



República de Cuba.

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Trabajo de Diploma.

Titulo: *Procedimiento para la selección de la estrategia físico estructural que garantice mínimo consumo del sistema de climatización centralizada por agua helada del Hotel Jagua.*

Autor: *Yasniel Alfaro Cabrera.*

Tutor: *Msc. Yarelis Valdivia Nodal.*
Msc. Roy Reyes Calvo.
Dr. Juan Carlos Armas Valdes.

"Año 52 de la Revolución"
Cienfuegos 2010

**DECLARACION DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS**



Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.
Nombre y Apellidos. Firma.

Firma del Tutor

Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellido. Firma.

PENSAMIENTO

“La precisión en el objetivo es el punto de partida para cualquier triunfo.”

W. Clement Stone

“Jamás dejes que las dudas paralicen tus acciones. Toma siempre todas las decisiones que necesites tomar, incluso sin tener la seguridad o certeza de que estás decidiendo correctamente. ”

Paulo Coelho

AGRADECIMIENTOS

Me es imposible en una cuartilla expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que de una forma u otra me ha ayudado a realizar mis sueños.

En especial quiero agradecer a:

- + Mis padres, fuentes de amor y dedicación en mi vida como estudiante.*
- + Mi novia, por ser la puerta que nunca se cerró en los momentos más importantes.*
- + Mis tutores Msc. Yarelis Valdívía Nodal, Msc. Roy Reyes Calvo, Dr. Juan Carlos Armas Valdés por poner a mi disposición su sabiduría, experiencia y ayuda en todo momento.*
- + Mis profesores por poner todo su empeño y haberme brindado todos sus conocimientos.*
- + Y aquellas personas a las cuales no olvidaré y que significaron mucho en mi vida como universitario.*

A todos,

MUCHAS GRACIAS.

DEDICATORIA

Muchas personas hicieron posible que pudiese recorrer este camino pero en especial le dedico este trabajo a:

- ✚ A mis tutores que me brindaron las herramientas para llevar a cabo esta investigación.*
- ✚ A quien me dio la vida, y me ha enseñado a conducirme en ella con todo el amor del mundo, mi estimada madre.*
- ✚ A mi padre, que ha sabido guiarme y de quien heredé las fuerzas para seguir adelante y nunca rendirme ante situaciones difíciles.*
- ✚ A una de las personas más importantes de mi vida en estos momentos, la cual me ha dado siempre mucho amor y apoyo sin límites desde que la conocí: mi novia.*
- ✚ A mi padrastro que también ha sabido guiarme a lo largo de mi vida.*
- ✚ A mi hermano y hermana, a mis abuelos y en especial a mi abuela Estrella que ya no está entre nosotros pero darle muchas gracias por su dedicación y amor.*

RESUMEN

Resumen

En el presente trabajo de diploma se describe un procedimiento soportado en ambiente MATLAB, para la selección de enfriadoras de agua en base al mínimo consumo para vencer una carga determinada, evaluándose dos alternativas de interconexión serie y paralelo. Utilizando el procedimiento propuesto en el desarrollo de este trabajo se realiza un caso de estudio con el objetivo de comprobar si la interconexión de las enfriadoras que operan en el Hotel Jagua está basada bajo un adecuado criterio físico estructural que garantice mínimo consumo de potencia para la carga térmica a vencer definida por diseño.

Después de analizar los resultados del caso de estudio se obtiene una estrategia físico estructural, siendo esta más económica que la que opera actualmente en la instalación reduciéndose los consumos energéticos en un 2,24%. Lo que representa un ahorro en gastos energéticos de 3587.95 CUC anual para la entidad.

Índice	Pág.
Introducción: _____	2
Capítulo I: Estudio de estrategias físico estructural en sistemas de climatización centralizados por agua helada. _____	6
1.1 Estado del arte _____	6
1.2 Generalidades de los sistemas de climatización centralizada _____	9
1.3 Principio de funcionamiento de los sistemas de climatización centralizada por agua helada (Chillers). _____	9
1.3.1 Funciones de los principales componentes del sistema. _____	10
1.4 Clasificación de los sistemas de climatización centralizada _____	12
1.4.1 Principales ventajas y desventajas de los sistemas de climatización centralizada por agua helada. _____	13
1.5 Evaluación de sistemas de climatización _____	14
1.6 Estrategias físico estructural de operación de sistemas de climatización centralizados por agua helada. _____	16
Conclusiones Parciales Capítulo I _____	22
Capítulo II: Procedimiento para la selección de la estrategia físico estructural que garantice mínimo consumo de potencia. _____	24
2.1 Introducción _____	24
2.2 Descripción del procedimiento: _____	25
2.3 Análisis termodinámico de los componentes de un sistema de climatización centralizada. _____	26
2.3.1 Principales indicadores energéticos: _____	30
2.4. Descripción del procedimiento propuesto para la selección de la estrategia físico estructural de mínimo consumo. _____	31
Conclusiones Parciales Capítulo II _____	37
Capítulo III: Evaluación del procedimiento propuesto mediante un caso de estudio. _____	39

3.1 Caracterización del sistema de climatización centralizada por agua helada instalado en el Hotel Jagua de la provincia de Cienfuegos.	39
3.2 Caso estudio Hotel Jagua:	42
3.2.1 Análisis de resultados:	44
3.3. Análisis energético y económico de la estrategia conceptual de interconexión propuesta:	45
3.3.1 Análisis energético.	45
3.3.2 Análisis económico.	46
3.4 Determinación del efecto indirecto de emisiones de CO₂ al medio ambiente.	47
Conclusiones Parciales Capítulo III	50
Conclusiones	52
Recomendaciones	54
Referencias Bibliográficas:	56
Bibliografía:	59
Anexo I	62
Anexo II	73

INTRODUCCION

INTRODUCCIÓN:

El ahorro de energía en edificaciones es un asunto muy tratado en la actualidad debido a los elevados gastos energéticos y al costo asociado a la operación de estos sistemas. Particularmente, en las instalaciones hoteleras de nuestro país, debido al clima tropical existente es imprescindible garantizar las condiciones de confort de los usuarios a partir del empleo de sistemas de climatización; siendo estos responsables de alrededor del 40 - 70% del consumo total de energía eléctrica de los hoteles^[1]. Estos sistemas de climatización utilizados en la hotelería son generalmente del tipo centralizado, de compresión mecánica, con enfriadoras de agua y distribución del agua helada a los diferentes sectores del hotel. Este tipo de sistemas se conocen con el nombre de sistemas todo agua o sistemas de agua helada.

Debido a la importancia de estos sistemas de climatización para el desarrollo económico del país en un sector tan importante como es el sector del turismo es de suma importancia realizar un estudio con el objetivo de establecer estrategias de operación en dichos sistemas para aumentar su eficiencia energética. Esto traería consigo un ahorro de energía significativo a la entidad sin la necesidad de realizar grandes inversiones.

También es importante realizar una buena evaluación del sistema de climatización en aras de obtener los indicadores energéticos de la instalación y los índices técnico - económicos de esta en cada momento de su explotación. Los principales indicadores ha tener presente en estos sistemas son: eficiencia energética, coeficiente de funcionamiento del ciclo (COP) y eficiencia energética estacional.

Situación problemática:

El alto consumo de energía eléctrica que representan los sistemas de climatización centralizados en las instalaciones hoteleras en el país, puede llegar a ser entre el 40 y el 70% de su consumo total, lo cual obliga al personal encargado de la gestión energética brindarle una atención especial a estos equipos. Que va desde la correcta selección de los mismos hasta su puesta en marcha con los parámetros que garanticen una operación con el mínimo consumo energético.

Una de las tareas más difíciles por parte del personal técnico es la selección adecuada de las enfriadoras y su interconexión, pues esto influye considerablemente en el consumo energético de la instalación.

Problema científico:

La literatura consultada carece de procedimientos que permitan la selección e interconexión adecuadas de los sistemas de climatización centralizados por agua helada que garanticen mínimo consumo energético.

Hipótesis:

El desarrollo de un procedimiento que permita evaluar estrategias físico estructurales de interconexión de sistemas de climatización centralizados por agua helada garantizará el mínimo consumo energético para la capacidad de refrigeración preestablecida por diseño.

Objetivo General:

Desarrollar un procedimiento para la evaluación de estrategias físico estructural de interconexión de sistemas de climatización centralizados por agua helada que garantice el mínimo consumo energético para la capacidad de refrigeración preestablecida por diseño.

Objetivos específicos:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica sobre las principales estrategias físico estructural en sistemas de climatización centralizados por agua helada.
2. Establecer comparación entre las estrategias de operación más empleadas en estos sistemas.
3. Desarrollar los modelos termodinámicos de los principales componentes del sistema.
4. Evaluar el sistema de climatización para las alternativas de interconexión en serie y paralelo de sistemas de climatización centralizados por agua helada.
5. Desarrollar un procedimiento para la selección de la alternativa físico estructural en base a mínimo consumo energético.

CAPITULO I

CAPÍTULO I: ESTUDIO DE ESTRATEGIAS FÍSICO ESTRUCTURAL EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS POR AGUA HELADA.

1.1 Estado del arte

Los costos de la energía eléctrica que se consume en sistemas térmicos empleados en el sector de la industria y los servicios han llegado a ser tan significativos que resulta necesario encontrar la forma de minimizarlos. Para lograr este objetivo se requiere de un análisis del uso de la energía en el diseño, instalación y operación de los mismos.

El turismo es uno de los sectores de mayor crecimiento en la economía mundial donde se reportan elevados ingresos, por lo que en la actualidad se le presta especial atención. Dentro de este sector se destacan por su elevado consumo energético las instalaciones hoteleras, siendo la climatización el principal consumidor de energía eléctrica.

En la actualidad existe la tendencia a instalar sistemas de climatización del tipo centralizados, dadas las ventajas que representa. Las enfriadoras de agua o sistemas todo agua son las más generalizadas, por lo que debe hacerse un uso eficiente de los mismos, así como estudiar las mejores estrategias que favorezcan a la reducción de los consumos energéticos, tanto en la etapa de diseño como en su explotación.

Acerca de esta temática, uno de los trabajos revisados de la literatura ^[2] aborda las estrategias de operación para incrementar la eficiencia de sistemas de climatización centralizados. En el mismo se evalúa la estrategia de ajuste de la temperatura de agua helada en chillers, siendo esta una de las más generalizadas y que requiere de un especial cuidado ya que un excesivo

aumento en la misma puede llevar a afectar las condiciones de confort. Dicho trabajo se limita solamente al análisis de esta estrategia de operación tomando la temperatura del agua helada como variable de decisión, sin embargo no contempla otras alternativas de configuración de la instalación.

Khalil ^[3] realiza un estudio termodinámico de los sistemas de producción de agua caliente sanitaria en instalaciones turísticas a partir de la recuperación de calor de condensación de sistemas de climatización centralizados. Este tipo de estrategia representa una vía de perfeccionamiento no explotada para el ahorro de combustible o energía eléctrica en este tipo de sistemas pero dicho trabajo no establece ningún criterio para la interconexión de sistemas.

En otra investigación relacionada al tema ^[4] se realiza un análisis experimental del comportamiento de un sistema de climatización centralizado por agua helada en un hotel turístico, basado en el alcance de la primera ley de la termodinámica. A pesar de la ventaja que ofrece el análisis termodinámico para la evaluación de los principales parámetros de operación, no se exploran otras variables de diseño que también influyen en el consumo energético de la instalación. Este trabajo tampoco contempla la evaluación de sistemas interconectados.

McQuay ^[5] presenta un resumen de las principales estrategias de operación e interconexión utilizadas en los sistemas de climatización centralizados por agua helada. Se destacan los rangos de valores de algunos parámetros de operación principales así como de diseño de algunos de los componentes del sistema. A pesar de que esta literatura proporciona las principales ventajas para cada alternativa, no recomienda cual de ellas es la más idónea para satisfacer una capacidad determinada, como tampoco desarrolla un procedimiento para la selección más adecuada de la estrategia de interconexión a utilizar.

En un reciente trabajo ^[6] el autor realiza una evaluación de estrategias físico-estructurales en los sistemas de climatización centralizados por agua helada, con vistas a reducir los consumos energéticos, también aplicado a un hotel turístico de la provincia de Cienfuegos. Aunque en el trabajo se abordan todas las posibles estrategias de interconexión que pueden ser utilizadas, solo tiene en cuenta la alternativa operacional del uso de recuperadores de calor para el calentamiento de agua sanitaria, para el estudio de su factibilidad en este tipo de instalaciones.

En uno de los artículos de la TRANE ^[7] se describen en detalle las estrategias de interconexión de enfriadoras en serie y en paralelo, así como las distintas alternativas físico estructurales más utilizadas en este tipo de sistemas y sus parámetros de operación para cada configuración. No se especifica cuál es la interconexión más recomendable, sin embargo sugieren el uso de sistemas múltiples de diferentes capacidades como una de las alternativas operacionales más factible a la hora de implementar estrategias de operación para el ahorro de energía.

En las normas ASHRAE 2009 ^[8] se exponen los criterios para la selección del equipamiento de sistemas de climatización centralizados, así como los principales parámetros de trabajo por componentes (compresor, evaporador, condensador). Sin embargo no abordan el sistema desde el punto de vista global encaminado a la búsqueda de estrategias físico estructural que garanticen mínimo consumo de potencia para la aplicación que se requiera.

Como se puede apreciar, de la revisión bibliográfica son reportados escasos trabajos que abordan la temática de las estrategias físico estructural en instalaciones de climatización centralizada. Los trabajos referenciados tienen como principal objetivo lograr un incremento en la eficiencia del sistema a partir

de la optimización de parámetros de operación ó modificaciones en su diseño como es la incorporación de los recuperadores de calor. Sin embargo en ninguno de los casos se considera la posibilidad de evaluar las diferentes alternativas de interconexión que pueden emplearse a fin de encontrar la estrategia físico estructural más factible.

1.2 Generalidades de los sistemas de climatización centralizada

Los sistemas de climatización centralizada son utilizados en grandes instalaciones, pues resulta más factible centralizar la distribución de frío a los recintos a climatizar que ubicar unidades independientes en cada uno de ellos. El objetivo de un sistema de climatización es proporcionar un ambiente confortable. Esto se consigue mediante el control simultáneo de la humedad, la temperatura, la limpieza y la distribución del aire en el ambiente, incluyendo también otro factor, el nivel acústico. El avance de la técnica ha hecho indispensable su aplicación en todo edificio moderno, porque el aire acondicionado no es un lujo como muchas veces se considera, sino una necesidad, ya que está destinado no solo para el confort sino básicamente para preservar la salud humana y también constituye un requisito para los procesos industriales.

1.3 Principio de funcionamiento de los sistemas de climatización centralizada por agua helada (Chillers).

Los sistemas de climatización centralizada por agua helada están compuestos de dos circuitos: primario y secundario (Figura 1.1). El circuito primario utiliza como refrigerante una sustancia química que tiene como principal propiedad que

entra en ebullición a bajas temperaturas (R22, R134a, R404). El funcionamiento de estos equipos se basa en un sistema de refrigeración por compresión de vapor, el cual está compuesto por cuatro elementos principales: evaporador, compresor, condensador, dispositivo de expansión. El circuito secundario utiliza como sustancia refrigerante agua helada y está constituido por sistemas de bombeo, sistemas de distribución de agua y unidades terminales de intercambio de valor.

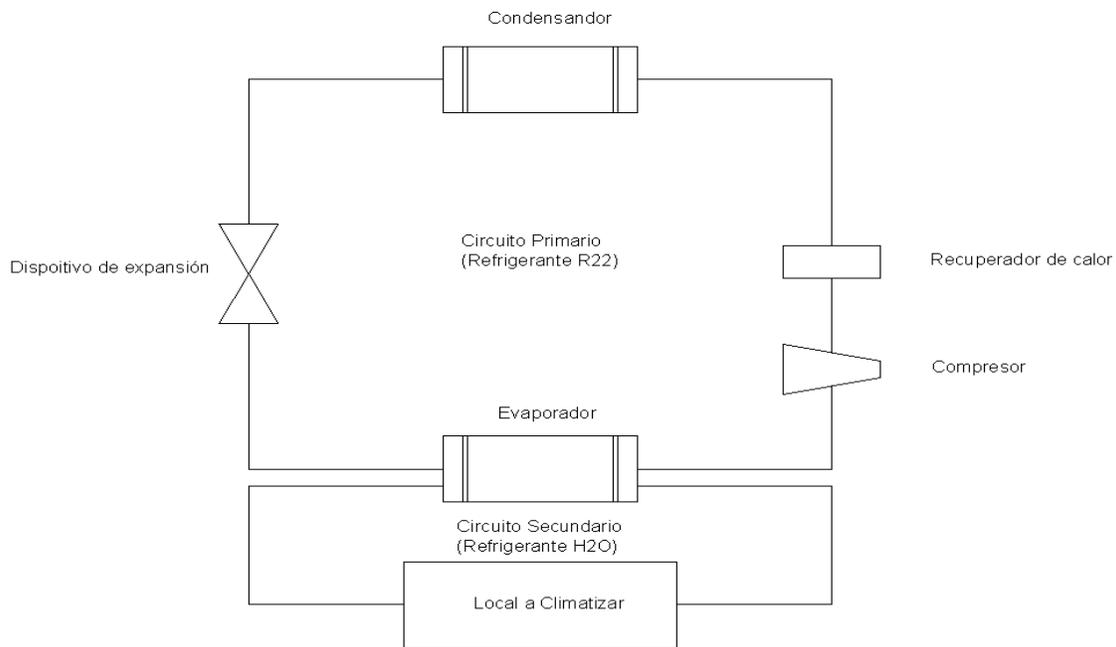


Figura 1.1 Componentes de un sistema de climatización centralizada por agua helada.

1.3.1 Funciones de los principales componentes del sistema.

➤ **Compresor**

El compresor es el corazón del sistema, ya que es el encargado de hacer circular la sustancia refrigerante a través de los diferentes componentes en la unidad enfriadora. Succiona el gas refrigerante sobrecalentado a baja presión y

temperatura, lo comprime aumentando la presión y la temperatura a un punto tal que se puede condensar por medios condensantes normales (Aire o agua). A través de las líneas de descarga fluye el gas refrigerante a alta presión y temperatura hacia la entrada del condensador.

➤ **Evaporador**

El evaporador es un intercambiador de calor del tipo casco y tubo cuya función es proporcionar una superficie para transferir calor del agua al refrigerante en condiciones de saturación. Es aquí donde el refrigerante se evapora al tiempo de ir absorbiendo el calor.

➤ **Condensador**

El condensador es el componente del sistema que extrae el calor del refrigerante y lo transfiere al aire o al agua. Su función principal es proporcionar una superficie de transferencia de calor, a través de la cual es cedido el calor del gas refrigerante al medio condensante. Esta pérdida de calor provoca que el refrigerante se condense. Luego, en estado líquido a alta presión fluye hacia la válvula de expansión termostática.

➤ **Recuperador de calor**

El recuperador es un intercambiador de calor refrigerante-agua, dispuesto por lo general a la salida del compresor, que permite la reutilización del calor residual del sistema de climatización a través de un circuito de calentamiento de agua. El refrigerante al salir del proceso de compresión se encuentra a una temperatura elevada cediéndole parte de su calor al agua cuyo objetivo final es aprovechar

este potencial térmico para producir agua caliente para uso sanitario y a su vez incrementar la eficiencia de la instalación.

➤ **Válvula termostática**

La válvula de expansión termostática tiene como función regular el suministro del líquido refrigerante al evaporador, en este dispositivo se reduce la presión y temperatura del refrigerante de manera que a su entrada al evaporador se alcance la temperatura deseada del agua en su intercambio.

1.4 Clasificación de los sistemas de climatización centralizada

Según la literatura, ^[9] existen diferentes clasificaciones de los sistemas de climatización centralizada en función del fluido encargado de compensar la carga térmica en el recinto climatizado. Las cuatro categorías básicas en que se dividen estos sistemas son las siguientes:

1. Sistemas todo aire.
 2. Sistemas aire - agua.
 3. Sistema todo refrigerante.
 4. Sistema todo agua.
- **Todo aire:** El aire es utilizado para compensar las cargas térmicas en el recinto climatizado, en el cual no tiene lugar ningún tratamiento posterior. Tienen capacidad para controlar la renovación del aire y la humedad del ambiente.
- **Sistema aire-agua:** Se trata de sistemas donde llega tanto agua como aire para compensar las cargas del local. Un ejemplo de este tipo de instalaciones son los sistemas de inducción.

- **Sistema todo refrigerante:** Se trata de instalaciones donde el fluido que se encarga de compensar las cargas térmicas del local es el refrigerante. Dentro de estos sistemas podemos mencionar los pequeños equipos autónomos (Split y multisplit).
- **Sistema todo agua:** Son aquellos en los que el agua es el agente que se ocupa de compensar las cargas térmicas del recinto acondicionado (aunque también puede tener aire exterior para la renovación). El sistema todo agua es uno de los más utilizados para la climatización de grandes hoteles, este sistema es conocido también como sistema de agua helada.

Los sistemas de agua helada son los más utilizados en nuestro país en los sectores de salud y turismo. Debido al alto consumo de energía que representa dichos sistemas es de suma importancia operar estos equipos con una alta eficiencia. Por este motivo es importante evaluar alternativas de operación que te permitan reducir el costo de operación de los mismos manteniendo las reglas de confort de los locales.

1.4.1 Principales ventajas y desventajas de los sistemas de climatización centralizada por agua helada.

Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor por sus características de trabajo superan a otros métodos de obtención de frío, debido a que se pueden obtener muy bajas temperaturas con un equipamiento muy compacto, haciéndose extensivos casi a todas las aplicaciones de frío. Estos equipos permiten realizar una supervisión de los parámetros básicos de funcionamiento del sistema de climatización de la habitación y la comprobación del funcionamiento de las válvulas y del motor del ventilador-serpentin. Desde el punto de vista operacional, este sistema posee una gran flexibilidad ya que

posibilita establecer estrategias operacionales en las enfriadoras de forma centralizada, lo que resulta económicamente más factible. Permite conocer el consumo real de energía de cada habitación, dato fundamental en los programas de ahorro de energía que se realicen en la instalación. Son de bajo costo de operación y mantenimiento.

En Cuba, existe la tendencia de utilizar sistemas de enfriamiento por aire, porque resulta más factible, también son sistemas eficientes, y si se logra aplicar una estrategia de operación y control correctas son hasta más económicos, puesto que los que son de enfriamiento por agua, aparte de que llevan consigo gastos correspondientes a costos por concepto de bombeo de agua, torres de enfriamiento, tratamiento de agua, etc. no son los más recomendables porque su eficiencia se ve grandemente reducida por las condiciones de elevada humedad prevalecientes del clima típico de Cuba, convirtiéndose esta en una opción con más desventaja por todos estos factores.

Como principal desventaja de este tipo de sistema es que los costos iniciales son elevados debido a que son sistemas más complejos desde el punto de vista de su tamaño y automatización.

1.5 Evaluación de sistemas de climatización

La evaluación de un sistema de climatización permite obtener los indicadores energéticos de la instalación y los índices técnico - económicos de esta en cada momento de su explotación. Para ello se compara el funcionamiento actual del sistema con los mejores resultados históricos, con el objetivo de conocer si el sistema se encuentra trabajando cerca de su punto de máxima eficiencia registrado. A partir de este estudio es posible tomar acciones concretas con

vistas aumentar su eficiencia en caso de encontrarse por debajo de los indicadores preestablecidos.

Aspectos a tener en cuenta a la hora de realizar la evaluación de una instalación.

Cuando se pretende evaluar una instalación es necesario que el especialista tome en cuenta que cada parámetro medido, cada indicador energético calculado, si se analiza aisladamente, dice muy poco o nada, ya que estas son muy complejas por sus características y por la acción sobre ella de un conjunto de factores variables en el tiempo. Las instalaciones de refrigeración y climatización se caracterizan porque sus sistemas están muy interrelacionados, un desperfecto en uno de ellos provoca alteraciones en los restantes.

El funcionamiento de las instalaciones de climatización depende de factores internos y externos que influyen en su consumo energético. Los cuales se relacionan a continuación:

- Temperatura ambiente.
- Frecuencia de apertura de las puertas.
- Radiación solar.
- Tiempo de explotación.
- Grado de automatización.
- Área que se climatiza.
- Cargas térmicas aportadas. (iluminación, equipos y personas).

1.6 Estrategias físico estructural de operación de sistemas de climatización centralizados por agua helada.

Las condiciones de competitividad demandan una mayor eficiencia en la operación de los sistemas de climatización centralizada en las grandes instalaciones, siendo el parámetro costo/ingreso de la instalación el más importante.

En la literatura ^[10,11] se reportan diversas estrategias físico estructurales en los sistemas de climatización centralizados, tanto con condensadores enfriados por agua como por aire. Muchos autores reportan que no existe una variante absoluta para la operación eficiente de las enfriadoras, 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 de la enfriadora y el mantenimiento de las condiciones de confort.

Algunas de las estrategias físico estructurales más empleadas en estos sistemas son:

- Máquinas múltiples (de iguales y diferentes capacidades).
- Interconexión de las enfriadoras en serie o paralelo.
- Sistemas de climatización con flujo total constante y válvulas de tres vías.
- Sistema de climatización con bombeo primario secundario con flujo variable y válvulas de dos vías.

Se reportan algunas estrategias de operación utilizadas para incrementar la eficiencia de estos sistemas a cargas parciales, dentro de las más frecuentes y que no requieren inversión se encuentran:

- Ajuste de la temperatura del agua helada.
- Control de la temperatura de torre de enfriamiento (Aplicable en chillers enfriados por agua).

Para llevar a cabo estas estrategias es necesario realizar un estudio profundo pues no pueden afectarse las condiciones de confort. Algunas de las estrategias utilizadas con el fin de reducir los consumos de los sistemas de climatización centralizada se detallan a continuación:

➤ **Sistemas múltiples**

La selección de máquinas múltiples para una carga común se basa normalmente en la disponibilidad, confiabilidad y versatilidad de las mismas: disponibilidad a causa de las limitaciones de tamaño por razones económicas de producción; confiabilidad a causa de poder trabajar con una parte de la carga cuando una máquina tiene que ser puesta fuera de servicio para su reparación; y versatilidad a causa de aptitud para la eficiente adaptación de la capacidad del compresor a los requisitos de carga parcial. Las máquinas múltiples se emplean pocas veces con cargas de acondicionamiento de aire normales menores de 50 TR (toneladas de refrigeración).

➤ **Interconexión en serie**

Cuando se consideran máquinas múltiples, puede ser ventajoso el flujo de agua a través de enfriadoras en serie (Ver figura 1.2). 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. La eficiencia del sistema (COP) es afectada por la configuración de la tubería de las enfriadoras. Generalmente, cuanto más largo sea el sistema de distribución de tuberías, mayor es el aumento de la temperatura del agua enfriada. Cuando las enfriadoras están conectadas en serie se obtiene el mejor consumo de potencia con una igual reducción de la carga en cada máquina.

Generalmente, la configuración en serie es la más empleada, pero se encuentra afectada por el costo de bombeo del agua. En este tipo de configuración el número de enfriadoras está limitado por las excesivas caídas de presión.

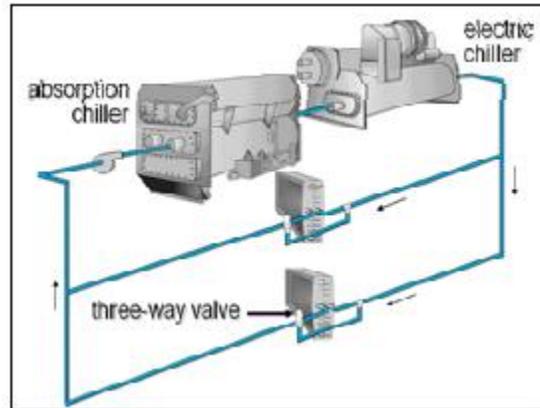


Figura 1.2 Interconexión de enfriadoras en serie.

➤ Interconexión en paralelo

El conducto en paralelo es una configuración común de sistemas de enfriadoras múltiples. Cuando se instalan dos o más máquinas con las enfriadoras conectadas en paralelo en el circuito de agua fría, cada máquina controla la temperatura de su salida de agua fría para que se mantenga igual a la de proyecto, lo mismo que en una instalación de máquina simple.

Para cada máquina se utiliza el mismo régimen de estrangulación. Cuando se reduce la carga del sistema, ambas máquinas reducen simultáneamente su capacidad, produciéndose así individualmente la misma temperatura de salida de agua fría. Cuando cada enfriadora esté provista de una bomba de agua fría independiente como se muestra en la figura 1.3, se pueden parar la bomba y la enfriadora durante el funcionamiento con carga parcial.

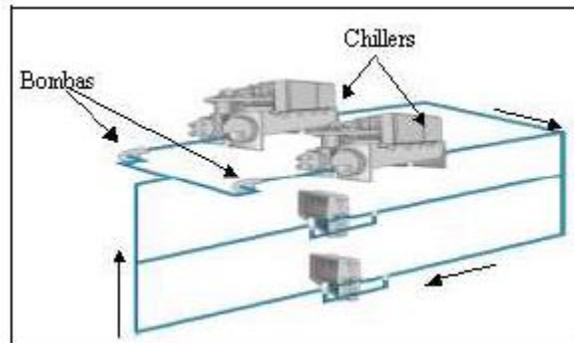


Figura.1.3 Interconexión de enfriadoras en paralelo.

Esto significa que el sistema debe poder funcionar con flujo reducido de agua fría y que los motores de bomba deben ser elegidos de modo que no se sobrecarguen cuando una de las bombas no está funcionando. Si solo hay una bomba provista o ambas bombas funcionan continuamente, cuando una máquina está parada, la otra debe proveer el agua más fría que la proyecto a fin de que sea ésta la temperatura de la mezcla.

➤ **Sistemas de climatización con flujo total constante y válvulas de tres vías**

Este sistema es el más usado en nuestras instalaciones actualmente. El desarrollo de nuevas técnicas lo ha hecho obsoleto, porque ocasiona gastos energéticos innecesarios. El sistema mueve con sus bombas el volumen total de agua fría constantemente. Para demandas inferiores a la máxima no es necesario utilizar todo el volumen de agua disponible, sin embargo, este sistema no lo tiene en cuenta. Debido a esta forma de operación los costos de mantenimiento y reposición aumentan por el trabajo excesivo.

La operación básica que no permite aumentar la rentabilidad de este sistema, es el uso de un flujo de agua fría constante, que provoca el uso obligado de válvulas de tres vías.

➤ **Sistema de climatización con bombeo primario secundario con flujo variable y válvulas de dos vías**

En este sistema es conveniente separar las acciones para disminuir los gastos energéticos y analizar el bombeo primario y el bombeo secundario por separado.

Bombeo Primario

Dependiendo de la magnitud del sistema, el consumo de las bombas del sistema primario puede ser significativo y la utilización de variadores de velocidad permite disminuir apreciablemente los valores de consumo. Esta forma de operación compensa automáticamente los cambios de flujo en el sistema secundario, impidiendo que un cambio brusco en su flujo provoque variaciones de flujo en el sistema primario causando disparos de las protecciones anti hielo.

Bombeo Secundario

En los sistemas con flujo variable, las bombas del sistema secundario son las encargadas de distribuir a la carga el agua producida por el sistema primario, acorde con las necesidades del flujo variable del sistema. Debido a que el flujo es variable en el secundario, puede mantenerse la mínima presión necesaria para reducir el ruido en el sistema y mejorar la eficiencia. El flujo del sistema secundario es variable debido a que el control de las bombas se hace a través de variadores de velocidad, estos facilitan que las bombas varíen su velocidad respondiendo a la curva de requerimientos del sistema.

Cuando se alcanza en las habitaciones la temperatura deseada, el control de habitaciones cierra la válvula de dos vías, aumenta la presión en el sistema, los presostatos diferenciales envían la señal a los variadores de velocidad que disminuyen la velocidad de las bombas para mantener el diferencial de presión fijado. Al reducirse la velocidad de las bombas estas trabajan más desahogadamente y su desgaste es menor, aumentando su tiempo de vida y

disminuyendo los gastos de mantenimiento. De igual forma al controlarse la presión a través de las válvulas de dos vías éstas nunca se ven sometidas a una sobre presurización, sufriendo menos desgaste y evitándose aperturas indeseadas.

Estos tipos de sistemas tienen una mayor eficiencia que los sistemas de flujo constantes y válvulas de tres vías. Aunque es un producto caro en el mercado se justifica su inversión ya que se ahorra dinero y tiempo en mantenimiento y otras operaciones. No obstante la inversión inicial de este sistema se recupera en un año y medio de explotación del mismo debido a su alta eficiencia.

Conclusiones Parciales Capítulo I

1. En la revisión bibliográfica se pudo observar que existen diferentes estrategias físico-estructurales que conducen al ahorro de energía eléctrica en sistemas de climatización centralizada pero no consta con un procedimiento que permita en base a la capacidad a instalar, seleccionar la alternativa de interconexión más tentativa desde el punto de vista energético.
2. La aplicación de estrategias operacionales en sistemas de climatización conducen a un incremento de la eficiencia de los mismos, pero es preciso velar por la calidad de otros factores determinantes, como el confort de los clientes en instalaciones hoteleras.
3. Los sistemas de climatización centralizados según el esquema de interconexión de las unidades enfriadoras pueden clasificarse en serie o en paralelo. La conexión más idónea será en función de las necesidades y características de la edificación.

CAPITULO II

CAPÍTULO II: PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LA ESTRATEGIA FÍSICO ESTRUCTURAL QUE GARANTICE MÍNIMO CONSUMO DE POTENCIA.

2.1 Introducción

Se describe un procedimiento para la selección de enfriadoras de agua en base al mínimo consumo para vencer una carga determinada, evaluándose dos alternativas de interconexión serie y paralelo. Los datos de las enfriadoras provienen del catálogo técnico del fabricante FRIOCLIMA.

En el desarrollo de este capítulo se detallan las ecuaciones principales que describen el comportamiento de cada componente del sistema y se enfatiza en aquellas variables que influyen dentro el procedimiento propuesto en aras de lograr el menor consumo de las enfriadoras seleccionadas para el estudio.

Con el procedimiento se pretende evaluar ambas alternativas a fin de identificar la combinación de enfriadoras que garantice el mínimo consumo energético para vencer una carga térmica existente.

Se parte de la base de datos ofrecida por el fabricante, y que proporciona los diferentes rangos de capacidades. Se seleccionan las series de enfriadoras de pequeña, mediana y gran capacidad de refrigeración, con el objetivo de explorar toda la gama de combinaciones posibles. Con el uso del software MATLAB como herramienta de trabajo se estudian las combinaciones posibles de enfriadoras para la interconexión en serie y paralelo buscando la configuración que venza la capacidad instalada con un mínimo de consumo energético.

2.2 Descripción del procedimiento:

En la figura 2.1 se muestra la estructura general de análisis para el desarrollo del procedimiento a seguir para la determinación de la alternativa físico estructural más tentativa en función de mínimo consumo.

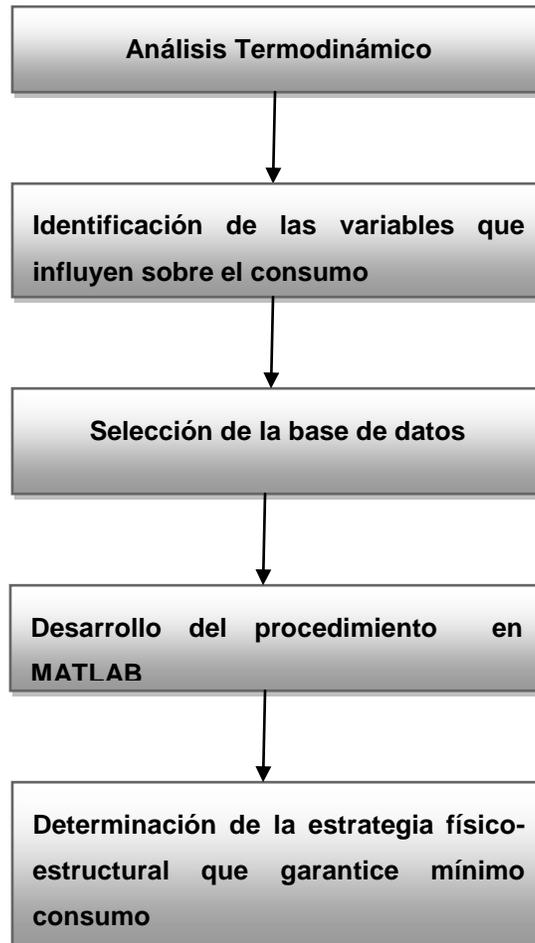


Figura 2.1: Esquema del procedimiento.

El análisis termodinámico del ciclo se realiza con el objetivo de analizar los principales parámetros de trabajo del mismo, así como los indicadores energéticos que lo caracterizan. Identificados los parámetros se procede a la

conformación de la base de datos a partir del catálogo del fabricante, seleccionándose enfriadoras de pequeña, mediana y gran capacidad de enfriamiento. Se definen las siguientes variables que influyen sobre la selección del equipamiento: temperatura de agua helada a la salida del evaporador (T_{se}), temperatura de condensación (T_{cond}), capacidad de enfriamiento (CAP), consumo de potencia (COMP) y eficiencia (COP).

Definidas las variables se procede a desarrollar un procedimiento para la selección de la estrategia físico estructural que garantice mínimo consumo. Como herramienta de trabajo se utiliza el software especializado MATLAB, dado la facilidad que brinda el mismo para el procesamiento de datos, modelación y optimización.

2.3 Análisis termodinámico de los componentes de un sistema de climatización centralizada.

A continuación se desarrolla el estudio termodinámico del sistema, identificándose las principales variables que influyen sobre su comportamiento energético, así como los principales indicadores de eficiencia.

En la figura 2.2 se muestran cada uno de los componentes del sistema con los flujos de trabajo asociados.

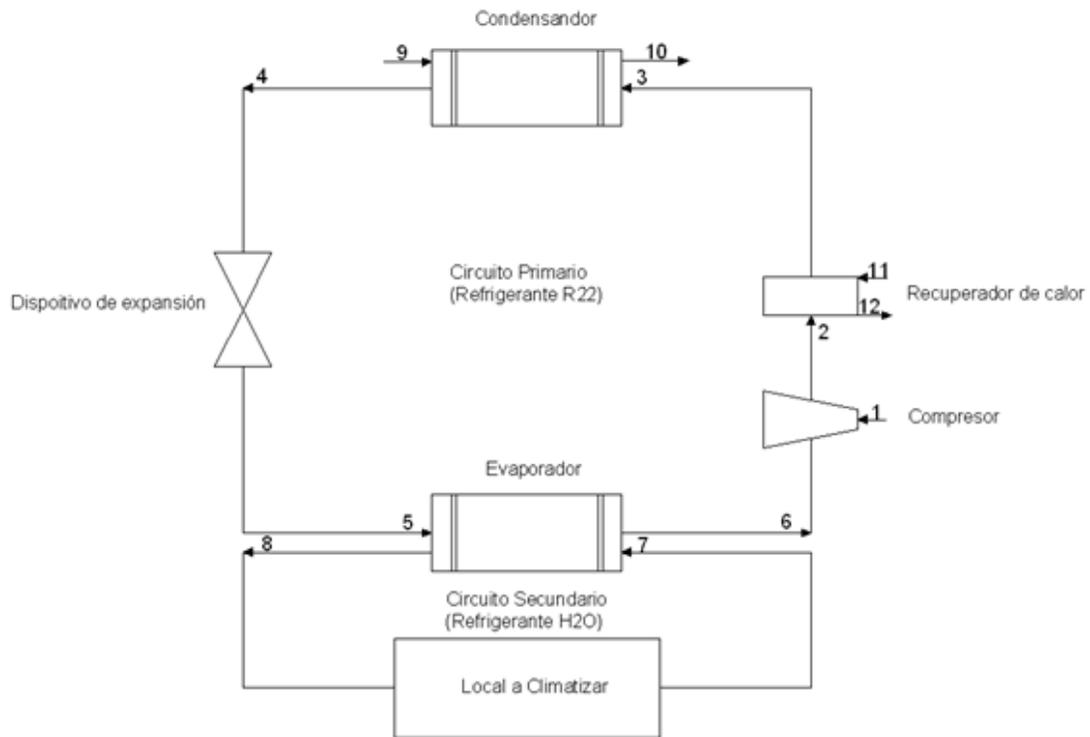


Figura 2.2: Esquema de análisis del sistema de climatización centralizado por agua helada.

➤ **Compresor**

Determinación de la potencia del compresor:

$$N_c = m_g * W_{real} \quad (2.1)$$

$$m_g = \frac{m_{H2O}(h_7 - h_8)}{(h_6 - h_5)} \quad (2.2)$$

Donde:

N_c : Potencia del compresor, [kW].

m_g : Flujo másico del refrigerante, [kg/s].

h_7, h_8 : Entalpía del agua a la entrada y salida del evaporador respectivamente, [kJ/kg].

h_5 : Entalpía del refrigerante a la entrada del evaporador, [kJ/kg].

m_{H_2O} : Flujo másico de agua a través del evaporador, [kg/s].

El compresor es el elemento del ciclo que más energía consume, por este motivo es de vital importancia una selección adecuada del mismo. Por lo general, existe una tendencia a utilizar compresores sobredimensionados para la aplicación que se requiere en las instalaciones de climatización, por lo que estos operan muy por debajo de su carga parcial afectándose la eficiencia del sistema.

➤ **Condensador**

Determinación de la temperatura de condensación:

$$T_{cond} = \frac{T_{10} - T_9}{\varepsilon_{cond}} + T_9 \quad (2.3)$$

Donde:

T_9 : Temperatura del aire a la entrada del condensador, °C.

T_{10} : Temperatura del aire a la salida del condensador, °C.

ε_{cond} : Efectividad térmica del condensador.

La determinación de la temperatura de condensación es importante ya que la misma influye en el consumo de potencia del compresor. Esta temperatura está influenciada por la temperatura ambiente, que es una variable no controlada. Un aumento de la temperatura de condensación trae consigo un aumento del

consumo de potencia de la instalación dado que aumenta el trabajo del compresor. Actualmente existen sistemas eficientes que permiten controlar esta variable (T_{cond}) a partir de variación del flujo de enfriamiento en el condensador (agua o aire).

➤ **Evaporador**

La temperatura a la salida de agua del evaporador es un parámetro clave en la operación del sistema, pues esta variable puede ajustarse en función de las necesidades reales de carga térmica.

- Determinación de la temperatura de evaporación:

$$T_{Evap} = T_8 - \frac{T_8 - T_9}{\varepsilon_{Evap}} \quad (2.4)$$

Donde:

T_8 : Temperatura del agua a la entrada del evaporador, °C.

T_9 : Temperatura del agua a la salida del evaporador, °C.

ε_{Evap} : Efectividad térmica del evaporador.

El flujo de agua en el evaporador se determina en función de la carga térmica a vencer en las habitaciones.

$$m_{H_2O} = \frac{Q}{(h_7 - h_8)} \quad (2.5)$$

Determinación de la capacidad frigorífica:

$$Q = q^* m_g \quad (2.6)$$

Donde:

q : Efecto refrigerante, [kJ/kg].

m_g : Flujo másico del refrigerante, [kg/s].

2.3.1 Principales indicadores energéticos:

Coeficiente de Funcionamiento del Ciclo (COP):

$$COP = \frac{q}{W_s} \quad (2.7)$$

$$q = h_5 - h_6 \quad (2.8)$$

Donde:

q : Efecto refrigerante, [kJ/kg].

Q : Capacidad de refrigeración, [kW].

N_c : Potencia del compresor, [kW].

h_5 y h_6 : Entalpía a la entrada y salida del evaporador respectivamente, [kJ/kg].

W_s : Trabajo del compresor, [kJ/kg].

m_g : Flujo másico del refrigerante, [kg/s].

Eficiencia Energética (Energy Efficiency Ratio, EER)

Se define como la relación entre el calor removido (carga frigorífica) y la potencia eléctrica total consumida:

$$EER = \frac{Q}{N_c} \quad (2.9)$$

La EER se relaciona con el COP mediante la siguiente expresión:

$$COP = \frac{EER}{3.412 \text{ BTU / Watt}} \quad (2.10)$$

Donde:

Q : Capacidad de refrigeración, [kW].

N_c : Potencia del compresor, [kW].

Eficiencia Energética Estacional (Seasonal Energy Efficiency Ratio, SEER)

$$SEER = \frac{\text{Calor removido en un periodo dado, Btu}}{\text{Energía eléctrica consumida, Watts - hora}} \quad (2.11)$$

2.4. Descripción del procedimiento propuesto para la selección de la estrategia físico estructural de mínimo consumo.

Alternativa de interconexión en paralelo

Este procedimiento se realiza con el objetivo encontrar la alternativa físico estructural de menor consumo energético dentro de una amplia gama de modelos de chillers. Se realizan combinaciones de una, dos, tres y cuatro enfriadoras conectadas en paralelo las cuales tienen que suplir la carga establecida por diseño con un mínimo de consumo de energía. Como herramienta informática se utiliza el software especializado MATLAB por las potencialidades que brinda el mismo en el trabajo con matrices.

Para el procesamiento de datos se trabajó con la información del catálogo técnico de FRIOCLIMA seleccionándose una amplia gama de enfriadoras de pequeña, mediana y gran capacidad de refrigeración, contemplándose en el estudio un total de 109 enfriadoras pertenecientes a los modelos que se muestran en la tabla siguiente (Ver tabla 2.1).

Tabla 2.1: Datos de las enfriadoras utilizadas en el procedimiento.

Modelo	Potencia	Capacidad
EAAS-R22-R407C	17 – 93 kW	5 – 25 TR
CHAMT-R134a.	124 – 352 kW	35-100 TR
CHAW-R134a	264 – 1004 kW	75 – 285 TR
CHAWT-R22-R407C	262 – 1683 kW	74 – 478 TR

Los datos de estos modelos se procesan en un documento Excel para su posterior trabajo en MATLAB. Dentro de las variables consideradas en el estudio se encuentran:

- Temperatura a la salida del evaporador (T_{se}). Estas enfriadoras operan con un rango que varía desde 5°C hasta 8°C .
- Temperatura de condensación (T_{cond}) 30 y 35°C , siendo una de las variables de entrada al programa.
- CAP: Es la capacidad de refrigeración de los diferentes tipos de enfriadoras.
- COMP: Potencia que consume el compresor.
- COP: Eficiencia de las enfriadoras.

De las variables antes mencionadas se definen como variables de entrada: la capacidad de refrigeración (CAP) a suplir en la edificación y T_{cond} , y como variables de salida: COMP, COP, T_{se} y el tipo de interconexión entre las enfriadoras garantizando que la suma de sus potencias frigoríficas supla la capacidad de refrigeración necesaria para la edificación.

Organizadas las hojas de cálculo en Excel se importan al MATLAB, creándose ocho matrices en las cuales se almacenan todos los datos de cada modelo para cada T_{se} y cada T_{cond} respectivamente. A partir de una T_{cond} se crean todas las combinaciones posibles para una, dos y tres enfriadoras y se buscan aquellas cuya capacidad total sea mayor o igual a la capacidad que se desea instalar, la cual es definida por el usuario.

La cantidad de combinaciones que se crean en el software para las distintas enfriadoras interconectadas (n) son:

- Para $n=1$ se crean 109 combinaciones.
- Para $n=2$ se crean 5886 combinaciones.
- Para $n=3$ se crean 209 934 combinaciones.
- Para $n=4$ se crean 5 563 251 combinaciones.

Después que se tienen todas las combinaciones que cumplen las condiciones de diseño (T_{cond} , CAP) se selecciona la de menor consumo. Para determinar el consumo total se calcula la sumatoria de los consumos de las enfriadoras presentes en cada combinación. En caso de que existan varias combinaciones con el mismo consumo mínimo, entonces se elige la que tenga mayor eficiencia. Para determinar la eficiencia total del conjunto se suman las eficiencias de cada enfriadora que lo integran.

Para el caso en que se desee evaluar la combinación de cuatro enfriadoras en paralelo primero se identifican todas las combinaciones de tres enfriadoras cuya capacidad total sea menor a la capacidad que se desea instalar, con el objetivo de disminuir el número de combinaciones para optimizar el tiempo de cálculo. Cuando se tienen todas las combinaciones de tres enfriadoras que cumplan la condición anterior entonces se crean las combinaciones de cuatro enfriadoras y se busca la de menor consumo. Si existieran varias de igual consumo entonces se selecciona la más eficiente.

El procedimiento descrito se realiza para cada T_{se} (5, 6, 7 y 8 °C), obteniéndose la mejor combinación para cada temperatura. Al final de este procedimiento es posible obtener combinaciones de hasta cuatro enfriadoras, de ellas se seleccionan las de menor consumo y como resultado se obtiene el número de enfriadoras a conectar en paralelo con sus respectivos parámetros de operación.

Alternativa de interconexión en serie

En el caso de la evaluación de enfriadoras en serie en base al mínimo consumo para vencer la capacidad de refrigeración de la instalación, se analizan combinaciones de dos enfriadoras pues según la literatura consultada^[7] el uso de más de dos enfriadoras conectadas en serie aumenta la resistencia al paso del fluido y esto provoca que aumente el consumo en el sistema de bombeo. El procedimiento a seguir es el siguiente, se establecen los dos escalones de enfriamientos para cada enfriadoras, pues estas no están ajustadas con el mismo set point, se define la temperatura ambiente (30 o 35 °C respectivamente) y la carga que debe suplir el sistema. A partir de estos datos se crean todas las posibles combinaciones para dos enfriadoras (5886 combinaciones), se seleccionan aquellas combinaciones cuya capacidad total sea mayor o igual a la

carga y se selecciona la combinación que garantice suplir la carga térmica con el mínimo consumo.

A partir de la evaluación físico estructural de la conexión en serie y en paralelo, se establece un punto comparativo en el programa desarrollado en MATLAB (Ver Anexo I) obteniéndose a partir de este la alternativa físico estructural más atractiva desde el punto de vista energético.

En la figura 2.3 se muestra el esquema de forma resumida que describe el procedimiento descrito para la selección de la alternativa físico estructural del sistema de climatización centralizado por agua helada, en base a mínimo consumo para vencer la carga térmica de la edificación.

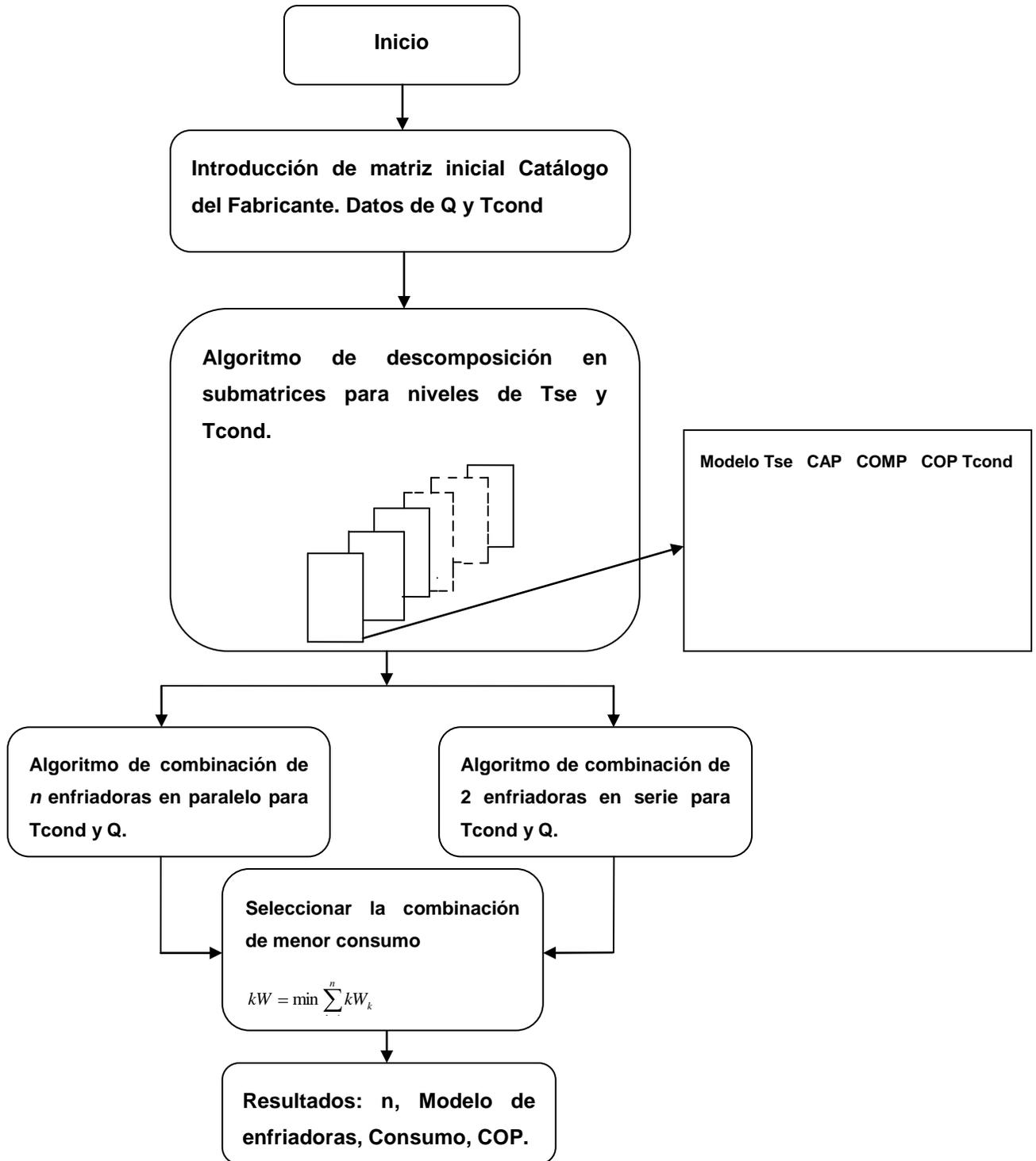


Figura 2.3: Algoritmo de cálculo utilizado en el Software.

Conclusiones Parciales Capítulo II

1. El análisis termodinámico de los componentes del sistema de climatización centralizado permitió identificar las principales variables que influyen en la selección del equipamiento, los cuales serán de mucha utilidad a la hora de proponer el procedimiento para la selección de la estrategia físico estructural que garantice menor consumo de potencia.
2. El procedimiento propuesto para selección de la estrategia físico estructural del sistema contempla dos posibilidades de interconexión serie y paralelo, evaluando hasta cuatro enfriadoras conectadas en paralelo, obteniéndose como resultado una amplia gama de variables (número de enfriadoras interconectadas, potencia frigorífica por enfriadoras, consumo de potencia absorbida por los compresores, temperatura de agua helada y eficiencia).
3. El procedimiento desarrollado en base a la amplia gama de variables que explora permite seleccionar dentro una línea de fabricante la interconexión de las enfriadoras que garantice menor consumo de potencia para la capacidad requerida por diseño.
4. La herramienta utilizada para la selección de la interconexión de las enfriadoras dentro una línea de fabricante fue el software especializado MATLAB. Dado su eficacia con el trabajo con matrices fue posible evaluar para un caso crítico de cuatro enfriadoras un total de 5 563 251 de combinaciones.

CAPITULO III

CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO MEDIANTE UN CASO DE ESTUDIO.

En este capítulo se realiza un caso de estudio con el objetivo de comprobar si la interconexión de las enfriadoras que operan en el Hotel Jagua está basada bajo un adecuado criterio físico estructural que garantice mínimo consumo de potencia para la carga térmica a vencer definida por diseño. El caso de estudio se realiza en el Hotel Jagua ya que dicha instalación turística es una de las de mayor consumo de energía por el sistema de climatización centralizado con el que cuenta, el cual es responsable de alrededor del 40 - 70% del consumo total de energía eléctrica que consume dicha instalación. Para la comprobación se utiliza el procedimiento propuesto en el cuerpo de este trabajo, el cual está soportado en ambiente MATLAB.

3.1 Caracterización del sistema de climatización centralizada por agua helada instalado en el Hotel Jagua de la provincia de Cienfuegos.

El sistema de climatización centralizada por agua helada del Hotel Jagua opera con dos enfriadoras marca CHAW-T 1402 de 105 Toneladas de Refrigeración (TR) cada una conectadas en paralelo. Los parámetros de trabajo son establecidos por el operario en función de la demanda térmica del edificio, con un ajuste de la temperatura de agua helada a 8⁰C a la salida de cada enfriadora y para una temperatura ambiente de 30 ⁰C.

Las características técnicas de dichas enfriadoras se pueden observar en el ANEXO II del presente trabajo.

A continuación se hace referencia al diseño de los principales componentes de estas enfriadoras.

➤ **Evaporador**

Son de tipo casco y tubo, multitubular, horizontal, de expansión seca, constituido esencialmente por una camisa exterior de tubo de acero de alta resistencia. La presión máxima por el lado del agua es de 10 bar y 24 bar por el lado del refrigerante. Este tipo de evaporador trae consigo una serie de mejoras desde el punto de vista de diseño con el objetivo de aumentar su eficiencia.

➤ **Compresores**

Los compresores son del tipo semiherméticos, de tornillo, apropiados para trabajar con R-22 y R-407C. El compresor y el motor están situados en el interior de una carcasa herméticamente sellada. El interior es accesible mediante tapas atornilladas, con lo que se consigue que sea hermético y accesible a la vez. La carcasa es de una sola pieza de fundición y aloja toda la parte motriz y elementos mecánicos en movimiento.

➤ **Condensadores**

Las unidades de condensación están dispuestas en “W”, con cabezales en chapa de acero galvanizado. Aletas de aluminio y tubos de cobre expansionados mecánicamente. Esto permite obtener un mejor aprovechamiento de la capacidad frigorífica, sin aumentar la potencia consumida. Los moto ventiladores de enfriamiento son axiales y permiten regular la velocidad por disminución de la tensión de alimentación hasta 60 voltios.

➤ **Recuperador de calor**

El recuperador de calor integrado al sistema está interconectado en serie con el condensador de la unidad, permitiendo obtener agua caliente para uso sanitario

u otra finalidad en la instalación. Estos tipos de recuperadores pueden aprovechar hasta el 30% del calor total rechazado.

➤ **Capacidades frigoríficas**

En la Tabla 3.1 se muestran las capacidades frigoríficas de esta enfriadora para un rango de temperatura de salida de agua helada entre 5 y 8 °C y diferente temperatura de aire a la entrada del condensador. Tomado de FRIOCLIMA [12]

Tabla 3.1: Capacidades frigoríficas de la enfriadora modelo CHAW-T 1402.

Modelo / Model	Tse ²	Temperatura del aire a la entrada del condensador / Air Inlet temperature on condenser								
		30°C			35°C			40°C		
		CAP ³	COMP ⁴	COP ⁵	CAP	COMP	COP	CAP	COMP	COP
		°C	kW	kW		kW	kW		kW	kW
CHAWT-1402	5	375.51	114.00	2.94	346.86	125.60	2.49	315.72	138.40	2.08
	6	386.97	114.60	3.02	357.93	126.20	2.56	326.23	139.20	2.14
	7	398.62	115.20	3.09	369.20	127.00	2.63	336.92	139.80	2.20
	8	413.52	116.00	3.19	383.53	127.80	2.71	350.68	140.80	2.27

Donde:

Tse: Temperatura del agua a la salida del evaporador.

CAP: Capacidad frigorífica de la unidad.

COMP: Potencia absorbida por los compresores.

COP: Eficiencia de la unidad.

3.2 Caso estudio Hotel Jagua:

El caso de estudio se basa en la comparación entre la estrategia de interconexión del sistema de climatización centralizado instalado actualmente en el Hotel Jagua y el sistema conceptual obtenido por medio del procedimiento propuesto, tomando como patrón de comparación la potencia absorbida por los compresores. En el epígrafe anterior fueron detalladas las características del sistema instalado actualmente.

Para desarrollar el procedimiento se toma como punto de partida la línea de fabricación FRIOCLIMA, considerando un total de 109 enfriadoras, con las que se crean las matrices (descrito en Epíg. 2.4) y se evalúa la posibilidad de conectar hasta cuatro enfriadoras en paralelo para vencer la carga térmica, o dos enfriadoras conectadas en serie, dado que no se justifica una instalación de más de dos enfriadoras conectas en serie.^[7]

Se implementa la función desarrollada en MATLAB que para el caso crítico de cuatro enfriadoras conectadas en paralelo evalúa un total de 5 563 251 combinaciones. El resultado obtenido para este caso fue que para vencer la carga térmica de la edificación para una capacidad igual a la instalada actualmente de 826 kW, la conexión conceptual sería de dos enfriadoras modelo CHAWT-1802 y CHAWT-1001 respectivamente, de diferentes capacidades. Esta combinación es la de mínimo consumo de potencia de los compresores.

A continuación se muestra en las tablas 3.2 y 3.3 las capacidades frigoríficas de ambas enfriadoras, cuyas características técnicas se pueden observar en el ANEXO II. El diseño de los componentes de estas enfriadoras se expone en el epígrafe 3.1 ya que no difieren del diseño de las enfriadoras instaladas actualmente.

Tabla .3.2: Capacidades frigoríficas de la enfriadora modelo CHAWT-1802.

Modelo / Model	Tse ²	Temperatura del aire a la entrada del condensador / Air Inlet temperature on condenser								
		30°C			35°C			40°C		
		CAP ³	COMP ⁴	COP ⁵	CAP	COMP	COP	CAP	COMP	COP
		°C	kW	kW		kW	kW		kW	kW
CHAWT-1802	5	483.99	144.00	2.98	447.13	158.70	2.52	406.83	174.80	2.10
	6	498.80	144.80	3.06	461.36	159.50	2.60	420.30	175.70	2.17
	7	513.69	145.60	3.13	475.78	160.40	2.66	434.24	176.60	2.23
	8	532.79	146.60	3.23	494.31	161.40	2.75	451.91	177.80	2.30

Tabla .3.3: Capacidades frigoríficas de la enfriadora modelo CHAWT-1001.

Modelo / Model	Tse ²	Temperatura del aire a la entrada del condensador / Air Inlet temperature on condenser								
		30°C			35°C			40°C		
		CAP ³	COMP ⁴	COP ⁵	CAP	COMP	COP	CAP	COMP	COP
		°C	kW	kW		kW	kW		kW	kW
CHAWT-1001	5	266.92	78.80	3.02	246.58	86.80	2.56	224.33	95.60	2.13
	6	275.04	79.20	3.09	254.41	87.20	2.63	231.78	96.10	2.20
	7	283.25	79.60	3.18	262.34	87.70	2.69	239.42	96.60	2.25
	8	293.76	80.20	3.28	272.56	88.30	2.79	249.16	97.20	2.33

Para realizar la comprobación de la interconexión de las enfriadoras se trabajó con el procedimiento descrito en el capítulo anterior realizado en el software especializado MATLAB. Para una capacidad de refrigeración igual a la establecida por diseño de las enfriadoras existentes en el Hotel Jagua, con el modelo desarrollado se obtiene la mejor configuración en serie y paralelo que satisface esa capacidad para un mínimo consumo de potencia. Seleccionándose de ambas la alternativa físico estructural de menor consumo.

Los resultados obtenidos durante la comprobación del sistema de climatización centralizado se exponen en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Resultados obtenidos del caso de estudio.

Cantidad Enfriadoras	Modelo	Tse (°C)	CAP (kW)	COMP (kW)	COP	Tamb (°C)
Enf-1	CHAWT-1802	8	532.79	146.60	3.23	30
Enf-2	CHAWT-1001	8	293.76	80.20	3.28	30
Totales	-	8	826.55	226.80	6.51	30

Nota: Se pueden observar las características físicas de estas enfriadoras en el anexo II.

Como se puede observar se obtiene como resultado dos enfriadoras de diferentes capacidades de refrigeración del mismo modelo dentro de la línea del fabricante^[12]. El procedimiento ofrece como mejor alternativa la interconexión en paralelo, para una temperatura agua helada de 8°C a la salida de evaporador.

3.2.1 Análisis de resultados:

Estableciendo una comparación entre la estrategia conceptual de interconexión obtenida mediante procedimiento propuesto (Ver Tabla 3.4) y las enfriadoras instaladas actualmente en el hotel (Ver Tabla 3.1) se puede apreciar que de acuerdo a los resultados obtenidos, la nueva configuración ofrece mayores ventajas que las que operan actualmente, ya que la potencia absorbida por los compresores disminuye en un 2,24% lo que traería consigo un significativo ahorro en el consumo de potencia del compresor, lo cual se traduciría en ahorro de energía de la edificación, tan importante en este tipo de sistemas de climatización.

Otra de las posibilidades que nos brinda la configuración asimétrica de capacidades instaladas es que el sistema de climatización se puede ajustar en mejor medida a la demanda térmica de la edificación durante el día, trayendo

esto consigo que el sistema no opere muy por debajo de la carga nominal del equipamiento, lo cual trae consigo un trabajo ineficiente del mismo. La opción de instalar capacidades asimétricas ofrece la ventaja que en horarios de la madrugada o en época de invierno, donde las cargas térmicas a vencer no son altas, se pudiera trabajar con la enfriadora de menor capacidad, lográndose un ajuste más eficiente del sistema ante las variaciones de carga térmica de la edificación ya que las enfriadoras van a operar lo más cercano a su máxima capacidad.

3.3. Análisis energético y económico de la estrategia conceptual de interconexión propuesta:

En este epígrafe se realiza un análisis energético y económico para considerar las oportunidades de ahorro que nos representa las enfriadoras obtenidas en el desarrollo del procedimiento sobre las enfriadoras instaladas actualmente en la edificación.

3.3.1 Análisis energético.

Se realiza este análisis con el propósito de comparar el gasto energético de las enfriadoras que operan actualmente en la instalación y las enfriadoras que se proponen en el desarrollo del presente trabajo, para ello se asume que estos sistemas trabajan 18 horas diarias.

Análisis del Consumo Energético (CE) de las enfriadoras CHAW-T 1402 instaladas actualmente.

$$CE = \frac{N_c}{\eta} h_d = \frac{232}{0.90} * 18$$
$$CE = 4640 kWh \tag{3.1}$$

Donde:

N_c : Potencia consumida por el compresor, [kW].

η : Eficiencia del motor eléctrico del compresor.

h_d : Horas de trabajo diarias del compresor (asumidas).

Análisis del Consumo Energético (CE) de las enfriadoras CHAWT-1802 y CHAWT-1001 obtenidas en el procedimiento.

$$CE = \frac{N_c}{\eta} h_d = \frac{226.80}{0.90} * 18$$
$$CE = 4536 kWh$$

Como se puede observar las enfriadoras propuestas representan un ahorro de 104 kWh diario, esto significa un ahorro anual de 37 960 kWh, significativo para la entidad.

3.3.2 Análisis económico.

Para analizar el impacto económico que representaría el cambio de la estructura de interconexión actual del sistema por la estrategia conceptual de interconexión obtenida mediante el procedimiento propuesto, se realiza el análisis económico del caso de estudio con vistas a determinar cuánto se hubiera ahorrado la cadena hotelera si se hubiera realizado un estudio previo.

Análisis económico de los gastos energéticos de las enfriadoras CHAW-T 1402 instaladas actualmente.

$$\begin{aligned}G &= CE * S = 4640 * 0.0945 \\G &= 438.48 \text{ CUC/día} \\G_{\text{anual}} &= 160045 \text{ CUC}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Donde

G: Gastos energéticos de las enfriadoras; CUC.

S : Tarifa promedio diaria; $\left[\frac{\text{CUC}}{\text{kWh}} \right]$.

CE : Consumo energético de las enfriadoras.

Análisis económico de los gastos energéticos de las enfriadoras CHAWT-1802 y CHAWT-1001 obtenidas en el desarrollo del procedimiento.

$$\begin{aligned}G &= CE * S = 4536 * 0.0945 \\G &= 428.65 \text{ CUC/día} \\G_{\text{anual}} &= 156457.98 \text{ CUC}\end{aligned}$$

Al realizar la comparación entre los gastos energéticos del sistema instalado y el sistema obtenido mediante el procedimiento propuesto, se puede observar que se logra un ahorro de 9.83 CUC diario, lo que representa un ahorro anual de 3587.95 CUC.

3.4 Determinación del efecto indirecto de emisiones de CO₂ al medio ambiente.

Con el objetivo de evaluar y comparar el impacto ambiental de la estrategia conceptual de interconexión obtenida mediante el procedimiento propuesto

respecto a las enfriadoras que operan actualmente en el hotel turístico, se determina el impacto global (TWEI). Este Indicador permitirá comparar las emisiones indirectas de CO₂ entre ambos sistemas.

$$TWEI = E_d + E_i \quad (3.3)$$

Donde:

E_d: efecto directo, kg CO₂/año.

E_i: efecto indirecto, kg CO₂/año.

Como ambos sistemas no emiten directamente CO₂, el efecto directo es anulado ($E_d = 0$), quedando el impacto global total en función del efecto indirecto.

$$TWEI = E_i = N_c * e_{CO_2} \quad (3.4)$$

Donde

e_{CO_2} : Emisiones de CO₂ por kW-h, según normas internacionales de medio ambiente $e_{CO_2} = 0.94 \text{ kg} / \text{kWh}$.^[13]

N_c : Potencia consumida por el compresor, [kw]

Análisis de las emisiones indirectas de CO₂ de las enfriadoras instaladas actualmente CHAW-T 1402.

Sustituyendo en la ecuación 3.4 se obtiene como resultado que emisiones indirectas de CO₂ del sistema instalado actualmente con 232 kW de potencia consumida por el compresor en la instalación es:

$$TWEI = E_i = 218.08 \text{ kg/h}$$

Análisis de las emisiones indirectas de CO₂ de las enfriadoras CHAWT-1802 y CHAWT-1001 obtenidas en el desarrollo del procedimiento.

De la ecuación 3.4 para un consumo de potencia de los compresores de 226,80 kW se obtiene como resultado que las emisiones indirectas de CO₂ de las enfriadoras obtenidas del procedimiento es de:

$$TWEI = E_i = 213,19 \text{ kg/h}$$

Considerándose la estrategia conceptual de interconexión obtenida como resultado del procedimiento propuesto se reducirían en 4.89 kgCO₂/h, lo que representa una disminución en un 2,24% de las emisiones indirectas de CO₂ al medio ambiente.

Conclusiones Parciales Capítulo III

1. Se pudo comprobar que las enfriadoras instaladas actualmente en la edificación no fueron seleccionadas bajo un adecuado criterio físico estructural.
2. Desarrollado el procedimiento se obtiene como resultado que la mejor combinación de enfriadoras a instalar es una configuración asimétrica de dos enfriadoras de los modelos (CHAWT-1802) y (CHAWT-1001) respectivamente conectadas en paralelo, con una temperatura de agua helada a la salida del evaporador de 8 °C, que satisfacen la capacidad total instalada.
3. Se reducen los consumos energéticos en un 2,24%, dejando de emitir al medio 4.89 kgCO₂/h.
4. Al realizar el análisis económico de los gastos energéticos, se pudo constatar que con la propuesta obtenida por el procedimiento se reducirían los gastos energéticos en 3587.95 CUC anual.

CONCLUSIONES

Conclusiones

1. En la bibliografía consultada se pudo constatar la existencia de disímiles estrategias físico-estructurales con el objetivo de minimizar el consumo de energía en sistemas de climatización centralizada, pero no se cuenta con un procedimiento que permita atendiendo a la capacidad a instalar seleccionar la alternativa de interconexión más económica desde el punto de vista energético.
2. El procedimiento propuesto en el desarrollo del trabajo para selección de la estrategia físico estructural del sistema ofrece la opción de evaluar dos posibilidades de interconexión de las enfriadoras, considerando hasta cuatro enfriadoras conectadas en paralelo y dos enfriadoras conectadas en serie. Obteniéndose como resultado una amplia gama de variables (número de enfriadoras interconectadas, potencia frigorífica por enfriadoras, consumo de potencia absorbida por los compresores, temperatura de agua helada y eficiencia).
3. Se obtiene que la mejor combinación de enfriadoras a instalar es una configuración asimétrica de dos enfriadoras de los modelos (CHAWT-1802) y (CHAWT-1001) respectivamente conectadas en paralelo las cuales satisfacen la capacidad total instalada.
4. Se reducen los consumos energéticos en un 2,24%, dejando de emitir al medio $4.89 \text{ kgCO}_2/h$. Al realizar el análisis económico de los gastos energéticos, se pudo constatar que con la propuesta obtenida por el procedimiento se reducirían los gastos energéticos en 3587.95 CUC anual.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones

1. Incorporar al procedimiento otras estrategias físico estructurales de interconexión.
2. Explorar la posibilidad de establecer indicadores termodinámicos que caractericen las estrategias de interconexión física estructurales.

*REFERENCIAS
BIBLIOGRAFICAS*

Referencias Bibliográficas:

1. López H, L. (2006). *Predicción del consumo energético de Hoteles Turísticos aplicando la simulación termodinámica y la inteligencia artificial*. Tesis de maestría, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos. Cuba.
2. Fletcher Christian Jacobs. (2007). *Estrategia de operación del sistema de climatización centralizada por agua helada del hotel Jagua*. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos. Cuba.
3. Dass Youssef Khalil. (2007). *Análisis termodinámico para la producción de agua caliente sanitaria en los sistemas de climatización centralizada*. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
4. Bravo Hidalgo, Debrayan. (2008). *Modelo termodinámico del sistema de climatización del Hotel Jagua*. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos Cuba.
5. McQuay. (2002). *Chiller Plant Design*.
6. Mikhail Dwayne Akeino Reid. (2009). *Evaluación de estrategias físico-estructurales de sistemas de climatización centralizada*. Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos Cuba.
7. Trane Air Conditioning Clinic. (2001). *Chilled-Water System*.
8. *The ASHRAE Handbook CD*. (2009).
9. Sistemas de climatización centralizada. (n.d.). Retrieved from at:<http://www.emc.uji.es/asignatura/obtener.php?letra=9&codigo=29&fichero=1082540407929>
10. Bitondo, Michael. (1999). *Chiller Control Plant*. Syracuse New York: Carrier Corporation.

11. Colectivo de Autores. (n.d.). Análisis comparativo de estrategias de operación en sistemas de climatización centralizados por agua helada. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos Cuba.
12. *Air cooled screw wáter chillers*. (2006). Frioclima catálogo técnico.
13. Armas, Valdes. J. Carlos. (2008.). Procedimiento para la optimización de sistemas de climatización centralizados por agua helada desde la etapa de diseño conceptual. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos Cuba.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografía:

- Air cooled screw wáter chillers.* (2006). . Frioclima catálogo técnico.
- ARTI Announces Final Report on the Benefits of Variable Primary for Chilled Water Systems. (n.d.). .
- Bitondo, Michael. (1999). *Chiller Control Plant.* Syracuse New York: Carrier Corporation.
- Bravo Hidalgo, Debrayan. (2008). *Modelo termodinámico del sistema de climatización del Hotel Jagua.* Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos. Cuba.
- Carrier Air Conditioning Company. (1972). *Manual de Aire Acondicionado.*
- Colectivo de Autores. (2004a). Beyeene, Assfaww. A Preliminary Assessment of Strategies to Raise the Off-Design Energy Efficiency of Chiller Machines. Energy Institute Department of Mechanical Engineering San Diego State University, CIEE Project Highlight.
- Colectivo de Autores. (2004b). *Chiller- Plant Energy Performance York.* Corporation HVAC&R Engineering.
- Colectivo de Autores. (2008a). Inteligencia artificial aplicada a la reducción del consumo energético de un sistema de climatización por agua helada en un hotel turístico.
- Colectivo de Autores. (2008b). Procedimiento para la optimización del diseño conceptual de sistemas de climatización centralizada por agua helada.
- Colectivo de Autores. (2009). *Temas avanzados de refrigeración y climatización.*
- Colectivo de Autores. (2003, INC). Variable Speed primary chilled water pump control with two way valve direct return system. Powersav ITT Industries.
- Colectivo de Autores. (n.d.). Análisis comparativo de estrategias de operación en sistemas de climatización centralizados por agua helada. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente Universidad Carlos Rafael Rodríguez Cienfuegos.
- Colectivo de Autores. (n.d.). Análisis comparativo haciendo uso de la segunda Ley de la segunda termodinámica entre dos sistemas de compresión de vapor. Centro de

Estudios de Energía y Medio Ambiente Universidad Carlos Rafael Rodríguez Cienfuegos.

Colectivo de Autores. (n.d.). Influencia de las principales variables climatológicas en la operación de los sistemas de climatización por agua helada. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente Universidad Carlos Rafael Rodríguez Cienfuegos.

Dass Youssef Khalil. (2007). *Análisis termodinámico para la producción de agua caliente sanitaria en los sistemas de climatización centralizada*. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos. Cuba.

Fletcher Christian Jacobs. (2007). *Estrategia de operación del sistema de climatización centralizada por agua helada del hotel Jagua*. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos. Cuba.

Lopez H, L. (2006). *Predicción del consumo energético de Hoteles Turísticos aplicando la simulación termodinámica y la inteligencia artificial*. Tesis de maestría, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos. Cuba.

McQuay. (2002). *Chiller Plant Design*.

Mikhail Dwayne Akeino Reid. (2009). *Evaluación de estrategias físico-estructurales de sistemas de climatización centralizada*. Universidad Carlos Rafael Rodríguez Cienfuegos Cuba.

Parallel Chiller Sequencing. (n.d.). .

Related Efficiency Upgrades Chiller Sequencing Decoupler Systems. (n.d.). . Retrieved from <http://tristate.apogee.net/cool/cfrcc.asp>.

Sistemas de climatización centralizada. (n.d.). . Retrieved from at: <http://www.emc.uji.es/asignatura/obtener.php?letra=9&codigo=29&fichero=1082540407929>.

Stocker F, W. (1985). *Refrigeración y Acondicionamiento de Aire*.

The ASHRAE Handbook CD. (2009). .

Trane Air Conditioning Clinic. (2001). *Chilled-Water System*;

ANEXOS

Anexo I

Anexo I: Datos del programa desarrollado en MATLAB:

```
function [varargout] = mtr(CAP,tamb,Tse1,Tse2,cb)
n = nargin;
% [filename, pathname] = uigetfile( ...
%     {'*.xls;*.xlsx', 'Excel Files (*.xls, *.xlsx); ...
%     '*.*',          'All Files (*.*)'}, ...
%     'Selecciona los Datos');
% [Data, txt] = xlsread([pathname filename]);
S = load('-mat', 'Datos Rna.mat');
Data = S.Data;

if n == 0
tamb = 30; % datos de entrada
% tamb = 1 ---> tamb de 30
% tamb = 2 ---> tamb de 35
CAP = 500; % Capacidad a vencer
Tse1 = 5;
Tse2 = 6;
disp(['Caso ejemplo para CAP = ' num2str(CAP) ' y una tamb = ' num2str(tamb)]);
% combinación paralelo
disp('Combinación en paralelo');
MinCp = paralelo (Data,CAP,tamb)
% combinación serie
disp('Combinación en serie')
disp(['Tse1 = ' num2str(Tse1) ' y una Tse2 = ' num2str(Tse2)]);
MinCs = serie (Data,tamb,Tse1,Tse2)
elseif n == 2
```

```
[MinC,D] = paralelo(Data,CAP,tamb);
elseif n == 4
MinC = serie(Data,tamb,Tse1,Tse2);
elseif n == 5
if strcmpi(c,'p')
[MinC,D] = paralelo (Data,CAP,tamb);
elseif strcmpi (cb,'s')
MinC = serie(Data,tamb,Tse1,Tse2);
elseif strcmpi(cb,'sp')
[MinC,D] = paralelo (Data,CAP,tamb);
MinCs = serie (Data,tamb,Tse1,Tse2);
else
error('Parámetros de entrada cb no valido')
end
else
error('Parámetros de entrada no válidos');
end

nout = nargout;
if nout == 1
varargout{1} = MinC;
elseif (nout == 2)&&(n==2)
varargout{1} = MinC;
varargout{2} = D;
elseif (nout >= 2)&&(n > 2)
varargout{1} = MinC;
varargout{2} = MinCs;
varargout{3} = D;
end
```

```
function [MinC,Data] = paralelo(Dt,CAP,tamb)
% Combinaciones en paralelo
% M ---> Matriz con los datos
% CAP ---> Capacidad que se desea instalar
% tamb ---> Temperatura ambiente
maxCap = max(Dt(:,3));
if 4*maxCap < CAP
error('La capacidad es muy elevada')
end

M = GetMatrizDatos(Dt, tamb);
h = waitbar(0,'Espere, Calculando tiempo restante ... Paralelo');
tic
for l = 1:4,
% ciclo de temperatura de salida
cap = [];
mincap = min(M{l}(2:end,3));
t(l,1) = toc;waitbar(1*l/25, h);
lm=length(M{l}(:,3));
cap = M{l}(:,3)*ones(1,lm);
cap = cap + cap.';
cap = tril(cap); cap(find(cap == 0)) = nan; cap(1) = 0;

t(l,2) = toc;waitbar(2*l/25, h);
lc = length(cap(:));
cap = cap(:)*ones(1,lm)+(M{l}(:,3)*ones(1,lc)).';
cap = reshape(cap,[lm lm lm]);

t(l,3) = toc;waitbar(3*l/25, h);
```

```

[a,b,c] = size(cap);
B = [];
for Q = 1:c,
    Tr = zeros(a,b);
    Tr(Q:a,Q:b) = tril(cap(Q:a,Q:b,Q));
    B(:,:,Q) = Tr;
end
B (find(B == 0)) = nan;
cap = B;

% combinaciones de 3 enfriadoras
try
ind = find(cap >= CAP);
% Buscando todas las combinaciones que superan la capacidad necesaria
[i,j,k] = ind2sub([a b c],ind);
% Buscando los índices de las enfriadoras
cmp = M{i}(i,4)+M{j}(j,4)+M{k}(k,4);
% Calculando el consumo de cada combinación
mn = min(cmp);
% Buscando el mínimo consumo de las combinaciones seleccionadas
idc = find(cmp == mn);
% Buscando las combinaciones con el mismo consumo para analizar la
eficiencia
cop = M{i}(i(idc),5) + M{j}(j(idc),5) + M{k}(k(idc),5);
[mnc,id] = max(cop);
% Buscando la máxima eficiencia

indice{i} = [i(idc) j(idc) k(idc) mn*ones(size(idc)) cop;...
i(idc(id)) j(idc(id)) k(idc(id)) mn mnc];
Mx = [M{i}(i(idc(id)),:);M{j}(j(idc(id)),:);M{k}(k(idc(id)),:);];

```

```

sm = sum(Mx);sm([1:2 end])=0;
C(:,:,l)=[Mx; sm];
catch
C(:,:,l) = nan*ones(4,5);
disp(['No se encontraron combinaciones de hasta 3 enfriadoras para T: '
num2str(l+4)])
end

t(l,4) = toc;waitbar(4*l/30, h);

% combinaciones de 4 enfriadoras
try
cap(:,:,1) = nan;cap(:,1,:) = nan;cap(1,,:) = nan;
% indm = find((0 < cap) & (cap <= (CAP-mincap)));
% li = length(indm);
% cap4 = cap(indm)*ones(1,lm) + ([nan; M{l}(2:end,3)]*ones(1,li)).';
indm = find(0 < cap & cap < CAP);
if isempty(indm)
indm = find(0 < cap & cap < (CAP+0.35*CAP));
end
li = length(indm);
cap4 = cap(indm)*ones(1,lm) + ([nan; M{l}(2:end,3)]*ones(1,li)).';

t(l,5) = toc;waitbar(5*l/30, h);

ind4 = find(cap4 >= CAP);
[i4,j4]=ind2sub(size(cap4),ind4);
[i,j,k] = ind2sub([a,b,c],indm(i4));
cmp4 = M{l}(i,4)+M{l}(j,4)+M{l}(k,4)+M{l}(j4,4);
[mn4]=min(cmp4);

```

```

id4 = find(cmp4 == mn4);
cop4 = M{l}(i(id4),5)+M{l}(j(id4),5)+M{l}(k(id4),5)+M{l}(j4(id4),5);
[mnc4, idc4] = max(cop4);
indice4{l} = [i(id4) j(id4) k(id4) j4(id4) mn4*ones(size(id4)) cop4;...
i(id4(idc4)) j(id4(idc4)) k(id4(idc4)) j4(id4(idc4)) mn4 mnc4];
Mx = [M{l}(i(id4(idc4)),:);M{l}(j(id4(idc4)),:);M{l}(k(id4(idc4)),:);M{l}(j4(id4(idc4)),:)];
sm = sum(Mx);sm([1:2 end])=0;
C4(:, :, l)=[Mx; sm];
catch
C4(:, :, l) = nan*ones(5,6);
disp(['No se encontraron combinaciones de 4 enfriadoras para T: ' num2str(l+4)])
end
t(l,6) = toc;
waitbar(6*/30, h, ['Tiempo restante ... ' num2str((4-l)*(t(l,6)-t(l,1)) + 1) '
segundos, Paralelo']);
end

% buscar la mejor combinación en paralelo
[Cm,mi] = min(C(end,4,:));
[Cm4,mi4] = min(C4(end,4,:));
if Cm <= Cm4
MinC = C(:, :, mi);
elseif Cm > Cm4
MinC = C4(:, :, mi4);
elseif isnan(Cm)&&~isnan(Cm4)
MinC = C4(:, :, mi4);
elseif isnan(Cm4)&&~isnan(Cm)
MinC = C(:, :, mi);
else
MinC = [];

```

```
end
```

```
close(h);
```

```
[a,b] = size(MinC);
```

```
ind = [];
```

```
for l = 1:a-1
```

```
if MinC(l,1) == 0
```

```
ind = [ind l];
```

```
end
```

```
end
```

```
MinC(ind,:) = [];
```

```
Data.Comb3.Datos = C;
```

```
Data.Comb3.Indice = indice;
```

```
Data.Comb4.Datos = C4;
```

```
Data.Comb4.Indice = indice4;
```

```
Data.MinC = MinC;
```

```
Data.Time = t;
```

```
end
```

```
function [Cserie,Dta] = serie(Dt,tamb,Tse1,Tse2)
```

```
% combinaciones en series
```

```
% Tse1 = 1;
```

```
% Tse2 = 2;
```

```
tic
```

```
M = GetMatrizDatos(Dt, tamb, .35, [Tse1 Tse2]);
```

```
h = waitbar(0,'Espere, Creando todas las combinaciones ... serie');
```

```
it1 = 1;
```

```
it2 = 2;
```

```

lm1 = length(M{it1}(:,3));
% Tse1
lm2 = length(M{it2}(:,3));
% Tse2
capS = M{1}(:,3)*ones(1,lm2);
capS = capS + [M{2}(:,3)*ones(1,lm1)].';
if lm1 < lm2
capS = capS.';
[lm1,lm2] = size(capS);
it1 = 2;
it2 = 1;
end
capS = tril(capS); capS(find(capS == 0)) = nan; capS(1) = 0;

waitbar(.3,h,'Espere, Buscando las combinaciones q" superan el CAP... serie');
try
indS = find(capS >= CAP);
% Buscando todas las combinaciones que superan la capacidad necesaria
[i,j] = ind2sub([lm1 lm2],indS);
% Buscando los índices de las enfriadoras
cmps = M{it1}(i,4)+M{it2}(j,4);
% Calculando el consumo de cada combinación
waitbar(.6,h,'Espere, Buscando el menor consumo ... serie');
mn = min(cmps);
% Buscando el mínimo consumo de las combinaciones seleccionadas
idc = find(cmps == mn);
cops = M{it1}(i(idc),5) + M{it2}(j(idc),5);
[mnc,id] = min(cops);
indiceS = [i(idc) j(idc) mn*ones(size(idc)) cops;...
i(idc(id)) j(idc(id)) mn mnc];

```

```
Mx = [M{it1}(i(idc(id)),:);M{it2}(j(idc(id)),:)];
sm = sum(Mx);sm([1:2 end])=0;
Cserie = [Mx; sm];
catch
Cserie = [];
indiceS = [];
disp(['No existen combinaciones disponibles para la capacidad ' num2str(CAP)])
end
waitbar(.9,h,'Terminando ... serie');
close(h);
t = toc;
Dta.Datos = Cserie;
Dta.Indice = indiceS;
Dta.Time = t;
end
```

```
function t = gettamb(tamb)
if tamb == 30
t = 1;
elseif tamb == 35
t = 2;
elseif (tamb == 1)||(tamb == 2)
t = tamb;
else
error('La temp. ambiente debe ser 30 o 35 oC');
end
end
```

```
function Tout = gettse(Tse)
```

```
if (Tse >= 5)&&(Tse <= 8)
    Tout = Tse - 4;
elseif Tse <= 4
    Tout = Tse;
else
    error('Valor de Tse no valido');
end
end
```

```
function M = GetMatrizDatos(Data, tamb, Pcto, Tse)
M = [];
ni = nargin;
switch ni
case 2
    Pcto = .35;
case 1
    tamb = 30;
    Pcto = .35;
case 0
    error('Faltan parámetros')
End
```

```
maxCap = max(Data(:,3));
if Pcto*CAP > maxCap
    Pcto = 0;
end
```

```
if ni <= 3
for l = 1:4
    Tmp = Data(find(Data(:,6) == tamb),:);
```

```
M{I} = [[0 I+4 0 0 0 tamb]; Tmp((find((Tmp(:,2) == (I+4))&(Tmp(:,3) >= Pcto*CAP))),:);
```

```
end
```

```
else
```

```
for I = 1:length(Tse)
```

```
  Tmp = Data(find(Data(:,6) == tamb),:);
```

```
  M{I} = Tmp((find((Tmp(:,2) == Tse(I))&(Tmp(:,3) >= Pcto*CAP))),:);
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
% Calcular los indices
```

```
% k = ceil(ind./a./b);
```

```
% res = rem(ind-1,a*b);
```

```
% j = floor(res./a)+1;
```

```
% i = rem(res,a)+1;
```

Anexo II

Tabla 1: Características técnicas del modelo de enfriadora CHAW-T 1402.

Unidad / Unit	CHAWT ¹											
	1001 1001-E	1002 1002-E	1102 1102-E	1202 1202-E	1302 1302-E	1402 1402-E	1502 1502-E	1602 1602-E	1604 1604-E	1802 1802-E	2002 2002-E	
Componentes / Components:												
Datos generales de la unidad / Unit general data:												
Capacidad frigorífica ² / Unit capacity ² , kW	R-22	262	281	300	318	344	369	398	427	439	476	525
	R-407C	240	261	276	291	315	338	364	391	407	436	480
Peso aproximado / Aproximated weight, kg	3180	3470	3600	3910	4100	4135	4200	4230	4410	4890	5015	
Volumen aproximado / Aproximated volume, m ³	15.8	15.8	15.8	15.8	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2	
Compresores de tornillo / Twin screw compressors:												
Potencia nominal motor / Motor nominal size, HP	1x100	2x50	1x50 1x60	2x60	1x60 1x70	2x70	1x70 1x80	2x80	4x40	1x80 1x100	2x100	
Cantidad por unidad / Quantity per unit	1	2	2	2	2	2	2	2	4	2	2	
Tipo de arranque ³ / Type of start ³	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
Condensadores / Condensers:												
Baterías por unidad / Coils per unit	4	4	4	4	8	8	8	8	8	8	8	
Diámetro exterior de tubos / Outlet tube diameter, pulgadas	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	
Aletas por pulgada / Fins per inches	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	
Ventiladores de los condensadores / Condenser fans:												
Tipo / Type	Axial / Axial											
Cantidad por unidad / Quantity per unit	4	4	4	4	8	8	8	8	8	8	8	
Cantidad total de aire / Total airflow, m ³ /h	96000	96000	96000	96000	147000	147000	147000	147000	147000	192000	192000	
Potencia total / Total size, kW	8.8	8.8	8.8	8.8	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	17.6	17.6	
RPM a 60 Hz / RPM at 60 Hz	1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010	
Evaporador / Evaporator:												
Tipo / Type	Casco y tubo / Shell and tube											
Cantidad / Quantity	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Circuitos de refrigeración / Refrigerant circuits	1	2	2	2	2	2	2	2	4	2	2	
P. máx. de trab. lado agua / Max. water side pressure, kg/cm ²	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	
Refrigerante / Refrigerant:												
Tipo / Type	R-22 y R-407C											
Sistema de expansión / Expansion system	Válvula termostática de expansión / Thermostatic expansion valve											