

*Universidad de Matanzas
Sede "Camilo Cienfuegos"
Departamento Mecánica
Facultad de Ciencias Técnicas*



**AHORRO ENERGÉTICO EN EL SISTEMA CENTRALIZADO DE AIRE
ACONDICIONADO DEL HOTEL SOLYMAR**

Ejercicio Culminación de Estudios en Ingeniería Mecánica

Autor: Yasiel Hernández Casanova.

Tutor: M.Sc. Ing. Jorge Luis Lamas Acevedo.

Matanzas, 2020

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaré que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas «Camilo Cienfuegos» a darle el uso que estime más conveniente.

PENSAMIENTO

“Aquellos que tienen el privilegio de saber, tienen la necesidad de actuar”

Albert Einstein

DEDICATORIA

A mis padres Antonio y Yolaine y mi hermana leidys, por toda una vida de sacrificios para alcanzar esta meta y por todo el amor y la paciencia que me han regalado.

A Dago y Deyanet por haberme dado todo su apoyo en el transcurso de mi carrera.

A Melody mi pequeña hermanita.

A mi amigo y hermano Javier.

A aquellas personas que siempre pensaron que si podía y me dieron aliento aun cuando yo mismo dudé.

AGRADECIMIENTOS

A mi amigo y tutor Jorge Luis Lamas porque la verdad que, sin él, no habría podido solo con esta última batalla.

A mi familia en general por toda la ayuda que me han brindado en estos 5 años.

A marcita por todo su apoyo en esta última y decisiva etapa.

A mis compañeros de estudio y amigos que de muchas maneras han contribuido en mi formación en especial a Jorge, Marquito, Edwar, Julio y el Leo, a todos muchas gracias.

A mi alma mater la universidad Camilo Cienfuegos.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis del sistema de bombeo de agua helada en el hotel Solymar, específicamente en las unidades terminales tipo *fancoils* y sus válvulas de regulación de dos vías, tipo *on-off*, que se encuentran fuera de servicio por estar deterioradas. Esto trae consigo que el caudal de agua no sea regulado por el sistema y las bombas trabajan a flujo constante sin regulación de caudal para la cual fueron concebidas. A partir del caudal de agua de diseño de cada unidad terminal y la curva características del sistema se determinan los ahorros que generan tener el sistema operando a caudal variable en función del aumento de presión cuando las válvulas de dos vías cierran la circulación de agua a través de estos. Para ello se simula el sistema trabajando con diferentes flujos de agua en función de la carga térmica impuesta al sistema. Se cuantificó el ahorro económico y medio ambiental de la propuesta.

Palabras claves: Sistemas centralizados, válvulas de regulación, flujo de agua variable bombas centrífugas, variador de velocidad

ABSTRACT

In this work will be carried out an analysis of the system of pumping of chill water in the hotel Solymar, specifically in the Fan-coils terminal units' type and two ways regulation valves, type on-off that is are out of service due to they are deteriorated. This brings I get that the chill water flow is not regulated by the system and the pump work to constant flow without flow regulation for that which they were conceived. Starting from The flow of water of design of each terminal unit and the characteristic curve of the system the savings are determined that it generates to have the system operating to variable flow in function of the pressure increase when the two ways valves close the circulation of water through these. For it is simulated it and system working with different flows of water in function of the thermal load imposed to the system. You quantify the economic and environmental saving of the proposal.

Keywords: Centralized system; regulation valves; variable flow water; pump centrifugal; variable speed device.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
1.1 Componentes de un sistema de climatización centralizada	3
1.1.1 Enfriadoras de agua	4
1.1.2 Unidades terminales	6
1.2 Distribución de agua helada.....	8
1.2.1 Circuito primario de agua helada.	10
1.2.2 Circuito secundario de agua helada	11
1.3 Balanceo hidráulico de un sistema de agua helada.....	11
1.4 Bombas centrífugas.....	13
1.4.1 Tipos y características	14
1.4.2 Curvas características. Regulación de caudal.	15
1.5 Válvulas de control empleadas en unidades terminales.....	17
1.6 Selección de las válvulas de regulación.....	20
1.7 Ahorro energético con caudal de agua variable en el circuito secundario.....	21
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.1 Caracterización de la instalación	24
2.2 Leyes de semejanzas de las bombas	25
2.3 Variación de las curvas características	30
2.4 Caudal de agua necesario en las unidades terminales.....	35
2.5 Ahorros energéticos y medioambientales al aplicar los métodos de regulación	37
2.6 Análisis de la inversión de la restauración del sistema.....	39
CONCLUSIONES	44
RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
Anexos:	48

INTRODUCCIÓN

La eficiencia de los sistemas de climatización es un tema cada más recurrente debido a el valor de la energía que consumen y a la necesidad de los mismos, ya que esta es cada vez más demandada y sus fuentes de obtención actuales son cada vez más escasas y costosas. Es necesario ahorrar energía porque no es posible desde el punto de vista económico y medio ambiental mantener los índices de consumo actuales. Ahorrar energía evitando las perdidas innecesarias e introducir mejoras tecnológicas que se traduzcan en incrementos de la eficiencia energética y reducción de los costos de los procesos tecnológicos y la emisión de los contaminantes que alteran la ecología global es la mejor alternativa. En Cuba es de suma importancia ahorrar energía para que los altos costos de los portadores energéticos se transformen en altos niveles de producción y satisfacción del nivel de vida de la población en general. El Hotel Barceló Solymar Arenas Blancas Resort localizado en Varadero en la provincia de Matanzas cuenta con unas 525 habitaciones de ellas 328 estándar, 4 *suite* 120 estándar *bungalows* y 73 *suites bungalows* además de 3 restaurantes, seis bares, un *miniclub*, gimnasio, sauna, masaje, peluquería, servicios médicos, salón de reuniones (con capacidad para 35 personas). Como se aprecia existe un gran requerimiento de climatización en esta instalación lo que acarrea un gran consumo de energía. Este hotel cuenta con sistemas de climatización centralizada del tipo todo agua y acumulación térmica con piscina de almacenamiento. A los locales no llega más que agua helada que se hace recircular por las unidades terminales y regresa nuevamente a la piscina. Las máquinas refrigeradoras grandes, conocidas como enfriadoras de agua, plantas refrigeradoras, equipos de refrigeración (en inglés, *chillers*), enfrían agua que después se distribuye a los climatizadores por tuberías. Las máquinas de refrigeración grandes tienen mejores rendimientos. Los cuales aportan una notable eficiencia y eficacia siempre y cuando estén en óptimas condiciones. Estos equipos se diseñan para un promedio de 10 a 12 horas de trabajo útil diario con válvulas y sensores que cortan el flujo de agua helada y disminuyen las revoluciones de la bomba simultáneamente aumentando así la eficiencia del proceso al disminuir el consumo eléctrico en situaciones específicas como habitación desocupada, puertas o ventanas abiertas, etc. El turismo es un sector cimero en la economía cubana por lo que garantizar la calidad de sus servicios y la eficiencia de los mismos es clave para que

se mantenga como una fuente de ingresos al país. Los sistemas de climatización son muy utilizados en todo el mundo en diversas aplicaciones, en este caso se utilizan principalmente, para lograr el confort de los huéspedes. Nuestro país es una isla tropical ubicada en el trópico de cáncer en la que las temperaturas se mantienen relativamente altas todo el año, de ahí la importancia de lograr una operación racional y eficiente del sistema.

Las unidades terminales de esta instalación están equipadas con válvulas de dos vías *on-off* y bombas de velocidad variable mediante variadores de velocidad por regulación de frecuencia con el fin de reducir el consumo energético. Estas válvulas, debido fundamentalmente a la falta de mantenimiento y al tiempo de explotación, se han ido deteriorando y la gran mayoría están fuera de servicio o totalmente abiertas, por lo que no cumplen su objetivo para la cual fueron instaladas, siendo ésta la situación problemática de este trabajo de diploma. Es importante mencionar que dificultades como ésta o similares, en mayor o menor medida ocurre también en otras instalaciones del país ocasionando pérdidas cuantiosas a la economía del país.

Por tanto, la **hipótesis** del trabajo descansa sobre la base que, si se reponen de las válvulas de dos vías de las unidades terminales, se logrará una disminución del consumo energético de la instalación y, por ende, una mayor eficiencia energética del hotel.

Para alcanzar la realización exitosa de la evaluación propuesta se trazó como **objetivo general** proponer el cambio de las válvulas de dos vías averiadas para devolver el funcionamiento eficiente del sistema de clima del hotel.

Los **objetivos específicos** propuestos son:

1. Realizar un estudio del arte de la temática abordada.
2. Comprobar el estado de las válvulas de dos vías de los sistemas Fan-coil.
3. Elaborar una correcta metodología para la evaluación de las propuestas.

CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El contenido del presente capítulo es una selección de bibliografías referentes al tema en cuestión. Luego de una ardua tarea de búsqueda y análisis se ha plasmado todo el material teórico necesario para el desarrollo de la investigación teniendo en cuenta diversidad y fiabilidad de las fuentes bibliográficas.

1.1 Componentes de un sistema de climatización centralizada

El objetivo de un sistema de climatización centralizada por agua helada radica en la extracción de calor de los locales o de un área determinada con el fin de lograr la temperatura, humedad, calidad del aire y movimiento deseado en un local determinado que permita alcanzar las condiciones de confort para una estancia placentera en los mismos.

Aunque existe una gran diversidad en cuanto a la forma de concebir un sistema centralizado de agua helada (SCAH), los equipos principales (Reina), (Refrigeración, 2012) mostrados de forma esquemática en la figura 1, que lo componen son afines a todos, a saber:

- Unidades enfriadoras de agua.
- Unidades terminales y de tratamiento de aire.
- Bombas centrífugas
- Red de tuberías

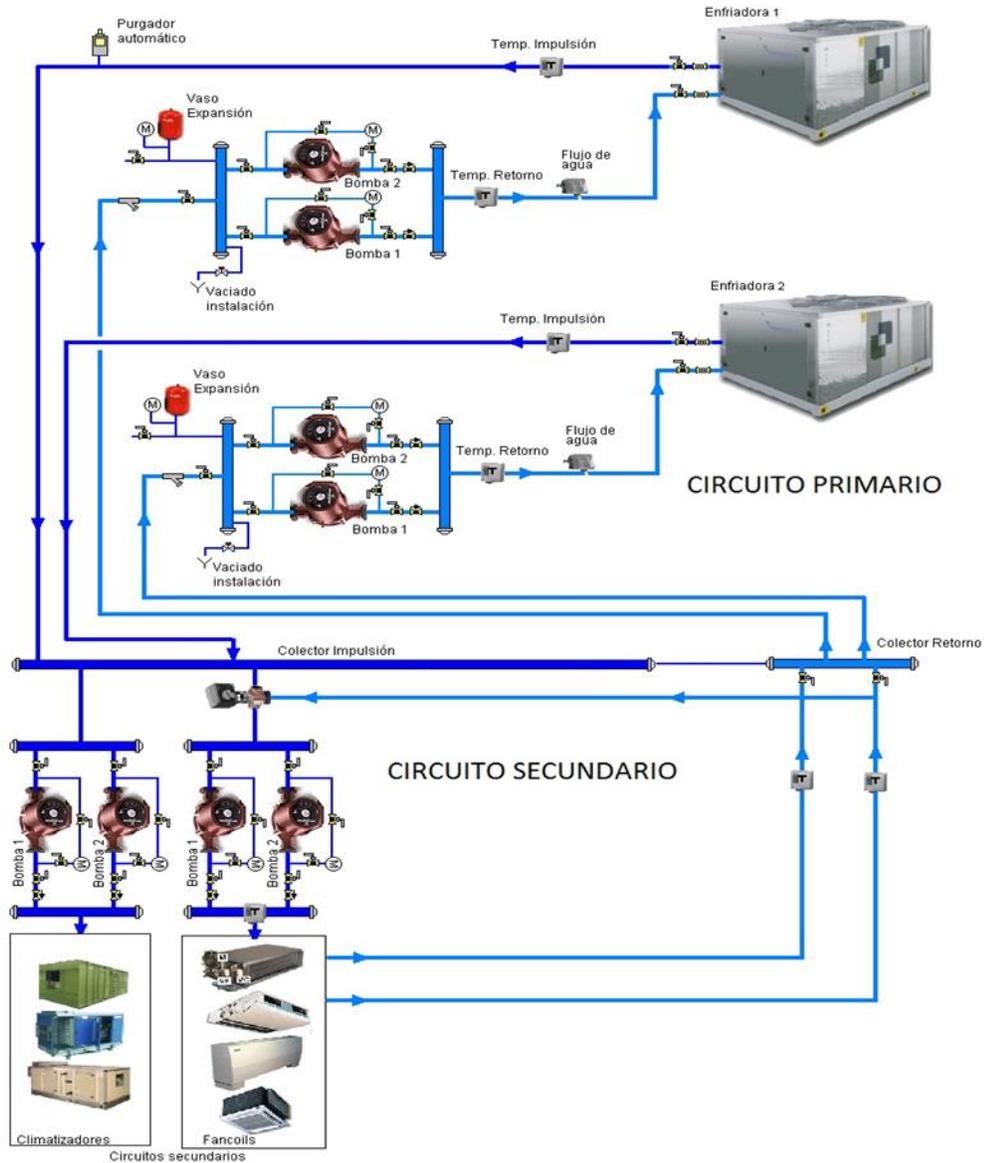


Figura # 1: sistema centralizado de agua fría con circuito primario secundario

1.1.1 Enfriadoras de agua

La unidad enfriadora de agua (conocido también como *chiller*) es el equipo principal dentro de un sistema centralizado de aire acondicionado, en el cual se encuentra ubicado, sobre una estructura de metálica y lo más compacta posible, los cuatros componentes fundamentales de un circuito de refrigeración por compresión de vapor, ellos son:

compresor, condensador, elemento de expansión y evaporador. Su función es enfriar un medio líquido, generalmente agua.

El compresor en funcionamiento hace que el refrigerante circule hacia el condensador rechazando calor al medio ambiente para posteriormente, mediante una restricción de presión y temperatura pase al evaporador donde absorbe el calor al agua que circula por dicho intercambiador de calor.

El consumo de electricidad representa la mayor partida dentro de los costos de energía del sector turístico, donde el sistema de climatización (Sergio Montelíer Hernández, 2008 a) es responsable de aproximadamente el 65% de los gastos energéticos totales del hotel, debido fundamentalmente, a las condiciones climáticas características de las regiones tropicales .

Existe una gran variedad de clasificación de estos pero las más usadas se basan según el proceso de condensación que puede ser por agua o aire, es decir enfriadoras de agua de condensación por aire o condensación por agua, siendo estas últimas la de mayor eficiencia.

Son sistemas muy utilizados para acondicionar grandes instalaciones, edificios de oficinas y sobre todo aquellas que necesitan simultáneamente climatización y agua caliente sanitaria (ACS), por ejemplo hoteles y hospitales. ("Chiller Plant Efficiency ") (HESS, 2010)

El agua enfriada se puede usar también para:

- Refrigerar maquinaria industrial.
- Plantas de procesos químicos y de alimentos.
- Centros de cómputo (*datacenters*).
- Procesos de acondicionamiento de aire en grandes instalaciones.
- Producir agua para duchas y calentar piscinas.

Elementos adicionales:

La máquina enfriadora de agua necesita de elementos adicionales que le permitan funcionar:

- Redes de tubería y colectores.
- Bombas de circulación.
- Vaso de expansión.
- Elementos de control, presostatos y sondas de temperatura.
- Depósito de inercia.
- Válvula de llenado y válvula de vaciado.
- Decantadores.
- Torre de enfriamiento o intercambiador exterior.
- Ablandador de agua para evitar la corrosión en las tuberías de condensación.

1.1.2 Unidades terminales

Las unidades terminales (tipo *fan-coils*) y de tratamiento de aire (UTA), se presentan en una cantidad de forma y tamaño según su capacidad, pero de manera general, están compuestas por un serpentín de tubos aleteados montado sobre una estructura metálica con una bandeja inferior para la recogida de la humedad condensada sobre la superficie del serpentín. Un ventilador centrífugo hace circular el aire del local de forma forzada sobre la superficie fría de manera que disminuya su temperatura y humedad, lográndose así el proceso psicrométrico de enfriamiento y deshumidificación.

Para la regulación del caudal de agua que circula por el serpentín de estas unidades se colocan válvulas de dos o tres vías de tipo *on-off* o moduladoras, que actúan bajo el mando de un termostato ubicado en el interior del local climatizado, manteniéndose así las condiciones de confort establecidas.

Los equipos *fan-coils* utilizan el agua como elemento refrigerante. Estas unidades reciben agua caliente o fría desde una enfriadora remota o caldera y lo hacen circular por unos tubos o serpentines. El ventilador impulsa el aire y lo hace pasar por los tubos donde circula el agua, produciéndose así la termotransferencia, previamente este aire pasa por un filtro y

sale a la estancia que se está climatizando, en forma de aire frío o calor en función de las necesidades de la misma.(Refrigeración, 2012)

Tipos de *fan coils*:

En términos generales, se podrían decir que existe dos tipos: los de dos tubos y los de cuatro tubos:

- ❖ *Fan coils* de dos tubos: Tiene un tubo de impulsión o de ida y otro de retorno. El tubo de impulsión proporciona agua fría o caliente en función del momento del año. Solo pueden proporcionar frío o calor, pero no ambas. Su coste no es elevado.
- ❖ *Fan coils* de cuatro tubos: Tiene dos tubos de impulsión y dos tubos de retorno. Cada circuito funciona de forma independiente por lo que pueden llegar a producir frío y calor simultáneamente. Su uso se asocia con un mayor confort. Este tipo de *fan coils* abunda en grandes superficies como oficinas, hospitales, grandes almacenes, etc. Su coste es más elevado.(Arizone, 2018)

En cuanto a su colocación, existen también diversas tipologías: pueden ser colocado en pared, en suelo, en techo. (Refrigeración, 2012)

Para el funcionamiento correcto de estos sistemas se requiere el uso de bombas centrífugas y de una red de tuberías que garanticen los propósitos del sistema.

Los equipos de bombeo son muy usados a nivel mundial y dentro de los SCAH tiene la función de hacer circular el agua helada por toda la instalación, desde las enfriadoras de agua hasta los *fan coils* (*anexo 1*) y unidades de tratamiento de aire.

Aunque existen una gran diversidad de bombas, las más usadas en este tipo de sistema son las bombas centrífugas de tipo vertical u horizontal debido a su sencillez y noble operación, no obstante, de su correcta selección, operación y mantenimiento depende en gran medida la eficiencia de estos sistema, pues están funcionando las 24 horas del día para de esta forma garantizar la circulación de agua helada en la instalación.

La red de tuberías tiene una función determinante en los SCAH ya que a través de ella circula el agua helada por toda la instalación. Los materiales más usadas son acero negro en las construcciones más antiguas y en la actualidad las tuberías plásticas a base de polímeros se han impuesto debido a su bajo coeficiente de rozamiento que posibilita menos consumo de energía para hacer la circulación del agua helada y por tanto, equipos de bombeos más pequeños.

Debido a la circulación de agua fría por estas, las superficies exterior de los tubos tendrá una temperatura inferior a la temperatura de rocío del aire que circula por su exterior, lo que provocará la condensación de la humedad ambiente sobre la misma y se producirá un goteo constante de agua por la instalación que traerá como consecuencia el deterioro del falso techo donde estén instaladas y una ganancia de calor, disminuyendo la eficiencia del sistema, por lo que, para evitar esta situación es necesario e imprescindible el uso de aislamiento térmico en ellas con un espesor de pared determinado para reducir los efectos perjudiciales expuestos.

1.2 Distribución de agua helada

La impulsión del agua fría hacia las enfriadoras y hacia la carga térmica se logra a través del circuito primario (CP) y el circuito secundario (CS) respectivamente, aunque la instalación puede prescindir del circuito secundario. Por lo general, siempre se le da mayor importancia a los circuitos secundarios de agua fría debido a que, en varios diseños estructurales el mismo circuito que impulsa el agua hacia las edificaciones, también tiene la función de retornarla al evaporador de las enfriadoras. Esta funcionalidad es la misma, independientemente de que se regule a través de válvulas de estrangulamiento o con variadores de velocidad el caudal que debe ir al evaporador. Este flujo debe estar en correspondencia con la potencia de enfriamiento de cada equipo en particular. Es difícil encontrar el empleo de variadores de velocidad en los circuitos primarios de agua fría, pero existen algunos sistemas en los que se aplican, fundamentalmente cuando la carga térmica es muy variable y la potencia de enfriamiento es muy grande ("Primary Secondary Pumping Application Manual," 2013).

Los circuitos de distribución de agua helada se clasifican de acuerdo al tipo de retorno de ésta, que pueden ser: de retorno directo o inverso. En el retorno directo la primera unidad terminal de un ramal determinado en recibir el agua helada es la primera en conectarse a la tubería de retorno y, por el contrario en el retorno inverso la dicha unidad sería la última en conectarse a la tubería de descarga, esto tiene la ventaja de que cuando los circuitos de agua son iguales rara vez se necesita de equilibrarlo.

Cuando los sistemas de climatización centralizados por agua helada (SCCAH) a flujo constante cuentan a la vez con bombas en el CP y en el CS, debido a la operatividad que se logra, se puede reducir el consumo de energía eléctrica por trabajo de compresión aproximadamente en un 2% con una mejor regulación de los caudales acordes con los requerimientos de los evaporadores y de la carga térmica.

La tendencia actual para el mejoramiento de la eficiencia en la impulsión de agua fría de forma general está en la sustitución de caudal constante a caudal variable.

En varios hoteles cubanos se presentan bloques técnicos (conjunto de enfriadoras y bombas de agua fría y caliente) en los cuales se garantiza el caudal de entrada a los evaporadores de las enfriadoras mediante una bomba para cada enfriador. Con el transcurso del tiempo se ha demostrado que cuando se sustituyen las enfriadoras por otras nuevas hay que regular el caudal para las nuevas condiciones. Las exigencias tecnológicas son diferentes, por ejemplo las enfriadoras de la marca *Gree* exigen caudales específicos para su trabajo, si no, se activan los circuitos de protección. Las enfriadoras de *Frioclima* y *York* no son tan exigentes con este parámetro, lo que brindan mejores prestaciones para las cargas parciales. Esta posibilidad técnica permite introducir los variadores de velocidad en los CP.

Otra variante presente en estos sistemas es una bomba o un conjunto de bombas en paralelo suministrando un caudal total para todos los evaporadores de todas las enfriadoras conectados. Esto hace irracional el trabajo de estas bombas debido a que no siempre están conectadas todas las enfriadoras, ejemplo de esta situación es que en invierno las enfriadoras trabajan en regímenes parciales más variados. En el caso de los CS también se presentan bombas que trabajan de forma individual para cada zona habitacional o bombas que trabajan en paralelo para grandes edificaciones o para estructuras civiles estilo

bungalows distribuidos en grandes extensiones de terreno. Independientemente del tipo de caudal que experimentan los CSAH (constante o variable) existe un conjunto de características que se manifiestan de manera similar en ambos sistemas y que influyen indistintamente en el comportamiento energético de estas instalaciones como son: las características climatológicas de la región, la bioclimática de la edificación, las ganancias de calor adicionales, el porcentaje de ocupación de los locales y las propiedades para el transporte de las redes hidráulicas, su dinámica y equilibrio (Valdez, 2009).

1.2.1 Circuito primario de agua helada.

Está compuesto por la(s) enfriadoras de agua, las bombas primarias y el sistema de tuberías que las interconectan.

El circuito primario es responsable de mantener la temperatura de diseño de las enfriadoras en un punto determinado. Las bombas del circuito primario son bombas de velocidad constante que trabajan para mantener el caudal a través de las enfriadoras. Los sistemas de primario-secundario se basan en la existencia de dos grupos de bombeo, uno de ellos ubicado en el circuito primario de la instalación, que trabaja a caudal constante, y con la característica de que cada enfriadora va asociada a su bomba de circulación, de forma que todas estas bombas no pueden funcionar con otra enfriadora. El segundo grupo de bombeo se encarga de impulsar el agua a través de las unidades terminales, dotadas de válvulas de regulación de caudal de 2 vías, de forma que, este grupo deberá ser de caudal variable. Las presiones estáticas disponibles de diseño de ambos grupos de bombeo, deberán permitir vencer la pérdida de carga en cada uno de los bucles del circuito de forma independiente. Los sistemas de caudal de agua variable en circuito primario, se caracterizan por la existencia de un único grupo de bombeo de caudal variable, diseñado para vencer la pérdida de carga total del circuito (primario más secundario), y que recirculará el agua necesaria en cada momento para el funcionamiento del conjunto de la instalación a través de toda ella, incluso de las unidades enfriadoras. Estas bombas se instalan agrupadas, de forma que cualquiera de ellas puede trabajar sobre cualquiera de las enfriadoras del sistema. Cada unidad enfriadora estará dotada de una válvula de aislamiento automática, que cerrará en caso de que su enfriadora asociada esté parada (Reina).

1.2.2 Circuito secundario de agua helada

Está compuesto por la (s) bombas secundarias, las unidades terminales y unidades de tratamiento de aire.

El circuito secundario se encarga de distribuir el agua fría a través del edificio. Las bombas del circuito secundario son de velocidad variable o constante, según el diseño del sistema. Cuando el sistema es de caudal variable éste se encargan de incrementar el caudal en respuesta a la pérdida de presión a través de la carga del edificio y de reducir el caudal en respuesta a un incremento de presión a través de la carga y garantizar de este modo, que haya suficiente agua fría disponible para vencer la carga térmica impuesta.

El funcionamiento eficiente de un circuito secundario es una combinación de bomba a velocidad constante, velocidad variable y, en su caso, control con diferencial de presión variable o constante, válvulas de control de 2 vías o de 3 vías, tipo de control: todo/nada o proporcional y equilibrado con válvulas de equilibrado estáticas o dinámicas ("Variable Primary Flow Systems," 2012).

Vale aclarar que los CP y CS están siempre interconectados entre si debido a que los caudales de agua que estos manejan pueden ser, o no diferentes en muchos casos, esta interconexión puede ser mediante un *bypass* o caballete como se conoce en el lenguaje del sector y, que no es más que un tubo de diámetro mayor al requerido que es capaz de absorber esa diferencia del flujo de agua demandada. También existen los conocidos baches, que son usados en los sistemas con acumulación térmica tales como piscina y tanques de almacenamiento tanto de calor sensible como latente.(Quiles, 2017)

1.3 Balanceo hidráulico de un sistema de agua helada

Los sistemas de climatización, en general, deben cumplir dos requisitos fundamentales: garantizar un elevado confort térmico y limitar el consumo de energía. Para que esto sea posible, es necesario suministrar a los terminales de la instalación la cantidad adecuada de fluido caloportador para que puedan calentar, refrigerar y deshumidificar dentro de los valores de diseño. Según las leyes de transmisión de calor, la emisión o extracción de calor

por parte de los terminales depende del caudal de fluido que lo atraviesa. Por tal motivo, para asegurar la eficacia de la instalación, es preciso determinar con exactitud el caudal que se envía a cada terminal. Si los terminales reciben el caudal adecuado de fluido, pueden funcionar en las condiciones nominales, es decir, en las condiciones para las que fueron dimensionados. En este caso se dice que el circuito está equilibrado.

Se dice que un circuito está equilibrado hidráulicamente si cada una unidad terminal que compone en circuito recibe en todo momento el caudal para el que fue diseñado (Reina).

El fenómeno del equilibrado hidráulico de un circuito se debe a que la pérdida de carga es proporcional a la longitud de la tubería, por lo que en los terminales situados a más distancia se tendrán una mayor pérdida de carga, y en los más cercanos una pérdida menor. El caudal tiende a circular por el circuito de menor pérdida, como consecuencia los terminales más cercanos tendrán un caudal excesivo, y los más alejados un caudal insuficiente. El circuito estará, entonces, desequilibrado. Para conseguir el equilibrado de un circuito se pueden utilizar principalmente tres métodos:

1. Equilibrado natural: Mediante la utilización de determinados recorridos de tuberías que tengan como objetivo equilibrar la red.
2. Equilibrado estático: Mediante válvulas de equilibrado estático.
3. Equilibrado dinámico: Mediante válvulas de equilibrado dinámico.

Como ya se ha comentado, en la mayoría de los casos, estos problemas son debidos a que no se obtienen en la instalación, los caudales de proyecto, hecho que además impide a los reguladores (válvulas de dos vías, tres vías) trabajar en las condiciones adecuadas. Sólo si se obtienen los caudales nominales de las condiciones de diseño, éstos pueden regular eficazmente. La única manera consiste en “equilibrar” la instalación, es decir, en ajustar los caudales en todo momento a los valores de diseño mediante válvulas repartidas en la red hidráulica de la instalación. Esta operación debe realizarse en los tres niveles siguientes:

1. Enfriadoras de agua: Deben estar equilibrados ya que el caudal de cada uno de ellos debe, en la mayoría de los casos, mantenerse constante. Las fluctuaciones del

caudal conducen a una reducción de la eficiencia de producción y de la vida útil de las unidades.

2. Red de distribución. La distribución debe estar equilibrada para garantizar que todos los terminales reciban, como mínimo, el caudal nominal, en cualquier régimen de carga.
3. Módulos hidráulicos. Cada uno de los módulos deben estar equilibrados para proporcionar a las válvulas de control las condiciones idóneas de trabajo y para compatibilizar los caudales del primario y secundario.

Un sistema HVAC está balanceado cuando el flujo de agua a través del serpentín se encuentra entre un $\pm 10\%$ del flujo de diseño estipulado por el fabricante. Si el sistema se encuentra desbalanceado, la distribución del flujo es inequitativa, esto generará un excedente de flujo en algunos serpentines y una disminución de flujo en otros.

Los serpentines que tienen un flujo inadecuado disminuirán su capacidad de transferencia térmica afectando el correcto acondicionamiento del aire. Los serpentines con excedentes de flujo serán ineficientes y consumirán mayor energía debido a tres razones:

1. El exceso de flujo será tanto que el sistema no podrá maximizar la cantidad de transferencia térmica que se da entre el serpentín de agua y el aire que fluye a través de él.
2. El sistema de bombeo requerirá mayor energía para llevar el excedente de agua al serpentín.
3. El usuario se quejará de que en la zona hay lugares donde la temperatura del aire es extremadamente caliente y en otros extremadamente frío.

1.4 Bombas centrífugas

La bomba de una instalación hidráulica de agua fría tiene la función de hacer circular el agua desde el equipo generador de frío o planta frigorífica hasta el terminal de uso. Para ello, la bomba debe suministrar un caudal de agua cuya presión sea suficiente para vencer las resistencias a lo largo del circuito de distribución. El comportamiento de las bombas centrífugas en conjunto con la red de tuberías es de suma importancia ya que son estas las

más utilizadas en este tipo de aplicaciones. Los fabricantes suministran gráficos con las características de las bombas, determinadas de forma experimental. ((ATECYR), 2012; "Determinacion de las características de una bomba centrífuga," 2017)

Una bomba centrífuga se compone, principalmente, de los siguientes elementos cumpliendo cada uno de ellos una función específica, a saber:

- a. Conducto de entrada: Su objetivo es conducir el fluido hacia el impelente.
- b. Voluta: Convierte la velocidad del fluido en carga de presión al incrementar de forma gradual el área de flujo
- c. Eje motor: Es el encargado de transmitir la energía mecánica a las partes móviles de la bomba.
- d. Sello del eje: Su función es disminuir o eliminar los salideros del fluido de trabajo trasegado.
- e. Impelente: Está compuesto por los canales interálabes donde se le entrega la energía al fluido
- f. Conducto de descarga: Ubicado a continuación de la voluta es el encargado de conducir el fluido a la salida del equipo.

1.4.1 Tipos y características

La experiencia práctica ha llevado a la existencia de distintos tipos de bombas diseñadas específicamente para aplicaciones concretas. De hecho, la mayoría de fabricantes siguen esta clasificación. En cuanto a aplicaciones para sistemas de aire acondicionado, calefacción, ACS y energía solar, las bombas generalmente empleadas, ordenadas de menor a mayor potencia son:

- ❖ Bombas circuladoras. Bombas centrífugas sencillas, muy silenciosas, diseñadas para la recirculación de agua fría o caliente en los sistemas de climatización y agua caliente sanitaria. Se trata de bombas de rotor húmedo donde el propio líquido refrigera el motor.
- ❖ Bombas compactas o monobloc. Conjunto compacto con eje único motor-bomba, adecuados para bajas y medias potencias y funcionamiento en continuo.

Aplicaciones industriales para bombeo de aguas limpias y no agresivas: equipos de presión, aire acondicionado y calefacción, sistemas de riego y equipos contra incendios.

- ❖ Bombas de bancada u horizontales. Bombas de medias-altas potencias donde la conexión al motor se realiza mediante poleas o mediante acoplamiento elástico que no precisa de alineamientos precisos. El acoplamiento indirecto mediante correas y poleas facilita la extracción del rodete. En el caso de acoplamiento directo debe instalarse un espaciador para permitir acceder al rodete sin mover el motor eléctrico. Se emplean en industrias, riego, construcción, grandes instalaciones de calefacción y aire acondicionado, municipios, equipos contra incendios, etc.((ATECYR), 2012)

1.4.2 Curvas características. Regulación de caudal.

Las curvas características de las bombas centrífugas muestran gráficamente la dependencia de la altura manométrica, rendimiento y potencia absorbida con el caudal en un eje de coordenadas rectangulares como aparece en la figura # 2. Se trata de curvas obtenidas experimentalmente por los fabricantes, que indican el comportamiento de las bombas en distintas condiciones de servicio.

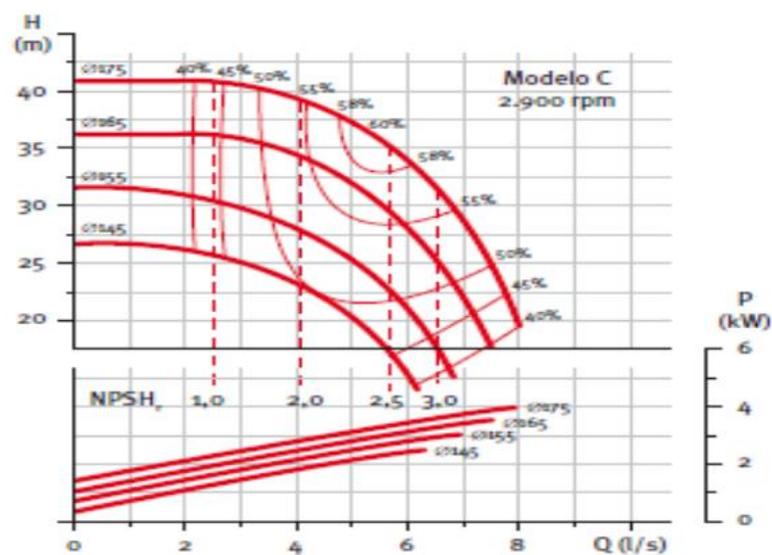


Figura # 2: Curvas características de una bomba centrífuga comercial.

Las curvas se obtienen en un banco de pruebas, manteniendo constante la velocidad de giro de la bomba y variando el caudal mediante la estrangulación en la tubería de impulsión.

Las curvas características de las bombas centrífugas suelen ser de tipo plano, donde la presión máxima producida a caudal nulo no es muy superior a la correspondiente al caudal nominal. Las curvas planas son las más adecuadas para su funcionamiento en circuitos cerrados con regulación por válvulas de dos vías, con estas curvas planas se consigue una buena regulación del caudal sin producirse sobrepresiones en la instalación.

Durante el funcionamiento real de un sistema de bombeo, a veces, es necesario variar el caudal de la bomba para adaptarlos a las exigencias del servicio. Esta regulación puede realizarse, de manera general, de dos formas:

- Regulación de caudal a velocidad constante.
- Regulación a velocidad variable.

La regulación a velocidad constante puede ser mediante la estrangulación o cierre parcial de una válvula de control o un *bypass* ubicada en la descarga de la bomba. El primero de ellos introduce una pérdida localizada que modifica la curva altura contra caudal (H-Q) desplazando el punto de operación de la curva característica.

Al cerrar la válvula cambia la curva resistente de la instalación, siendo posible reducir el caudal de impulsión hasta el valor deseado. El rendimiento de la bomba subirá o bajará según la posición de partida respecto al máximo. Se trata del método más empleado, no es un método energéticamente eficiente, aunque se consigue una disminución de la energía total consumida.

Si la estrangulación se realiza en la tubería de aspiración, se podría provocar cavitación en la bomba, por lo que dicha estrangulación se sitúa siempre en la zona de descarga de la bomba.

Por otro lado, la regulación por *bypass* es simple y se logra mediante una válvula derivadora en la parte de alta presión, lográndose así que el caudal bombeado retorne al lugar de origen sin recorrer el circuito.

Mediante este sistema se consigue evitar las sobrepresiones que se producen con las válvulas dispuestas en serie, pero a cambio se derrocha inútilmente una energía para bombear un caudal que luego será recirculado por la bomba. Se trata del peor sistema de regulación desde el punto de vista energético.

El segundo método radica en un cambio del régimen de giro de la bomba de forma tal que modifique la curva característica y, por tanto, el punto de operación de la curva H-Q, es un método muy eficiente desde el punto de vista energético ya que no introduce pérdidas adicionales ocasionadas por el estrangulamiento de una válvula, esto se logra mediante un variador de frecuencia que regule la velocidad de giro de la bomba.

El empleo de variadores de frecuencia para la regulación de instalaciones hidráulicas es cada vez más habitual. Muchos fabricantes han incorporado el variador de frecuencia en algunos modelos de bombas siendo esta operación muy adecuadas en sistemas de caudal variable, esta regulación de la velocidad de giro se suele hacer:

- Manteniendo la presión diferencial constante.
- Con presión diferencial variable.

(Carrier, 2009)

1.5 Válvulas de control empleadas en unidades terminales

La capacidad de los serpentines de enfriamiento se controla comúnmente con válvulas de 2 o de 3 vías, como se muestra en la figura # 3, dependiendo de si se desea un sistema de caudal de agua constante o variable. El primero es de diseño y operación simples pero tiene un mayor costo operativo y su uso es más común en instalaciones de menor capacidad, mientras que el segundo, que resulta en un menor costo operativo, se usa con mayor frecuencia en las instalaciones más grandes.

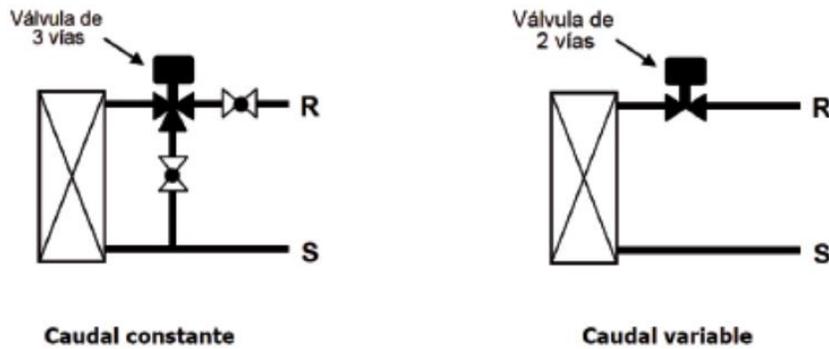


Figura # 3: Válvulas de dos y tres vías usadas en los fan-coils.

El caudal de agua en sistemas con válvulas de 3 vías será la suma de los caudales de todos los serpentines de enfriamiento, pues este sistema no aprovecha el factor de diversidad en el caudal, aunque sí, en la capacidad del chiller. En sistemas con válvulas de 2 vías el factor de diversidad puede aplicarse tanto al caudal de agua como a la capacidad de los *chillers*.

Las válvulas de 3 vías pueden ser del tipo divergente o convergente (mezcladora) (anexo 2). Para el control de los serpentines de agua fría es más conveniente el uso de las válvulas convergentes que, además de tener un menor costo se instalan en la línea de retorno que es más aconsejable para la operación del sistema.

La necesidad de ahorrar energía se ha traducido en una nueva tendencia a la hora de proyectar instalaciones. Los ingenieros están sustituyendo sistemas de caudal constante, por sistemas de caudal variable y bombas con variador de velocidad. Por supuesto, este nuevo proceder tiene una influencia directa en los elementos de regulación: las válvulas de control de tres vías, están siendo sustituidas por válvulas de dos vías. En las instalaciones de caudal variable, la gestión de las presiones y su influencia en los caudales, es el gran desafío que tienen los proyectistas.

Las válvulas reguladoras de presión diferencial, se instalan en aquellos puntos de la instalación donde es necesario evitar que se produzcan sobrepresiones y de esta forma, protegen a las válvulas de control de dos vías. Dichas válvulas, tienen la ventaja añadida de aislar la instalación aguas debajo de cualquier fluctuación de presión que se produzca

aguas arriba, manteniendo el sistema equilibrado y mejorando la regulación de las válvulas de control de dos vías.

Para evitar esta situación actualmente se comercializan las válvulas de equilibrado y control independiente de la presión (por sus siglas en inglés *PIBCV*), las cuales combinan las tres funciones principales: control proporcional de la temperatura, ajuste de la limitación del caudal y regulación de la presión diferencial, en un solo cuerpo. Estas válvulas se seleccionan en función del diámetro de la tubería, teniendo en cuenta el caudal. Se instalan en cada unidad terminal. No requieren otro tipo de válvulas de control; por lo tanto, podemos decir que los componentes del sistema pasarían a ser los siguientes: generadores de energía, bomba con variador de velocidad, su sensor, las unidades terminales y junto a éstas, las válvulas *PIBCV*.

El control integrado de presión diferencial en la válvula, garantiza que la válvula *PIBCV* mantenga constante la presión en la válvula de control de dos vías. El resultado es que, cuando la válvula de control está totalmente abierta, el caudal que pasa a través de la válvula es el preestablecido (manteniendo una presión diferencial constante, con una resistencia fija el resultado es un caudal constante).

El paso a través de la válvula de control de dos vías puede ajustarse manualmente y por lo tanto puede utilizarse para ajustar el caudal de diseño. Una vez ajustada, la válvula realizará la función de válvula limitadora de caudal cuando la válvula de control de dos vías esté totalmente abierta. Solamente cuando la válvula de control comienza a cerrar, el caudal es distinto al caudal de proyecto.

Las válvulas *PIBCV* consisten en una válvula de asiento que puede ser motorizada, por distintos tipos de actuación (3 puntos ó 0-10 Vcc), con un mecanismo que limita el caudal y un regulador de presión diferencial integrado, que mantiene constante la presión en la válvula.

1.6 Selección de las válvulas de regulación

La selección de las válvulas de regulación (Calor, 2013) motorizadas debe cumplir con varios criterios, que son principalmente los siguientes.

- Característica: es la curva de la pérdida de carga de la válvula en función de su apertura; existen varias formas de curvas entre las cuales las más corrientes son las lineales y las isoporcentuales. Los aparatos que controlan las válvulas de regulación no tienen un comportamiento lineal (caudal en función de la potencia) con lo cual una válvula lineal no es adecuada. La solución correcta es, en la mayoría de los casos, seleccionar una característica isoporcentual.
- Presión admisible: es el PN de la válvula, debe ser superior a la suma de la presión estática (presión del sistema de presurización menos altura) y de la presión dinámica.
- Presión diferencial: el actuador de la válvula debe ser capaz de abrir y cerrarla con la presión diferencial máxima del circuito, esta presión diferencial depende de la bomba y de la ubicación de la válvula en el circuito.
- Coefficiente de flujo o Kv: en los catálogos de los proveedores, el diámetro se deduce del Kv. En ningún caso, el diámetro es un criterio de dimensionamiento de una válvula de regulación.

El coeficiente de flujo, Kv, es una característica de la válvula y define la relación entre caudal y pérdida de carga de la misma, abierta a 100%.

El Kv en el sistema métrico internacional, es definido como el caudal Q (m³/h) de un fluido de densidad 1 que pasa a través de una válvula que tenga el obturador totalmente abierto con un diferencial de presión ΔP de 1 bar ó 100 kPa. La expresión con densidad del agua igual a 1 kg/litro queda como sigue:

$$Q = K_v \times \Delta P \quad (1.1)$$

La autoridad de una válvula α está definida por la relación entre la caída de presión a través de ella cuando está totalmente abierta (o sea ΔP_{min}) y la caída de presión de todo el circuito afectado por la válvula, válvula incluida, o lo que es lo mismo, la ΔP a través de la válvula cuando está cerrada o a caudal cero ($\Delta P_{m\acute{a}x}$). Esta ΔP máxima es igual a la pérdida de presión a través de la válvula totalmente abierta más la pérdida de presión a través de los otros elementos del circuito en las mismas condiciones de válvula totalmente abierta.

$$\alpha = \frac{\Delta P_{min}}{\Delta P_{max}} \quad (1.2)$$

Un valor pequeño de α significa una pequeña caída de presión a través de la válvula en relación con la caída de presión a través de todo el circuito. Cuando α es pequeño, el caudal esta predominantemente determinado por caída de presión a través de los otros componentes del circuito y las maniobras de apertura y o cierre de la válvula tienen poca influencia sobre la variación del caudal. Más aún, en la primera mitad del recorrido del actuador la válvula tiene un efecto casi nulo sobre el caudal y la válvula deberá trabajar sobre un recorrido de obturador muy pequeño lo que dificulta la acción del lazo de control de temperatura, generando inestabilidades de la regulación, precisión insatisfactoria y desgaste rápido de la válvula y de su actuador por los movimientos continuos de cierre y de apertura.

Por otro lado, el valor máximo de la autoridad se debe limitar para evitar velocidades excesivas del agua a su paso a través de la válvula y, por tanto, desgaste por erosión y ruidos.

Para asegurar un correcto funcionamiento de la válvula se recomienda seleccionar el K_v de tal forma que su autoridad sea entre 0,3 y 0,5.

1.7 Ahorro energético con caudal de agua variable en el circuito secundario

Los sistemas de bombeo a velocidad variable son más caros que los sistemas de velocidad constante, debido al incremento de los costos del equipamiento y de instalación. Por otro lado, un correcto diseño e instalación de los sistemas de velocidad variable reduce los costos de operación significativamente (Ma & Wang, 2009), incluso más allá del tiempo

de vida útil del sistema de bombeo, de manera que el pequeño incremento en los costos iniciales del sistema puede ser visto como una inversión con muy buena tasa de recuperación de la misma. En la actualidad los códigos locales y de diseño de edificaciones estimulan a la reducción del uso energético, por tanto, el sistema de bombeo de velocidad variable se convierte en práctica normal y un aspecto técnico a tener en cuenta, especialmente en grandes sistemas de aire acondicionado con un perfil de carga térmica muy variable durante su funcionamiento diario, además de reducir los costos energéticos contribuye de manera eficaz en disminución la emisión de gases de efecto invernadero al medio ambiente (Quiles, 2017)

En muchos hoteles cubanos el acondicionamiento del aire se realiza mediante los sistemas de climatización centralizados todo-agua. El transporte del agua mediante los circuitos de bombeo en los SCCAH consume aproximadamente el 10 % de la energía eléctrica total de un hotel y las bombas operan los 365 días del año, las 24 horas del día. Un subsistema esencial dentro de los SCCAH lo constituyen los circuitos secundarios de agua fría (CSAF), encargados de enviar el fluido a través de una red hidráulica mallada hasta las unidades terminales.

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

En los SCCAH con CSAF a flujo variable, mediante el empleo de los VV se ahorra energía ya que no es necesario mantener la presión de envío todo el tiempo en su valor máximo. Para optimizar esta magnitud debieran tenerse en cuenta las cambiantes condiciones climatológicas en las que se explota el edificio, pero esto no siempre se hace. (Laurencio, 2015) También, en ocasiones la instalación hidráulica montada puede diferir de la prevista: las rugosidades de las tuberías son distintas a las que definen las tablas y las bombas pueden estar sobredimensionadas.

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

Al variar la frecuencia de trabajo varía la velocidad de funcionamiento (rpm) de la bomba, por lo que de acuerdo a las leyes de semejanzas flujo es proporcional a las rpm que la carga varía de forma cuadrática con las rpm (n) y la potencia varía de forma cúbica con las rpm, por tanto, al aumentar la frecuencia de rotación aumenta el caudal, la carga y la potencia y, de forma análoga al disminuir la frecuencia de rotación estos parámetros se reducen y por tanto los gastos energéticos de la instalación (Laurencio, 2015).

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se realiza un análisis metodológico del funcionamiento de las bombas centrífugas cuando su regulación de caudal se hace mediante estrangulación o variación de velocidad. Se analizan las variaciones en las curvas características de estas que permiten cuantificar el ahorro energético en la instalación.

2.1 Caracterización de la instalación

El hotel Barceló Solymar, dentro de sus principales sistemas tecnológicos, tiene el sistema de aire acondicionado central por agua helada, el cual representa el mayor y más importante de los consumos de electricidad del mismo.

Básicamente este sistema está compuesto por tres partes fundamentales:

- La producción de agua helada
- La distribución del agua helada
- Las unidades terminales.

La producción de agua ha cambiado con respecto a su composición original, de tres enfriadoras en los inicios, ahora trabaja con una enfriadora Frioclima CHAWT 1602 con capacidad frigorífica de 394.5 kW y refrigerante R-134a en la azotea del hotel y otra enfriadora ubicada en el área de mantenimiento marca Climaveneta con capacidad frigorífica de 421 kW y refrigerante R-134a. Ellas conforman el circuito primario de agua helada, con sus respectivas cuatro bombas centrífugas, una de ellas de reserva.

La distribución de agua helada, que pertenece al circuito secundario, está concebida para impulsar el agua helada hasta las unidades terminales y la conforman un total de cuatro circuitos con dos bombas cada uno, en los cuales trabaja una y la otra de reserva.

Las unidades terminales están integradas por 336 *fancoils*, de cuatro modelos diferentes de acuerdo a la carga térmica del local y 7 unidades de tratamiento de aire o manejadoras que sirven a tres restaurantes y dos salas de fiesta y un piano bar.

El circuito primario y secundario de agua helada están interconectados en una piscina de acumulación de agua helada con capacidad para almacenar 281.3 kW.

2.2 Leyes de semejanzas de las bombas

En la aplicación de cualquier bomba centrífuga o un sistema práctico de manejo de fluidos, el ingeniero tiene por lo general dos variables en la bomba, que son: la velocidad de operación y el diámetro del impulsor. Para utilizar con ventaja esta variable, es necesario comprender las relaciones de semejanza.

Las seis leyes de semejanza en bombas:

Las tres primeras leyes se refieren a la misma bomba por lo que $D_{\text{modelo}} / D_{\text{prototipo}} = 1$. Pero funcionan en condiciones distintas.

Primera ley:

$$\left(\frac{Q}{nD^3} \right)_{\text{mod}} = \left(\frac{Q}{nD^3} \right)_{\text{prot}} \quad (2.1)$$

$$D_{\text{modelo}} = D_{\text{prototipo}} \quad (2.2)$$

$$\frac{Q_{\text{Mod.}}}{Q_{\text{Prot.}}} = \frac{n_{\text{Mod.}}}{n_{\text{Prot.}}} \quad (2.3)$$

Segunda ley:

$$\left(\frac{H_m}{n^2 D^3} \right)_{\text{modelo}} = \left(\frac{H_m}{n^2 D^3} \right)_{\text{prototipo}} \quad (2.4)$$

$$\frac{H_{m(\text{modelo})}}{H_{m(\text{prototipo})}} = \left(\frac{\eta_{\text{modelo}}}{\eta_{\text{Prototipo}}} \right)^2 \quad (2.5)$$

Tercera ley:

$$\left(\frac{N}{n^3 D^5} \right)_{\text{modelo}} = \left(\frac{N}{n^3 D^5} \right)_{\text{Prototipo}} \quad (2.6)$$

$$\frac{N_{\text{modelo}}}{N_{\text{Prototipo}}} = \frac{n^3_{\text{modelo}}}{n^3_{\text{Prototipo}}} \quad (2.7)$$

Las tres leyes siguientes se refieren a dos bombas geoméricamente semejantes pero de diámetros diferentes.

Cuarta ley:

$$\left(\frac{Q}{nD^3} \right)_{\text{modelo}} = \left(\frac{Q}{nD^3} \right)_{\text{Prototipo}} \quad (2.8)$$

$$\frac{Q_{\text{modelo}}}{Q_{\text{Prototipo}}} = \frac{D^3_{\text{modelo}}}{D^3_{\text{Prototipo}}} \quad (2.9)$$

Quinta ley:

$$\frac{H_{m(\text{modelo})}}{H_{m(\text{Prototipo})}} = \frac{D^2_{\text{modelo}}}{D^2_{\text{Prototipo}}} \quad (2.10)$$

Sexta ley:

$$\frac{N_{\text{modelo}}}{N_{\text{Prototipo}}} = \frac{D^5_{\text{modelo}}}{D^5_{\text{Prototipo}}} \quad (2.11)$$

El fundamento de las leyes de semejanza es el análisis dimensional. Una ecuación debe ser dimensionalmente homogénea y sus términos deben tener las mismas dimensiones:

- Una variable es dimensional si su valor numérico depende de la escala utilizada en su medida, es decir, depende del sistema de unidades elegido (longitud, tiempo, potencia).
- Una variable es adimensional cuando su valor numérico es independiente del sistema de unidades de medida (rendimiento, relaciones geométricas).

Aplicaciones de las leyes de semejanza:

- Determinar la respuesta de una máquina hidráulica cuando cambia alguna característica como la velocidad de rotación.
- Obtener las características de una máquina geoméricamente semejante a otra pero de diferente tamaño.
- Parametrizar el comportamiento de las máquinas ensayadas a través de ábacos adimensionales y diagramas universales.

Condiciones de aplicación de las leyes de semejanza:

Semejanza Geométrica

- ❖ El modelo y el prototipo han de ser geoméricamente semejantes tanto interior como exteriormente y en los elementos auxiliares.
- ❖ En modelos a escalas muy reducidas, se pueden encontrar dificultades como el escalado de las holguras o las rugosidades superficiales (Renedo, Diego, Haya, & Fernández).

Semejanza Dinámica y Cinemática

- El modelo y el prototipo mantienen una proporcionalidad directa en los triángulos de velocidades en puntos de funcionamiento semejantes.

Solo habrá un punto de funcionamiento del modelo que cumpla con las semejanzas geométricas y cinemáticas, y que mantenga proporcionalidad con los triángulos de velocidades del prototipo.

A esos puntos se les llama puntos homólogos:

- Semejanza Geométrica
- Semejanza Cinemática
- Semejanza Dinámica

Cuatro de los cinco parámetros adimensionales fundamentales de la mecánica de fluidos han de ser iguales en el modelo y en el prototipo (el quinto será igual obligatoriamente si lo son los cuatro restantes).

Las leyes de semejanza resultan imprescindibles cuando en un banco de pruebas se ensaya un modelo a escala reducida y a partir de los resultados obtenidos se desea conocer cómo se va a comportar el prototipo.

Para establecer las leyes de semejanza hace falta que exista una semejanza absoluta, que incluye las semejanzas geométrica (proporcionalidad total en las dimensiones de dos máquinas), cinemática (triángulos de velocidades también proporcionales) y dinámica (número de Reynolds iguales en los puntos de trabajo considerados).

La primera condición se suele cumplir, pero la segunda y sobre todo la tercera son más complejas y presenta unas dificultades prácticamente insalvables. Por ello, las leyes de semejanza que se exponen a continuación son más sencillas que las reales, pero tienen suficiente precisión para los objetivos que persiguen (Renedo et al.).

Utilizaciones prácticas de las leyes de semejanza.

Velocidad variable

Se trata de considerar los regímenes de trabajo semejantes de una misma bomba o bombas iguales cuando varía el número de revoluciones. Al ser $D = D_1$ se cumplirá:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1} = \alpha \quad (2.12)$$

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{n}{n_1} \right)^2 = \alpha^2 \quad (2.13)$$

$$\frac{N}{N_1} = \left(\frac{n}{n_1} \right)^3 = \alpha^3 \quad (2.14)$$

De este modo, si se conoce, por ejemplo, la curva característica $Q_1 - H_1$ correspondiente a η_1 , puede deducirse la característica Q-H correspondiente a η eliminando η / η_1 entre (1) y (2)

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{Q}{Q_1} \right)^2 \rightarrow H = \frac{H_1}{Q_1^2} \cdot Q^2 = k \cdot Q^2 \quad (2.15)$$

La importancia de estas relaciones estriba en que a partir de ellas se pueden deducir las curvas características de una bomba a cualquier velocidad, (n) conociendo las correspondientes a (n)₁ sin necesidad de utilizar un banco de prueba.

El lugar geométrico de todos los puntos de isorrendimiento son parábolas que pasan por el origen. La bomba trabaja con idéntica eficiencia (η) en todos los puntos. (Rural)

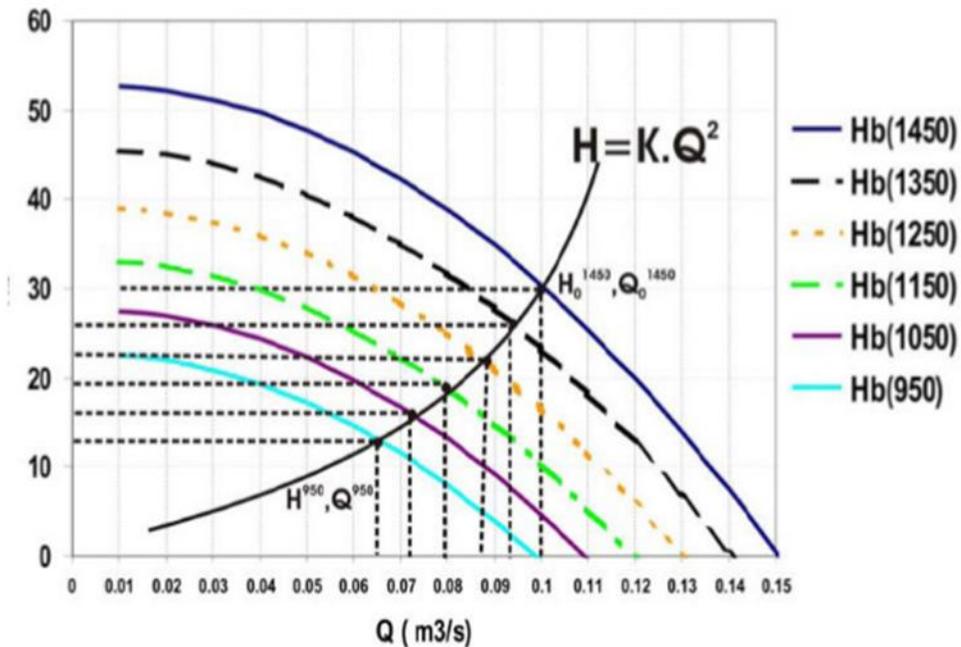


Figura # 4: Relación entre los parámetros Q-H para nuevas condiciones

2.3 Variación de las curvas características

Curva característica de una bomba

La curva característica de una bomba describe la relación entre la altura manométrica (caída de presión) y el caudal, datos que permiten escoger la bomba más adecuada para cada instalación. La altura manométrica de una bomba es una magnitud, expresable también como presión, que permite valorar la energía suministrada al fluido, es decir, se trata de la caída de presión que debe de vencer la bomba para que el fluido circule según condiciones de diseño.

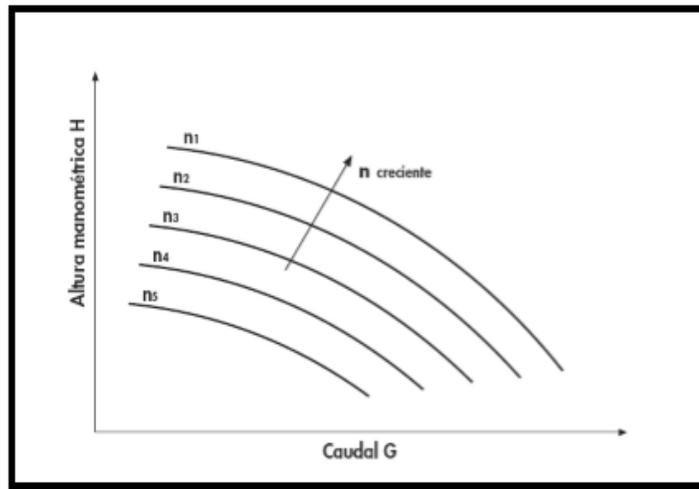


Figura # 5: Relación Q-H cuando la velocidad aumenta.

Como puede observarse en la figura anterior, para cada velocidad de rotación n , hay una curva característica. Nótese también que si la velocidad se reduce, también disminuye la altura manométrica máxima y el caudal máximo.

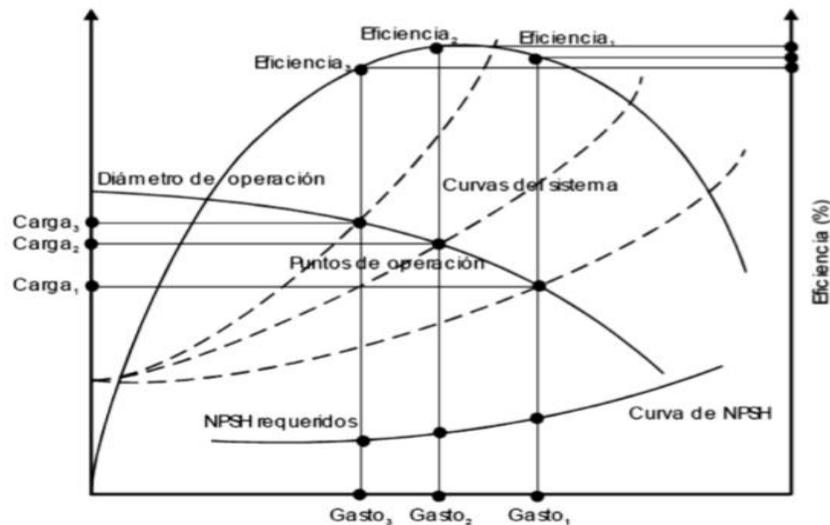


Figura # 6: Relación Q-H para diferentes velocidades de rotación.

Leyes de afinidad de las bombas

Las leyes de afinidad, figura 7, establecen lo siguiente:

- El caudal varía con la velocidad de rotación del rotor.
- La presión varía con el cuadrado de la velocidad de rotación.
- La potencia varía con el cubo de la velocidad de rotación.

	Variación de velocidad	Variación del diámetro del rodete
Caudal	$m_{v2} = m_{v1} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)$	$m_{v2} = m_{v1} \left(\frac{D_2}{D_1}\right)$
Presión	$p_2 = p_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$	$p_2 = p_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$
Potencia	$P_2 = P_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$	$P_2 = P_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$

Figura # 7: Relación de los parámetros en las leyes de semejanza.

Podemos obtener dos conclusiones de los resultados anteriores:

1. Si variamos la velocidad de rotación manteniendo constante el diámetro del rodete, la eficiencia de la bomba se mantiene constante, variando la presión, capacidad y potencia.
2. Variando el diámetro del rodete y manteniendo la velocidad constante, la eficiencia de la bomba se mantendrá constante

Curva NPSH – caudal

El NPSH (*Net Positive Suction Head*, o altura neta positiva en la aspiración) figura 8, es la presión mínima que debe haber en la entrada de la bomba para evitar fenómenos de cavitación.

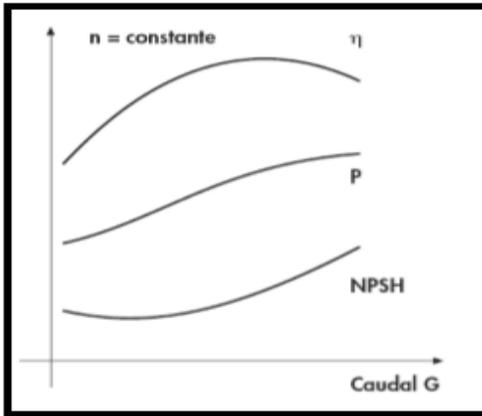


Figura # 8: Curva que representa el NPSH con el caudal

Se puede apreciar que, si la velocidad de rotación n se mantiene constante, la curva de potencia absorbida (P), aumenta con el caudal. El rendimiento (η) en cambio, tiene un máximo en presencia de un determinado caudal y disminuye cuando el caudal se hace superior o inferior a dicho valor.

Otro método es la regulación de caudal mediante una válvula de estrangulamiento

Este método de regulación consiste en colocar una válvula de estrangulamiento a la salida de la bomba donde se produce la descarga de la misma. Mediante la válvula se pueden variar las pérdidas de carga del sistema alterando la característica caudal-altura del mismo, introduciendo una altura H adicional, y ajustando la misma se puede obtener un cruce con la característica de la bomba en un punto de funcionamiento caudal-altura deseada.

Con este método de regulación se puede observar que la característica caudal-altura de la bomba permanece inalterada mientras que la característica caudal-altura del sistema varía. La velocidad de funcionamiento de la bomba no varía y, por lo tanto, funciona a velocidad nominal. Los puntos de funcionamiento para diferentes caudales deseados se van desplazando por la curva caudal-altura de la bomba (figura 9).

Desplazamiento de los puntos de funcionamiento al actuar sobre la válvula de estrangulamiento.

Este método de regulación de caudal es sencillo de implementar y requiere poco mantenimiento. A pesar de dichas ventajas en cuanto a implementación y mantenimiento, tiene un gran inconveniente, a producirse grandes pérdidas de carga en la válvula que se traducen en unas pérdidas elevadas de energía en el sistema de bombeo por lo cual es muy ineficiente

Existen otros métodos como:

- Arranque y paro de la bomba.
- Regulación mediante desvío o *by-pass*.

Analizando, determinamos que de las formas de regulación de caudal examinadas la más adecuada al fin deseado es mediante la variación de las rpm de la bomba pues representa un ahorro considerable de energía, a pesar de ser más complicado la implementación de un sistema de este tipo, resulta muy eficiente cuando se realiza de forma correcta y siguiendo todas las metodologías y estudios necesarios.

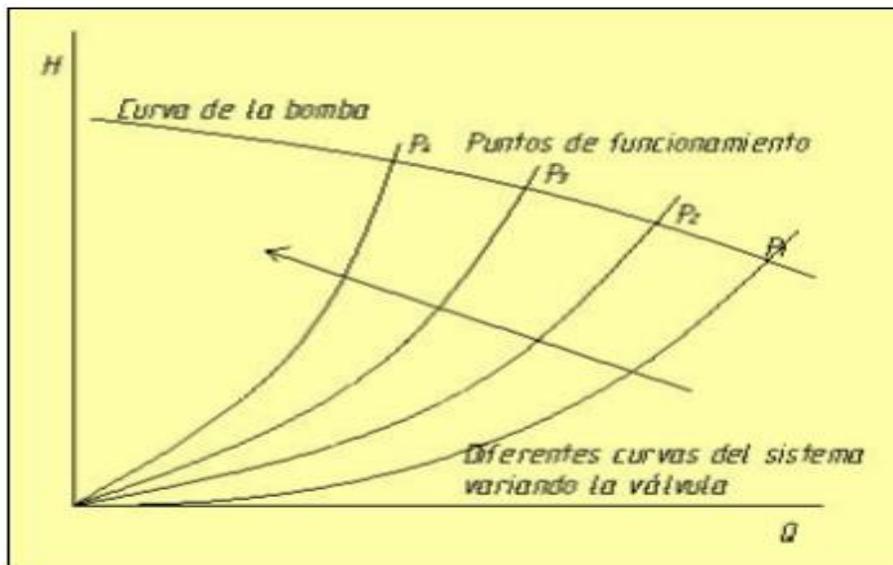


Figura # 9: Curvas cuando se emplea el método de estrangulación.

2.4 Caudal de agua necesario en las unidades terminales

Cuando se dimensiona una instalación de aire acondicionado, independientemente del tipo y tamaño que esta posea, es necesario determinar la carga térmica de la misma para poder seleccionar las unidades enfriadoras de agua, así como las unidades terminales que la conformarán.

Esto resulta de gran importancia en los sistemas centralizados de aire acondicionado que funcionan con agua helada, ya que es imprescindible obtener el caudal de agua, másico (m) o volumétrico (V), que circulará por cada una de dichas unidades terminales, obteniéndose entonces, el caudal total que fluirá por la instalación, partiendo de una diferencia de temperatura de 5°C , manteniendo como constante el calor específico (C_p) a presión constante del agua y de la potencia térmica a disipar en cada local (Q), podemos obtener el caudal de agua en cada uno de ellas despejando el flujo másico de la expresión de la cantidad de calor intercambiado en un equipo, quedando entonces:

$$m = \frac{Q}{c_p \times \Delta T} \quad (2.16)$$

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.17)$$

Donde:

m = caudal másico de agua, kg/s.

Q = cantidad de calor intercambiado en la unidad terminal, kW.

C_p = Calor específico a presión constante, kJ/kg $^{\circ}\text{C}$.

ΔT = Diferencia de temperatura en la unidad terminal, $^{\circ}\text{C}$.

V = Caudal volumétrico de agua, m 3 /h.

ρ = Densidad del agua a temperatura media de trabajo, kg/m 3 .

Lo anteriormente expuesto evidencia la necesidad de conocer los datos de proyecto del flujo de agua en cada unidad o conociendo el modelo de la unidad terminal y la cantidad de calor a disipar, por los datos técnicos aportados por el fabricante del equipo puede conocerse el flujo de agua.

Otro aspecto importante en estas instalaciones es determinar la resistencia que ofrecerá el sistema hidráulico emplazado en la edificación por donde fluirá el agua helada. En circuitos de recirculación cerrados, como es el caso nuestro, la energía mecánica proporcionada por la bomba se destina únicamente a vencer las pérdidas, independientemente de si transcurre por distintas plantas del edificio, no hay que emplear energía para elevar el fluido, estas son: pérdidas por fricción en tuberías (primer término ecuación 2.18), pérdidas en accesorios (segundo término ecuación 2.18) y las pérdidas en equipos (evaporador de la enfriadora de agua y en los serpentines de enfriamiento de las unidades terminales, (tercer término ecuación 2.18). Estas pérdidas se calcularán para el caudal nominal y el tramo más desfavorable en la instalación que será el que mayor caída de presión introduzca.

Por tanto, la ecuación de la energía mecánica se verá reducida a:

$$H_l = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} + \sum k_o \times \frac{V^2}{2g} + H_{eq} \quad (2.18)$$

Donde:

H_l = Pérdidas del sistema, (m).

f = Coeficiente de fricción, *adim.*

L = Longitud de la tubería, (m)

D = Diámetro de la tubería, (m)

V = Velocidad del fluido, (m/s)

g = Aceleración de la gravedad, (m/s²)

K_o = Coeficiente de fricción característicos de los accesorios, *adim.*

H_{eq} = Pérdidas de cargas en equipos de intercambio de calor, enfriadoras y unidades terminales, (m).

Si las pérdidas por accesorios son expresadas como longitud equivalente de tramos de tubos la ecuación anterior quedará como:

$$H_l = f \times \frac{L+L_{ac}}{D} \times \frac{V^2}{2g} + \sum H_{eq} \quad (2.19)$$

De esta forma, podemos obtener en un eje de coordenadas Q-H graficar la curva de resistencia del sistema para varios caudales, distintos al nominal al desarrollar, como ejemplo, la siguiente tabla.

Tabla # 1: Relación Q-H para condiciones distintas a la nominal

	Relación Q-H para condiciones distintas a la nominal					
Q/Q _{nominal}						
H/H _{nominal}						

También se puede obtener las características del sistema de tubería conociendo el trazado de las tuberías, midiendo el diámetro de estas y con la velocidad recomendadas para esta tipo de instalación que no produzcan ruidos, esto conllevaría a una gran cantidad de tiempo y personal, pues las mismas están ocultas en el falso techo de la instalación y aisladas térmicamente, por lo que para conocer el diámetro tendríamos que ranurar una sección de dicho aislamiento.

2.5 Ahorros energéticos y medioambientales al aplicar los métodos de regulación

Con la instalación y cambio de las válvulas averiadas que actualmente están instaladas en el hotel, se obtendrán un ahorro de energía por concepto de bombeo de agua helada que, a su vez, influirán de manera positiva en el medio ambiente, al dejar de emitir gases de efecto

invernadero. La cuantificación de estos ahorros se basa en la cantidad de horas que las bombas de los circuitos secundarios que conforman el sistema, trabajarán con caudales de agua y altura manométrica menor que las de diseño debido al vencimiento de la carga térmica de climatización en los locales habitacionales y de uso común. (Sergio Montelíer Hernández, 2008 a; Sergio Motelíer Hernández, 2010 b; Quiles, 2017)

La energía consumida por una bomba, en kWh, se puede expresar como la integral de la potencia consumida a lo largo del tiempo de funcionamiento de esta, es decir:

$$kWh = \int_0^T P_B = \int_0^T \frac{\rho \times g \times Q \times H}{1000 \times \eta_{ins}} \quad (2.20)$$

donde:

T = Tiempo de funcionamiento, (h).

P_B = Potencia consumida por la bomba al realizar trabajo sobre el fluido, (kW).

ρ = Densidad del fluido trasegado a la temperatura de trabajo, (kg/m³).

g = Aceleración de la gravedad, (m/s²).

Q = Caudal de agua helada suministrado por la bomba, (m³/s).

H = Altura manométrica desarrollada por la bomba, (m).

En las condiciones actuales de funcionamiento, la bomba trabaja en régimen estacionario, por lo que la ecuación (2.20) se transforma en un producto resultando, ecuación (2.21) que:

$$kWh = P_B \times T = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{1000 \times \eta_{ins}} \quad (2.21)$$

Al realizar la propuesta de cambio en la instalación hotelera el régimen de funcionamiento de la bomba, dejaría de ser todo el tiempo estacionario, es decir, variarían sus condiciones iniciales a través de él, ya que cambiarán el caudal y la altura, es decir trabaja en régimen variable de velocidad, según demande la instalación, resultando que la ecuación (2.20) se

transforma en la sumatoria de las distintas condiciones de trabajo como se aprecia en la ecuación (2.22)

$$kWh = \sum_0^i P_{Bi} \times T_i = \sum_0^i \frac{\rho \times g \times Q_i \times H_i}{1000 \times \eta_{insi}} \quad (2.22)$$

La diferencia entre las ecuaciones (2.21) y (2.22), serán los ahorros energéticos logrados. Estos ahorros energéticos al multiplicarlos por el valor de la energía eléctrica, según tarifa del hotel, nos dará el dinero que la instalación deja de erogar en un tiempo determinado, es decir:

$$\$_{ah} = [(P_B \times T) - \sum_0^i P_{Bi} \times T_i] \times C_{ee} \quad (2.23)$$

donde:

$\$_{ah}$ = Dinero ahorrado en el período analizado, \$.

C_{ee} = Costo de la energía eléctrica, \$/kWh.

La producción de 1 kWh de electricidad se puede hacer utilizando diferentes fuentes de energía, cada fuente puede ser caracterizada por un factor que indica cuántos kg de CO₂ se emiten a la atmósfera para producir 1 kWh de electricidad. En (Díaz, Monteagudo, Valdivia, & Miranda, 2016) se plantea que este factor es de 0.91 Kg CO₂/kWh.

2.6 Análisis de la inversión de la restauración del sistema

Para la evaluación de inversiones de ahorro energético se tienen dos métodos, que son: métodos estáticos y dinámicos, este último será el usado para analizar los cambios propuestos ya que tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo, lo que significa que un determinado capital que se tiene actualmente va incrementando su valor en el futuro a una tasa de interés fijada, en otras palabras, el dinero que tengamos hoy tiene más valor que otra a recibir en el futuro pues el primero al ser invertido ganará una cierta cantidad de intereses. (León, Rriversa, Tápanes, & Rivera) (León et al.)

Lo primero que se define es un horizonte o lapso de tiempo donde se espera que la inversión sea recuperada, una inversión con buenos dividendos es aquella que se recupera en menos de 5 años, aunque existen inversiones a largo plazo cuyo tiempo es mayor, pero, por ejemplo, son beneficiosa para el ya deteriorado medio ambiente.

La metodología que se presenta ha sido empleada en varias tesis de maestrías y de grado en nuestra universidad lo cual otorga fiabilidad en su aplicación.

El costo total de una inversión se puede calcular de la forma siguiente:

$$CTI = CI + CO * \left[\frac{(1+i)^m - 1}{(1+i)^m * i} \right] \quad (2.24)$$

donde:

CTI= Costo total de la inversión.

i = Tasa de interés del banco de donde se extrajo el dinero, o la tasa de interés del crédito o préstamo solicitado, en fracción.

CI = Costo de instalación, que es la suma del costo de la inversión más el montaje, en \$.

CO = Costo de operación y mantenimiento, en \$.

m = Vida útil, se toma 10 años.

$\left[\frac{(1+i)^m - 1}{(1+i)^m * i} \right]$ = Coeficiente que tiene en cuenta que el costo de operación y mantenimiento se produce durante su vida útil.

En este caso, el costo de operación no existe debido a que estos sistemas son totalmente automáticos, por lo que solo llevará implícito el costo de mantenimiento del equipamiento que se compró, el cual se calcula por la siguiente expresión:

$$CO = 0,03 * CI \quad (2.25)$$

El costo de la instalación (CI) también se puede subdividir en:

$$CI = C_{inv} + C_{mont} \quad (2.26)$$

donde:

C_{inv} → Costo de la inversión.

C_{mont} → Costo del montaje

Movimiento de fondos

Los períodos de pagos y cobros son los que determinan el movimiento de fondos de una inversión, mediante su análisis podemos evaluar la rentabilidad de cualquier proyecto de inversión que se ejecute. Resulta de gran importancia al analizar el movimiento de fondos definir el horizonte y período de la inversión, el primero determina el tiempo de la inversión, dentro del cual se producirán cobros y pagos, mientras que el período serán las partes en que se divide el horizonte y serán de igual duración.

La depreciación se calcula según tiene normado el hotel y se encuentra regulado por el fisco en un 10 % anual del costo de la inversión; el valor de la depreciación D, expresada en \$/año, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$D = 0,10 \cdot CI \quad (2.27)$$

Si no se realiza el movimiento de fondos no se puede determinar y evaluar con todo rigor las inversiones. Es aconsejable antes de acometer una inversión realizar un estudio de mercado previo, que permita tener en cuenta todas las posibilidades de ofertas; en este caso se utiliza un solo proveedor por ser este al que se tuvo mayor acceso durante la búsqueda de precios, no obstante por ser esta una prestigiosa empresa del aire acondicionado, los precios se ajustan a la realidad del mercado internacional.

- Período de recuperación de la inversión (*pay-back*).

El plazo de recuperación (*pay-back*), es el periodo de tiempo que tarda en recuperarse el desembolso inicial con los flujos de caja. El criterio de selección es dar preferencia a aquellos cuyo plazo de recuperación sea menor. Por tanto, se trata de un criterio de liquidez; un criterio en el que se prefieren las inversiones más líquidas.

Se utilizó la siguiente ecuación la cual tiene en cuenta que todos los cobros y los pagos anuales son iguales.

$$T_{ri} = \frac{CTI}{[Cobros - Pagos * (1 + I_b)] * (1 - I_{sr})} \quad (2.28)$$

donde:

T_{ri} = Período de recuperación de la inversión, años.

I_b = Intereses a pagar por préstamos en el año k o intereses dejados de cobrar por extraer dinero del banco, 1 %.

n = Horizonte analizado.

I_{sr} = Impuesto sobre la renta, es la parte de lo ahorrado que se paga como impuesto a la ganancia de la empresa, para el hotel, es el 20 % de la ganancia.

➤ Valor actual neto (VAN).

Este método dinámico tiene en cuenta que el dinero invertido pierde valor con el tiempo debido fundamentalmente al interés bancario y representa la magnitud en que se incrementa el valor actual de la empresa o la ganancia que se espera obtener con la inversión. En su cálculo se actualizan todos los flujos de fondos de un año base y se compara el flujo equivalente, si es mayor que cero es económico realizar la inversión, ya que permite obtener una mayor cantidad que el dinero invertido inicialmente. Es considerado como el mejor indicador de la rentabilidad de un proyecto y el mayor inconveniente de este método consiste en fijar el valor de la tasa de interés (i). No obstante

como el inversionista es el propio dueño del inmueble la tasa de interés bancaria se puede fijar en 1%, aunque esto puede variar debido a la crisis mundial actual.

$$VAN = \sum_{k=0}^n \frac{St * k}{(1+i)^k} \quad (2.29)$$

donde:

St = Movimiento de fondos, \$.

k = Período analizado, en este caso el año.

El valor resultante puede ser positivo o negativo, el valor positivo es lo que se desea; el valor negativo significa que la inversión no es recuperable en el horizonte determinado, esto ocurre generalmente cuando el valor de la producción que se logra con la inversión, se encuentra por debajo del punto de isorrentabilidad de la empresa.

➤ Tasa interna de retorno (TIR).

Es el valor de i (tasa de descuento, interés, etc.) que anula al Valor Actual Neto (VAN) y también se conoce como: tasa de retorno o rentabilidad de una inversión. Se aplica generalmente para determinar qué interés máximo se debe aceptar de los créditos propuestos o existentes en el mercado financiero, o sea, cualquier interés de crédito o préstamo menor que el calculado es aceptable para realizar la inversión. Se calcula despejando el interés de la siguiente ecuación.

$$0 = \sum_{k=1}^n \frac{St * K}{(1+TIR)^k} \quad (2.30)$$

donde:

TIR = Tasa interna de retorno, en fracción.

CONCLUSIONES

1. Cambiar las válvulas de dos vías convencionales actualmente averiadas por válvulas de equilibrado y control independiente de la presión.
2. Se realiza un análisis de los tipos de regulación del funcionamiento de las bombas centrífugas en un sistema centralizado de aire.
3. La reanimación del sistema propuesto ahorrará al hotel recursos energéticos y medioambientales, disminuyendo sus gastos económicos.
4. Se realiza un trabajo metodológico que permitirá su aplicación en instalaciones similares del polo turístico.

RECOMENDACIONES

1. Obtener las características de los circuitos secundarios de agua helada como caudales de agua y del sistema, así como de las unidades terminales.
2. Realizar el análisis de factibilidad de la inversión para conocer su periodo de recuperación.
3. Capacitar al personal de mantenimiento encargado del sistema de agua y mecánicos de habitaciones.
4. Llevar a cabo los cambios propuesto para devolverle al sistema la eficiencia energética en la instalación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (ATECYR). (2012). Guía técnica de selección de equipos de transporte de fluidos
- Arizone. (2018). Que es un fan-coils y como funciona este equipo. In.
- Calor, F. (2013). *Frío y Calor*.
- Carrier. (2009). *Manual de Aire Acondicionado* (S. A. Marcombo Ed.).
Chiller Plant Efficiency.
- Determinación de las características de una bomba centrífuga. (2017).
- Díaz, Y., Monteagudo, J. P., Valdivia, Y., & Miranda, Y. (2016). Feasibility Evaluation of Two Solar Cooling Systems Applied to a Cuban Hotel. Comparative Analysis. *Ingeniería Energética*, 37(1), 35-44.
- Hernández, S. M. (2008 a). *Reducción del consumo energético en instalaciones con sistemas de climatización centralizados todo-agua a flujo constante*.
- Hernández, S. M. (2010 b). Estrategia operacionales para el ahorro de energía en sistemas centralizados de climatización por agua helada de hoteles turísticos *Retos turísticos* 9.
- HESS, H. (2010). Factsheet Chiller Efficiency.
- Laurencio, R. M. (2015). *Procedimiento para la optimización energética de los sistemas de climatización centralizados todo-agua en hoteles*. Intituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- León, A. M., Rrivera, D. N., Tápanes, L. Q., & Rivera, C. N. (). *Herramientas Económicas-Financieras Para La Toma De Decisiones Generales* Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
- Ma, Z., & Wang, S. (2009). Energy and Buildings.
- Primary Secondary Pumping Application Manual. (2013).
- Quiles, P. G. V. (2017). Medidas de Ahorro Energético en los Circuitos Hidráulicos.
- Refrigeración, A. T. d. C. y. (2012). Guía Técnica de instalaciones de climatización por agua.
- Reina, G. M. Manual para el diseño de una red hidráulica de climatización. 8.
- Reina, G. M. Manual para el diseño de una red hidráulica de climatización. 9.

Renedo, C. J., Diego, I. F., Haya, J. C., & Fernández, F. O. Máquinas de Fluidos Incompresibles *Bloque 1*.

Rural, I. Grupos de bombes.

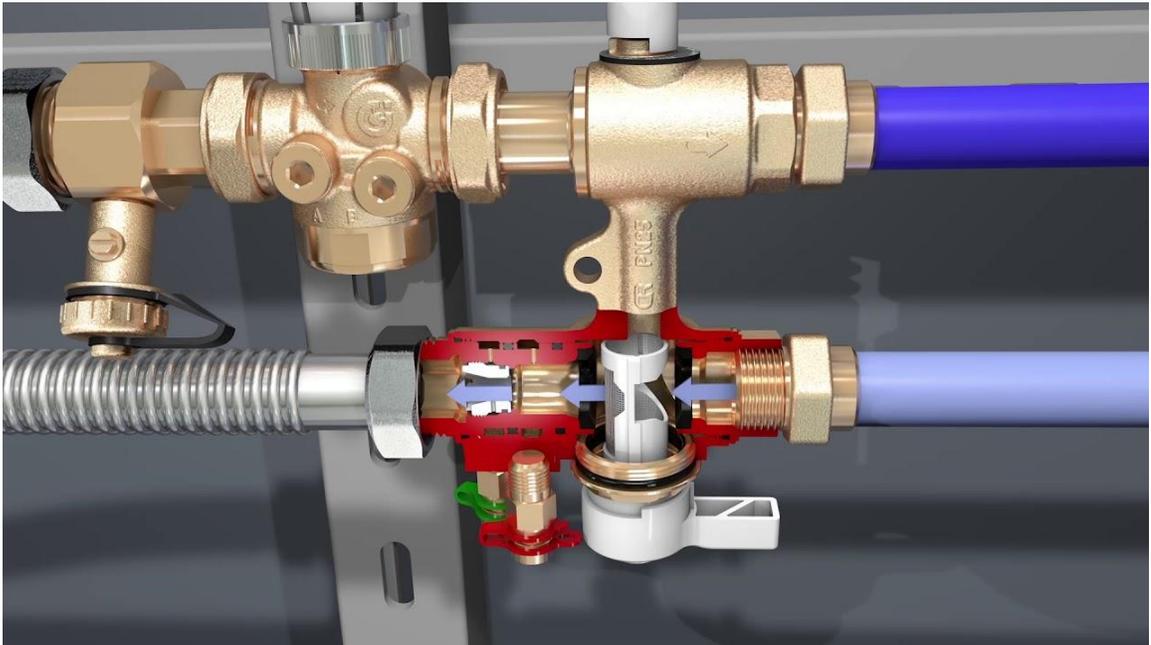
Valdéz, O. D. (2009). *Componentes de la climatización centralizada en hoteles : propuesta para realizar el consumo energético*. (Trabajo de diploma), Instituto Superior Minero Metalúrgico " Dr. Antonio Nuñez Jiménez" Moa-Holguín. Retrieved from <https://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/3659>.

Variable Primary Flow Systems. (2012). Retrieved from <https://www.bellgossett.com>

Anexos:



anexo # 1: Unidad de enfriamiento fan-coils



anexo#2: Válvulas de control