para la interconexión de los “chillers”, ya que existen diferentes factores de diseño, explotación y externos que determinan las ventajas y desventajas de cada una de las formas de interconexión [38], [70], [72], [39].

La configuración en serie es muy empleada ya que con esta opción se logran altos valores de diferencia de temperatura entre la salida y el retorno del agua helada, pero presenta la desventaja del incremento del costo de bombeo y el número de “chillers” conectados en serie está limitado por las excesivas caídas de presión [6], [70].

El uso de los “chillers” en paralelo, como se muestra en la figura 1.5, permite la operación de la cantidad de “chillers” que realmente se necesite en dependencia de la demanda de carga. Desde del punto de vista hidráulico posee la ventaja de que las caídas de presión a través de la tuberías no son tan altas como en el caso de los “chillers” conectados en serie.

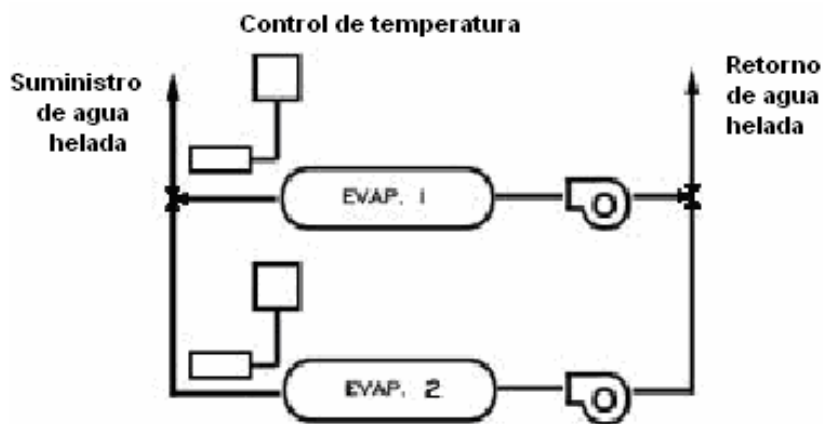


Figura 1.5 Configuración de “chillers” en paralelo

Esta configuración tiene como ventaja también la operación continua de uno de los “chillers”, en caso de mantenimiento o de roturas inesperadas del otro “chiller”, garantizando un servicio continuo. Su desventaja radica en que pueden aparecer problemas con la mezcla de las corrientes cuando uno de los “chillers” está fuera de servicio, lo que provoca un incremento de la temperatura del agua helada a la entrada del evaporador. Se necesita en este caso una bomba primaria que trabaje en función de la carga de enfriamiento requerida.

1.7.1.4- Control de la presión de condensación.

Ajuste de la temperatura del agua de enfriamiento en los condensadores enfriados por agua.

La temperatura de entrada del agua al condensador de los “chillers” tiene gran influencia en la eficiencia global del sistema. Una disminución en la temperatura del agua reduce la

temperatura de condensación, y por tanto, disminuye el consumo de potencia del compresor. En general, por cada grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$) de disminución en la temperatura de condensación la eficiencia del “chiller” aumenta un 2% aproximadamente [6], [73].

Los controles de la torre de enfriamiento posibilitan ajustar la temperatura de entrada al condensador mediante la regulación del flujo de aire, escalonando el trabajo de los ventiladores o variando su velocidad. Por supuesto que un aumento del flujo de aire [6] incrementa el consumo de potencia de los ventiladores, de modo que el objetivo es encontrar el balance que proporciona el consumo de potencia total mínimo.

Hay que tomar en consideración que si la temperatura en el condensador es muy baja se puede afectar la capacidad máxima del “chiller”, la cual está limitada por la diferencia de presión requerida para hacer circular la masa de refrigerante necesaria a través del condensador y el dispositivo de expansión [74]. Esto limita la presión mínima en el condensador y la temperatura mínima del agua de enfriamiento, en dependencia de las condiciones ambientales y de carga del sistema.

Esta estrategia, encontró un amplio uso en sus inicios, fundamentalmente en los Estados Unidos y Canadá donde los recursos hidráulicos no eran un gran problema. Sin embargo, con el agotamiento de este recurso natural, los sistemas enfriados por aire han encontrado una amplia aceptación, eliminando el gasto innecesario de agua, los costos de mantenimiento y de operación de la torre de enfriamiento.

Variación del flujo de aire de condensación en condensadores enfriados por aire.

En los condensadores enfriados por aire, es posible mantener la presión de condensación alrededor de un punto determinado a partir del control del flujo de aire. El uso de ventiladores de diferentes capacidades y de accionamientos de velocidad variable, permite controlar el flujo de aire de enfriamiento con vistas a suministrar los volúmenes adecuados ante los diferentes requerimientos del sistema. El método de variar el número de ventiladores en operación de acuerdo al flujo de aire requerido, se conoce como ciclaje de ventiladores, aunque también en la actualidad se utilizan variadores de velocidad en los ventiladores para controlar la presión de condensación.

La temperatura de condensación en los sistemas de refrigeración enfriados por aire se encuentra normalmente de 15 a 17 $^{\circ}\text{C}$ [8] por encima de la temperatura ambiente.

De esta forma se controla la presión de condensación alrededor de un punto ventajoso para el sistema, tanto para evitar excesivos consumos derivados de las altas presiones de condensación, como para garantizar el flujo de refrigerante necesario a través del condensador y el dispositivo de expansión para satisfacer la carga térmica demandada por el sistema.

1.7.1.5- Ajuste de la temperatura del agua helada

Una de las variables que mayor influencia tiene sobre el consumo de energía de un sistema de climatización todo-agua es la temperatura del agua helada que sale del “chiller” y que se distribuye a las áreas y locales a climatizar [6], [69]. Es práctica común elevar la temperatura del agua helada para ahorrar energía en los períodos de menor carga de enfriamiento o de temperaturas exteriores más bajas, sin embargo, el uso de esta estrategia requiere un especial cuidado debido a que un excesivo aumento en la temperatura de suministro del agua helada puede provocar que no se alcancen las condiciones de temperatura y humedad del aire en los locales climatizados, afectando las condiciones de confort en ellos. [75], [70].

Generalmente, la aplicación de este método se realiza empíricamente por el personal de operación, no logrando el aprovechamiento máximo del ahorro de energía alcanzable con el control operacional de esta variable en las diferentes condiciones climatológicas y de ocupación del hotel, o en otros casos afectando las condiciones de confort [73], [76].

El Instituto de Refrigeración Americano (ARI), establece valores de temperatura del agua helada de suministro y retorno para “chillers” de 6,7°C y 12 °C respectivamente para las condiciones de diseño de Norteamérica [34]. Sin embargo, este rango no es rígido, y es posible ajustarlo, variando la temperatura de suministro del agua helada en dependencia de la carga térmica de la edificación y las condiciones climáticas imperantes, sin afectar las condiciones de confort.

Mantener la temperatura del agua helada lo más elevada posible, conlleva a ahorros significativos de energía. De forma general, por cada grado Celsius (°C) que se eleve la temperatura del agua helada, se incrementa la eficiencia del “chiller” en un 4 % [16]. Los “chillers” se diseñan comúnmente para operar a temperaturas de salida del agua helada de 6,7 a 7,2 °C. Es frecuente que en la operación de las plantas se mantenga la

temperatura del agua helada en un valor fijo, lo que resulta ineficiente para la mayoría de las aplicaciones, donde la carga se comporta por debajo del valor máximo la mayor parte del tiempo.

Normalmente se puede elevar la temperatura del agua helada de 2,5°C a 5,5°C por encima de la temperatura de diseño [16], [60], incluso en condiciones de cargas nominales. El margen típico de sobredimensionamiento de los componentes, permite elevar la temperatura del agua helada hasta cierto punto, esto conlleva a un tiempo mayor de operación del sistema para alcanzar las condiciones de confort.

En el Manual “ASHRAE”, Sección 40.14 [18], se recomienda un método empírico para establecer la temperatura del agua helada, el cual, en esencia consiste en monitorear la posición de las válvulas que controlan el flujo de agua en las manejadoras de aire críticas, e ir aumentando la temperatura del agua helada hasta que estas válvulas alcancen la posición de completamente abiertas. Este método garantiza que no se afecte el confort, pero no asegura que el consumo de energía sea mínimo, ya que considera solo el efecto de la temperatura del agua helada sobre la potencia consumida por el compresor, sin considerar el incremento del tiempo de operación del sistema.

En el sistema Electra™ [77], solo se contempla como estrategia realizar el ajuste de la temperatura del agua helada en correspondencia con la variación de la temperatura ambiente, lo que tampoco posibilita optimizar el consumo de energía del sistema.

En otros sistemas para la optimización de sistemas de enfriamiento de agua helada, como el sistema de Siemens [19], o el de “Energy Optimization, Inc” [78], no se contempla el ajuste de la temperatura de agua helada como estrategia para la optimización del consumo de energía.

La Compañía CARRIER desarrolló un optimizador para el control del número de “chillers” en funcionamiento cuando se opera a cargas parciales (IPLV) a partir las demandas térmicas de la edificación. Sin embargo, no se reporta en este optimizador la variación de la temperatura del agua helada como estrategia de optimización [79], [80].

Por su parte, el sistema “Chiller Plant Optimizer” [81], considera el ajuste de la temperatura del agua helada como una estrategia de limitada aplicación, y que aunque se pueden obtener ahorros significativos de energía en sistemas de flujo constante, hay que

prestar atención al mantenimiento de las condiciones de confort y el efecto adverso que la misma tiene sobre el tiempo de trabajo del sistema para vencer una carga de enfriamiento dada, sin dar una solución para ello.

Wulfinghoff, en su Manual de Eficiencia Energética [13], recomienda mantener la temperatura del agua helada tan alta como sea posible, como un método simple y de bajo o ningún costo para obtener significativos ahorros de energía. Este autor señala como única limitación para ello, la satisfacción de la carga térmica. Establece, además, que el ajuste de la temperatura de trabajo del evaporador, que determina la temperatura del agua helada en el caso de los sistemas climatización de este tipo, depende de la carga de enfriamiento, de las condiciones climáticas y del diseño del “chiller”, y de la eficiencia de los equipos involucrados en el sistema de enfriamiento. Y señala que el reto fundamental lo constituye determinar la temperatura máxima del agua helada para todo el rango de carga térmica, la cual se podría ajustar manual o automáticamente.

La Patente 6718779 de Estados Unidos [82], expone un método de optimización para “chillers”, el cual está basado en el control de la operación de las bombas de circulación de las torres de enfriamiento y las bombas de circulación de agua helada, así como el control de los ventiladores de las torres de enfriamiento para mantener la presión de condensación en valores óptimos de consumos de energía del sistema. Este método de optimización no es aplicable a sistemas de flujo constante, ni a sistemas de climatización enfriados por aire, además de no contemplar la variación de la temperatura del agua helada como una estrategia para la optimización del consumo de energía.

En conclusión, no se reporta en la literatura la existencia de un valor de la temperatura del agua helada, dentro del rango que garantiza las condiciones de confort, que posibilite minimizar el consumo de energía. Asimismo, no aparece en la literatura un análisis completo ni herramientas que permitan establecer la temperatura adecuada del agua helada para lograr un consumo mínimo de energía, considerando que la misma influye tanto sobre la potencia que demanda el compresor, como sobre el tiempo que debe trabajar el sistema para vencer la carga de enfriamiento dada, y que está influenciada por la carga de enfriamiento y las condiciones del aire exterior.

Por tanto, se justifica la necesidad de desarrollar métodos y procedimientos para la determinación del valor de la temperatura del agua helada, que considerando las

condiciones climáticas exteriores de la región y condiciones operativas de la edificación, posibiliten la reducción del consumo de energía en los sistemas de climatización centralizados del tipo todo-agua, sin afectar las condiciones de confort.

Conclusiones parciales

- 1- La situación energética internacional condicionada por el costo creciente de la energía, la limitación de recursos, y el deterioro ambiental, requiere la adopción urgente de acciones para el incremento de la eficiencia energética y el avance hacia el desarrollo energético sostenible.
- 2- El turismo es uno de los sectores más dinámicos e importantes de la economía cubana, caracterizado en general por su elevado, y en ocasiones poco racional, consumo energético. Existe un potencial de ahorro de energía importante en este sector, en particular en los sistemas de climatización centralizados por agua helada.
- 3- Los modelos de consumo de los “chillers” desarrollados hasta el momento, son modelos basados fundamentalmente en las relaciones físicas de los componentes, y en muchos casos se basan en especificaciones dadas por el fabricante, las cuales no son suficientes para desarrollar modelos operacionales con la exactitud requerida, donde la realidad es cambiante y afectada por parámetros que muchas veces no se conocen y la descripción de su comportamiento posee un nivel de incertidumbre determinado. Por tanto, para sistemas en operación es necesario el desarrollo de nuevos modelos y herramientas que logren reproducir el comportamiento de los sistemas, y que puedan prescindir de aquellos datos y detalles que no son directamente obtenibles.
- 4- La estrategia de aumento de la temperatura del agua helada en los “chillers”, constituye una estrategia atractiva, posible de implementar con mínimos recursos. Sin embargo, no se reporta en la literatura un análisis completo ni herramientas que permitan establecer la temperatura del agua helada para lograr un consumo mínimo de energía, considerando que la misma influye tanto sobre la potencia que demanda el compresor, como sobre el tiempo que debe trabajar el sistema para vencer la carga de enfriamiento dada.

CAPITULO II. PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS DEL TIPO TODO-AGUA A FLUJO CONSTANTE

2.1- Modelación termodinámica de los sistemas de climatización.

Tradicionalmente existen métodos de abordar problemas de modelación aplicando herramientas que están basadas fundamentalmente en la primera y la segunda ley de la termodinámica. Para la aplicación de estos modelos es necesario tener una vasta información de las características del equipamiento que interviene en el proceso termodinámico, coeficientes de traspaso de calor en los intercambiadores, así como las efectividades térmicas de los mismos [83], [84], [54], [45].

Estos datos, desafortunadamente, no siempre están disponibles y muchos de ellos varían con las condiciones de operación.

El análisis del estado del arte en la modelación de sistemas de climatización por agua helada realizado, tanto de los modelos físicos de los componentes de un sistema, como aquellos desarrollados por algunos autores con un propósito determinado, indica que para obtener un detallado comportamiento de un fenómeno con elevada precisión es necesario desarrollar investigaciones de un alto nivel de complejidad, sobre todo teniendo en cuenta la alta cantidad de parámetros y variables que intervienen en la modelación.

En la etapa del diseño de un “chiller” es más fácil desarrollar modelos de comportamiento a partir de la información disponible de los sistemas a instalar.

Un aspecto totalmente diferente se presenta cuando se trata de investigar sistemas en operación, donde la realidad es cambiante y afectada por parámetros que muchas veces no se conocen y la descripción de su comportamiento posee un nivel de incertidumbre determinado.

Por tanto, en sistemas en operación es necesario el desarrollo de herramientas y modelos que logren reproducir de la forma más cercana a la realidad posible y que se puedan prescindir de los datos y detalles que no son directamente obtenibles desde el sistema.

En la modelación moderna de sistemas termodinámicos, existe la necesidad de implementar otras herramientas que sean aplicables a estos sistemas y que reproduzcan los resultados con exactitud adecuada y con un menor número de datos de diseño del equipamiento. Precisamente en este principio se basan los modelos termodinámicos de

cajas negras en los cuales sólo es necesario conocer las entradas y las salidas de las mismas, sin tener en consideración las transformaciones internas del sistema.

Es en este marco donde se justifica la implementación de modelos de consumo de sistemas a partir de parámetros conocidos y medibles directamente en el sistema. Este es el caso de los modelos neuronales y “ANFIS” [85], donde a partir del conocimientos de las entradas y salidas son capaces de reproducir con alto nivel de precisión el comportamiento de un proceso, sin necesidad de tener detallada información de las relaciones internas del proceso.

2.2- Obtención de los modelos de consumo de la instalación.

Tomando en consideración lo anterior, y teniendo en cuenta las características de la situación que se analiza en este trabajo, se decidió la utilización de técnicas de inteligencia artificial, basadas en la filosofía de los modelos de cajas negras, y en la utilidad que estas tienen en caso de problemas con incertidumbres e indeterminaciones.

Dado que algunas de estas herramientas se basan en datos experimentales adquiridos durante la operación de un sistema real, es necesario partir de una instalación dada. Es por ello que se toma el Hotel Jagua de la provincia Cienfuegos como caso de estudio para el desarrollo de los modelos y el procedimiento presentados.

El establecimiento de las condiciones de contorno y las restricciones del modelo, permiten establecer de forma detallada y clara el comportamiento de un sistema o parte del mismo con relación a las variables de interés que se desean estudiar.

Las condiciones del modelo que se propone son las siguientes:

- 1- Sistema en operación real.
- 2- Sistema a flujo constante de agua helada.
- 3- El consumo de las bombas se considera constante.
- 4- No se conocen las efectividades térmicas de los intercambiadores de calor.
- 5- No se conocen detalles del rendimiento actual de los componentes del sistema.
- 6- Sistema con recuperación de calor de condensación y condensadores adicionales enfriados por aire.

- 7- La temperatura de salida del agua helada oscila entre 6,5 °C y 11 °C
- 8- La variable a controlar es la temperatura del agua helada.
- 9- La temperatura y la humedad relativa en el interior de la habitación se mantienen dentro del rango de condiciones de confort.

Para darle solución al problema científico planteado bajo estas condiciones se requiere desarrollar un procedimiento que abarca tres etapas fundamentales.

Una primera etapa de simulación térmica del edificio para obtener las cargas de enfriamiento y la obtención de un modelo neuronal de cargas térmicas.

Una segunda etapa de modelación del sistema de climatización a partir del desarrollo de un sistema “ANFIS” para la modelación del consumo de energía, y finalmente una tercera etapa donde se realiza la determinación de la temperatura del agua helada para obtener el mínimo consumo de energía.

2.3- Caracterización climatológica de la región

La caracterización climatológica de la región, constituye el primer paso fundamental para el desarrollo exitoso de los cálculos de cargas térmicas de climatización de una edificación determinada [44]. La demanda de enfriamiento de una edificación está estrechamente relacionada con las condiciones climatológicas de la región, por lo que existen una serie de variables que es necesario considerar a la hora de realizar el cálculo de las necesidades de climatización [86], [87].

La ubicación de la construcción juega un papel importante en la determinación de las necesidades energéticas finales en materia de calefacción y refrigeración.

Las características que influyen sobre el intercambio térmico entre una edificación y su contexto pueden ser extrínsecas e intrínsecas. Conforme a esta clasificación, las características medio ambientales, entre ellas el clima, son entendidas como una serie de parámetros externos a la edificación que influyen directamente en el intercambio energético entre la edificación y su contexto [88], [89], [90]

Una caracterización detallada de la zona de ubicación ayudará a realizar un mejor análisis y cálculo del balance energético. Algunos autores [31], [24], abordan esta temática desde diferentes contextos y señalan que los datos más significativos y característicos de la zona

que son necesarios saber son: temperaturas máximas y mínimas, grados-día, radiación solar diaria, distribución de la radiación solar horaria-anual para diferentes orientaciones y precipitaciones.

Radiación solar: Este parámetro suele variar constantemente. Su estudio permite determinar la cantidad de energía que llega a una superficie de modo directo, difuso o reflejado, dependiendo de los movimientos relativos del sol y la tierra. El estudio de este parámetro resulta necesario, pues la radiación produce un incremento de la temperatura en las superficies envolventes, que luego desprenden ese calor en el interior de las edificaciones y generan movimientos de masas de aire por diferencias de temperatura entre las zonas expuestas al sol y las que están a la sombra.

Temperatura ambiente: Es sin dudas uno de los parámetros fundamentales del clima. Desde el punto de vista de acondicionamiento del aire resulta fundamental en el análisis del comportamiento de las edificaciones, ya que junto con los resultados obtenidos de otros parámetros se puede determinar si se ofrecen o no unas condiciones climáticas de confort. Se deben tener en cuenta las temperaturas máximas y mínimas diarias.

La humedad: Es entendida como la cantidad de vapor de agua que contiene el aire, como resultado de la evaporación de las masas de agua producto del calentamiento generado por la radiación solar y la evapotranspiración animal y vegetal. Este valor varía de acuerdo al tiempo y lugar y, junto con la temperatura, es fundamental para determinar el clima en un sitio.

La velocidad del aire: Es considerada un parámetro fundamental en el análisis ambiental de las edificaciones, puesto que del mismo modo que puede ser una forma de climatización, también puede generar manifestaciones de malestar, en los ocupantes de un espacio e incluso ocasionar problemas de inestabilidad en las edificaciones [91]

La precipitación: La precipitación es un elemento del clima que influye en la humedad relativa, vegetación y contaminación, entre otros.

A todos estos parámetros hay que añadir el efecto de una orientación y disposición adecuadas de las edificaciones que favorezcan el máximo aprovechamiento de las condiciones climáticas del lugar de implantación. Se debe tener muy presente el factor de

la radiación solar sobre las diferentes orientaciones posibles para intentar que éstas jueguen a favor del proceso de acondicionamiento térmico de la construcción.

Para los cálculos de climatización es necesario, como mínimo, el conocimiento de ciertas variables de cada localidad de implantación de un proyecto y que sean tabuladas para su conocimiento y aplicación [92].

Estas variables se hallan detalladas a continuación y a partir de las mismas pueden obtenerse otras que serán necesarias para los cálculos:

Temperatura Bulbo Seco verano: Es la temperatura exterior de bulbo seco correspondiente a los meses de julio y agosto a las 15 horas y que corresponde a la máxima temperatura a efectos de transmisión.

Temperatura Bulbo Húmedo verano: Es la temperatura exterior de bulbo húmedo correspondiente a los meses de julio y agosto a las 15 horas y que corresponde a la máxima temperatura a efectos de transmisión [93].

Temperatura máxima (Tmax): Es la máxima temperatura ambiente exterior que se alcanza a una hora determinada del día o la noche.

Temperatura mínima: Es la mínima temperatura ambiente exterior que se alcanza a una hora determinada del día o la noche.

Temperatura de confort interior: Se refiere a la temperatura de bulbo seco que existe dentro de la habitación, para los cálculos de climatización, su valor varía entre 22°C y 24°C.

Todas estas variables pueden ser obtenidas a partir de la medición directa o de las bases de datos históricos de las entidades que brindan servicios meteorológicos.

2.3.1- Caracterización climatológica de la región de Cienfuegos.

Las principales variables climatológicas utilizadas en los cálculos de simulación fueron obtenidas del Instituto de Meteorología de la Provincia de Cienfuegos, lugar donde se realiza el presente estudio. La temperatura de confort interior y los parámetros geográficos se consideran constantes y se introducen una sola vez dentro del simulador térmico. En caso de las temperaturas exteriores máximas y mínimas y la humedad relativa se obtuvieron a partir de datos confiables procedentes del Instituto de Meteorología.

En el Anexo A se observan los valores de temperaturas máximas y mínimas de la región de Cienfuegos para los meses de verano.

2.3.2- Horas-Grado de la localidad

La temperatura ambiente de una región se registra de manera horaria durante un determinado período de tiempo. Mientras más se aleje dicha temperatura de las condiciones de confort, mayor es la necesidad de climatización de un espacio, y esto puede ocurrir tanto en un sentido o en otro, es decir, puede requerirse enfriamiento en climas cálidos o calefacción en climas fríos.

Estos requerimientos, tanto de enfriamiento como de calefacción, se pueden caracterizar mediante las horas-grado. De manera formal, las horas-grado se definen como:

$$HG = \int_{T_{ref}}^{T_{ext}} \int_{t=1}^{24} T(t) dt dT \quad (2.1)$$

Donde T_{ref} y T_{ext} son la temperatura de referencia o de confort, y la temperatura ambiente exterior, respectivamente. La integración se efectúa para cada día por lo que el intervalo del tiempo es de la hora 1 a la 24 en intervalos de 1 hora. En la Figura 2.1 se muestra el concepto de horas-grado en forma gráfica y donde T_H y T_L definen las temperaturas límite consideradas de confort en verano e invierno, respectivamente.

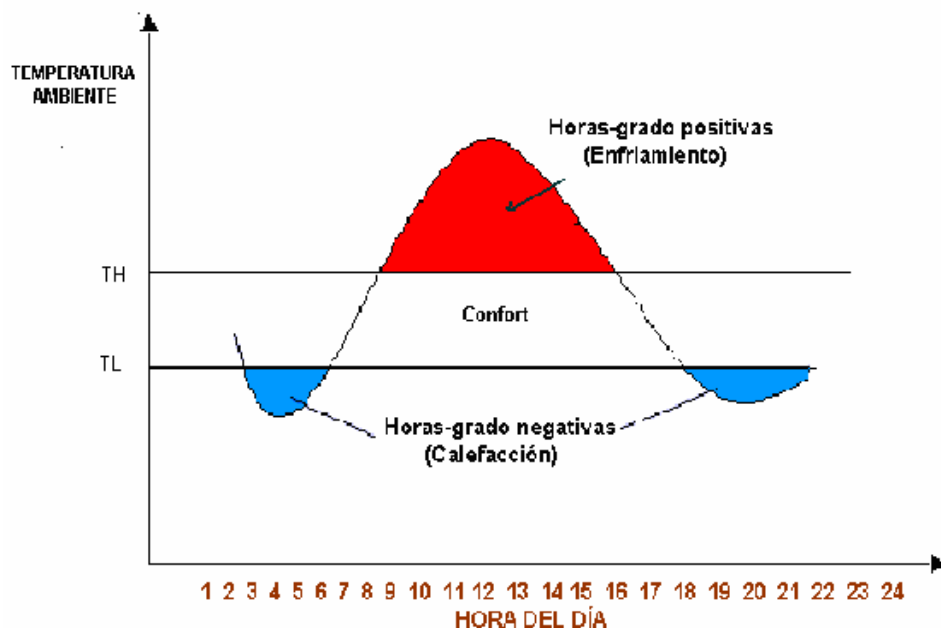


Figura 2.1. Visualización gráfica del concepto de horas-grado.

La relación entre la temperatura y las horas del día se encuentra a partir de la función de Fourier.

$$\theta(t) = \langle m \rangle + A * \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) + B * \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \quad (2.2)$$

Donde:

$$t = 1, 2, 3, \dots, 24 \text{ (horas)}$$

$\theta(t)$. – Factor adimensional de temperatura.

$$\theta(t) = \frac{T_{\text{máx}} - T(t)}{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}} \quad (2.3)$$

$$A = \frac{2}{24} \sum_{t=1}^{24} [m(t) - \langle m \rangle] \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \quad (2.4)$$

$$B = \frac{2}{24} \sum_{t=1}^{24} [m(t) - \langle m \rangle] \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \quad (2.5)$$

$$\langle m \rangle = \frac{\sum_{t=1}^{24} T_{av}(t)}{24} \quad (2.6)$$

Las horas-grado positivas (HG) indican la necesidad de aire- acondicionado, mientras las negativas se consideran para el caso de calefacción.

Las horas-grado reflejan no sólo el alejamiento de las condiciones de confort, sino también el tiempo que cada nivel de temperatura permanece en el ambiente, por lo que guardan proporción con la energía necesaria para lograr dichas condiciones de confort.

2.3.2.1- Horas-Grado de la región de Cienfuegos.

Las horas-grado horarias de la región de Cienfuegos se obtienen en el fichero HG-2000, del simulador de la UABC [44]. En el Anexo B se expone un resumen de las horas-grado totales de la región de Cienfuegos.

2.4- Características constructivas de las edificaciones

Para la modelación térmica de una edificación es importante realizar un levantamiento detallado de las características constructivas de la misma. Los principales parámetros constructivos a considerar son:

- Geometría
- Altura
- Aislamiento y espesores
- Número de muros exteriores
- Sombreado interior
- Mobiliario
- Tipo de división interior
- Localización de la zona
- Tipo de techo y Tipo de piso
- Porcentaje de cristal
- Cubierta de piso

2.5- Características del Caso de estudio “Hotel Jagua”.

El Hotel Jagua está situado en la provincia de Cienfuegos (figura 2.2), en la zona de Punta Gorda; ostenta la categoría cuatro estrellas y pertenece a la cadena Gran Caribe. Tiene una capacidad de ciento treinta y seis habitaciones en el edificio principal, dos suites en el sexto y séptimo piso, cuenta también con un bloque de trece cabañas ubicadas en el área de la piscina, lo que totaliza un total de 149 habitaciones disponibles para el turismo, principalmente turismo de tránsito.



Figura 2.2 Hotel Jagua Provincia de Cienfuegos

2.5.1- Características constructivas.

Este hotel está construido con una estructura de concreto, con paredes exteriores de bloque doble de 15 centímetros, un espacio de aire en el centro para que estas paredes sean acústicas y paredes interiores de bloque sencillo, con ventanas de cristal en el edificio principal con vista a la parte norte y puertas de madera en el pasillo sur. Las cabañas están construidas de forma similar, sólo que la pared del lado norte de estas es de cristal, la tienda y el restaurante también poseen áreas acristaladas muy grandes con grandes ganancias de calor en esta zona.

Los detalles específicos de la construcción se le introducen al simulador térmico en el fichero "DATA 2" que recoge todas las características constructivas del edificio en estudio [44].

2.5.2- Características del sistema de climatización.

La figura 2.3 muestra un esquema simplificado del circuito de refrigeración del Hotel caso de estudio.

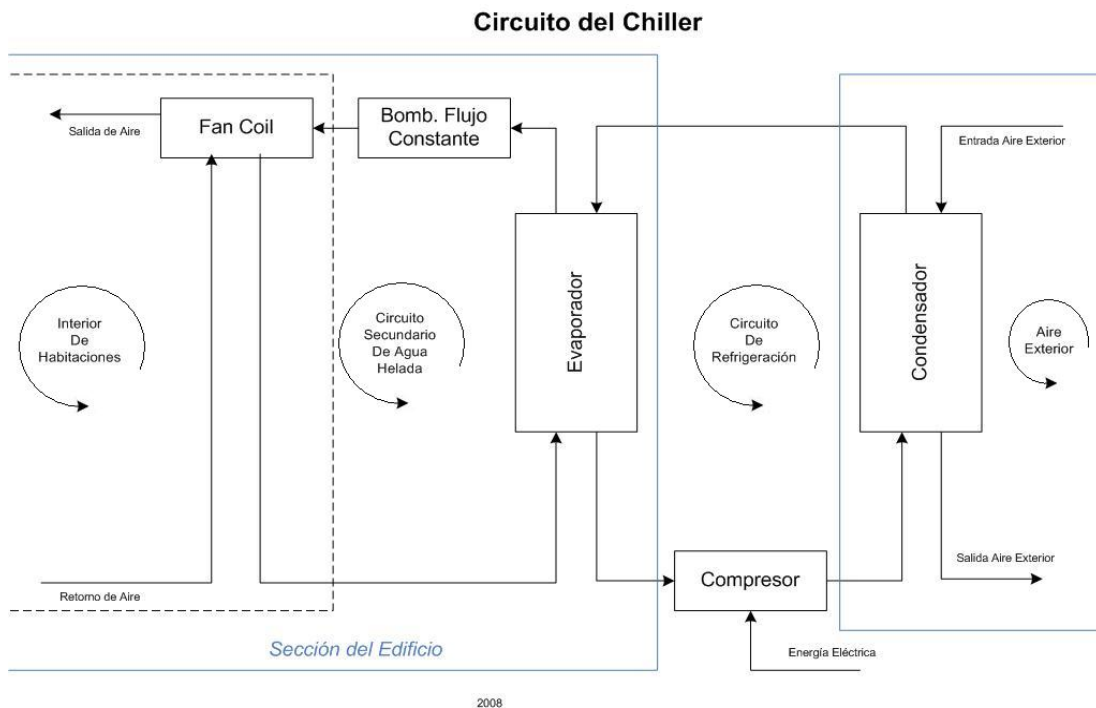


Figura 2.3 Circuito de refrigeración simplificado Hotel Jagua.

Este Hotel posee un sistema de climatización centralizado por agua helada de dos enfriadoras de agua marca CHAW-T 1402. [2] con las siguientes características.

Circuito frigorífico.

Posee cuatro circuitos frigoríficos e igual número de compresores conectados en paralelo y constituido básicamente por:

1. Válvulas de líquido de cierre manual.
2. Filtros deshidratadores con cartuchos recambiables.
3. Visores de líquido con indicador de humedad.
4. Válvulas de expansión termostáticas con equilibrados de presión externa.
5. Válvulas de acceso tipo obús.
6. Válvulas solenoide en línea de líquido.
7. Mangueras antivibratorias en succión y descarga.
8. Silenciador en la descarga.

Condensadores

Dispuestas en “W”, con cabezales en chapa de acero galvanizado. Aletas de aluminio y tubos de cobre expansionados mecánicamente. Con capacidad para subenfriamiento del líquido condensado. Esto permite obtener un mejor aprovechamiento de la capacidad frigorífica, sin aumentar la potencia consumida. Los motoventiladores de enfriamiento son axiales y regulables en velocidad por disminución de la tensión de alimentación hasta 60 voltios.

Evaporador.

De tipo multitubular, horizontal, de expansión seca, constituido esencialmente por una camisa exterior de tubo de acero de alta resistencia y un haz de tubos de cobre rectos en su interior y deflectores de flujo.

Compresores.

Son del tipo semiherméticos de tornillo, para R-22, marca Bitzer de fabricación alemana, enfriados por el gas de succión y protegidos por sondas termostáticas alojadas en el

interior de las bobinas. La lubricación es forzada de la zona de alta presión a la de baja presión. El circuito de aceite incluye calentador del cárter, visor de nivel de aceite, filtro y válvulas de toma de presión.

En la Tabla 2.2 se muestran los datos generales de varios componentes del sistema de refrigeración.

Tabla 2.2 Características del sistema centralizado del hotel Jagua.

Unidades condensadoras	Temp. entrada aire: 32 °C
Suministrador: FRIOCLIMA	Refrigerante: R-22
Modelo: CHAW –T 1402	Amperaje a plena carga: 335 A
No. Serie: 409294	Peso 4135 kg.
Capacidad frig: 404 kW	Año: 2000
Potencia abs: 187,1 kW	3F/60 Hz/380 V
Temp salida del agua: 6 °C	
Evaporador	Válvula de expansión
Modelo: CHAW 1402	Modelo: CHAW 1402
No Serie: 100434	No Serie: 100436
Presión Prueba: 20 bar	Presión prueba:30 bar
Presión máx. serv: 12 bar	Presión máx. serv: 20 bar
Volumen: dm ³	Temp. máx. serv: 100 °C
Temp. máx. serv: 30 °C	Refrigerante: R-22
Temp. mín. serv: 5 °C	
Fan – coil FBH -6	
Capacidad frigorífica:	5,4 kW.
Caudal de aire :	275 l / s.
Presión estática disponible:	40 Pa.
Potencia eléctrica:	230W, 220volt, 60 Hz.
Dimensiones:	1174 x 515 x 278 (mm).
Fan – coil FBH – 4	
Capacidad frigorífica:	3.78kW.
Caudal de aire :	192 l / s.

Presión estática disponible:	40Pa
Potencia eléctrica:	230W, 220volt,60 Hz
Dimensiones:	924 x 515 x 278 (mm)

2.6- Simulación Térmica de la edificación.

La simulación térmica es un paso fundamental en la aplicación del procedimiento propuesto, y sirve de base para la posterior obtención del modelo de carga térmica que se necesita. A partir de la simulación se obtiene la base de datos que sirve para el entrenamiento de la RNA y para la obtención del modelo neuronal que a la postre sustituye al simulador.

Después de contar con una base de datos suficiente, que abarque todas las condiciones ambientales y demás detalles constructivos de la instalación, se procede a la simulación térmica del hotel.

La ventaja fundamental de utilizar un simulador en esta etapa del cálculo, es el hecho de analizar un número elevado de variantes, logrando una base de datos suficientemente rica que cubra todas las condiciones reales que puedan presentarse en la instalación.

Los detalles constructivos de la instalación son datos fijos, así como las condiciones de confort en el interior. Es posible variar los niveles de ocupación y parámetros climáticos exteriores y obtener las cargas de enfriamiento ante diferentes situaciones.

En este procedimiento se utiliza el simulador térmico desarrollado por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México, el cual está basado en la metodología de cálculo de la “ASHRAE”, y ha sido utilizado con resultados satisfactorios en previos estudios, tanto en México como en Cuba [44], [94].

2.6.1- Simulación térmica del Hotel Jagua Provincia de Cienfuegos

El estudio de simulación térmica del hotel Jagua tomado como caso base se realizó para distintas condiciones de temperaturas exteriores y diferentes niveles de ocupación. La simulación se hizo para diferentes valores de temperatura máxima y mínima dentro de un mismo día para un total de 914 días en diferentes meses del año.

Para poder considerar los diferentes niveles de ocupación resulta necesario establecer una estrategia ocupacional de las habitaciones, siguiendo criterios técnicos y energéticos. La estrategia debe basarse en ocupar primero las habitaciones de menor consumo, respetando las preferencias de los clientes por aquellas habitaciones que tienen una ubicación más atractiva. La aplicación de esta estrategia ocupacional presupone en si misma un ahorro de energía y reducciones de costos al hotel.

2.6.2- Estrategia de ocupación utilizada para la simulación térmica.

A partir del estudio de simulación térmica del bloque habitacional del hotel y de la obtención mediante éste de las cargas de enfriamiento de las diferentes habitaciones, se estableció una estrategia de ocupación que permite considerar de manera determinada la influencia del nivel de ocupación del hotel sobre la carga de enfriamiento y así poder incluir esta variable en el modelo neuronal del edificio.

Esta estrategia de ocupación de las habitaciones, diferente a la que se usaba tradicionalmente en el hotel, posibilita, adicionalmente, obtener significativos ahorros de energía al ocupar, primero, las habitaciones de menor carga térmica, respetando las preferencias de los clientes, los que normalmente prefieren ocupar las habitaciones de mayor altura, producto de la belleza paisajística que se observa, y las que están más al oeste, ya que con esta se tiene una buena vista hacia el área de piscina.

Aplicando esta nueva estrategia ocupacional, con el uso del simulador térmico, se determinan las cargas térmicas de climatización para diferentes valores de ocupación del hotel y diferentes condiciones de temperaturas exteriores.

La aplicación de la nueva estrategia ocupacional en el hotel como se muestra en la figura 2.4, posibilita, como un resultado complementario del presente trabajo, lograr un ahorro energético promedio de 26 352 kWh / año, lo que representa, considerando la estructura promedio del consumo de electricidad y la tarifa correspondiente en los diferentes horarios, un ahorro económico de 2 556 CUC/año sin necesidad de inversión alguna, y una reducción de emisiones de 24 toneladas de CO₂ anuales.

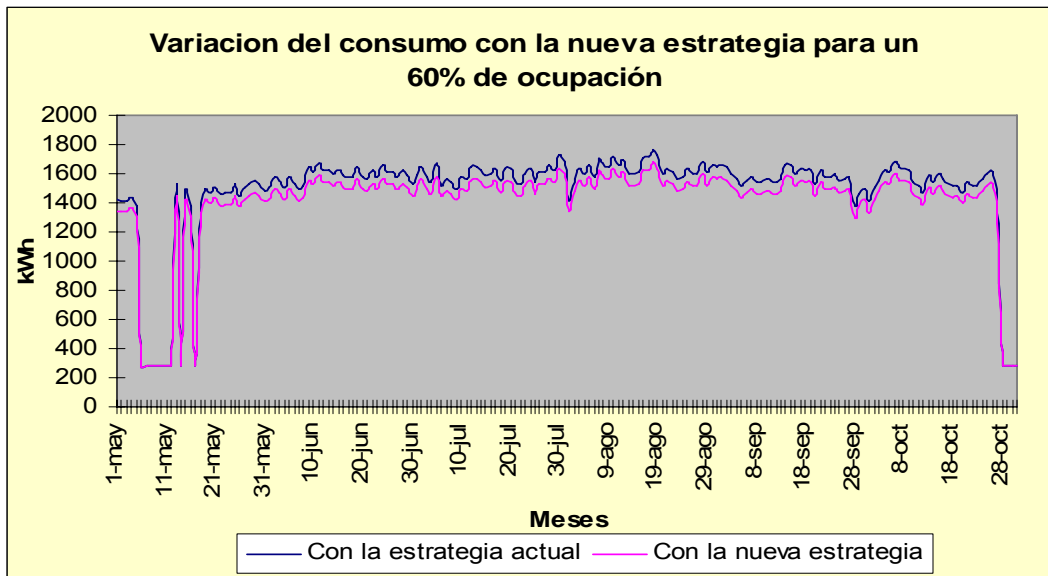


Figura 2.4 Variación del consumo para un 60% de ocupación.

En el Anexo C, se exponen otros resultados de cálculo de cargas térmicas, de la aplicación de la estrategia propuesta para distintos valores de ocupación y para diferentes condiciones climatológicas. El procedimiento para el establecimiento de la estrategia de ocupación de las habitaciones, resultado complementario del presente trabajo, puede ser aplicado, con carácter general, en programas de ahorro de energía en el sector hotelero.

2.7- Modelo neuronal de las cargas de enfriamiento en la edificación.

La simulación térmica de la edificación brinda una base de datos de cargas térmicas ante diferentes condiciones ambientales y niveles de ocupación del hotel. Sin embargo, el proceso de simulación es engorroso, y requiere de recursos materiales y humanos que no siempre están disponibles. Es en este contexto donde el uso de redes neuronales adquiere un papel protagónico debido a su rapidez y exactitud en los resultados una vez entrenadas satisfactoriamente [44], [95], [96].

A partir de los datos generados con el simulador térmico de la edificación y utilizando el software de cálculo “Matlab”, se procede al diseño de la RNA y a la obtención del modelo neuronal que es capaz de determinar con gran exactitud las cargas de enfriamiento de la edificación, con el objetivo de:

- 1- Sustituir el simulador térmico en la aplicación final que se le entrega al usuario, lo que facilita su manejo y utilización con el mínimo de conocimientos.

2- Permitir obtener un modelo de las cargas de enfriamiento con menor cantidad de datos requeridos y que corra en ambiente “Matlab” donde se desarrolla toda la aplicación.

En la tabla 2.3 se expone un resumen de la simulación térmica del hotel Jagua para el mes de junio del año 2006.

Tabla 2.3 Cargas de enfriamiento del Hotel Jagua para el mes de Junio 2006.

Día	Tmáx °C	Tmín °C	Horas - Grado	Carga de Enfriamiento (Toneladas de Refrigeración)			
				40% de Ocupación	60% de Ocupación	80% de Ocupación	100% de Ocupación
1-jun	30,80	22,00	76,15	791,42	1021,61	1185,15	1450,12
2-jun	31,30	23,40	120,01	873,94	1128,22	1310,36	1604,74
3-jun	31,60	22,60	105,76	847,15	1093,60	1269,70	1554,53
4-jun	30,80	22,00	76,15	791,42	1021,61	1185,15	1450,12
5-jun	30,50	23,90	117,59	869,40	1122,35	1303,47	1596,24
6-jun	31,60	22,10	93,40	823,88	1063,54	1234,40	1510,94
7-jun	31,00	21,70	72,43	784,41	1012,56	1174,52	1436,99
8-jun	31,50	21,80	84,13	806,44	1041,02	1207,95	1478,27
9-jun	33,00	23,60	156,35	942,34	1216,57	1414,14	1732,89
10-jun	31,50	24,00	138,54	908,81	1173,27	1363,27	1670,08
11-jun	32,80	24,40	172,44	972,61	1255,68	1460,07	1789,62
12-jun	31,50	24,40	148,43	927,43	1197,31	1391,51	1704,95
13-jun	33,80	22,50	143,93	918,96	1186,37	1378,67	1689,09
14-jun	32,20	23,20	131,68	895,92	1156,61	1343,71	1645,92
15-jun	32,20	23,70	144,05	919,19	1186,66	1379,01	1689,51
16-jun	32,10	23,00	124,89	883,14	1140,10	1324,31	1621,97
17-jun	33,00	22,20	121,73	877,19	1132,42	1315,30	1610,84
18-jun	32,40	22,60	120,54	874,95	1129,52	1311,89	1606,63
19-jun	32,90	23,70	156,98	943,52	1218,09	1415,93	1735,10
20-jun	31,90	22,90	118,72	871,53	1125,10	1306,71	1600,23
21-jun	32,00	22,60	113,15	861,05	1111,56	1290,80	1580,58
22-jun	32,00	23,80	142,83	916,89	1183,69	1375,52	1685,21
23-jun	33,40	21,90	121,70	877,14	1132,35	1315,21	1610,73
24-jun	33,90	23,20	163,09	955,01	1232,94	1433,36	1756,63
25-jun	32,60	23,20	139,07	909,82	1174,57	1364,80	1671,97
26-jun	32,20	23,60	141,58	914,53	1180,65	1371,95	1680,79
27-jun	33,80	21,60	121,67	877,08	1132,27	1315,13	1610,63
28-jun	32,50	23,40	142,17	915,65	1182,10	1373,65	1682,90
29-jun	31,90	23,20	126,14	885,49	1143,14	1327,89	1626,38
30-jun	29,90	23,20	89,20	815,97	1053,33	1222,41	1496,13
			3724,53	26452,29	34148,84	39665,94	48580,76

Existen diversas topologías de redes, por tanto debe escogerse la red que mejor se adapte al problema existente. En el caso de cálculo de cargas de enfriamiento, se propone el uso de una red multicapas, con propagación hacia adelante y algoritmo de aprendizaje con retropropagación. Este tipo de red fue escogida dadas las posibilidades que brinda y su amplio uso en un gran número de aplicaciones [97], [95], [98], [96], [99].

Es importante señalar que el número de neuronas en la primera y última capa están en dependencia del número de variables de entrada y salida respectivamente [100]. Las variables de entrada para esta aplicación son: la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$), la temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$), el porcentaje de ocupación del hotel (Ocup), y la variable de salida es la carga térmica (Q_T).

Por tanto, la arquitectura de la red tendrá una neurona en la última capa y tres neuronas en la primera capa. El número de capas ocultas y neuronas de las mismas se obtiene por el método de prueba y error.

El entrenamiento de la RNA es supervisado y los datos de entrenamiento se toman a partir de la base datos procedentes del simulador térmico de la UABC.

Una vez entrenada la red neuronal con los datos de salida del simulador térmico, es posible entonces obviar el uso del simulador y utilizar el modelo neuronal obtenido para calcular las cargas de enfriamiento del hotel bajo cualquier situación que se presente.

El éxito del cálculo de la red neuronal depende del grado de entrenamiento que se le dé a la misma, mientras más variantes se estudien, con más exactitud la RNA reproduce los resultados con la condición de que los valores que se procesen en la RNA tienen que estar en el intervalo de los datos utilizados para el entrenamiento.

2.7.1- Modelación neuronal de las cargas de enfriamiento del hotel Jagua.

Se seleccionó una RNA multicapas del tipo propagación hacia delante con aprendizaje por retropropagación [66]. La selección de este tipo de red responde a sus potencialidades en la solución de problemas de ingeniería y su efectividad a la hora de resolver problemas complejos [101].

En el caso del Hotel Jagua, se han llevado a cabo investigaciones con resultados satisfactorios encaminadas a obtener el modelo de la carga de enfriamiento (Q_T) utilizando redes neuronales artificiales (RNA) [20], [94].

El modelo propuesto se resume en la Figura 2.5 y será el utilizado en este caso.

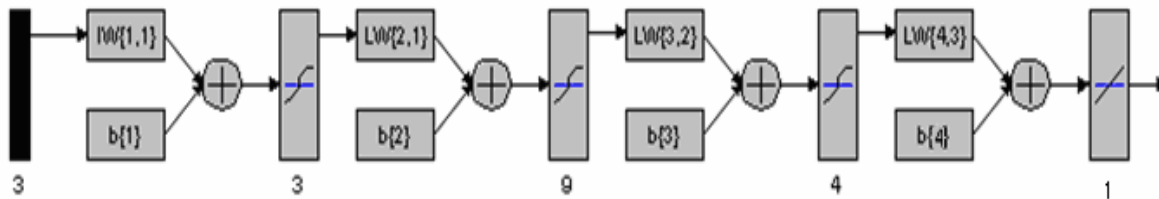


Figura 2.5 Esquema simplificado representando el modelo neuronal para la carga de enfriamiento del Hotel Jagua.

2.7.2- Entrenamiento de la RNA y obtención del neuronal resultante para el hotel Jagua provincia Cienfuegos.

La red neuronal escogida, utiliza de la primera capa a la tercera una función transferencia del tipo “tansig”, porque esta le permite a la red “aprender” de relaciones lineales y no lineales entre los vectores de entrada y salida; y en la cuarta “purelin” ya que con esta la red puede tomar cualquier valor.

La función de entrenamiento escogida para la red fue el de “Levenberg-Marquardt” (trainlm), porque es la que mejores resultados ofrece en aplicaciones de ingeniería, ya que consigue llegar al valor meta (0) con más rapidez que las demás funciones de entrenamiento

El entrenamiento de la red neuronal se realizó por el procedimiento supervisado de retropropagación de errores con 914 juegos de datos obtenidos de la simulación térmica del hotel mediante el simulador térmico de la UABC [20]. De ellos el 75 % para el entrenamiento y el 25% restante se utilizaron en la validación. Para verificar la calidad de la red y su capacidad de reproducir patrones, se evaluó estadísticamente el error entre la respuesta de la red neuronal y el experimento para corroborar la calidad de la predicción y de la reproducción del comportamiento del sistema. Este análisis se muestra en la Figura 2.6, junto a los resultados estadísticos que reflejan la calidad del trabajo de la red.

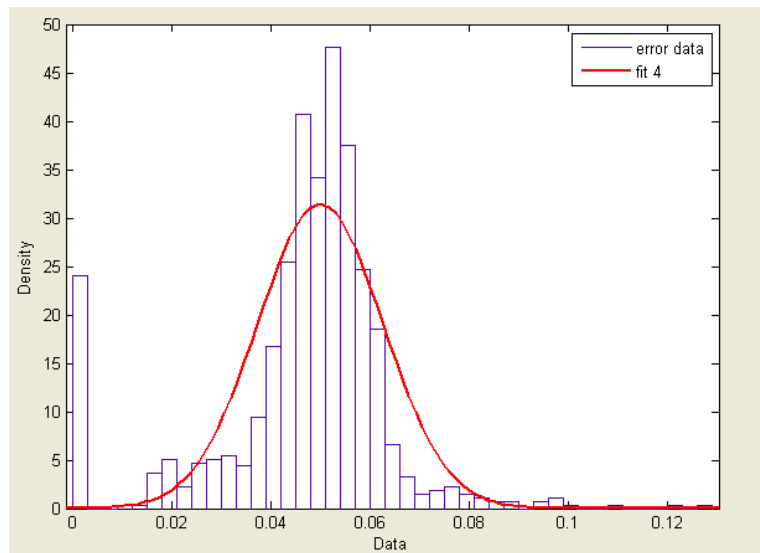


Figura 2.6 Comportamiento estadístico de la red

Distribución: Normal

Dominio: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Media: 0,0499552

Varianza: 0,000160603

Error Standard

$\mu(\mu)$ 0,0499552 0,000434934

$\sigma(\sigma)$ 0,0126729 0,000307817

Evidentemente, el análisis arroja una red eficaz para sus objetivos y el grado de exactitud con que ha respondido a los valores no presentado a entrenamiento indican que no ha sucedido la sobrefijación de la información y la capacidad de reproducir el comportamiento deseado es adecuada.

Por otro lado, la validación estadística de los resultados arrojados por el modelo se lleva a cabo empleando el criterio de desviación promedio expresada en porciento. Este valor estadístico devuelve el promedio de las desviaciones absolutas de la media de los puntos de datos, o sea:

$$Desv_{prom} = \frac{1}{n} \sum |X - \bar{X}| \quad (2.7)$$

Donde:

n es el número de observaciones.

X es la desviación individual expresada en por ciento.

\bar{X} es el valor medio del conjunto de las desviaciones individuales en por ciento.

La desviación media es de 0,01 %, la desviación máxima no supera el 0,13 %.

La figura 2.7 muestra el comportamiento de las desviaciones individuales lo que se corresponde con una respuesta excelente del modelo.

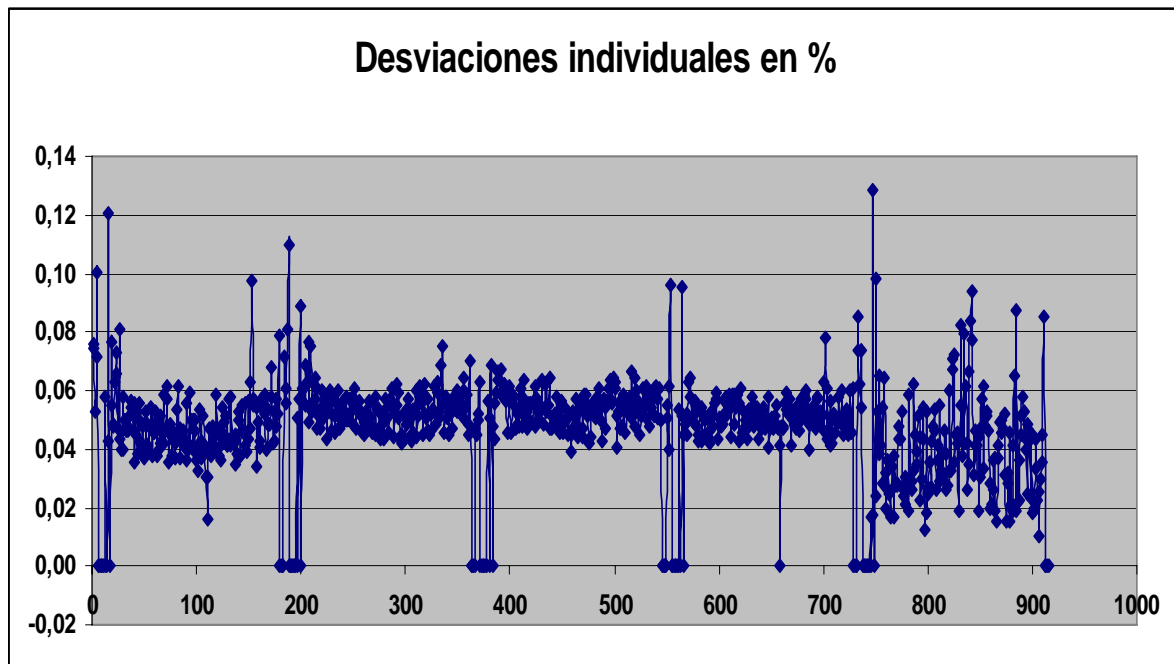


Figura 2.7 Desviaciones de la red neuronal

Después de haber obtenido las matrices de pesos y el umbral se realiza una aplicación en Matlab, donde se le introducen éstas y se obtiene la siguiente función de comportamiento de la carga de refrigeración del hotel.

$$Q_T = \text{purelin}(\text{LW43} * \text{tansig}(\text{LW32} * \text{tansig}(\text{LW21} * \text{tansig}(\text{IW11} * \text{Entrada} + b_1) + b_2) + b_3) + b_4) \quad (2.8)$$

Donde:

Q_T . Es la carga de enfriamiento.

Lw43, LW32, LW21, IW11. Son las matrices de peso.

b1, b2, b3, b4. Polarizaciones.

“Purelin” y “Tansig”. Son las funciones de transferencia utilizadas en la RNA.

La potencialidad del modelo descrito en la ecuación 2.8 radica precisamente en la posibilidad de estimar las cargas de enfriamiento del hotel con un alto grado de exactitud y de forma rápida. Además, el modelo contempla integralmente la influencia tanto de los parámetros climatológicos fundamentales y características constructivas de la instalación, como la estrategia de ocupación más ventajosa para el hotel que brinda los menores consumos de energía ante dichas condiciones.

2.7.3- Validación de los resultados

En la tabla 2.4 se muestra, a modo de ejemplo, una comparación entre algunos resultados obtenidos con el simulador de la UABC y la RNA, escogidos aleatoriamente, donde queda demostrada la efectividad de la aplicación de las RNA en la estimación de cargas térmicas de enfriamiento. El error máximo obtenido con relación al simulador ha sido resaltado y es de un 1,3%, lo cual mantiene aún los cálculos en el margen de seguridad apropiado en la determinación de las de cargas térmicas.

Tabla 2.4. Comparación entre el simulador de la UABC y la RNA.

Variables de interés			Simulador UABC	Red Neuronal
Tmax	Tmin	% Ocup	CEtotal (Toneladas de refrigeración)	CEtotal (Toneladas de refrigeración)
29,9	20,8	40	704,3	704,79
29,5	19,5	60	0	0,048
29,5	19,5	80	0	0,057
30,4	22,8	40	814,7	815,14
30,4	22,8	60	1051,7	1052,3
30,4	23,6	80	1277,02	1277,7
30,4	23,6	100	1563,5	1564,4
36,4	22,8	40	1023,21	1023,7
36,4	22,8	80	1536,8	1537,76
39,2	22,6	40	1111,2	1111,19
39,2	22,6	60	1434,7	1435,26
39,2	22,6	80	1670,43	1670,69
29,5	20,4	60	867,06	874,9
29,5	20,4	100	1225,96	1238,3
27,2	20,4	60	0	0,052
27,2	20,4	80	0	0,057

2.8- Modelación del consumo energético del “chiller”.

Los modelos termodinámicos de los “chillers”, basados en las relaciones físicas de los componentes, son de limitada aplicación para el control operacional de los sistemas, donde la realidad es cambiante, afectada por parámetros que muchas veces no se conocen [102], y la descripción de su comportamiento posee un nivel de incertidumbre determinado.

Es por ello que para sistemas en operación se requiere el desarrollo de modelos y herramientas que logren reproducir el comportamiento de los sistemas de forma más cercana a la realidad posible y que puedan prescindir de aquellos datos y detalles que no son directamente obtenibles desde el sistema.

Debido a lo anterior, en esta segunda etapa del trabajo, se desarrolla un sistema de inferencia difusa, conocido como “ANFIS” por sus siglas en inglés, que permite obtener

un modelo que define el consumo de energía eléctrica del “chiller” en condiciones reales de operación, en función de variables climatológicas, carga térmica y la temperatura del agua helada.

La capacidad fundamental de esta herramienta consiste en determinar, mediante un sistema de entrenamiento similar al utilizado en las redes neuronales, la función de pertenencia que mejor se adapta a cada una de las variables de entrada para reproducir o modelar el comportamiento del consumo de energía del sistema [103], [104], [105], [106], [107].

Como se conoce, las redes neuronales y los sistemas difusos se consideran potencialmente capaces de reproducir diversos patrones, por lo que pueden ser combinados de forma eficiente para realizar el mapeo de los datos de entrada y salida.

Los beneficios de combinar redes neuronales y lógica difusa han sido explorados en forma considerable, pues estos métodos pueden en forma automática y simultánea identificar reglas y ajustar las funciones de pertenencia, además de usar la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales para realizar la tarea de forma satisfactoria.

La selección de las variables y la formación de las reglas que describen el comportamiento del proceso, es la parte decisiva y más importante durante el diseño de un sistema de inferencia difusa [108]. La composición y la base de conocimientos codifican el conocimiento de los expertos. Existen al menos cuatro formas no mutuamente excluyentes para generar las reglas.

1- Por la experiencia y el conocimiento de los expertos.

Este es el método más utilizado, siendo efectivo cuando los operadores pueden expresar lingüísticamente el comportamiento y las reglas que rigen su sistema. Dado que son de carácter difuso, estas reglas son del tipo de Mamdani.

2- Modelando las acciones de control del operador.

Estas acciones de control se conforman modelando las acciones del operador sin que este intervenga en el proceso con sus opiniones.

3- Basadas en la observación de un proceso.

Se fundamenta en desarrollar un modelo difuso del sistema, construyendo las reglas difusas de forma similar a como se procede en un control tradicional; necesitándose de la estructura y la identificación de parámetros.

4- Basado en el aprendizaje y la autoorganización.

Este método se basa en la habilidad de crear y modificar las reglas de control para mejorar el comportamiento del sistema de forma automática. Este poder, algo similar al autoaprendizaje de las redes neuronales, lo posee el sistema "ANFIS".

En el desarrollo de un sistema "ANFIS" no necesariamente se deben conocer todas las características de las variables, e incluso puede suceder que es difícil o no es dado conocer la apariencia de la función de pertenencia. En estas situaciones las técnicas neuro adaptivas de aprendizaje incorporadas en "ANFIS" tienen la mayor potencia y utilidad [107], [85].

La idea es simple: esta técnica, al igual que proceden las redes neuronales, encuentra la vía de aprender de la información de entrada y encontrar la función de pertenencia que mejor permite reproducir el comportamiento del sistema o proceso.

En el caso de estudio, es necesario efectuar registros del consumo de energía y de las variables de interés que modelan el sistema, pero sin necesidad del conocimiento exacto de las funciones que las relacionan, y crear con ello una base de datos que va a ser utilizada para el entrenamiento, la prueba y el chequeo durante el desarrollo de un sistema neuro difuso que sea capaz de reproducir el comportamiento energético de una forma efectiva.

El éxito del sistema depende en gran medida de la selección de la base de datos experimentales, la cual debe responder a las cualidades mostradas y observadas durante la explotación del sistema. Esta información puede ser utilizada para generar sistemas de inferencia tipo Sugeno, con una buena modelación del sistema, usando un número mínimo de reglas. Las reglas se conforman a sí mismas de acuerdo con las cualidades asociadas a cada una de las agrupaciones. La función de formación por "subclustering" genera pocas reglas, es sencilla y por ello de gran utilidad.

2.8.1- Base de datos experimentales

Esta base de datos está compuesta por valores históricos de las temperaturas máximas y mínimas (T_{\max} y T_{\min}) en °C, el nivel de ocupación (Ocup) en %, el punto de ajuste de la temperatura de salida del agua helada del “chiller” (T_s) en °C y el consumo de energía eléctrica diaria del Hotel Jagua (Energía) en kWh/día, para diversas etapas de un período comprendido entre los años 2005 y 2007. El valor de la carga térmica durante los días que se analizan se obtiene del modelo neuronal descrito por la ecuación (2.8).

La matriz de datos conformada para utilizarse en el diseño del sistema “ANFIS” se muestra en el Anexo D. Los datos reales se modifican, dividiéndolos por su valor máximo para normalizarlos como es en ocasiones recomendado para simplificar el trabajo de este tipo de sistemas. Los valores normalizados se dividen en dos grupos, unos para entrenamiento y otros para chequeo del sistema “ANFIS”. La estructura de los datos de entrenamiento y chequeo se muestran a continuación:

Matriz de entrenamiento:

$$Entrena = [T_{\max EN} \quad T_{\min EN} \quad OcupEN \quad TsEN \quad QtEN \quad EnergiaEN]$$

Matriz de chequeo:

$$Chequea = [T_{\max CN} \quad T_{\min CN} \quad OcupCN \quad TsCN \quad QtCN \quad EnergiaCN]$$

Donde:

T_{\max} , T_{\min} , $Ocup$, T_s , Qt y $Energía$ son los vectores de datos de temperatura máxima del día, temperatura mínima del día, nivel de ocupación del hotel, punto de ajuste del agua helada, carga de enfriamiento y consumo de energía eléctrica del día respectivamente. La terminación EN o CN indican si los valores normalizados son para entrenamiento o chequeo respectivamente.

El empleo de un conjunto de datos de chequeo para la validación del modelo permite ver si después de cierto punto en el entrenamiento, el modelo comienza a sobreajustarse los datos. Esto sucede si el error de los datos de chequeo comienza a aumentar mientras el de los datos de entrenamiento continua disminuyendo. Un comportamiento de esta naturaleza no es deseable ya que el sistema “ANFIS” no será capaz de generalizar correctamente. El sistema desarrollado utiliza la función de formación por “subclustering”.

2.8.2- Modelo “ANFIS” del consumo del “chiller”,

El desarrollo del sistema “ANFIS” en “Matlab” se realiza de forma sencilla, primeramente se importan los datos que serán utilizados en el entrenamiento y el chequeo, la formación del sistema de inferencia, y por último proceder al entrenamiento del mismo. El tipo de funciones de pertenencia para las entradas se seleccionaron como “gaussmf” y “linear” para la salida.

Las opciones adoptadas para la formación del “ANFIS”, y que forma el vector de parámetros a aplicar en el algoritmo de clustering son: “Range of Influence”=0,2, “SquashFactor”=1,25 (predeterminado), “AccepRatio”=0,5 (predeterminado) y “RejectRatio”=0,08.

La Figura 2.8 muestra la estructura del “ANFIS” desarrollado y la Figura 2.9 el proceso de entrenamiento mostrando que la raíz del error cuadrático medio para el entrenamiento “RMSE”_{Tm}=0,0038 y para los datos de chequeo, “RMSE”_{Chk}=0,019.

En este caso, tal como se aprecia en la Figura 2.10 tanto el error de entrenamiento (estrellas) y el de chequeo (puntos) son muy pequeños, ya que ambos conjuntos de datos caracterizan exactamente el sistema a aproximar.

Los criterios de parada adoptados para el proceso de entrenamiento son que el error sea igual a cero y un número de épocas igual a 25.

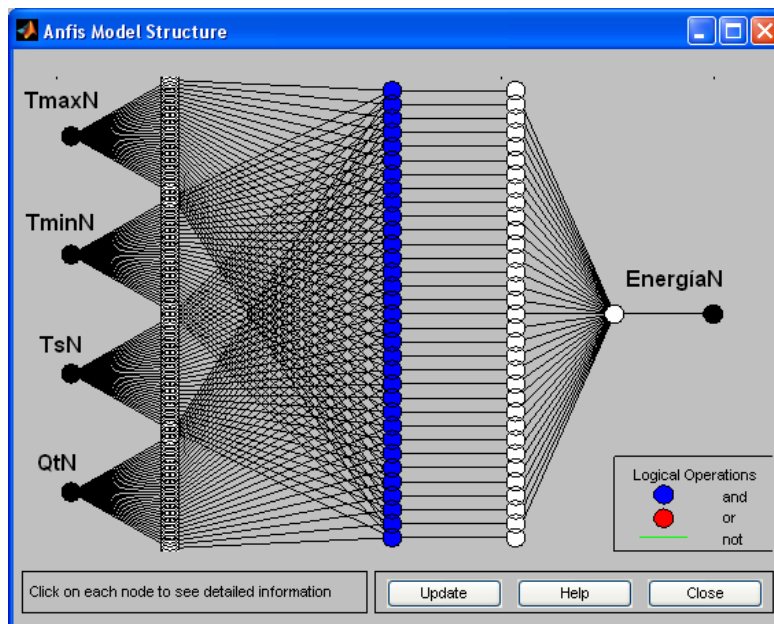


Figura 2.8 Estructura del modelo ANFIS desarrollado.

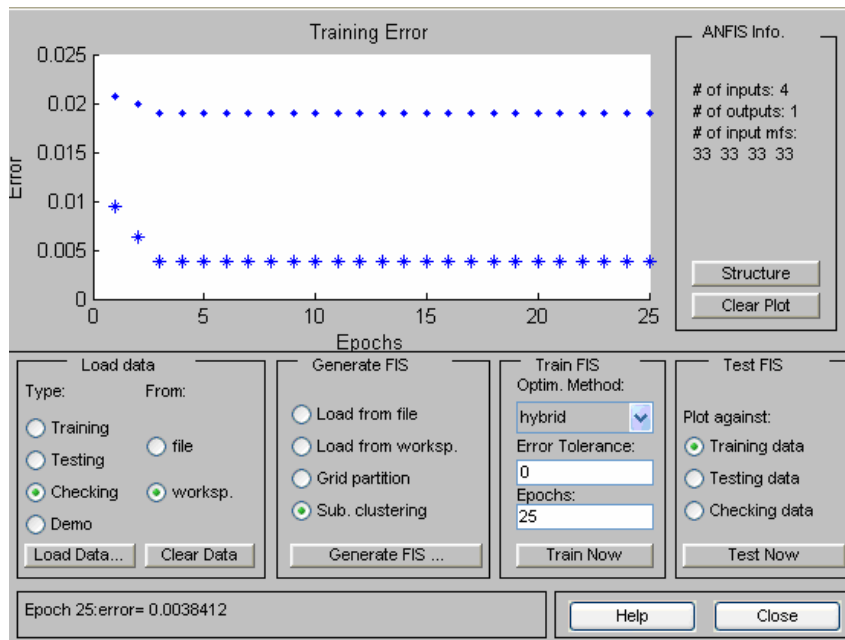


Figura 2.9 Proceso de entrenamiento.

La Figura 2.10 y la Figura 2.11 muestran la correspondencia entre los valores resultantes del modelo y los datos de entrenamiento y chequeo utilizados como objetivos. En estas figuras se puede apreciar la exactitud del modelo obtenido, no obstante, posteriormente se realizará un análisis de los errores .



Figura 2.10 Correspondencia entre los valores de energía utilizados en el entrenamiento y la salida del “ANFIS”.

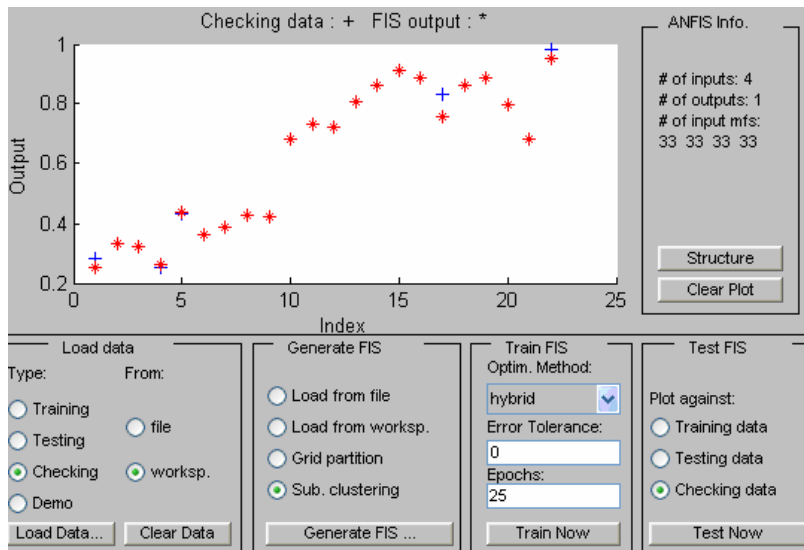


Figura 2.11 Correspondencia entre los valores de energía utilizados en el chequeo y la salida del “ANFIS”.

2.8.3- Modelo general de consumo energético.

Integrando los modelos desarrollados de carga térmica basado en RNA e identificador “ANFIS” para el consumo energético se obtiene un modelo general como el que se muestra en la Figura 2.12. Este recibe como datos las temperaturas extremas pronosticadas para el día que se analiza, el nivel de ocupación real de la instalación y la temperatura de ajuste del agua helada del “chiller”, y devuelve a la salida un pronóstico del consumo de energía eléctrica.

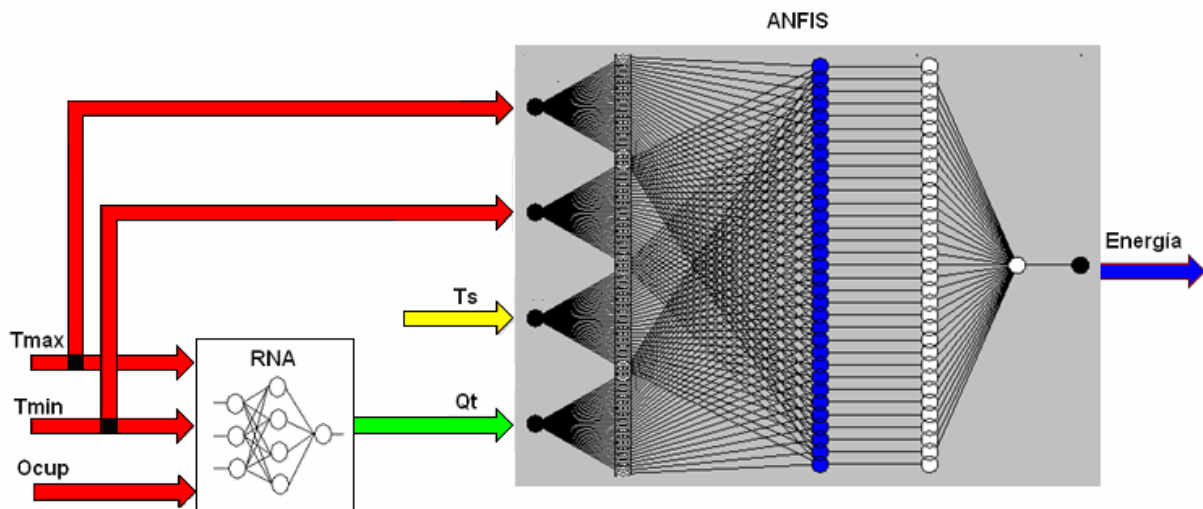
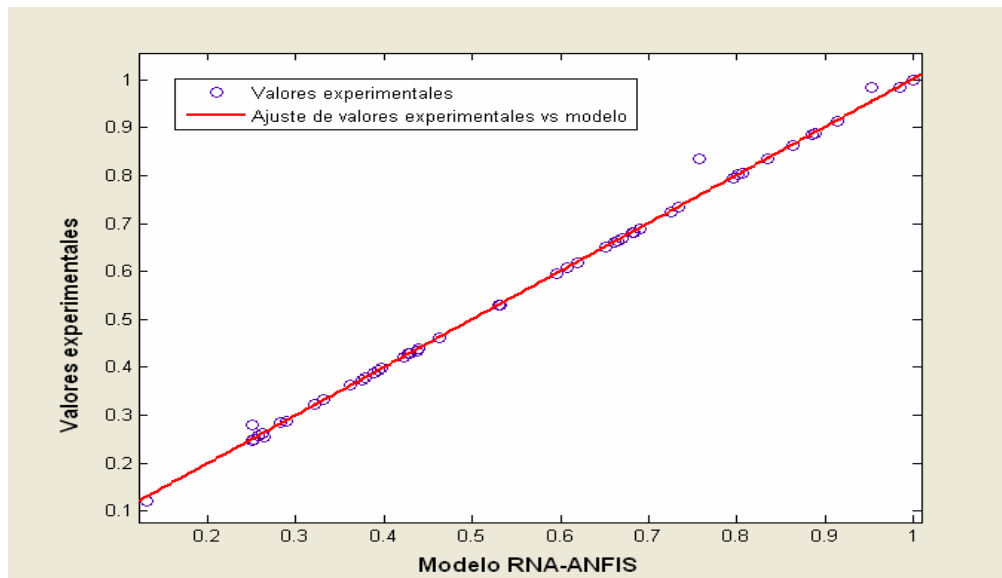


Figura 2.12 Estructura del modelo general de consumo energético desarrollado para el sistema de climatización del Hotel Jagua.

Una ventaja de este modelo es que las variables de entrada necesarias para el pronóstico son fácilmente obtenidas por el usuario permitiendo su aplicación inmediata.

2.8.4- Validación del modelo.

Para analizar la concordancia del modelo con los datos experimentales se realiza una regresión lineal entre los valores devueltos por éste y los de consumo real. Si el ajuste es perfecto (salidas iguales a los valores experimentales), la pendiente de la línea de regresión debe ser 1, el intercepto debe ser igual a 0 y el coeficiente de correlación R^2 igual a 1, indicando que hay una correlación perfecta entre la salida del modelo y la realidad. A continuación los resultados de este análisis indican que se ha obtenido una buena reproducción del sistema (Ver Figura 2.13):



Linear model Poly1:

$$f(x) = m \cdot x + b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1,004 (0,9957, 1,012)$$

$$p2 = -0,0009177 (-0,005931, 0,004095)$$

Goodness of fit:

SSE: 0,008936

R-square: 0,9984

Adjusted R-square: 0,9984

RMSE: 0,009453

Figura 2.13 Regresión lineal entre los valores experimentales y el resultado del modelo “RNA-ANFIS”.

Por otro lado, la validación estadística de los resultados arrojados por el modelo se lleva a cabo empleando el criterio de desviación promedio expresada en porcentaje (%). Este valor

estadístico devuelve el promedio de las desviaciones absolutas de la media de los puntos de datos, o sea:

$$Desv_{prom} = \frac{1}{n} \sum |X - \bar{X}| \quad (2.9)$$

Donde:

n es el número de observaciones.

X es la desviación individual expresada en por ciento(%).

\bar{X} es el valor medio del conjunto de las desviaciones individuales en por ciento(%).

Para el análisis se toma todo el universo de datos experimentales y se simula el consumo energético por el modelo desarrollado, se determina la desviación individual del modelo con relación al dato de consumo real y se aplica la expresión (2.9). La desviación promedio al estar expresada en por ciento (%) y con las variables normalizadas permite una mejor visualización de la calidad del ajuste del modelo.

La desviación media definida por la ecuación (2.9) es de 0,7 %, la desviación máxima no supera el 10,66 %, la desviación individual en el 93 % de los datos es menor del 2 % y la varianza de los datos anteriores es de 4,22 %. La Figura 2.14 muestra el comportamiento de las desviaciones individuales lo que se corresponde con una respuesta adecuada del modelo.

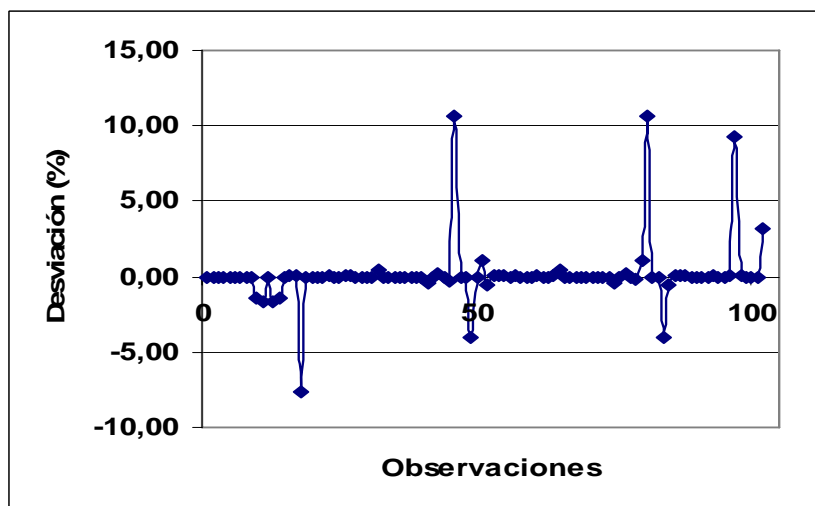


Figura 2.14 Desviación en consumo eléctrico diario del Hotel Jagua.

2.9- Análisis de la influencia de las variables del modelo sobre el consumo de energía.

Los modelos neuronales y neurodifusos realizan un mapeo entre las variables de entrada y salida de un sistema y reproducen el comportamiento del mismo a partir de su entrenamiento o sea, de la experiencia vivida, pero no dan información acerca de las relaciones funcionales entre las variables, ni tampoco se puede apreciar el efecto o el grado de influencia de una variable en específico.

Tomando en consideración que el modelo desarrollado no es un modelo tradicional que permite establecer la relación funcional entre las variables y el consumo de energía, se procedió a obtener adicionalmente un modelo estadístico, particularmente para establecer la relación entre la temperatura del agua helada y el consumo de energía del “chiller”, así determinar la existencia o no de un valor que haga mínimo este consumo.

Dado que el modelo “RNA-ANFIS”, reproduce con gran exactitud el comportamiento de la instalación real, se utilizó como plataforma experimental para generar los datos base, con vistas a obtener el modelo estadístico, el que permite apreciar la influencia de la temperatura del agua helada sobre el consumo de energía eléctrica del sistema de climatización centralizado.

2.9.1- Diseño de experimento.

Para obtener información de una serie de datos experimentales, se tienen que hacer suposiciones acerca del sistema que generó esos datos. Con estas suposiciones y la teoría física, se puede desarrollar un modelo matemático del sistema. Generalmente, aún en los modelos más rigurosamente formulados, habrá algunas constantes desconocidas. El objetivo de la experimentación es obtener estas constantes.

Para el caso de estudio se seleccionó un diseño factorial completo, tomando en consideración que este diseño brinda las siguientes posibilidades:

- Permite el estudio simultáneo de los efectos de varios factores que pueden haber en una respuesta.
- En el gráfico se puede observar cómo cada punto representa una combinación única de niveles de factor.

- También se puede hacer una corrida de diseño de factores completos (que son todas las combinaciones de los niveles del factor experimental) ó una fracción del diseño factorial (son medidas de respuestas a un subgrupo fracción de todas las combinaciones de los niveles del factor experimental).

Para el desarrollo del diseño de experimento factorial completo o multinivel, se utilizó el programa estadístico Statgraphics, siendo capaz de generar un diseño de 3 niveles a partir de los valores de entradas correspondientes a los 4 factores experimentales ($T_{máx}$, $T_{mín}$, $Ocup$, Ts), utilizando como valores máximos y mínimos a 1 y -1 respectivamente.

El objetivo que se persigue con esta experimentación es descubrir los efectos individuales y conjuntos que varios factores ejercen sobre el consumo energético del sistema de climatización centralizado bajo estudio.

2.9.2- Generación de los datos a partir del prototipo numérico “RNA-ANFIS”.

Teniendo en cuenta los resultados del diseño de experimento realizado, se emplea el modelo de consumo desarrollado en el epígrafe (2.8.3), como prototipo numérico para generar los datos necesarios que permitirán obtener información de este sistema. Las 83 combinaciones de valores de las variables de entrada se muestran en el Anexo E.

2.9.3- Modelo estadístico obtenido.

El modelo estadístico seleccionado es un modelo de superficie que incluye términos lineales, interacciones y términos cuadráticos para representar el comportamiento de las variables en diagramas de superficies y no en un plano, ya que se desea explorar la existencia de un mínimo en el consumo de energía.

Los datos experimentales necesarios para realizar el ajuste y la cantidad y combinación de los mismos queda establecida por un diseño de experimento factorial completo de cuatro factores y tres niveles como se muestra en el Anexo F.

La expresión matemática puede escribirse como:

$$\begin{aligned}
 \text{Energía} = & K_0 + K_1 * T_{\max} + K_2 * T_{\min} + K_3 * Ocup + K_4 * Ts + K_5 * T_{\max}^2 + \\
 & K_6 * T_{\max} * T_{\min} + K_7 * T_{\max} * Ocup + K_8 * T_{\max} * Ts + K_9 * T_{\min}^2 + \\
 & K_{10} * T_{\min} * Ocup + K_{11} * T_{\min} * Ts + K_{12} * Ocup^2 + K_{13} * Ocup * Ts + K_{14} * Ts^2
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Donde:

$K_0 \dots\dots K_{14}$ Son los coeficientes de la ecuación y T_{max} , T_{min} , $Ocup$ y T_s son las variables climatológicas, de ocupación y la temperatura de ajuste respectivamente.

Los resultados de la regresión utilizando el Statgraphics son los siguientes:

Coeficientes de la regresión	
K_0	48 170,3
K_1	32,769
K_2	-13 191,2
K_3	-87,017
K_4	5 027,17
K_5	-56,176
K_6	-30,502
K_7	0,025
K_8	-58,576
K_9	366,383
K_{10}	3,732
K_{11}	-176,582
K_{12}	0,107
K_{13}	-0,439
K_{14}	4 673,35

La ecuación del modelo de superficie ajustado es:

$$\begin{aligned}
 \text{Energía} = & 48\ 170,3 + 3,732 \cdot T_{max} - 13\ 191,2 \cdot T_{min} - 87,017 \cdot Ocup + \\
 & 5\ 027,17 \cdot T_s - 56,176 \cdot T_{max}^2 - 30,502 \cdot T_{max} \cdot T_{min} + 0,025 \cdot T_{max} \cdot Ocup \quad (2.11) \\
 & - 58,576 \cdot T_{max} \cdot T_s + 366,383 \cdot T_{min}^2 + T_{min} \cdot Ocup - \\
 & 176,582 \cdot T_{min} \cdot T_s + 0,107 \cdot Ocup^2 - 0,439 \cdot Ocup \cdot T_s + 4\ 673,35 \cdot T_s^2
 \end{aligned}$$

La influencia de las variables de entrada sobre el consumo de energía se puede apreciar en el gráfico de superficie mostrado en la figura 2.15, el cuál representa el lugar geométrico de los consumos energéticos diarios dados por el modelo “RNA-ANFIS” en

función de la ocupación y de la temperatura T_s para unas condiciones climatológicas de referencia.

Como se observa en ese gráfico, para temperaturas máximas y mínimas determinadas, y un nivel de ocupación dado, existe una temperatura del agua helada que conduce al menor consumo de energía para esas condiciones.

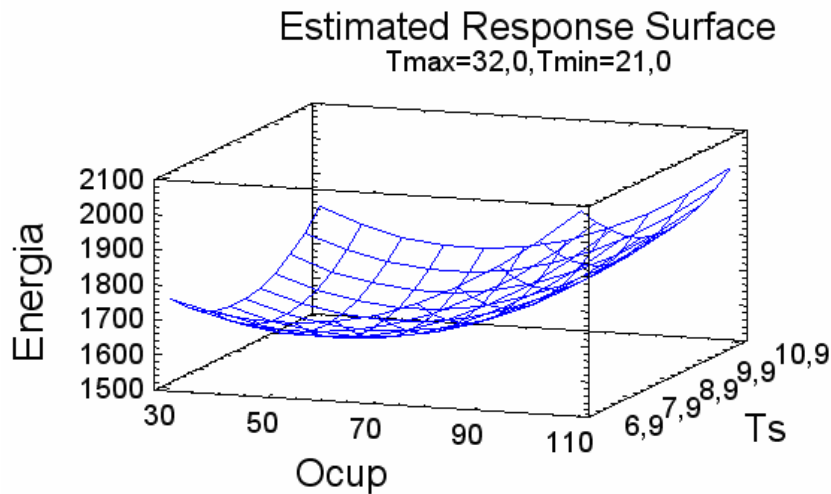


Figura 2.15 Resultados del modelo estadístico utilizado. Variación del consumo de electricidad del “chiller” en función de T_s y Ocup para $T_{max}=32^{\circ}\text{C}$ y $T_{min}=21^{\circ}\text{C}$.

El consumo de energía en un período determinado es mínimo para los diferentes niveles de ocupación, debido a la influencia contrapuesta de la potencia consumida por el compresor y del tiempo de trabajo del sistema al variar la temperatura del agua helada. Así se tiene, que al aumentar la temperatura del agua helada la potencia demandada por el compresor se reduce, pero una mayor temperatura del agua helada provoca que el tiempo de trabajo del sistema para vencer una carga de enfriamiento dada se incremente.

Luego controlando la temperatura de agua helada (T_s), se puede alcanzar este punto y reducir el consumo de energía para determinadas condiciones climáticas y nivel ocupacional. Pero para la implementación práctica de esta estrategia operacional se requiere desarrollar un procedimiento que permita determinar este valor de ajuste en condiciones reales de explotación.

A tal efecto se desarrolló y aplicó al caso de estudio una herramienta de optimización no tradicional, la cual se presenta en el capítulo siguiente.

Conclusiones parciales

- 1- Se obtiene un modelo del consumo de energía eléctrica diaria del Hotel Jagua empleando técnicas de inteligencia artificial que combina redes Neuronales artificiales (RNA) y un sistema de inferencia difuso el cual permite la determinar el consumo de energía del “chiller” en función de la temperatura del agua helada, bajo diferentes condiciones climatológicas y niveles de ocupación del hotel.
- 2- El modelo obtenido correlaciona satisfactoriamente con los resultados reales, presentando un $R^2=0,997$, con una desviación promedio de 0,7 y el 93% de los casos tiene desviaciones individuales inferiores a un 2 %. Este modelo puede ser empleado con propósitos de pronóstico y planificación del consumo de energía del “chiller” por la facilidad de uso, al considerar como variables de entrada solamente las temperaturas extremas del día, el nivel ocupacional de la instalación y el punto de ajuste de la temperatura de agua helada al “chiller” del sistema de climatización centralizado.
- 3- Se demuestra la existencia de un consumo mínimo de energía en función de la temperatura de agua helada para cada nivel de ocupación y se fundamenta la necesidad de desarrollar un mecanismo de búsqueda no tradicional que determine este valor para cada situación específica.

CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE AGUA HELADA PARA REDUCIR EL CONSUMO DE ENERGÍA.

La tercera etapa del procedimiento propuesto consiste en determinar el valor de la temperatura del agua helada que garantiza los mínimos consumos de energía ante distintas condiciones climáticas y ocupación del hotel, teniendo en cuenta la influencia contrapuesta que dicha temperatura tiene sobre el tiempo de trabajo del compresor y la potencia consumida por el mismo. Este valor se obtiene a partir de la utilización de algoritmos genéticos.

En este capítulo se describe el método propuesto para determinar la temperatura de agua helada que posibilita minimizar el consumo de energía diario de un “chiller”, considerando determinadas condiciones ambientales y de ocupación. Para este propósito se define como variable de decisión la temperatura del agua helada y se emplea un AG como núcleo de la aplicación.

3.1- Fundamentos de los algoritmos genéticos.

La solución de problemas de cómputo complejos ha llevado a la necesidad de desarrollar técnicas no convencionales, entre las que se encuentran aquellas inspiradas en modelos biológicos. Un modelo que explica la destreza de los organismos vivos para perpetuarse a través de una descendencia exitosa es el proceso de evolución natural. Este modelo ha servido para proponer soluciones novedosas a diversos problemas en el campo de la ingeniería a partir de métodos de computación evolutiva, dentro de los que se encuentran los AG [109].

Los AG constituyen una representación del modelo evolutivo [110], de manera que un problema específico actúa como medio ambiente dentro del cual se desempeña una población formada por individuos que son soluciones candidatas del problema en cuestión. Cada uno de estos individuos (fenotipo), está formado por la información contenida en su genoma (genotipo) y que bien pueden ser las variables independientes cuyo valor se desea conocer.

Similarmente como se propone para la evolución natural, los AG tienden a encontrar mejores soluciones al problema de manera progresiva, gracias a la “renovación del material genético” en la población por medio de los llamados operadores genéticos. La

adaptación de los individuos a su ambiente, se determina por la función de aptitud (función *fitness*), la cual constituye una medida de la calidad de la solución.

Los elementos básicos de un AG son: la selección de las soluciones basadas en sus bondades, la reproducción por cruzamiento, y la mutación para cambiar aleatoriamente los genes. La combinación adecuada de estos elementos, aplicada iterativamente sobre una población de individuos, constituye un mecanismo de evolución para el acercamiento a la solución del problema.

En general, el AG procede como sigue:

- 1- Generación aleatoria o heurística de una población inicial, $P(0)$.
- 2- En cada ciclo evolutivo t (generación), se selecciona un subconjunto de individuos $P'(t)$, después de ser evaluados bajo el criterio predefinido por la función de aptitud para reproducirse. Los individuos más aptos tienen más posibilidades de reproducirse, mientras los menos aptos tienden a desaparecer.
- 3- Se modifica la población seleccionada, para encontrar nuevos puntos en el espacio de búsqueda, aplicando operadores genéticos como el cruzamiento y la mutación.
- 4- Se introducen los nuevos individuos $P''(t)$ en la población de la siguiente generación $P(t+1)$, y se repite el proceso a partir de la selección de los más aptos.
- 5- El fin de la búsqueda queda condicionada a un número determinado de generaciones, a la obtención de un valor aceptable de la función de aptitud, etc.

El pseudocódigo de un AG básico es el siguiente:

comenzar

$t=0$

 inicializar $P(t)$

 evaluar $P(t)$

 mientras (no condición de término) hacer:

$t=t+1$

 seleccionar $P(t)$ a partir de $P(t-1)$

 cruzamiento y/o mutación $P(t)$

 evaluar $P(t)$

 fin

fin

El cruzamiento permite al proceso evolutivo moverse hacia mejores regiones en el espacio de búsqueda, mientras que la mutación previene de una convergencia prematura hacia óptimos locales, al muestrear aleatoriamente nuevos puntos del espacio de búsqueda.

Los elementos de búsqueda que se combinan en los AG (búsqueda determinística y estocástica) presentan algunas ventajas con relación a otros métodos basados en gradientes, aleatorios, exhaustivos, etc. Entre las ventajas de los AG se pueden mencionar las siguientes:

- No necesitan un conocimiento auxiliar del problema, tales como derivadas o buenas suposiciones iniciales.
- Exploran simultáneamente muchos puntos del espacio de búsqueda y por tanto, evitan más fácilmente la convergencia hacia un óptimo local.
- Alcanzan un buen equilibrio entre la explotación de las mejores soluciones y la exploración del espacio de búsqueda.

Para aprovechar estas ventajas, se utilizan las funciones de AG del “toolbox” del Matlab 7.0 para encontrar el mínimo consumo de energía, utilizando los modelos “RNA-ANFIS” obtenidos en el capítulo anterior.

3.2- Implementación del algoritmo.

3.2.1- Función de aptitud empleada.

La función de aptitud juega un papel fundamental en la clasificación potencial de las soluciones en términos de sus características; es el criterio de optimización y evaluación de la calidad de los individuos. Se desarrolla a partir de los valores del fenotipo y da como resultado la calidad o aptitud del individuo.

El objetivo del AG es determinar la temperatura del agua helada que hace mínimo el consumo de energía. Por lo tanto, la función de evaluación empleada lo constituye el modelo de consumo de energía “RNA-ANFIS”.

3.2.2- Tamaño de la población y población inicial.

La población es construida usando individuos. Cada individuo representa una posible solución al problema y constituye un valor de T_s que puede ser solución en el espacio del

problema. La codificación empleada para representar la temperatura del agua helada un vector $\vec{T_s}$ de variables reales. El individuo k de la generación t es definido por:

$$\vec{T_s}_k^t = (Ts(k)) \text{ para } 1 \leq k \leq n \quad (3.1)$$

Donde $Ts(k)$ son los valores numéricos de la temperatura T_s que van a ser evaluadas en el modelo.

El tamaño de la población (número de individuos) afecta la solución del AG y la eficiencia de la simulación. Una gran población casi siempre está asociada con un tiempo de la simulación más largo, que influye en la razón de convergencia. Con una población pequeña, se corre el riesgo de converger a un óptimo local [111]. El tamaño de la población adoptada para este estudio es de 100 individuos y como es usual se genera de manera completamente aleatoria

3.2.3- Opciones de reproducción y operadores genéticos.

Las opciones de reproducción indican como el algoritmo genético crea la próxima generación. Estas opciones son:

- **Operador elitista:** Este operador conserva las mejores soluciones encontradas, manteniendo un grupo de ellas en la próxima generación. Esta permanencia asegura que la mejor solución no se pierda cuando se pasa de una generación a otra. La mejor solución reemplaza a un individuo seleccionado aleatoriamente en la próxima generación. En este trabajo se emplea "Elitecount"=2 que es el valor predeterminado en el Matlab para esta función.
- **Fracción de cruzamiento:** Especifica qué fracción de la próxima generación, que no sean los individuos élites, son obtenidos por cruzamiento. También en este análisis se emplea la predeterminada, o sea, "CrossoverFraction"= 0.8.
- **Operador de selección:** Este operador aporta a la técnica de búsqueda mayor potencia y robustez. Se emplea una función de selección uniforme estocástica. Esta es la función predefinida en el toolbox de algoritmo genético del Matlab 7.0, la cual traza una línea en la que cada padre corresponde a una sección de la línea, de longitud proporcional a su valor escalado. El algoritmo se mueve a lo largo de la línea con pasos de igual

tamaño. A cada paso, el algoritmo localiza un padre de la sección en la cual se detiene. El primer paso es un número aleatorio uniforme menos el tamaño del paso.

- **Operador de cruzamiento:** Las opciones de cruzamiento especifican cómo el algoritmo genético combina a dos individuos, o padres, para crear un nuevo individuo para la próxima generación. La función de cruzamiento empleada es heurística con una proporción $R = 1,5$. Si $p1$ y $p2$ son los individuos seleccionados para reproducirse y $p1$ es el padre con mejor función de aptitud, la función de cruzamiento *heurística* devuelve como nuevo individuo: $p3 = p2 + R \cdot (p1 - p2)$.
- **Operador de mutación:** El propósito de la mutación es introducir una perturbación ligera para aumentar la diversidad de individuos después del cruzamiento, previniendo a los individuos de aglomerarse y causar convergencia prematura de solución. Se toma como probabilidad de mutación 0,01.

Para muchas aplicaciones se recomiendan los valores predeterminados en el Toolbox de Algoritmo Genético (AG) de Matlab [112], [111] el cual posee y recomienda algunos métodos para investigar el ajuste de las opciones y operadores escogidos para la implementación del AG. Uno de ellos es realizar un análisis del comportamiento de la función de evaluación variando los parámetros de la fracción de cruzamiento, de la razón de cruzamiento y de la mutación.

3.2.4- Criterios de parada y tratamiento de las restricciones.

El algoritmo se detiene cuando se han efectuado 100 iteraciones, además de la opción que tiene el usuario de detenerlo por el botón stop.

Las restricciones garantizan que no se busque una temperatura fuera del rango práctico, y por lo tanto, se especifica que $6,9 \leq T_s \leq 10,3$. Si esto no se cumple, se penaliza la función sea, se asigna un valor extremadamente alto al consumo energético lo que lo aparta del mínimo y garantiza que esa temperatura no prevalezca en próximas generaciones.

3.2.5. Algoritmo de optimización.

Un diagrama de bloques para comprender el algoritmo de optimización desarrollado se muestra en la Figura 3.1. El algoritmo requiere como datos de entrada las variables climatológicas T_{\max} y T_{\min} y el nivel ocupacional de la instalación. Se inicializa la población generando aleatoriamente un vector T_s de posibles soluciones como se especificó en el epígrafe 3.2.2. Este vector se evalúa en el modelo RNA-ANFIS y se

selecciona el valor de temperatura de agua helada T_s con el que se logra un menor consumo energético en esa generación. La población inicial es reemplazada por una nueva población después de aplicarle los operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación descritos en el epígrafe 3.2.3. Esta nueva población ($t = t+1$) se evalúa nuevamente y se repite la secuencia anterior hasta que se cumple el criterio de parada ($t=100$). A medida que se suceden generaciones, la calidad de la población mejora y la búsqueda converge al menor valor de consumo energético posible para las condiciones definidas en los datos de entrada. El valor de T_s para lo cual esto sucede es la solución óptima y se devuelve como resultado del algoritmo de búsqueda.

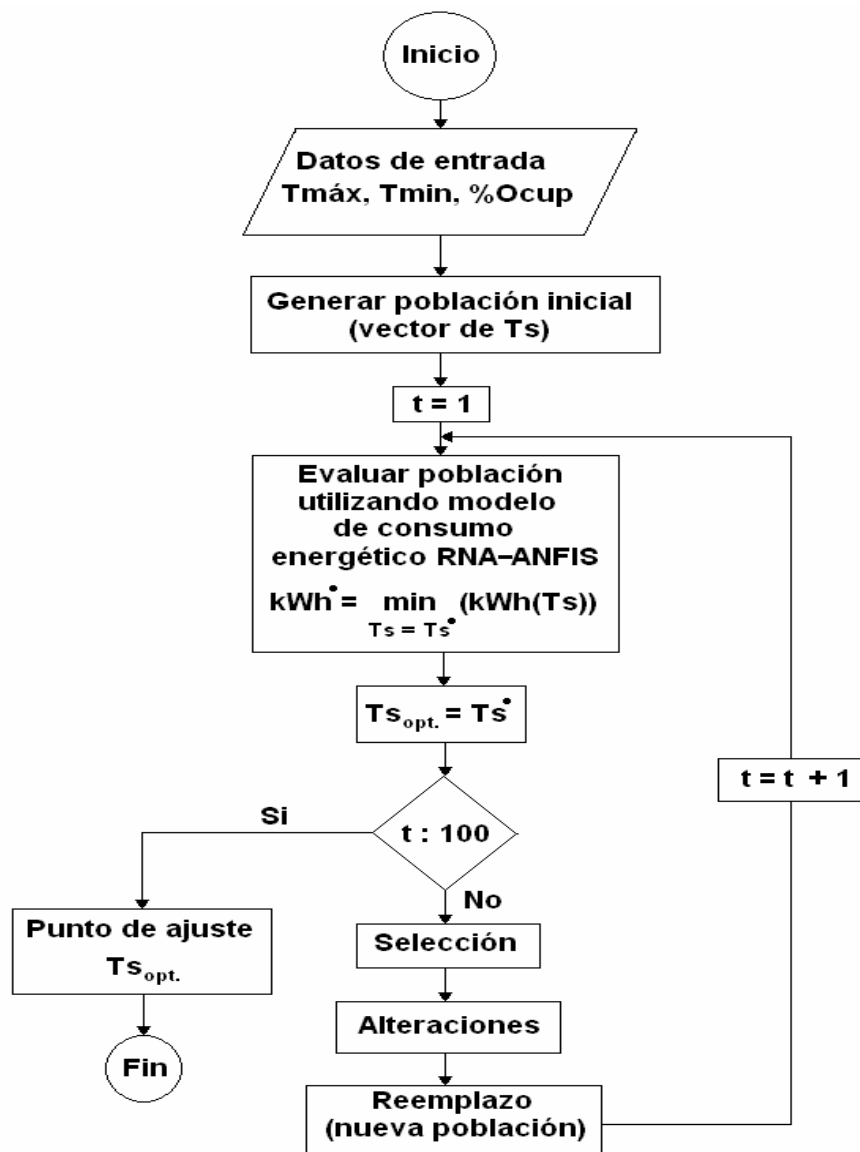


Figura 3.1. Algoritmo Genético.

3.3- Resultados de la optimización.

En la tabla 3.1 Se muestran resultados de la aplicación del algoritmo de búsqueda para dos niveles de ocupación diferentes, manteniendo las condiciones de temperatura ambiente fijas. Se puede observar que los menores consumos energéticos se corresponden con la temperatura de agua helada sugerida por el algoritmo genético ($T_{s\acute{O}PTIMO}$).

Tabla 3.1. Consumos de energía para dos niveles de ocupación diferentes y condiciones fijas de T_{max} y T_{min} .

Ocupación (%)	60	80
T_{max} °C	32	32
T_{min} °C	22	22
$T_{s\acute{O}PTIMO}$	8	10
kWh para $T_{s\acute{O}PTIMO}$	1294,3	2775,8
kWh para $T_{s\acute{O}PTIMO} + 1$	1417,9	2845,8
kWh para $T_{s\acute{O}PTIMO} - 1$	1377,5	2794,3

3.3.1- Comparación entre criterios de operación actual y el criterio de operación con consumo reducido.

Se realizó la corrida del algoritmo genético para varios días promedios del mes de Mayo del año 2007, donde se tomaron los valores reales de energía, temperaturas ambientales, ocupación y temperaturas del agua helada. Se observa que la energía que se consume después de encontrar la temperatura del agua helada más adecuada es menor que la real que se obtiene en cada prueba, mostrándose la ventaja que ofrece trabajar en estos valores de temperatura del agua helada.

La figura 3.2 muestra el punto de ajuste de la temperatura del agua helada para varios días de prueba, tanto por el método manual, como el sugerido por el algoritmo genético.

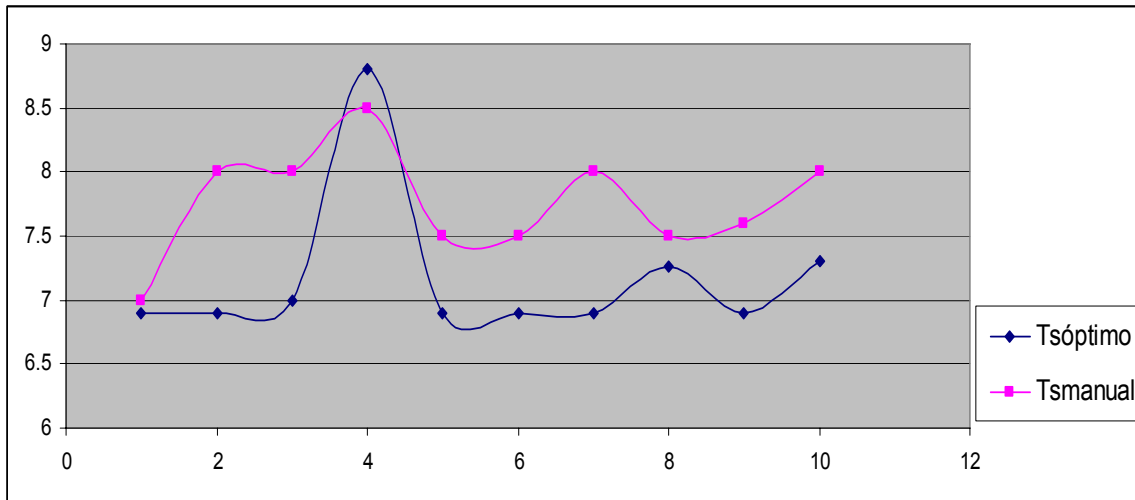


Figura 3.2. Comportamiento de la temperatura de agua helada óptima y temperatura real del sistema.

En la Figura 3.3, se aprecia la reducción del consumo de energía para cada uno de los días que se simulan, mostrándose que existen potenciales de ahorros importantes al utilizar una temperatura del agua helada óptima.

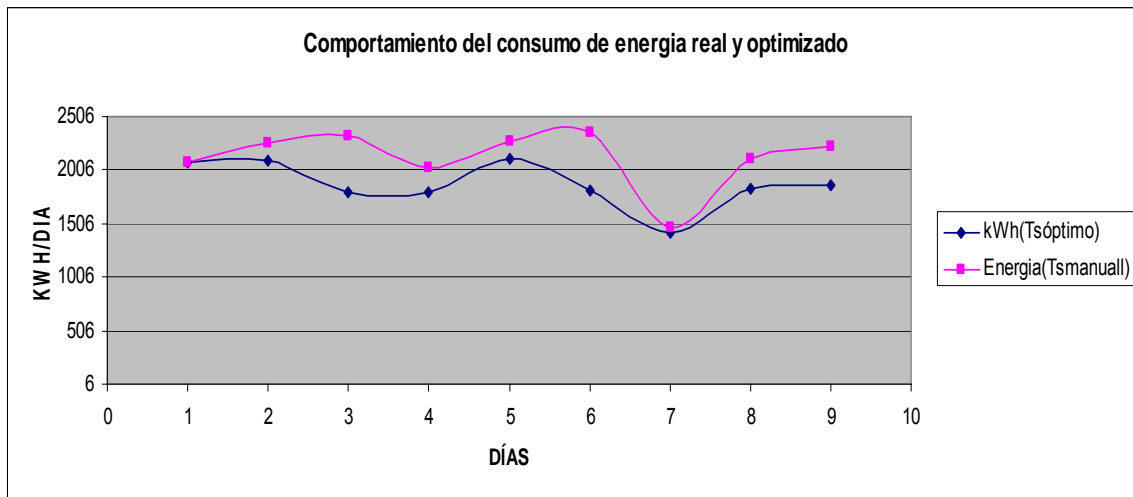


Figura. 3.3. Comportamiento del consumo de energía real y optimizado

En la tabla 3.3 se observan los ahorros promedios obtenidos después de utilizar el algoritmo de optimización, estos serán utilizados de base para el posterior cálculo económico y el impacto ambiental asociado.

Tabla 3.3 Comparación entre los consumos reales y el optimizador

Tmax (°C)	Tmin (°C)	Ocup %	Tr °C	Ts °C	Energía real kWh/día	Ts Opt. °C	Dif. Temp. Real - Optima	Energía (kWh/día) (Ts óptima)	Ahorro	
									kWh/día	%
28,80	21,00	71,14	11,80	8,00	2328,13	7,00	1,00	1793,00	535,13	22,99
28,70	21,00	66,00	11,50	8,00	2356,53	6,90	1,10	1816,00	540,53	22,94
28,50	21,40	88,00	12,00	8,00	2228,13	7,30	0,70	1872,00	356,13	15,98
27,80	21,60	81,00	11,20	7,60	2113,18	6,90	0,70	1835,00	278,18	13,16
28,00	21,50	80,00	11,20	7,50	2036,18	6,90	0,60	1791,80	244,38	12,00
28,90	22,10	98,66	11,00	8,00	2260,00	6,90	1,10	2091,20	168,80	7,47
29,00	22,20	96,00	10,50	7,50	2271,05	6,90	0,60	2118,00	153,05	6,74
28,80	22,00	78,00	11,00	7,50	1462,00	7,26	0,24	1419,00	43,00	2,94
28,50	22,00	91,95	11,00	7,00	2077,18	6,90	0,10	2070,90	6,28	0,30
								Promedio	258,39	11,61

Se demuestra que la operación del “chiller” con la temperatura del agua helada determinada por el procedimiento desarrollado en el presente trabajo, posibilita reducir significativamente los consumos de energía del mismo. En el caso de estudio dado el ahorro es superior al 10 % del consumo del “chiller”.

3.3.2- Valoración económica para los días de pruebas evaluados en este estudio.

Ahorro monetario.

Para la determinación del potencial de ahorro económico se determinó el precio promedio del kWh, tomando en consideración el porcentaje del consumo total que representa el consumo en el horario pico, en el día y en la madrugada, y el costo de la energía en esos diferentes horarios de acuerdo a la tarifa eléctrica aplicada para los hoteles turísticos. En el caso de estudio este precio promedio del kWh resultó ser de 0,097 CUC/kWh.

Para el cálculo del ahorro se consideraron los seis meses de verano (182 días)

$$EA = 258,39 \frac{kWh}{día} * 182 \frac{días}{año} = 47\ 026 \frac{kWh}{año} \quad (3.2)$$

$$Ahorro\ Económico = EA * 0,097 \frac{CUC}{kWh} = 4\ 546 \frac{CUC}{año} \quad (3.3)$$

Donde:

EA → Energía Ahorrada Anualmente, kWh/año

$0,097 \frac{CUC}{kWh}$ → Precio promedio del kWh pagado en el hotel estudiado.

3.3.2.1- Reducción del impacto ambiental asociado.

El aumento de la eficiencia energética de un sistema térmico, unido al mejor aprovechamiento de la energía en un proceso determinado conlleva a la reducción de las emisiones de gases contaminantes.

El calentamiento global del planeta, condicionado en su gran mayoría por la cantidad de gases contaminantes emitidos a la atmósfera durante el proceso de combustión, constituye un problema serio para la humanidad.

El efecto de contaminación indirecta derivado de la quema de combustibles fósiles queda expresado de la manera siguiente [113], [114].

$$RI = EA \cdot e_{CO_2}, \frac{kgCO_2}{año} \quad (3.4)$$

Donde:

RI = Reducción del impacto ambiental asociado; $\frac{kgCO_2}{año}$

EA = Energía ahorrada; $\frac{kWh}{año}$

e_{CO_2} = índice de emisiones; $\frac{kgCO_2}{kWh}$

Cálculo de la cantidad de $kg CO_2$ que se desprende durante el proceso de combustión.



De acuerdo al contenido de carbono que posee el petróleo crudo cubano: $0,81 \frac{kgC}{kgPetróleo}$,

utilizado en las termoeléctricas de Cuba [113].

$$3,67 \frac{kgCO_2}{kgC} \times 0,81 \frac{kgC}{kgPetróleo} = 2,97 \frac{kgCO_2}{kgPetróleo} \quad (3.7)$$

$$2,97 \frac{kgCO_2}{kgPetróleo} \times 0,310 \frac{kgPetróleo}{kgCO_2} = 0,921 \frac{kgCO_2}{kWh} \quad (3.8)$$

$e_{CO_2} = 0,921 \frac{kgCO_2}{kWh}$, según tipo de combustible quemado en las termoeléctricas de Cuba [113, 114].

$$E_i = 47026 \frac{kWh}{año} \times 0,921 \frac{kgCO_2}{kWh} = 43310 \text{ kgCO}_2/\text{año} \quad (3.9)$$

$E_i \rightarrow$ Efecto ambiental indirecto

3.4- Descripción general del procedimiento

El procedimiento que se propone para establecer estrategias de operación para mínimo consumo de energía en los sistemas de climatización de instalaciones turísticas contiene los pasos siguientes:

1- Captura de datos climatológicos de la región y datos constructivos de la instalación, definidos en los epígrafes 2.3 y 2.4.

La caracterización climatológica de la región en la cual se vaya a implantar el procedimiento propuesto, constituye, como se planteó anteriormente un paso fundamental para el cálculo de las cargas térmicas de enfriamiento. Los datos climatológicos a utilizar deben proceder de fuentes oficiales confiables, como por ejemplo el Instituto de Meteorología para el caso de Cuba. Por su parte los datos constructivos deben tomarse directamente de la edificación objeto de estudio, en conjunción con los datos del proyecto de construcción. Esto facilita el proceso de simulación térmica y garantiza una mayor fiabilidad en los resultados que se obtienen.

2- Simulación térmica de la instalación para determinar el vector de cargas de enfriamiento correspondientes a una matriz de datos climatológicos que abarque todo el espectro probable para la región y diferentes niveles de ocupación, utilizando un simulador térmico de edificios, según epígrafe 2.6.

Para la ejecución de este paso del procedimiento, se requiere la participación de especialistas en materias de climatización, además del uso de un simulador térmico de calidad reconocida.

También es preciso conocer el régimen de operación de la edificación, y en el caso de los hoteles, se necesita definir la estrategia ocupacional más acertada para realizar la simulación térmica siguiendo los criterios energéticos pertinentes.

Con el uso del simulador, se obtienen en este paso una base de datos de cargas térmicas de climatización, lo suficientemente extensa que caracterice la edificación ante distintas condiciones climáticas exteriores y niveles de ocupación dados, lo que permite posteriormente el entrenamiento de una red neuronal artificial que sustituya al simulador térmico.

3- Diseño de una red neuronal empleando el toolbox de redes neuronales del Matlab con la arquitectura descrita en el epígrafe 2.7. Esta red neuronal se entrena con la matriz de datos climatológicos de la región y el porcentaje de ocupación y se utiliza como meta el vector de cargas térmicas obtenido según el paso anterior.

La RNA obtenida, permite prescindir del simulador térmico, lo cual tiene como ventaja una mayor rapidez en el cálculo de las cargas térmicas de la instalación, además de poder ser utilizada directamente por la gerencia del hotel con propósitos monitoreo y control energético, sin la necesidad de ser un especialista en la materia.

El modelo neuronal de carga de enfriamiento de la instalación obtenido puede ser integrado con otras herramientas para la obtención del modelo general de consumo del sistema de climatización de la edificación, que a la postre es el responsable de vencer las cargas térmicas de la edificación y garantizar las condiciones de confort de los clientes y/o turistas.

4- Diseño de un Sistema de Inferencia Difuso Neuro Adaptivo, “ANFIS” por sus siglas en inglés, como se describe en el epígrafe 2.8 y que constituye el modelo del consumo energético del “chiller” para unas condiciones climatológicas y operacionales determinadas obtenida de registros históricos.

Para obtener el modelo de consumo del chiller, es preciso la participación de especialistas en mediciones eléctricas y técnicas de inteligencia artificial.

La medición de la energía consumida por el chiller en condiciones reales de operación se realiza mediante el empleo de un analizador de redes eléctricas. Al mismo tiempo es necesario registrar los demás parámetros influyentes en el modelo ANFIS, como son la temperatura de ajuste del agua helada, condiciones exteriores y condiciones de confort dentro de la habitación o recinto más crítico de la instalación. La carga térmica se obtiene directamente del modelo neuronal obtenido en el paso anterior.

Con el Modelo del chiller y el modelo neuronal se obtiene el modelo general de consumo de la instalación, el cual se utiliza como función de aptitud del algoritmo de optimización que permite determinar la temperatura óptima del agua helada para las condiciones de temperaturas exteriores, y ocupación dadas.

5- Implementación del algoritmo genético

Se utiliza la combinación del modelo neuronal de cargas de enfriamiento y del modelo “ANFIS” de consumo energético como función de evaluación en un algoritmo genético simple para la búsqueda del punto de ajuste de la temperatura de agua helada que garantiza menor consumo energético de la instalación ante determinadas condiciones climáticas y operación del hotel. Los operadores genéticos, criterios de parada y tratamiento a las restricciones son los especificados en el epígrafe 3.2.

Es importante destacar que los operadores genéticos que se escogen para una aplicación determinada no tienen porqué ser constantes, como se especificó anteriormente, pueden variar de una aplicación en otra en dependencia de la solución más acertada al problema que se analiza, y su efectividad puede ser comprobada por el propio Matlab. Se debe utilizar el método de prueba y error para determinar los parámetros del algoritmo genético[112].

6- Desarrollo y puesta a punto del software que será utilizado por el usuario para operar el “chiller” con un menor consumo energético.

En esta etapa la información acumulada puede ser utilizada para reentrenar la red neuronal o rediseñar el sistema “ANFIS” en caso de que sea necesario realizar ajustes a los modelos.

7- Fase de explotación del software.

El usuario determina el punto de ajuste de la temperatura del agua helada que garantiza el menor consumo energético esperado para unas condiciones climatológicas y

operacionales determinadas. En este paso se emplea el software desarrollado (ver Anexo G), al que se le introducen como datos las temperaturas máxima y mínima y el nivel de ocupación (%) de la instalación turística esperados para el día y devuelve el punto de ajuste y el consumo energético esperado, que resulta el mínimo para esas condiciones sin afectar el confort. Con este criterio de temperatura el personal encargado de la operación del sistema, realiza el ajuste de la temperatura agua helada, de acuerdo al valor sugerido por el software. Esta herramienta permite ser utilizada en la toma de decisiones con un mínimo de conocimientos de computación. Solo se requiere para su implementación una computadora que soporte Matlab 7.0. Los pasos 1 al 4 se muestran gráficamente en la Figura 3.4.

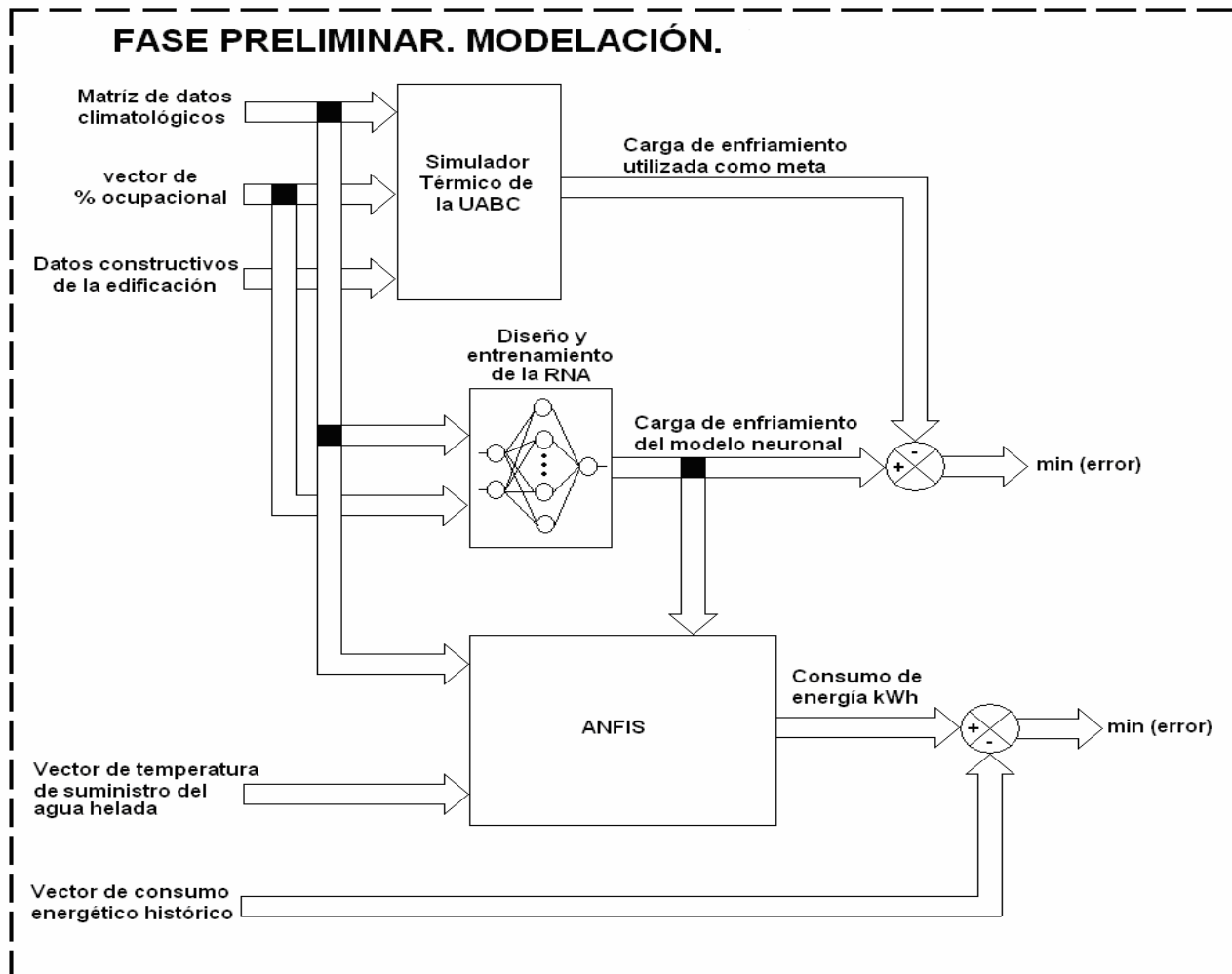


Figura 3.4 Desarrollo del modelo neuronal de cargas de enfriamiento y del sistema ANFIS de consumo energético.

Un diagrama de bloques simplificado de la metodología descrita lo representa la Figura 3.5.

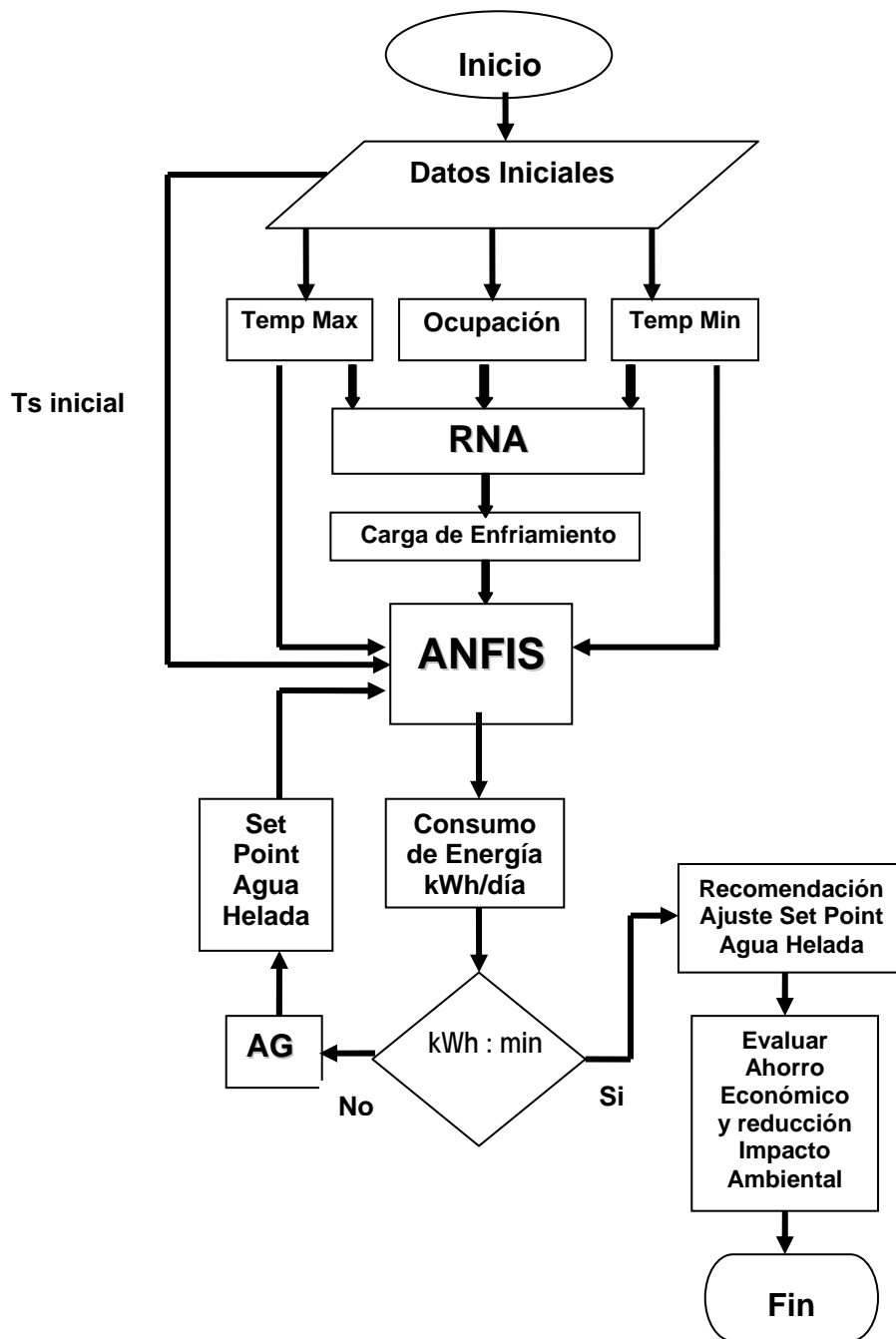


Figura 3.5 Diagrama de bloques de la metodología general

Conclusiones parciales.

- 1- Se desarrolla un procedimiento, basado en un algoritmo genético, para la determinación de la temperatura de agua helada que hace mínimo el consumo de energía del “chiller” para unas condiciones climatológicas y un nivel de ocupación del hotel dado. Un procedimiento de este tipo, ni algo similar, aparece reportado en la literatura internacional sobre el tema.
- 2- Para el período analizado, el potencial de ahorro de energía promedio, alcanzable mediante el ajuste de la temperatura del agua helada utilizando el procedimiento propuesto, es de 258,39 kWh/día, lo que representa un 11,61 % consumo del “chiller”.
- 3- Se desarrolla un procedimiento general que puede ser aplicado a cualquier instalación que emplee sistemas de climatización centralizados por agua helada del tipo todo-agua a flujo constante, basada en la modelación del sistema mediante técnicas de simulación e inteligencia artificial, el que posibilita alcanzar ahorros significativos de energía eléctrica y reducción del impacto ambiental asociado con mínimo de inversiones.

CONCLUSIONES GENERALES

- 1- Como resultado de la presente investigación, se desarrolló un procedimiento y un programa informático asistente para determinar la temperatura del agua helada, científicamente fundamentado y con herramientas que facilitan su aplicación práctica, y posibilitan alcanzar significativos ahorros de energía y reducción del impacto ambiental en los sistemas de climatización centralizados del tipo todo-agua a flujo constante de hoteles turísticos.
- 2- Mediante el estudio de la influencia de la temperatura del agua helada sobre el consumo del “Chiller”, se demostró que, dentro del rango de temperaturas que garantiza las condiciones de confort, existe un valor óptimo de dicha temperatura, que posibilita minimizar el consumo de energía para unas condiciones de temperatura exterior y ocupación dadas, aspecto no reportado en la literatura sobre el tema. Se puso en evidencia que la existencia de este valor óptimo responde a la influencia contrapuesta de la potencia consumida por el compresor y del tiempo de trabajo del sistema al variar la temperatura del agua helada.
- 3- El procedimiento desarrollado, basado en la simulación térmica de edificios, la utilización de una red neuronal artificial y un algoritmo genético, permite determinar la temperatura del agua helada que garantiza mínimos consumos de energía para unas determinadas condiciones climáticas y de ocupación del hotel. Este procedimiento constituye la base para la aplicación de una estrategia operacional para el ajuste de la temperatura del agua helada en los “chillers” que posibilita maximizar el ahorro de energía sin afectar las condiciones de confort.
- 4- El procedimiento obtenido ha sido desarrollado sobre un caso base, dadas las características de los métodos y técnicas empleadas, por lo que los modelos obtenidos son válidos solamente para el caso en cuestión. Sin embargo, el procedimiento general es aplicable a cualquier hotel o edificación que utilice sistemas climatización centralizados del tipo todo-agua a flujo constante.
- 5- Para posibilitar la simulación térmica del hotel a distintos niveles de ocupación fue necesario establecer una estrategia ocupacional de las habitaciones, que por su parte contribuye a la reducción de la carga de enfriamiento y al ahorro de energía, lo que constituye un resultado complementario de la presente investigación.

- 6- El un modelo matemático, obtenido mediante la combinación de la aplicación de un simulador térmico de edificaciones con una red neuronal artificial, posibilita, de una forma simple y novedosa, la simulación térmica del hotel y la determinación de la carga de enfriamiento impuesta al sistema de climatización para distintas temperaturas ambientes y niveles de ocupación. El procedimiento para la obtención de este modelo resulta válido para su aplicación a cualquier instalación climatizada.
- 7- El modelo de tipo “ANFIS” desarrollado es capaz de determinar el consumo de energía del “chiller” a partir del conocimiento de las temperaturas exteriores, nivel de ocupación del hotel y temperatura del agua helada. El procedimiento seguido para desarrollar este modelo constituye un aporte novedoso y el mismo es de carácter general, por lo que puede ser aplicado a cualquier instalación de climatización centralizada del tipo todo – agua a flujo constante.
- 8- El potencial de ahorro de energía alcanzable mediante la aplicación de la procedimiento y las herramientas desarrolladas al hotel Jagua en el período estudiado alcanza un valor aproximado de 47,02 MWh/año, representando esto un 11% del consumo del “chiller” en los meses de mayor carga de climatización. Este potencial de ahorro de energía implica una reducción en la factura de electricidad de 4 546 CUC al año y una reducción de emisiones al medio ambiente de 43,3 toneladas de CO₂ anuales.

RECOMENDACIONES.

1. Presentar a la Dirección Energética del Ministerio del Turismo y al Grupo Nacional de Eficiencia Energética los resultados de esta investigación para su aplicación en la gestión energética de hoteles e instalaciones que posean sistemas centralizados por agua helada a flujo constante.
2. Desarrollar un software en un lenguaje de programación que permita obtener ejecutables para un mejor acceso por parte del usuario y prescindir del Matlab.
3. En futuras investigaciones se podrían incorporar a los modelos otras variables de interés, en correspondencia con el desarrollo tecnológico de los sistemas objeto de estudio, tales como, el flujo de agua helada y la presión de condensación a partir de la utilización de variadores de frecuencia.

ACRÓNIMOS UTILIZADOS EN TEXTO DEL TRABAJO.

ANFIS: Sistema de Inferencia Difuso Neuro adaptivo

ASHRAE: Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción Refrigeración y Aire Acondicionado.

RNA: Red Neuronal Artificial

ARI: Instituto de Refrigeración Americano

UABC: Universidad Autónoma de Baja California

SCCAH: Sistemas de Climatización Centralizado por Agua Helada (todo - agua a flujo constante).

LMTD: Diferencia Media Logarítmica de Temperatura.

AG: Algoritmos Genéticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. d. I. I. Básica., "La Revolución Energética. Resultados y Perspectivas", Habana, Cuba, 2008.
- [2] C. Gutiérrez, Orlando., "Estrategia de desarrollo del turismo en Cuba: Resultados, retos y perspectivas" Disponible: <http://www.teruel.unizar.es>. Visitado: Mayo 2007.
- [3] M. d. turismo., "Hechos y Tendencias del Turismo", en Hechos y Tendencias del Turismo, Vol. 42, 2005.
- [4] K. t. C., W. Yu., "Energy Signatures for Assessing the Energy Performance of Chiller", University de Hung Hong, Hong Kong, China", Energy and Building, Vol. 37. Octubre 2004.
- [5] M. Milagros., "Gestión de la Energía en Hoteles Turísticos en Cuba", Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos. Cuba, 2005.
- [6] R. C. TRANE., "Conferencia de la Asociación de Ingenieros de Servicios en Refrigeración", Saint John, New Brunswick. Canadá, 2005.
- [7] T. Ross., "Central Cooling and Heating, Washington, Quorum" Disponible: http://webapp.dpor.state.va.us/articles/central_heating_cooling.htm. Visitado: Enero 2007.
- [8] K. T. Chan., "Condensing temperature control to enhance efficiency of air cooled chillers," Building Service Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China, Vol. 25, 2004, pp. 279-294.
- [9] ARTI., "Final Report on the Benefits of Variable Primary Flow Chilled Water Systems" Disponible: <http://www.arti-21cr.org/>. Visitado: Mayo 2005.
- [10] Y. I. Corporation, "Chiller- Plant Energy Performance", HVAC&R Engineering, Mayo 2004.
- [11] P. I. I. INC, "Variable speed primary chilled water pump control with two way valves direct return system", Bulletin D- 120 B, 2003.
- [12] T. Hartman., "The Hartman loop chiller plant design and operating technologies. Improve chiller plant efficiency", ASHRAE, 2001 p. 9.
- [13] D. R. Wulfinghoff., "Manual de Eficiencia Energética", Atlanta Georgia, EUA, 2000, p. 1536.
- [14] D. R. Wulfinghoff., "The Potential of Raising the Chilled water Temperatures", Chiller Plants, 2001.
- [15] B. Henry., "Performance Enhancements for Chiller Plants", Trane company, USA, Disponible:<http://www.coolenergytech.com/Enhancements.htm>. Visitado: Junio 2005.
- [16] D. Wulfinghoff., "Chiller Plant: Keep the chilled water supply temperature as high as possible", Washington, United States, 1999.
- [17] T. R. Company., "Improving Chiller and Chilled Water System Efficiency", Ohio, EUA. 2008.
- [18] ASHRAE., "Fundamentals Handbook", Atlanta, Georgia, 2000.
- [19] S. B. Technologies., "Siemens' Cooling Plant Optimization Software", Siemens Building Technologies. Berlín, Alemania, 2000.

- [20] L. H. López., "Predicción del consumo energético del Hotel "Jagua" aplicando la simulación termodinámica y la inteligencia artificial", Tesis en opción al grado de Master en Ciencias, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba, 2006, p. 80.
- [21] G. M. Franchosi., "OPEP prevé caída de demanda de petróleo en 2008", en Granma Internacional, ed.15 de Julio, Habana, 2008.
- [22] A. Xinxua., "Subida de precios del petróleo y de los alimentos". Beijing, China. Disponible: <http://www.xinxuanet.com>. Visitado: Septiembre 2008.
- [23] C. d. A. C. d. E. d. E. y. M. A. U. d. Cienfuegos., "Gestión Energética en el Sector Productivo y los Servicios", Cienfuegos: Editorial Universidad de Cienfuegos, 2006.
- [24] Aedenat., "Cambio Climático y Energía", Utopia, España. Disponible: <Http://www.uplgc.es/otros/asoc>. Visitado: Junio 2008.
- [25] Masqueaire., "La eficiencia energética, un aspecto a tener en cuenta", Madrid. España. Disponible: <http://www.masqueaire.com>. Visitado: Mayo 2004.
- [26] A. García., "Diagnóstico de la economía energética nacional y la estrategia desde la óptica del uso racional de la energía", INIE, Cuba, 2000.
- [27] J. González Francés., "Desarrollo del sector energético en Cuba", en Revista Energética (OLADE), Vol. 3, 2001, pp. 7-18.
- [28] "Informe del Grupo Nacional de Eficiencia Energética", La Habana, Cuba. Mayo, 2007.
- [29] AVEN., "Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en Establecimientos Hoteleros de la Comunidad Valenciana", Valencia, España, 2007, p. 118.
- [30] O. N. d. Estadísticas., " Estadísticas Seleccionadas en Cuba", Anuario Estadístico de Cuba. , 2004.
- [31] TECNECLIMA., "Climatización y Eficiencia Energética". Buenos Aires, Argentina, 2005.
- [32] R. Johannesen., "Energy Savings in Hotels and Motels", Florida Energy Extension Service, Miami, USA, 2005, p. 8.
- [33] T. Hartman., "The Hartman LOOP Chiller Plant Design and Operating Technologies. Improve Chiller Plant Efficiency", Atlanta, Georgia, EUA. Disponible: <http://www.automatedbuildings.com>. Visitado: Marzo 2003.
- [34] K. T. C., F. W. Yu†., "Improved energy efficiency standards for vapor compression chillers serving buildings", Department of building services engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong. China, 2005.
- [35] D. G. Fernández., "Análisis de la Influencia de Factores Climatológicos y Alternativas Operacionales en el Consumo Energético de los Sistemas Centralizados de Climatización por Agua Helada", Trabajo de Diploma, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba, 2005, p. 70.
- [36] ASHRAE., "Improving the Efficiency of Chilled Water Plants - Avery", Gil ASHRAE, May, 2001.
- [37] A. Beyeene., "A preliminary assessment of strategies to raise the off-design energy efficiency of chiller machines", CIEE Project Highlight. Energy Institute. Department of Mechanical Engineering. San Diego State University, USA, 2004.
- [38] P. I. I. INC., "Variable Speed primary chilled water pump control with two way valves direct return system", 2003.
- [39] R. Woodcock., "Part-Load control strategies for packaged rooftop units", Carrier Corporation, USA, 1998.

- [40] U. O. Wisconsin., "A Transient Systems Simulation program", The University of Wisconsin, Madison, United States. 2005.
- [41] DOE-2., "Building Energy Use and Cost Analysis Tool", Disponible: <http://www.doe2.com>. Visitado: Octubre 2008.
- [42] E. p. Company, "Disponible: [Http://www.energyplus.com](http://www.energyplus.com): Visitado Septiembre 2008.
- [43] D.E.Agency., "CoolPack", Dinamarca. Disponible: <http://www.et.web.mek.dtu.dk/Coolpack/UK>. Visitado: Julio 2008.
- [44] Pérez Tello, Carlos., "Comportamiento Térmico de Edificios", Instituto de Ingeniería Universidad Autónoma de Baja California, México, 2003.
- [45] J. M. Gordon., "Thermodynamic modeling of reciprocating chillers" en Journal of Applied Physics, Vol. 6, New York, 2000.
- [46] P. H. Priya Sreedharan., "Comparison of Chiller Models for Use in Model-Based Fault Detection", en International Conference for Enhanced Building Operations Austin, Texas, 2001.
- [47] W. F. Stoecker., "Procedures for simulating the performance of component and systems for energy calculation ", ASHRAE, Georgia, 1975.
- [48] J. A. A. J. A.H. Monteiro., J. M. D. Pimenta., "Desenvolvimento de Software Para Análise de Sistemas de Refrigeração" en CONBRAVA, Brasilia. Brasil, 2003.
- [49] S. Wang., WanJ, Burnet J., "Mechanistic modeling of HVAC centrifugal chiller systems dynamic simulation", Building Service Engineering, Vol. 21, 2000, pp. 73-78.
- [50] P.-. Ríó., "Modelo Matemático do chiller", Río de Janeiro, Brasil, 2002.
- [51] K. T. a. S. Deng., "A simulation study on a water chiller complete with a desuperheater and a reversibly used water cooling tower (RUWCT) for service hot water generation ", Building and Environment, Vol. 37, Julio, 2002., pp. 741-751.
- [52] Z. L. a. C. L. S. T.T. Chow, "Applying neural network and genetic algorithm in chiller system optimization," in Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro. Brasil, 2001.
- [53] I. X. Wenjian Cai., "HVAC System Optimization- in Building Section", Diciembre 2003.
- [54] W. F. Stoecker., and J.W. Jones., "Refrigeration and air conditioning", 1982, Ed New York: McGraw-Hill, 1982.
- [55] Z. D. a. X. X. Xinqiao Jin., "Energy evaluation of optimal control strategies for central VWV chiller systems ", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, Abril, 2007, pp. 934-941.
- [56] J. W. R. J. Rabelh., "Parameter estimation and use of catalog data in modeling heat exchangers and coils", HVAC&R Research, Vol. 1, 1999, pp. 3-17.
- [57] K. t. Chan., "Condensing temperature control to enhance efficiency of air cooled chillers", Building Service Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China, vol. 25, 2004, pp. 279-294.
- [58] J. F. H. J.J. Allen., "Steady-state reciprocating water chiller models", ASHRAE, 1983, p. 407.
- [59] "Eurovent certification program for liquid chilling packages ", en Eurovent (2005). Disponible: <http://www.eurovent-certification.com>. Visitado: Septiembre 2008.
- [60] TRANE., "ARI Standard 550/590–1998 Implications for Chilled-Water Plant Design", Engineer News Letter. United States, 1998.

- [61] S. Katipamula., "Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems", ASHRAE, Vol. 11, Enero, 2005.
- [62] D. P. Sandra Patricia., "Redes Neuronales Artificiales Fundamentos, Modelos y Aplicaciones", Universidad Militar Nueva Granada. Bogota, Colombia, 2006.
- [63] B. S. Martín Alfredo., "Redes Neuronales y Sistemas Difusos", Editorial Alfaomega, 2002.
- [64] R. Rojas., "Neural Networks: A Systematic Introduction", Springer, 1996.
- [65] M. Giovanni Moreno., "Relación de las redes neuronales artificiales con otras áreas", Universidad Particular de Loja, Ecuador. 2007.
- [66] I. Wikimedia Foundation, "Redes Neuronales Artificiales", Wikimedia Foundation, Inc. 2008.
- [67] R. Rocío., "Algoritmos Genéticos", en Republica del Saber, 2002, p. 19.
- [68] P. I. Larrañaga., I Moujahid. A., "Algoritmos Genéticos", Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial. Universidad del país Vasco-Euskal Herriko Univertsitatea, 2003.
- [69] B. Henry., "Performance enhancements for chiller plants", Trane Company. United States. 2000.
- [70] M. J. Tosí., Bitondo., "Chiller control plant". Carrier Corporation, Syracuse, New Cork. EUA, 1999.
- [71] Apogee, "Related efficiency upgrades chiller sequencing decoupler systems ", en Cooling Systems Alternatives. Disponible: <http://tristate.apogee.net/cool/cfrcc.asp> Visitado: Junio 2005.
- [72] Apogee., "Parallel chiller sequencing", en Cooling Systems Alternatives. Disponible: <http://tristate.apogee.net/cool/cfrcc.as>. Visitado: Julio 2005.
- [73] T. Webster., "Chiller control-related energy saving opportunities in federal facilities", P.E.Center for the Built Environment (CBE). University of California, Berkeley , EUA, Junio, 2003.
- [74] Willian C. Witman., "Tecnología de la Refrigeración y el Acondicionamiento de Aire", 5 ed: Delmar, 2005, p. 2215.
- [75] S. d. E. d. O. P. y. Comunicaciones., "Reglamento para el diseño e instalación de sistemas de refrigeración", Dirección General de Reglamentos y Sistemas, Santo Domingo, República Dominicana, 2002.
- [76] T. H. Company., "The Hartman loop chiller plant design and operating technologies", frequently Asked Questions, 2001.
- [77] E. Company., "Millennium Series Chiller Optimizer With Electra Software Energy Optimization", Disponible: <http://www.software-shop.com/in.php>. Visitado: Mayo 2005.
- [78] I. Energy Optimization, "Chiller Optimizer", Energy Optimization, Inc., 2005.
- [79] C. Corporation., "System Part Load Value: A Case for Chiller System Optimization", HVAC Analysis, Vol. 3, Julio 2000, p. 6.
- [80] "Optimization and Energy-Efficient Chillers", Disponible: <http://www.progress-energy.com/chiller>. Visitado: Junio 2007.
- [81] C. P. Optimizer., "Chiller Plant Optimizer", United States, 2005.
- [82] U. States, "United States Patent 6718779". United States, 2003.
- [83] E.-. Host., "Modelación Matemática y Simulación de un Sistema de Acondicionamiento de Aire en estado transitorio", EBSCO, 2006.

- [84] M. P., "Modelado de sistemas de refrigeración por compresión de vapor", U. P. D. d. T. Aplicada, Valencia. España, 2001, p. 200.
- [85] D. F. R. Yager., "Essentials of fuzzy modeling and control", Wiley Interscience, 1994.
- [86] N. Quadri., "Nuevos conceptos de diseño en aire acondicionado", Clima, Vol. 183, 2004.
- [87] G. G. A. David Morillón Gálvez., "Arquitectura Bioclimática", Barcelona, España, 2002.
- [88] J. C. Escobar Palacio., "Análisis estacional del comportamiento energético del Hotel "Jagua", Tesis en opción al grado de Master en Ciencias, Universidad de Cienfuegos. Cuba, 2004, p. 90.
- [89] A. E. B. N., José P. Monteagudo Yánes., "Considerar los Factores Climatológicos Durante la Explotación Reduce el Consumo de Potencia en Los Chillers en más de un 15%", en Congreso Internacional de Energía Renovables. Varadero, Cuba, 2005.
- [90] D. C. Pons., "Variables Climatológicas, Características Locales, Madrid, España", 2003.
- [91] M. Teórico., " El clima como característica extrínseca de la vivienda", Valencia, España. Vol. 2, 2003.
- [92] J. Pegues., "The Benefits of 8760 Hour-By-Hour Building Energy Analysis", Syracuse, New York: Carrier Corporation, 2002.
- [93] UNE., "Condiciones de Diseño Exterior", Vol. 100-001, UNE, 2001.
- [94] C. P. T., Héctor Campbell Ramírez., "Identificación y definición de la problemática del servicio eléctrico en Baja California", Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali. México, 2004.
- [95] G. Moreno., Massa Vinicio., "Relación de las redes neuronales artificiales con otras áreas", España, 2007.
- [96] J. R. M., Hilera, Víctor J., "Redes neuronales artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones", 2 ed: Editorial Alfaomega, 2000.
- [97] L. N. i. Computer. "Modeling a refrigeration system using recurrent neural network", Springer. Berlin. Germany. ISSN- 0302-9743, Vol. 1625, 1999.
- [98] C. D. Autores., "Neural Network Design", ISBN 0-9717321-0-8), "Disponible: <http://ee.okstate.edu/mhagan/nnd.html>. Visitado: Junio, 1999.
- [99] D. D. Massie., "Optimization of a building's cooling plant for operating cost and energy use", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 41, 2002, p. 1159.
- [100] Armas Teyra Marcos A., Gómez Sarduy Julio R., Mariño Stand Lourdes., Sepúlveda Chaverra Juan., "Inteligencia Artificial Aplicada al Análisis de Sistemas Energéticos con Matlab ", 2006, pp. 68-99.
- [101] e. d. r. n. 2008, "Conceptos básicos sobre RNA", España, 2008.
- [102] Z.-H. Z., Y. Xia., " The application of artificial neural network in HVAC system", Machine Learning and Cybernetics, Vol. 8, 2005, pp. 4800 - 4804.
- [103] H. D. Álvarez., "Control Difuso y Sistemas de Control Inteligentes", en Segundo Congreso de la Asociación Colombiana de Automática Bucaramanga, Colombia, 1997.
- [104] L. P. P. H. Juan José Mora Flores., Sandra Milena Pérez Londoño., "Utilización de Redes ANFIS y señales de corriente para localización de la zona de falla en

- sistemas de distribución de energía eléctrica", Ingeniería e investigación, Universidad de Colombia, 2004, pp. 93-99..
- [105] J. G. Gómez., "Lógica Difusa y Aplicaciones". Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación, Universidad de Málaga. España, 2008.
 - [106] O. M. i. Casals., "Sistemas Difusos Dinámicos Para el Tratamiento de Información temporal Imprecisa". Escuela Técnica de Ingeniería y Telecomunicaciones, Barcelona. España, 1997.
 - [107] A. Sanz., "Lógica borrosa. Incidencia en las aplicaciones industriales". Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicaciones. Zaragoza. España, 2006.
 - [108] F. G. W. Pedrycz., "An introduction to fuzzy sets: Analysis and design", ISBN: 0-262-16171-0., Massachusetts, EUA, 1998.
 - [109] A. F. C., Andrés Yovany Zapata Loaiza., "Aplicaciones de algoritmos genéticos", Politécnico Colombiano "JAIME ISAZA CADAVID". Ingeniería en Instrumentación y Control. Medellín, Colombia., 2004.
 - [110] D. G. Lio., "Algoritmos Genéticos", Universidad Central de las Villas, Villa Clara. Cuba, 2000.
 - [111] A. Marczyk., "Algoritmos genéticos y computación evolutiva", Barcelona. España, 2004.
 - [112] T. Niewierowicz., "Aplicaciones de algoritmos genéticos y redes neuronales en ingeniería eléctrica", Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Barcelona. España, 2002.
 - [113] R. V., Juan Landa., "Estimadores Cuantitativos de la Emisión de Contaminantes Atmosféricos Por Combustión del Petróleo Crudo Cubano y su Efecto Económico", Energética, Vol. 2, 2004.
 - [114] D. o. E. Washington., "DC 20585 Environmental Protection Agency Washington DC 20460 ". Vol. DC 20460 E. P. A. Washington, 2000.

Anexo A. Temperaturas máximas y mínimas de Cienfuegos.

	MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPT		OCTUBRE	
DIA	Tmáx.	Tmín.	Tmáx.	Tmín.	Tmáx.	Tmín.	Tmáx.	Tmín.	Tmáx.	Tmín.	Tmáx.	Tmín.
1	30	21	31	22	31	23	27	23	33	24	29	21
2	29	22	31	23	33	24	30	24	33	23	30	23
3	29	21	32	23	33	22	32	25	32	24	31	23
4	30	22	31	22	33	21	32	24	32	22	33	23
5	29	20	31	24	33	24	33	24	31	22	33	23
6	30	20	32	22	31	22	33	22	32	22	33	24
7	29	19	31	22	32	23	34	25	33	22	33	24
8	29	19	32	22	32	22	34	24	32	22	32	24
9	27	18	33	24	32	21	33	24	31	23	32	24
10	28	19	32	24	32	23	33	25	32	22	30	23
11	28	21	33	24	32	23	35	23	32	22	29	23
12	28	21	32	24	33	24	34	24	32	22	29	22
13	30	23	34	23	32	24	33	22	32	23	32	23
14	28	21	32	23	32	24	33	23	31	26	30	23
15	31	22	32	24	32	23	34	22	32	25	32	24
16	31	19	32	23	32	23	33	25	31	24	32	23
17	31	18	33	22	34	23	33	25	34	23	31	23
18	31	19	32	23	32	22	34	26	32	24	30	23
19	32	21	33	24	33	24	35	24	32	24	29	24
20	30	22	32	23	32	24	32	23	32	22	29	23
21	31	22	32	23	32	23	33	23	33	24	30	23
22	29	23	32	24	30	23	31	24	32	22	30	23
23	28	23	33	22	31	24	32	23	32	23	31	23
24	29	23	34	23	32	24	32	23	32	23	31	23
25	29	24	33	23	30	23	33	23	32	23	32	23
26	29	22	32	24	32	23	33	23	31	23	32	24
27	31	22	34	22	33	23	32	23	33	22	28	23
28	31	23	33	23	33	24	33	25	26	23	25	22
29	31	23	32	23	33	23	33	23	29	23	25	22
30	30	23	30	23	34	25	33	24	29	23	27	22
31	31	21	0	0	33	25	32	25	0	0	25	22

ANEXO B. Horas- Grado para el mes de Mayo 2006

Día	Horas Grados del Mes de Mayo	Carga de Enfriamiento (Toneladas de Refrigeración)
1-may	29.85	704.30
2-may	25.00	695.16
3-may	28.03	700.88
4-may	39.77	722.97
5-may	8.25	663.65
6-may	-9.68	0.00
7-may	-30.63	0.00
8-may	-44.87	0.00
9-may	-84.94	0.00
10-may	-50.38	0.00
11-may	-0.92	0.00
12-may	-12.01	0.00
13-may	88.54	814.74
14-may	-5.21	0.00
15-may	66.88	773.98
16-may	6.29	659.95
17-may	-35.13	0.00
18-may	21.09	687.82
19-may	74.21	787.77
20-may	60.75	762.44
21-may	81.10	800.73
22-may	50.35	742.87
23-may	57.80	756.89
24-may	55.30	752.18
25-may	89.86	817.21
26-may	47.22	736.98
27-may	79.22	797.19
28-may	92.21	821.64
29-may	104.57	844.90
30-may	91.05	819.45
31-may	66.85	773.93
Total de Mes	1264.19	16637.62

Anexo C. Resumen de las cargas totales de enfriamiento para distintos niveles de ocupación y diferentes condiciones climatológicas.

CE (ton/día) Ocup 40%	CE (ton/día) Ocup 60%	CE (ton/día) Ocup 80%	CE (ton/día) Ocup 100%	CE (ton/día) Ocup 40%	CE (ton/día) Ocup 60%	CE (ton/día) Ocup 80%	CE (ton/día) Ocup 100%
68.64	738.76	518.27	87.70	79.43	838.40	699.09	106.14
68.20	734.72	510.94	86.95	75.26	799.86	629.15	99.00
68.48	737.24	515.53	87.42	74.27	790.71	612.55	97.31
69.53	747.01	533.25	89.22	77.99	825.09	674.94	103.67
66.69	720.79	485.66	84.37	79.60	839.96	701.93	106.43
0.00	140.98	0.00	0.00	74.60	793.78	618.13	97.88
0.00	140.98	0.00	0.00	78.43	829.13	682.27	104.42
0.00	140.98	0.00	0.00	78.32	828.09	680.38	104.23
0.00	140.98	0.00	0.00	80.60	849.16	718.61	108.13
0.00	140.98	0.00	0.00	79.26	836.81	696.21	105.84
0.00	140.98	0.00	0.00	84.21	882.52	779.16	114.30
0.00	140.98	0.00	0.00	82.21	864.08	745.69	110.89
0.00	140.98	0.00	0.00	68.44	736.87	514.86	87.35
71.98	769.57	574.18	93.40	76.22	808.71	645.21	100.64
66.52	719.15	482.69	84.07	79.88	842.54	706.61	106.90
0.00	140.98	0.00	0.00	77.71	822.49	670.22	103.19
67.85	731.47	505.05	86.35	81.10	853.77	726.98	108.98
72.64	775.66	585.25	94.53	76.64	812.62	652.31	101.37
71.42	764.46	564.92	92.45	83.32	874.32	764.27	112.78
73.26	781.39	595.64	95.59	81.48	857.34	733.46	109.64
70.49	755.81	549.22	90.85	80.26	846.08	713.04	107.56
71.16	762.01	560.47	92.00	83.94	879.99	774.57	113.83
70.93	759.92	556.69	91.61	80.75	850.59	721.22	108.39
74.05	788.68	608.86	96.94	82.93	870.67	757.66	112.11
70.21	753.21	544.50	90.37	77.70	822.39	670.04	103.17
73.09	779.83	592.81	95.30	78.04	825.51	675.70	103.75
74.26	790.64	612.42	97.30	78.36	828.53	681.19	104.31
75.37	800.92	631.08	99.20	83.27	873.82	763.37	112.69
74.15	789.67	610.66	97.12	83.82	878.95	772.68	113.64
71.97	769.54	574.14	93.39	86.49	903.59	817.39	118.20
72.81	777.28	588.17	94.83	78.10	826.06	676.69	103.85
76.76	813.76	654.38	101.58	79.65	840.38	702.69	106.50
75.48	801.91	632.88	99.38	78.21	827.15	678.67	104.05
72.81	777.28	588.17	94.83	75.76	804.49	637.56	99.86
76.55	811.75	650.74	101.21	76.81	814.21	655.19	101.66
74.37	791.63	614.22	97.48	79.43	838.35	699.00	106.13
72.48	774.18	582.55	94.25	77.81	823.45	671.97	103.37

Anexo C. Continuación

80.04	844.00	709.26	107.17	82.27	864.57	746.59	110.98
78.43	829.18	682.36	104.43	78.14	826.50	677.50	103.94
81.49	857.39	733.55	109.65	80.82	851.19	722.30	108.50
79.33	837.41	697.29	105.95	80.49	848.19	716.86	107.95
77.82	823.48	672.02	103.38	80.76	850.67	721.36	108.41
78.93	833.76	690.68	105.28	79.93	842.96	707.37	106.98
77.20	817.83	661.76	102.33	77.82	823.50	672.06	103.38
76.92	815.20	656.99	101.84	75.98	806.50	641.20	100.23
76.81	814.21	655.19	101.66	73.70	785.50	603.11	96.35
80.10	844.52	710.20	107.27	75.14	798.79	627.21	98.81
76.65	812.70	652.45	101.38	76.92	815.20	656.99	101.84
76.15	808.06	644.04	100.52	74.76	795.22	620.74	98.15
78.82	832.75	688.84	105.09	75.04	797.82	625.46	98.63
76.92	815.17	656.95	101.84	75.87	805.48	639.36	100.05
80.65	849.60	719.42	108.21	75.26	799.83	629.10	99.00
78.48	829.62	683.17	104.51	74.87	796.24	622.58	98.33
78.71	831.71	686.95	104.90	75.76	804.49	637.56	99.86
76.91	815.15	656.90	101.83	81.06	853.40	726.31	108.91
78.76	832.20	687.85	104.99	80.99	852.83	725.27	108.81
77.32	818.87	663.65	102.52	77.88	824.07	673.10	103.49
73.99	788.13	607.87	96.83	79.76	841.40	704.54	106.69
76.93	815.30	657.17	101.86	79.04	834.78	692.53	105.47
80.32	846.58	713.94	107.65	74.31	791.11	613.27	97.38
76.86	814.68	656.05	101.75	79.15	835.80	694.37	105.66
74.58	793.61	617.81	97.85	76.37	810.09	647.73	100.90
81.15	854.29	727.93	109.08	76.37	810.14	647.82	100.91
73.87	787.02	605.85	96.63	77.54	820.90	667.34	102.90
76.26	809.08	645.88	100.71	75.31	800.38	630.09	99.10
74.81	795.72	621.64	98.24	76.04	807.07	642.24	100.34
72.58	775.17	584.35	94.44	76.64	812.65	652.36	101.37
76.43	810.66	648.76	101.00	66.16	715.85	476.71	83.46
75.98	806.52	641.25	100.24	70.49	755.81	549.22	90.85
80.04	844.00	709.26	107.17	72.60	775.34	584.66	94.47
78.87	833.24	689.74	105.18	67.98	732.63	507.16	86.56
77.26	818.37	662.75	102.43	72.76	776.80	587.32	94.74
77.98	825.01	674.80	103.66	75.71	804.00	636.66	99.77
79.59	839.84	701.70	106.40	78.93	833.74	690.64	105.27
75.53	802.38	633.74	99.47	78.48	829.62	683.17	104.51
79.37	837.85	698.10	106.04	81.99	862.00	741.91	110.50

ANEXO D. Datos utilizados para el entrenamiento sistema ANFIS

Tmax (°C)	Tmin (°C)	Ocup (%)	Tr (°C)	Ts (°C)	Energía(kW)	Qt (Ton)
33.0	22.2	89.00	11.0	7.5	2331.14	1581.0276
31.5	22.6	98.50	11.0	8.0	2506.38	1583.9928
31.8	22.4	79.00	11.0	7.8	2476.97	1236.5919
32.3	22.5	88.00	11.5	7.5	2753.75	1537.9534
31.8	22.4	84.00	11.0	8.0	2951.39	1388.0974
31.3	22.7	93.00	11.6	7.8	3120.47	1591.1223
33.3	22.1	99.00	11.3	7.5	3037.18	1647.7212
33.30	22.50	73.10	9.9	7.7	2953.44	1143.8543
33.70	22.80	82.50	12.1	9.5	3026.28	1476.8217
32.50	22.00	46.90	11.0	10.3	2738.91	957.8238
31.00	22.00	55.00	11.5	9.0	2720.28	1020.1116
33.00	23.00	65.00	11.0	9.0	2331.14	976.4383
34.00	22.60	60.00	11.5	7.0	2506.38	1201.9862
33.60	22.93	63.00	11.5	8.0	2476.97	1029.8992
27.6	21.00	86.58	10.5	7.8	1365.00	0.0579
28.5	22.00	91.95	11	7	2077.18	1342.8637
28.9	22.10	98.66	11	8	2260.05	1368.0693
28.8	21.00	71.14	11.8	8	2328.13	800.9621
27.8	20.90	69.80	10.5	8.5	879.21	0.0575
28	21.50	80.00	11.2	7.5	2036.18	1009.7651
27.8	21.30	82.00	11	7.5	1343.00	31.8169
29	22.20	96.00	10.5	7.5	2271.05	1413.5998
28.7	21.00	66.00	11.5	8	2356.53	704.5128
28.8	22.00	78.00	11	7.5	1462.00	1026.3487
27	20.80	60.00	12	8	984.50	0.0524
27.8	21.60	81.00	11.2	7.6	2113.18	997.4431
27.7	21.00	75.00	11.8	8	1295.00	0.0578
28.5	21.40	88.00	12	8	2228.13	1224.7407
28	21.40	77.00	10.5	8.5	9479.21	847.8587
26	18.00	90.60	11	8	240.10	0.0698
25.8	18.20	98.66	11	8	414.03	0.0686
26.1	17.90	95.97	11	8	8326.02	0.0049
27	18.50	69.13	12	8	1275.02	0.0574
26	18.00	74.50	11	8	959.00	0.0579
26.5	18.20	60.40	12	8	1779.01	0.0509
26.8	19.00	89.26	12	7.5	1135.01	0.0591
26.1	17.80	95.97	11	8	851.00	0.0456
26	18.00	96.00	11	8	842.60	0.0136
25.6	17.80	94.00	11	8	894.00	0.2369
26.1	18.00	92.00	11	8	851.00	0.0697
27	18.50	89.00	12	7.5	1100.00	0.0596
26.3	18.00	93.00	11	8	866.60	0.0712
26	17.90	93.60	12	7.5	1579.01	0.0422
26.5	18.20	89.00	11	8	976.60	0.0629

Anexo D. Continuación

28.1	21.00	56.00	11	7.8	1485.16	0.4557
28	20.70	99.00	11.5	7	1497.80	0.0662
29	21.10	99.00	11.3	8	1237.85	1280.9591
27.8	20.30	100.00	12	7.8	1327.87	0.0677
27.9	20.50	39.00	11.5	8	1468.46	0.1036
28.8	21.30	98.00	11	8	1441.95	1303.6585
27.5	21.00	98.00	11.4	8	148.55	0.0647
32.80	22.20	59.00	11.50	8.00	1809.83	1144.7026
31.00	22.60	65.00	11.00	7.50	2287.37	871.1515
31.80	22.40	30.00	11.50	8.00	2852.78	730.1942
32.00	22.50	49.00	12.00	7.50	2753.75	998.1635
31.80	22.40	32.00	12.00	8.00	2951.39	748.3346
31.30	22.70	73.00	11.00	7.00	3120.47	105.9987
33.30	22.10	68.00	12.50	7.50	3037.18	989.3287
32.50	22.20	79.00	11.80	7.80	3363.72	1259.0262
31.40	23.10	87.00	12.00	6.90	3417.68	1505.4844
33.00	23.00	85.00	12.00	6.90	3242.88	1532.0694
27.60	21.00	86.58	10.5	7.8	1365.00	0.0579
28.50	22.00	91.95	11.00	7.00	2077.18	1342.8637
28.90	22.10	98.66	11.00	8.00	2260.05	1368.0693
28.80	21.00	71.14	11.80	8.00	2328.13	800.9621
27.80	20.90	69.80	10.50	8.50	879.21	0.0575
28.00	21.50	80.00	11.20	7.50	2036.18	1009.7651
27.80	21.30	82.00	11.00	7.50	1343.00	31.8169
29.00	22.20	96.00	10.50	7.50	2271.05	1413.5998
28.70	21.00	66.00	11.50	8.00	2356.53	704.5128
28.80	22.00	78.00	11.00	7.50	1462.00	1026.3487
27.00	20.80	60.00	12.00	8.00	984.50	0.0524
27.80	21.60	81.00	11.20	7.60	2113.18	997.4431
27.70	21.00	75.00	11.80	8.00	1295.00	0.0578
28.50	21.40	88.00	12.00	8.00	2228.13	1224.7407
27.00	18.50	77.00	12.00	8.00	1275.02	0.0575
26.00	18.00	74.50	11.00	8.00	959.00	0.0579
26.50	18.20	60.40	12.00	8.00	1779.01	0.0509
26.80	19.00	89.26	12.00	7.50	1135.01	0.0591
26.10	17.80	95.97	11.00	8.00	851.00	0.0456
26.00	18.00	96.00	11.00	8.00	842.60	0.0136
25.60	17.80	94.00	11.00	8.00	894.00	0.2369
26.10	18.00	92.00	11.00	8.00	851.00	0.0697
27.00	18.50	89.00	12.00	7.50	1100.00	0.0596
26.30	18.00	93.00	11.00	8.00	866.60	0.0712
26.00	17.90	93.60	12.00	7.50	1579.01	0.0422
26.50	18.20	89.00	11.00	8.00	976.60	0.0629
28.10	21.00	56.00	11.00	7.80	1485.16	0.4557
28.00	20.70	99.00	11.50	7.00	1497.80	0.0662
29.00	21.10	99.00	11.30	8.00	1237.85	1280.9591
27.80	20.30	100.00	12.00	7.80	1327.87	0.0677

Anexo D. Continuación						
27.90	20.50	39.00	11.50	8.00	1468.46	0.1036
28.80	21.30	98.00	11.00	8.00	1441.95	1303.6585
33.00	22.2	89.00	11.0	7.5	2331.14	1581.0276
31.50	22.6	98.50	11.0	8.0	2506.38	1583.9928
31.80	22.4	79.00	11.0	7.8	2476.97	1236.5919
32.30	22.5	88.00	11.5	7.5	2753.75	1537.9534
31.80	22.4	84.00	11.0	8.0	2951.39	1388.0974
31.30	22.7	93.00	11.6	7.8	3120.47	1591.1223
33.30	22.1	99.00	11.3	7.5	3037.18	1647.7212
32.80	22.2	59.00	12.0	7.8	1809.83	1144.7026
31.00	22.6	60.00	9.9	7.7	2287.37	1067.2287
31.80	22.4	30.00	12.1	9.5	2852.78	730.1942
32.00	22.5	49.00	11.0	10.3	2753.75	998.1635
31.80	22.4	32.00	11.5	9.0	2951.39	748.3346
31.30	22.7	73.00	11.0	9.0	3120.47	105.9987
33.30	22.1	68.00	11.5	7.0	3037.18	989.3287
32.50	22.2	79.00	11.5	8.0	3363.72	1259.0262
31.40	23.1	87.00	11	7.5	3417.68	1505.4844
31.60	22.5	80.00	11.8	7.7	3242.88	1263.3687
33.30	22.50	73.10	9.9	7.7	2953.44	1143.8543
33.70	22.80	82.50	12.1	9.5	3026.28	1476.8217
32.50	22.00	46.90	11.0	10.3	2738.91	957.8238
31.00	22.00	55.00	11.5	9.0	2720.28	1020.1116
33.00	23.00	65.00	11.0	9.0	2331.14	976.4383
34.00	22.60	60.00	11.5	7.0	2506.38	1201.9862

Anexo E. Combinaciones utilizadas para el diseño del experimento

Tmaxexp	Tminexp	Ocupexp	Tsexp	Energíaexp
25,6	23,1	65	8,6	2531,2
34	20,45	30	8,6	830,77
29,8	17,8	65	10,3	6605,8
29,8	23,1	30	8,6	2655,7
29,8	23,1	100	8,6	2002,9
29,8	17,8	100	8,6	5794,6
29,8	20,45	65	8,6	2398,4
29,8	23,1	65	6,9	2078,1
25,6	20,45	65	10,3	-4324
25,6	20,45	65	6,9	1374,6
29,8	17,8	30	8,6	5794,6
29,8	20,45	100	10,3	2719,6
29,8	17,8	65	6,9	3650,6
25,6	17,8	65	8,6	184,53
29,8	20,45	100	6,9	1774,3
25,6	20,45	30	8,6	-846,69
29,8	23,1	65	10,3	2694,5
34	17,8	65	8,6	9559,6
29,8	20,45	65	8,6	2398,4
29,8	20,45	30	10,3	2558,1
34	20,45	65	10,3	2702,7
34	20,45	100	8,6	3151,9
34	23,1	65	8,6	2132,4
29,8	20,45	65	8,6	2398,4
29,8	20,45	30	6,9	2303,3
25,6	20,45	100	8,6	-846,69
34	20,45	65	6,9	2228,6
25,6	23,1	65	8,6	2531,2
34	20,45	30	8,6	830,77
29,8	17,8	65	10,3	6605,8
29,8	23,1	30	8,6	2655,7
29,8	23,1	100	8,6	2002,9
29,8	17,8	100	8,6	5794,6
29,8	20,45	65	8,6	2398,4

Continuación del diseño de experimento (Anexo E).

Tmaxexp	Tminexp	Ocupexp	Tsexp	Energiaexp
29,8	23,1	65	6,9	2078,1
25,6	20,45	65	10,3	-4324
25,6	20,45	65	6,9	1374,6
29,8	17,8	30	8,6	5794,6
29,8	20,45	100	10,3	2719,6
29,8	17,8	65	6,9	3650,6
25,6	17,8	65	8,6	184,53
29,8	20,45	100	6,9	1774,3
25,6	20,45	30	8,6	-846,69
29,8	23,1	65	10,3	2694,5
34	17,8	65	8,6	9559,6
29,8	20,45	65	8,6	2398,4
29,8	20,45	30	10,3	2558,1
34	20,45	65	10,3	2702,7
34	20,45	100	8,6	3151,9
34	23,1	65	8,6	2132,4
29,8	20,45	65	8,6	2398,4
29,8	20,45	30	6,9	2303,3
25,6	20,45	100	8,6	-846,69
34	20,45	65	6,9	2228,6

Anexo F: Análisis Estadístico del ANFIS

No. de la Observ.	Energía real normal.	ANFIS	Desv.	No. de la Observ.	Energía real normal.	ANFIS	Desv.
1	0,8057	0,8057	0,00	27	0,8642	0,8637	0,06
2	0,8014	0,8014	0,00	28	0,8855	0,8855	0,00
3	0,8887	0,8887	0,00	29	0,7959	0,7959	0,00
4	0,4383	0,4382	0,00	30	0,6821	0,6821	0,00
5	0,4383	0,4382	0,00	31	0,7248	0,7249	-0,02
6	0,6078	0,6078	0,00	32	0,3994	0,3978	0,41
7	0,8014	0,8014	0,00	33	0,6613	0,6613	0,00
8	0,4620	0,4621	-0,02	34	0,6812	0,6812	0,00
9	1,0000	1,0000	0,00	35	0,2573	0,2573	-0,02
10	0,2490	0,2525	-1,40	36	0,5958	0,5958	-0,01
11	0,2465	0,2507	-1,68	37	0,3930	0,3931	-0,04
12	1,0000	1,0000	0,00	38	0,6645	0,6645	0,00
13	0,2465	0,2507	-1,68	39	0,6895	0,6895	0,00
14	0,2490	0,2525	-1,40	40	0,4278	0,4278	0,00
15	0,7334	0,7334	0,00	41	0,2881	0,2892	-0,40
16	0,2616	0,2615	0,03	42	0,6183	0,6183	0,00
17	0,2616	0,2615	0,03	43	0,3789	0,3782	0,18
18	0,1211	0,1305	-7,69	44	0,6519	0,6519	0,01
19	0,7334	0,7334	0,00	45	0,3731	0,3744	-0,35
20	0,6821	0,6824	-0,05	46	0,2806	0,2507	10,66
21	0,7334	0,7333	0,01	47	0,3321	0,3321	0,01
22	0,7248	0,7247	0,00	48	0,3219	0,3218	0,00
23	0,8057	0,8056	0,01	49	0,2536	0,2637	-3,99
24	0,8636	0,8637	-0,01	50	0,4620	0,4621	-0,02
25	0,9130	0,9131	0,00	51	0,2857	0,2827	1,06
26	0,8887	0,8884	0,03	52	0,4346	0,4370	-0,57

Anexo F. Continuación

No. de la Observ.	Energía real normal.	ANFIS	Desv.	No. de la Observ.	Energía real normal.	ANFIS	Desv.
53	0,3622	0,3621	0,04	78	0,6519	0,6519	0,01
54	0,3885	0,3884	0,03	79	0,5296	0,5308	-0,23
55	0,4297	0,4292	0,11	80	0,2857	0,2827	1,06
56	0,4219	0,4221	-0,05	81	0,2806	0,2507	10,66
57	0,5296	0,5291	0,09	82	0,3321	0,3321	0,01
58	0,6693	0,6693	0,00	83	0,3219	0,3218	0,00
59	0,8347	0,8350	-0,03	84	0,2536	0,2637	-3,99
60	0,8057	0,8057	0,00	85	0,4346	0,4370	-0,57
61	0,8636	0,8633	0,03	86	0,3622	0,3621	0,04
62	0,9130	0,9130	0,00	87	0,3885	0,3884	0,03
63	0,8887	0,8887	-0,01	88	0,4297	0,4292	0,11
64	0,9842	0,9838	0,04	89	0,4219	0,4221	-0,05
65	0,3994	0,3978	0,41	90	0,6821	0,6824	-0,05
66	0,6078	0,6078	0,00	91	0,7334	0,7333	0,01
67	0,6613	0,6613	0,00	92	0,7248	0,7247	0,00
68	0,6812	0,6812	0,00	93	0,8057	0,8056	0,01
69	0,2573	0,2573	-0,02	94	0,8636	0,8637	-0,01
70	0,5958	0,5958	-0,01	95	0,9130	0,9131	0,00
71	0,3930	0,3931	-0,04	96	0,8887	0,8884	0,03
72	0,6645	0,6645	0,00	97	0,8347	0,7571	9,29
73	0,6895	0,6895	0,00	98	0,8642	0,8637	0,06
74	0,4278	0,4278	0,00	99	0,8855	0,8855	0,00
75	0,2881	0,2892	-0,40	100	0,7959	0,7959	0,00
76	0,6183	0,6183	0,00	101	0,6821	0,6821	0,00
77	0,3789	0,3782	0,18	102	0,9842	0,9531	3,16

ANEXO G. PROGRAMA DEL PROCEDIMIENTO ELABORADO CON EL ALGORITMO GENÉTICO

```
disp(' OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DETERMINACIÓN DEL SET POINT ')
disp(' DEL CHILLER DEL HOTEL JAGUA MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL ')
%*****
tic;
% global ChillerUNO Tmax Tmin Ocup Ts KWH;
global Tmax Tmin Ocup Chiller Qt
ConsumoJaguaOk;
% Chiller=readfis('ANFISJAGUA');
disp(' ALGORITMO GENETICO OPTIMIZANDO. ESPERE POR FAVOR ');
options1=gaoptimset('Generations',100,...
    'StallGenLimit',150,'StallTimeLimit',Inf,'PopulationSize',100,...
    'MutationFcn',{@mutationuniform,0.01},'SelectionFcn',@selectionuniform,...
    'PopInitRange',[6;11],'PlotFcns',{@gaplotbestf,@gaplotbestindiv},...
    'FitnessScalingFcn',@fitscalingrank);
SETPPOINT=ga(@Sergio2,1,options1);

VARSIMUOPTIMO=[Tmax/34 Tmin/23.1 SETPOINT/10.3 Qt/1647.7];
ConsumoOptimizado=evalfis(VARSIMUOPTIMO,Chiller)*3417.7;
disp(' Algoritmo Genético ha concluido la Optimización ');
SETPPOINT
SETPPOINTMANUAL=input('Ajuste Manual de Temperatura de Agua Helada en oC ,
SETPPOINTMANUAL= ');
VARSIMUNORMAL=[Tmax/34 Tmin/23.1 SETPOINTMANUAL/10.3 Qt/1647.7];
ConsumoNormal=evalfis(VARSIMUNORMAL,Chiller)*3417.7;
disp(' Ahorro en kWh ');
Ajustes =[SETPPOINTMANUAL SETPOINT;ConsumoNormal ConsumoOptimizado]
Ahorro= ConsumoNormal-ConsumoOptimizado

SETPPOINTMANUAL=input('Ajuste Manual de Temperatura de Agua Helada en oC ,
SETPPOINTMANUAL= ');
VARSIMUNORMAL=[Tmax/34 Tmin/23.1 SETPOINTMANUAL/10.3 Qt/1647.7];
ConsumoNormal=evalfis(VARSIMUNORMAL,Chiller)*3417.7;
disp(' Ahorro en kWh ');
Ajustes =[SETPPOINTMANUAL SETPOINT;ConsumoNormal ConsumoOptimizado]
Ahorro= ConsumoNormal-ConsumoOptimizado
toc;
t=toc;
```