



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO-METALÚRGICO
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ
FACULTAD DE METALÚRGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA.

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero Eléctrico

Red hidráulica y requerimientos de potencia eléctrica en climatización centralizada a flujo variable.

Autor: Disney Rodríguez Pavón.

Tutores: Ms.C Reineris Montero Laurencio.
Dr.C Jesús Rafael Hechavarría Hernández

Moa, 2011
“Año 53 de la Revolución”

Declaración de autoridad

Disney Rodríguez pavón, autor de este trabajo de diploma titulado: “**Red hidráulica y requerimientos de potencia eléctrica en climatización centralizada a flujo variable**”, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

*ISM de Moa, 17 de junio del 2011
“Año 53 de la Revolución”*

Autor:
Disney Rodríguez Pavón

Tutor:
Ms.C Reineris Montero Laurencio.

Tutor:
Dr.C Jesús Rafael Hechavarría Hernández.

PENSAMIENTO

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

Albert Einstein

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma a todas esas personas que siempre han estado presentes, en especial:

A mis padres: Esperanza y Rafael que tanto me han apoyado siempre,

A mis hermanas Yanelis y Mailin,

A mis amigos,

Y a todas esas personas que son especiales para mí y saben que siempre están presentes aunque no las mencione.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer:

A mis tutores por toda su ayuda en el desarrollo de este trabajo,

A mis padres y a toda mi familia, que siempre me estimularon a

Seguir adelante con mis estudios,

A mis amigos de forma general,

*Y a todas las personas que me ayudaron y aconsejaron tanto en los
buenos como en los malos momentos,*

A todos, les doy las gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una descripción de los trabajos precedentes y se abordan los elementos teóricos relacionados con el análisis y la modelación de las redes hidráulicas utilizadas en la climatización centralizada. Esta climatización se realiza mediante los Circuitos Secundarios de Agua Fría y entre los componentes que se analizan se encuentran: las redes hidráulicas en malla, el equilibrado hidráulico, tuberías, accesorios, motores de inducción, bombas centrifugas y unidades terminales. Se describen las características generales de la aplicación informática desarrollada en AutoCAD para realizar la modelación hidráulica, así como la potencialidad de validar los sus resultados con el software EpaNET. Aparecen los datos completos de la red escogida compuesta por 273 tramos y 286 nodos identificándose las habitaciones críticas que sugieren realizar un equilibrado. Como caso de estudio se simula la batería de las unidades terminales número 1 de 9 existentes en la edificación. Se demuestra como interactúan las características térmicas de los locales y los componentes hidráulicos para una evaluación energética del sistema de forma integral. Se hace el análisis dirigido a evaluar los requerimientos de potencia eléctrica para diferentes configuraciones de la red hidráulica.

ABSTRACT

A description of preceding works comes true in the present work and they go aboard the theoretic elements related with the analysis and the modelation of the hydraulic nets utilized in the centralized air conditioning. This air conditioning is carried out by means of the Secondary Circuits of Cold Water and among the components that are analyzed they are: the hydraulic nets in mesh, the balanced one hydraulic, pipes, accessories, induction motors, bombs centrifuge and units terminal. The general characteristics of information-technology application developed in AutoCAD to accomplish hydraulic modelation, as well as the potentiality of validating those results with the software EpaNET. Appear the complete data of the chosen net fixed by 273 stretches and 286 nodes providing evidence of identity the critical living quarters that they suggest selling off one balanced. As I marry of study simulates him the battery of the terminal units number 1 of 9 existent at the edification. It is demonstrated as the thermic characteristics of the locales and the hydraulic components for an energetic evaluation of system of integral form interact. Guided analysis is done to evaluate the requisites of electric potency for different configurations of the hydraulic net.

Tabla de contenidos

	Pagina
	1
CAPITULO 1	
	Introducción general
	Fundamentación teórica de la operación de la red hidráulica en Climatización Centralizada a flujo de agua variable
	5
1.1	Trabajos precedentes.. 5
1.2	Modelación hidráulica para la climatización. 11
1.2.1	Redes hidráulicas. 12
1.2.2	Fundamentos teóricos generales para la modelación. 13
	hidráulica.
1.3	Equilibrado hidráulico de las redes para climatización a flujo 17
	variable.
1.4	Red hidráulica en malla. 20
1.4.1	Análisis de las redes de distribución malladas. 22
1.4.2	Métodos de cálculo de las redes de distribución mallada. 22
1.4.3	Método del Gradiente. 23
1.4.4	Modelación matemática de las redes de distribución de 24
	agua.
1.5	Motor de inducción 25
1.5.2	Motor de inducción a cargas variables con regulación de 26
	frecuencia.
1.6	Bombas centrífugas a caudal variable. 28
1.6.1	Leyes de proporcionalidad. 29
1.7	Elementos componentes de la red hidráulica para 29
	climatización centralizada.
1.7.1	Tuberías y Accesorios. 29
1.7.1.1	Trazado de las tuberías. 30
1.7.2	Unidades Terminales (Ventilo convectors Fan-coil). 31
Capítulo 2	Procedimiento para la modelación hidráulica de los 33
	Circuitos Secundarios de Agua Fría en Climatización Centralizada
2.1	Materiales y métodos. 33
2.2	Algoritmo del procedimiento para la modelación hidráulica. 34
2.2.1	Caracterización del agua mediante sus propiedades físicas 35
	adaptadas al proceso.
2.2.2	Captura y sistematización de la configuración y datos de la 35
	red de distribución.
2.2.3	Captura, sistematización y modelación del accionamiento 36
	electromecánico para el bombeo.
2.2.4	Captura, sistematización y modelación de las pérdidas de 37
	carga de las unidades terminales de cada local.
2.2.5	Captura, sistematización y modelación de los componentes 38
	del equilibrado hidráulico.
2.2.6	Trazado espacial de la red de distribución y sus 38
	componentes.

2.2.7	Determinación del caudal de diseño y de operación de las unidades terminales.	40
2.2.8	Equilibrado hidráulico de la red.	40
2.2.9	Determinación de caudales y presiones en el sistema.	41
2.3	Estrategias de operación que incrementan la eficiencia en los Circuitos Secundarios de Agua Fría.	43
2.3.1	Eficiencia energética en los Circuitos Secundarios de Agua Fría.	44
2.3.2	Modelación energética de en los Circuitos Secundarios de Agua Fría.	47
Capítulo 3	Resultados de los requerimientos de potencia eléctrica a partir de la modelación hidráulica.	52
3.1	Aplicación CAD para la modelación hidráulica	52
3.1.1	Validación de los resultados en el software EPANET	55
3.2	Particularidades de la red hidráulica caso de estudio.	55
3.2.2	Caudales de diseño (resultados)	56
3.3	Ejemplo de requerimientos de potencia mediante la simulación hidráulica de un patinejo del CSAF caso de estudio	57
3.4	Consideraciones del equilibrado hidráulico y comportamiento energético	70
	Conclusiones.	72
	Recomendaciones.	73
	Bibliografía.	74
	Anexos.	77

INTRODUCCIÓN GENERAL

Las instalaciones hoteleras en regiones con clima cálido exhiben como uno de sus principales problemas energéticos la climatización de sus espacios. Es común encontrar que como promedio el 60% del consumo de energía eléctrica se deba a estas funciones. La variabilidad del clima también incide en el comportamiento energético de los sistemas de Agua Caliente Sanitaria (ACS) pero aun es insuficiente la gestión en estos sistemas donde la impulsión del agua fría de la climatización y el agua caliente de servicio.

La climatización en espacios habitacionales en todos los ámbitos debe cumplir con un mínimo de requisitos de confort para sus ocupantes logrando aprovechar al máximo los recursos energéticos y considerando el máximo ahorro de energía manteniendo los estándares de confort.

La climatización de los hoteles es un factor que decide la funcionalidad de la explotación. En especial, los Sistemas de Climatización Centralizada por Agua Helada (SCCAH) son de uso obligatorio en los hoteles de 4 y 5 estrellas (NC-45-6, 1999), y causan aproximadamente el 60% del consumo de la energía eléctrica (Mostelier, 2008), (Armas, 2008).

Existen diversas estrategias y acciones que permiten perfeccionar los sistemas de climatización entre las cuales podemos mencionar, los variadores de velocidad (V.V.), la acumulación térmica de hielo, válvulas inteligentes para la regulación óptima, pizarras de control avanzado, motores de alta eficiencia, bombas eficientes, tuberías con mejores propiedades para el transporte, etc. Todos estos mecanismos aumentan la eficiencia de las instalaciones, disminuyen el consumo de energía eléctrica y desplazan

del horario pico un gran por ciento de las cargas con la consecuente disminución de los gastos operacionales.

En el régimen de los circuitos de impulsión de agua fría y caliente se presenta una relación entre variables no del todo conocidas que inciden en cada uno de los elementos componentes (motor, bomba, red hidráulica, carga térmica y el control). Es por tanto la necesidad de acercarnos a determinadas relaciones que existen entre las variables del sistema que permitan proponer estrategias de operación en función del ahorro.

La impulsión del agua fría y caliente representa como promedio entre el 10% y el 12% del consumo de energía total del hotel. Las bombas que garantizan la impulsión del agua operan los 365 días del año, las 24 horas del día, con un elevado consumo energético, de aquí la importancia en mejorar su operación en conjunto con los demás elementos.

Situación problemática

Altos consumos energéticos en la actividad turística y en particular en la Climatización Centralizada, no es evaluado suficientemente el comportamiento hidráulico de las redes que garantice el menor consumo de energía, el problema del equilibrado hidráulico desde el punto de vista teórico – práctico no ha sido abordado suficientemente como problema energético en la operación de las redes y la necesidad de herramientas que permitan el diseño y la evaluación operacional de las redes hidráulicas en climatización centralizada.

Problema a investigar

Necesidad de evaluar los requerimientos de potencia eléctrica durante la operación de la red hidráulica en Circuitos Secundarios de Agua Fría de la Climatización Centralizada a flujo variable, que facilite la toma de decisiones.

Objetivo General

Evaluar la operación de la red hidráulica en Circuitos Secundarios de Agua Fría de la Climatización centralizada a flujo variable y su incidencia en los requerimientos de potencia eléctrica para el bombeo.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar los componentes de la red hidráulica que deciden la eficiencia en la operación de la red en los CSAF a flujo variable.
- Sintetizar los aspectos del equilibrado hidráulico en redes malladas para la climatización a flujo variable y su incidencia en el consumo energético.
- Evaluar en un caso de estudio la incidencia de la operación de la red hidráulica en el consumo de energía eléctrica del conjunto motor-bomba.

Objeto de estudio

Circuito Secundario de Agua Fría en climatización centralizada.

Campo de acción

Comportamiento energético en la operación de la red hidráulica en climatización centralizada a flujo variable

Hipótesis

Si se evalúan de manera adecuado los aspectos que inciden en los requerimientos de potencia eléctrica de las bombas de los CSAF en Climatización Centralizada a flujo variable entonces se puede realizar el transporte eficiente del agua con la consecuente reducción del consumo de energía eléctrica

Tareas de la investigación.

1. Análisis bibliográfico.
2. Elaboración del algoritmo para la modelación de las redes hidráulica en los CSAF a flujo variable.
3. Sintetizar aspectos relacionados con el equilibrado hidráulico de las redes.
4. Levantamiento de la información relacionada con el caso de estudio a evaluar.
5. Evaluar en un sistema (CAD) diseñado al efecto de operación de la red hidráulica en el caso de estudio.
6. Conformar el informe técnico.

Capítulo 1. Fundamentación teórica de la operación de la red hidráulica en Climatización Centralizada a flujo de agua variable

En este capítulo se presenta un análisis bibliográfico, donde se señalan los elementos relacionados con la red hidráulica y su interrelación con los requerimientos de potencia eléctrica, se resaltan algunas condiciones de explotación que inciden en el uso racional de la energía eléctrica. Se describe el estado actual de la red hidráulica en el hotel Blau Costa Verde enmarcado en el polo turístico de Holguín. Se hace referencia además a los aspectos teóricos de cada uno de los elementos que forman parte de la red.

1.1 Trabajos precedentes

El sector hotelero se caracteriza por un consumo poco racional de energía eléctrica. Esto se debe a que la principal función del hotel es dar el máximo confort a sus clientes y para ello, se necesita energía. A pesar de todo, existen muchas oportunidades de reducción de consumos, o lo que es lo mismo, de costos económicos, mediante la implantación y realización de mejoras tanto en la distribución y regulación.

Los costos energéticos oscilan entre el 3% y el 10% de los costos globales del hotel, siendo a su vez la partida de presupuesto más elevada tras los gastos de personal y de alimentación Ferran, (2003).

Existe un flujo turístico que es por naturaleza estacional, a la inversa con el verano y las altas temperaturas, siendo para Cuba el mes de mayor arribo de turistas el de diciembre y el de menor arribo junio. Creándose altos consumos de energía en meses donde la ocupación es baja como por ejemplo en verano.

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

- Temporada alta: del 8 de enero al 6 de abril y del 17 de diciembre al 7 de enero.
- Temporada media: del 16 de abril al 13 de julio y del 3 de septiembre al 16 de diciembre.

- Temporada baja: del 7 al 15 de abril y del 14 de julio al 2 de septiembre.

Algunos autores plantean que para el buen funcionamiento de las instalaciones hoteleras, desde el punto de vista energético debe garantizar menos de un 5% de sus costos totales para cubrir los gastos energéticos Travel, (1997); González y Looper (1999).

Por esta razón en las instalaciones hoteleras, influye notoriamente en la reducción de los consumos energéticos la posibilidad de incluir mejoras tecnológicas en el equipamiento y sistemas. Las mayores potencialidades están en primer lugar en adaptar los consumos a la demanda en cada uno de los servicios y en particular en el flujo de agua fría y caliente para brindar el confort a la carga térmica, lo cual se refleja en pocas instalaciones.

El consumo de energía de los hoteles debería ser proporcional a la ocupación del mismo y al uso que el huésped de a la instalación. Pero en la práctica existen factores que influyen en el consumo de energía eléctrica, conociendo estas variables se puede tratar de minimizar el impacto de ellas. En los países del Caribe donde las temperaturas exteriores son elevadas y los niveles de confort (24 °C) son los mismos para todas las personas las variables de mayor incidencia en el consumo eléctrico son:

Clima: Tiene una gran significación entre los factores a analizar el consumo eléctrico, ya que en una misma habitación se pueden consumir hasta 10 veces más electricidad en la temporada de verano que en la invierno Ramos, (1999), Acosta, (1999). En Cuba los meses más calurosos son Julio y Agosto, con el consiguiente aumento del consumo eléctrico, y en meses como Mayo, Junio, Septiembre y Octubre la temperatura exterior disminuye como consecuencia del aumento de las lluvias en este período.

Categoría del Hotel: El máximo consumo de energía de una habitación lo representa la climatización seguido por la iluminación y en ambos casos el consumo o no de la energía eléctrica depende del régimen de explotación a que es sometida, volumen de la

habitación, la cantidad de turistas y el tiempo de estancia en ella, costumbres y hábitos de consumo de cada turista (Blanco).

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

Estudios preliminares realizados por Monteagudo, (2002) y Campos, (2000) confirman la importancia de estos factores y la necesidad de obtener modelos que relacionen el consumo de energía eléctrica de las instalaciones hoteleras con factores de las variables anteriormente analizadas.

En el caso particular de los circuitos secundarios de agua fría (CSAF), estos no son más que un sistema de bombeo con la función de transportar agua fría aproximadamente a 7 C^0 procedentes de las enfriadoras hacia una carga térmica, a través de un circuito cerrado de redes hidráulicas de diferentes características. Luego de un análisis bibliográfico referido a elementos relacionados con los CSAF encontramos un conjunto de m potencialidades tecnológicas y medidas técnico-organizativas cuya aplicación en estos sistemas garantizan eficiencia. Todo lo que seguidamente se expone nos confirman la existencia de elementos que aportan al cumplimiento del objetivo de nuestro trabajo.

Existen dos regímenes básicos en los que pueden trabajar los circuitos secundarios de agua fría (CSAF), a flujo variable o a flujo constante, con la diferencia que el primero emplea variadores de velocidad y el segundo regulación mecánica del caudal. Aquí aparece el primer elemento tecnológico (VV) que no está generalizado su empleo en hoteles, la implementación de los variadores de velocidad fue propuesta y abordada profundamente por (Alexei Coba Lauzado) en su trabajo de diploma desarrollado en el

año (2003), además se han realizado estudios que abordan el tema de los variadores de velocidad en la climatización centralizada. *Lozada Núñez, Universidad de Oriente, (2007)*, establece una metodología para el análisis del empleo de variadores de velocidad en sistemas de bombeo, pero sólo se relacionan las interacciones entre las características de la bomba, la red y el motor de inducción. A partir de las ecuaciones de proporcionalidad y las ecuaciones del motor de inducción, estas leyes de afinidad tienen su análisis para sistemas de carga estática. A pesar de que se evalúa el comportamiento energético del accionamiento no se integra a este análisis las diferentes cargas parciales en las que pueden trabajar las zonas.

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

En el trabajo de diploma realizado por *Yosbany García Font, Moa (2010)* se exponen con gran profundidad los aspectos relacionados con el control de los circuitos secundarios de agua fría (CSAF) en climatización centralizada pero no se exponen con profundidad los aspectos relacionados con la red hidráulica y sus elementos componentes.

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

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

La gran mayoría de los hoteles cubanos son instalaciones con determinados tiempo de operación, esto hace que algunos CSAF en ocasiones se desajusten. En trabajos como los de *Rodríguez Lozano, Varadero, (2006)*, mediante cálculos hidráulicos con las expresiones de Bernoulli demuestra que es insuficiente el caudal que garantice el trasiego correcto del agua por todas las ramas de la red. Se da solución a un problema de suministro de agua y el sistema analizado es a caudal constante. Algo similar sucedió en la villa del hotel Las Brisas en Guardalavaca, realizándose el cambio a caudal variable del sistema de impulsión. *Hernández Velásquez, Universidad de Oriente, (2005)*. En ambos casos no se consideraron las perturbaciones del clima y modelo térmico de la edificación.

Se presentan en el 2009 un conjunto de resultados que tienen como centro los CSAF. Uno de ellos realiza un riguroso marco teórico de las relaciones entre los componentes

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

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

Como se conoce la operatividad del caudal variable en los CSAF se logra con el empleo de los variadores de velocidad en *Sergio Montelíer, Cienfuegos, (2007)*, se muestra la implementación de una aplicación prototipo que enlaza el software supervisión de procesos EROS y el control a lazo cerrado de este sistema permitiendo la recolección de datos bajo distintas condiciones. Esta aplicación permite operar el sistema bajo cualquier parámetro admisible de la presión de descarga de la bomba y además se puede ajustar el controlador PI que gobierna al variador desde la computadora. Se obtuvieron buenos resultados experimentales, pero aún no se integra a la operación del accionamiento, los aspectos térmicos del edificio ni los parámetros ambientales para lograr un modelo de la planta más acertado.

Un método que racionaliza el consumo de energía en una red de distribución de agua para la climatización resulta el de compensación y balance. Un estudio basado en este método logra las mínimas pérdidas de cargas posibles en un sistema de caudal

variable. El estudio consistió en ubicar válvulas de compensación en todos los ramales de la red trabajando en línea con un sistema computarizado. Estas válvulas operan a través de un modelo matemático creado para cada ramal en función de las mediciones preliminares realizadas. Estos modelos no fueron divulgados y no se tienen en cuenta los aspectos térmicos del sistema. *BEECKMANS, (2003)*. Se obtienen reducciones del consumo energético entre el 15 y 20%, pero la instrumentación empleada para poder mantener estas condiciones implican una inversión considerable no siempre posible. A pesar que se han realizado varios trabajos, relacionados con el objeto de estudio son insuficientes los resultados, se necesita una mejor estimación del consumo de electricidad teniendo en cuenta las principales variables inciden en la operación de la red hidráulica.

1.2 Modelación hidráulica para la climatización

La modelación matemática tiene como objetivo fundamental reproducir con la mayor exactitud posible el comportamiento real del sistema físico que representa, es la base que se utiliza en el cálculo hidráulico para simular diferentes estados que se producen en la red de distribución de agua sin tener que llegar a experimentarlos físicamente. El proceso de elaborar un modelo matemático para una red de distribución de agua presupone recopilar toda la información posible acerca de su estructura y funcionamiento y tratarla posteriormente para que pueda ser asimilada por los programas de análisis correspondientes.

Existen dos tipos fundamentales de modelos hidráulicos:

- Modelos estáticos: simulan el estado de la red en un instante determinado, generalmente en momentos en que se producen presiones mínimas (situación punta de consumo) o presiones máximas (situación valle de consumo).
- Modelos que simulan el comportamiento de la red a lo largo de un período de tiempo, entre los que se encuentran: (Modelos dinámicos, Modelos cuasi-estáticos o en período extendido)

En el caso del modelo matemático de las redes hidráulicas para climatización a flujo variable se impone el cálculo de las variables que caracterizan a tuberías, nodos, estación de bombeo, las diferentes válvulas para el equilibrado y las unidades terminales. Estos sistemas para el caso de la climatización a flujo variable trabajan a presión constante y flujo variable con un solo nodo de suministro.

En la actualidad los modelos están siendo utilizados para satisfacer un amplio rango de necesidades en lo referente a la operación del sistema Araujo et al., (2006); Bicik et al., (2009a, 2009b), constituyen herramientas de apoyo a la planificación, diseño y explotación de una red Olsson et al., (2009); Tabesh et al., (2009).

1.2.1 Redes hidráulicas

Las redes hidráulicas utilizadas en los SCCAH son redes cerradas y su topología y recorrido en los sistemas dependen de los sistemas constructivos a los cuales deben adaptarse. Las redes cerradas definen el término de las Redes Malladas obtenidas mediante la unión entre sí de los extremos libres de tuberías ramificadas. Una vez constituida la red la alimentación puede efectuarse por sus dos extremos indistintamente. Las tuberías principales se comunican unas con otras, formando circuitos cerrados.

En el caso de las redes hidráulicas en malla para la climatización, la distribución se efectúa en mallas concentradas, cambiantes en dependencia de las unidades terminales que estén en funcionamiento, lo que hace que el recorrido del fluido este en constantes cambios. En las redes en malla un punto cualquiera de la red puede abastecerse por varios caminos, lo que hace que se reduzcan las pérdidas de carga, y que por otra parte una interrupción determinada no afecta a otros puntos aguas abajo ya que puede abastecerse por otro camino. La red puede dividirse en sectores mediante llaves de paso, de manera que, en caso necesario, cualquiera de ellos pueda quedar fuera de servicio y de este modo facilitar las operaciones de limpieza y de mantenimiento que son necesarias efectuar con carácter periódico.

Las redes en malla presentan como ventajas el indistinto sentido de la circulación del agua; mejor distribución de la presión y ante una avería puntual puede aislarse un tramo y dar servicio través de otros tramos de la malla. Los inconvenientes radican en un mayor costo económico y serán precisos variar pruebas para conseguir que se cumplan los requisitos de que, la suma algebraica de las pérdidas de carga producidas a lo largo de un circuito cerrado sea nula. Este fenómeno relacionado con el equilibrado, no es un problema difícil de resolver en la actualidad debido a los métodos y tecnologías empleadas para resolver esta situación.

1.2.2 Fundamentos teóricos generales para la modelación hidráulica

La modelación hidráulica constituye el eslabón fundamental para determinar la carga de los accionamientos encargados de mover los fluidos a través de las redes. El transporte del agua como fluido incomprensible posee un conjunto de regularidades en cuanto al cálculo de las pérdidas energéticas las cuales no pueden ser determinadas sin la ayuda de expresiones y leyes conocidas que se resumen en los siguientes aspectos.

- Ecuaciones de Bernoulli
- Ecuaciones para determinar las pérdidas de carga.
- Ecuación de continuidad
- Primera y segunda ley de Kirchoff para redes en malla.

La energía, en un punto cualquiera de un sistema hidráulico, está definida por tres componentes (Streeter et al., 2000; Martínez et al., 2007): La elevación (m); la altura de presión (N/m^2) y la altura de velocidad (m/s).

La expresión que enlaza los tres componentes mencionados anteriormente y que contienen el principio de conservación de la energía en relación a un volumen de control atravesado por fluido incomprensible se denomina ecuación de Bernoulli. La ecuación de *Bernoulli* puede expresarse en su forma más general como (Ravinovich,

1986; Nekrasov, 1990; Kuttz, 1995; Aguirre et al., 1996a; Streeter et al., 2000; Martínez et al., 2007):

$$H_b - h_p = \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \right) - \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad (1.1)$$

- Energía de presión, p/γ , es el trabajo realizado por las fuerzas a que da lugar la existencia de una determinada presión, la cual actúa sobre una determinada superficie.
- Energía cinética, $v^2/2g$, debido a la velocidad que lleva el fluido.
- Energía potencial, z , debido a la cota, a la que está situada una partícula de fluido.
- Pérdidas de carga, h_p , es la energía perdida por unidad de peso entre los puntos 1 y 2 del sistema. Incluye los términos de pérdidas por fricción y pérdidas menores, y es irrecuperable.
- Trabajo aportado, H_b , energía por unidad de peso aportada al sistema por una bomba ($H_b > 0$) o disipada por una turbina ($H_b < 0$).

Debido a los orígenes no empíricos, la ecuación de Darcy-Weisbach es considerada por muchos ingenieros como el método más preciso para modelar pérdidas de fricción. Se describe comúnmente de la manera siguiente (Aguirre et al., 1996a; R.c., 1998; Streeter et al., 2000; Haestad, 2003; Martínez et al., 2007):

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (1.12)$$

Donde:

h_f - pérdida de carga del tramo (m).

f - factor de fricción de Darcy-Weisbach (adimensional).

D - diámetro de la tubería (m).

L - longitud de la tubería (m).

v - velocidad del flujo (m/s).

g - aceleración de la gravedad (m/s²).

Las pérdidas locales se expresan generalmente como una fracción de altura de velocidad a diámetro nominal (caso válvulas y codos) aunque en secciones de diámetro variable (estrechamientos y ensanchamientos) casi siempre se especifica el diámetro a que está referida dicha fracción (Ravinovich, 1986; Nekrasov, 1990; Kuttz, 1995; Streeter et al., 2000; Martínez et al., 2007).

$$h_l = k \frac{v^2}{2g} \quad (1.3)$$

Donde:

h_l - pérdida de energía local (m)

k - coeficiente adimensional en función del Re y los parámetros del elemento.

v - velocidad del flujo (m/s).

g - aceleración de la gravedad (m/s²).

Colebrook & White combinaron las expresiones de Von Karman-Prandtl para conductos lisos y rugosos y obtuvieron una buena aproximación para el régimen turbulento de transición en tuberías comerciales, lo cual permite calcular el valor del factor de fricción de Darcy-Weisbach para cualquier régimen turbulento. (Aguirre et al., 1996a; R.C., 1998; Streeter et al., 2000; Haestad, 2003; Martínez et al., 2007). La ecuación de Colebrook & White expresa:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (1.4)$$

Donde:

f - factor de fricción de Darcy-Weisbach (adimensional).

ε - coeficiente de rugosidad de la tubería (m).

D - diámetro de la tubería (m).

En una tubería, las cuatro variables hidráulicas fundamentales son: velocidad v , caudal Q , diámetro D , y pérdida de carga h_f . Existen dos ecuaciones básicas que ligan

obligatoriamente estos cuatro parámetros en cada línea, la ecuación de continuidad y la ecuación de pérdidas (Ravinovich, 1986; Pérez, 1986; Nekrasov, 1990; Kuttz, 1995; Aguirre et al., 1996a; R.C., 1998; Streeter et al., 2000; Haestad, 2003; Martínez et al., 2007):

Ecuación de continuidad:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (1.8)$$

Donde:

Q - caudal del líquido (l/s).

D - diámetro de la tubería (m).

v - velocidad del flujo (m/s).

En un modelo de análisis en régimen permanente de una red hidráulica mallada se hace uso de dos leyes generales, que se cumplen independientemente de la configuración y los elementos que componen la red y que constituyen una particularización de las ecuaciones generales de conservación de la masa y la energía aplicada al flujo de un fluido incompresible a través de un sistema de tuberías a presión. Se conocen como las Leyes de Kirchoff (Ravinovich, 1986; Pérez, 1986; Nekrasov, 1990; Fleites, 2002).

La primera ley de Kirchoff establece que la suma neta de todos los caudales que confluyen en un nodo debe ser nula. Se plantea como criterio de signos que q es negativo (-) cuando entra en un nodo y positivo (+) cuando sale de éste. La sumatoria de aportes y consumos externos debe ser nula, lo que se plasma en la condición siguiente:

$$\sum_{i=1}^N Q_i = 0 \quad (1.5)$$

La segunda ley de Kirchoff, que corresponde al principio de conservación de la energía, establece que la suma algebraica de las pérdidas de carga debe ser igualmente nula a lo largo de cualquier malla, ver figura 1.4.

Planteándose como convenio de signo, que las pérdidas de carga se consideran positivas cuando el caudal recorre el circuito en el sentido horario y negativo en caso contrario, la segunda ley de Kirchoff, que debe aplicarse a M mallas independientes de la red, se expresa en la forma siguiente:

$$\sum_{(i,j) \in B_k} (\pm)_{ij} h_{ij} = 0 \quad K = 1, 2, \dots, M \quad (1.6)$$

Donde:

B_k – conjunto de líneas pertenecientes a la malla K .

$(\pm)_{ij}$ – toma el valor (+1) si el sentido hipotético del caudal q_{ij} es el mismo que el de la malla y (-1) si toma el sentido contrario.

1.3 Equilibrado hidráulico de las redes para climatización a flujo variable

En la mayoría de los casos los problemas de equilibrado se deben a que no se obtienen en la instalación los caudales que se proyectaron. Sólo si se obtienen los caudales nominales en las condiciones de diseño, el sistema de control puede actuar eficazmente. La única manera de conseguirlos consiste en equilibrar la instalación, es decir, en ajustar los caudales a los valores de diseño mediante válvulas juiciosamente repartidas en la red hidráulica de la instalación.

Un SCCAH se diseña para poder combatir unas cargas térmicas máximas. Si la instalación no puede producir o distribuir esta potencia, por no estar equilibrada en las condiciones de diseño, no podrá rentabilizarse la inversión efectuada. *Con una*

inversión inferior al 1% del costo de la instalación, el equilibrado rentabiliza la misma al permitir distribuir y emitir la potencia máxima instalada.

Las tres herramientas necesarias para realizar el equilibrado de las redes de distribución son: Las válvulas de equilibrado, un instrumento de medida y un procedimiento de equilibrado.

Las *válvulas de equilibrado* tienen como objetivo ofrecer la mayor precisión en la obtención de caudales y en consecuencia contribuir a la optimización del funcionamiento del sistema de control y de los consumos energéticos. En la figura 1.6 se pueden apreciar las válvulas más comunes empleadas en el equilibrado tanto para la regulación de flujos como de la presión. La variedad de diámetros (DN) la hacen compatible para diferentes diseños. Las demás características como el coeficiente de variación de flujo para diferentes números de vueltas, la tabla de dimensionamiento de las válvulas de equilibrado se presentan en el Anexo 1.1.



Figura 1.6. Válvulas de equilibrado y reguladores de presión.

A pesar de que las válvulas que más se utilizan en redes de distribución son las válvulas de equilibrado, no se puede dejar de mencionar las válvulas de control que se disponen a la entrada de las unidades terminales, estas válvulas en la actualidad poseen una regulación dinámica en función de las necesidades específicas del confort. En el caso de las válvulas utilizadas en los sistemas a caudal variable instalados en Cuba, las predominantes son las motorizadas de operación on-off [NC 45-99]. En los locales que excepcionalmente exigen una regulación muy precisa de la temperatura se utilizan las válvulas de control de acción modulante. Se destacan además los *Red hidráulica y requerimientos de potencia eléctrica en climatización centralizada aflujo variable*

reguladores de presión encargados de estabilizar la presión diferencial en las válvulas de control o en los circuitos.

Cuando se ajusta el caudal en una válvula de equilibrado, las pérdidas de carga en la válvula y en la tubería se modifican, así como también, las presiones diferenciales aplicadas en otras. Esto significa que cada ajuste de caudal en una válvula, desajusta el caudal ya ajustado en otras; es decir, que los circuitos son interactivos. La diferencia principal entre los diferentes métodos de equilibrado radica en la forma de compensar esta interactividad. Los métodos Proporcional, el de Compensación y el TA Balance, compensan directa o indirectamente los fenómenos mencionados de interactividad hidráulica. La explicación de estos métodos de equilibrado pueden encontrarse en los diferentes manuales elaborados al efecto.

En un módulo, la evolución de todos los caudales de los terminales puede controlarse midiendo en uno de ellos que actuará como referencia. Una válvula de equilibrado común a todos los terminales del módulo puede compensar el efecto de una perturbación externa sobre los caudales de los mismos. Esta válvula común, se denomina válvula de compensación. Los terminales normalmente están conectados, como muestra la figura 1.7 donde el caudal depende de la presión diferencial entre A y L. Cualquier modificación de la presión afecta al caudal de cada terminal en la misma proporción. La válvula de compensación STAD compensa el efecto de las perturbaciones externas sobre los circuitos ya equilibrados.

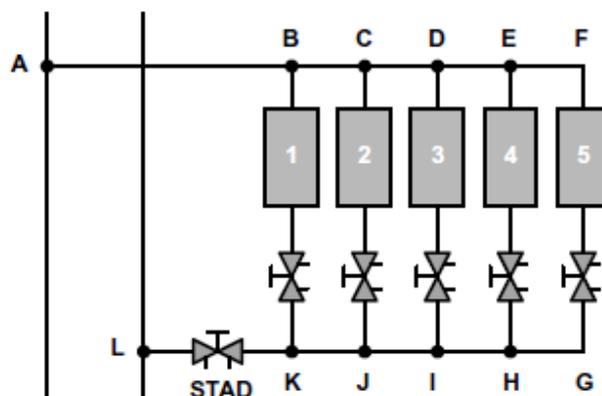


Figura 1.7. Módulo de equilibrado formado por un ramal con varios terminales.

La ley de proporcionalidad sólo puede utilizarse para detectar desviaciones respecto a los valores de diseño. Esta es la razón por la que el método más preciso de equilibrado es el de compensación ya que los caudales de diseño se mantienen constantes durante el proceso de equilibrado de cada módulo.

Cuando se instala una válvula de equilibrado de un diámetro superior al necesario, no sólo es más costosa, sino que además debe ajustarse en una posición más próxima a su cierre. Normalmente, la tubería debe tener el mismo diámetro o uno superior al de la válvula. El rango operativo ideal de la válvula de equilibrado se sitúa entre el 50 y el 100% de su apertura máxima. Por tanto, su selección debe hacerse de forma que la pérdida de carga a crear para el caudal de diseño, determine una posición de ajuste de la válvula dentro del mencionado rango. Pérdidas de carga por debajo de 3 kPa reducen considerablemente la precisión en las medidas debido a su mayor sensibilidad a las turbulencias del agua creadas en los elementos perturbadores aguas arriba de la válvula de equilibrado (bomba, válvulas de control, codos, etc.). En el Anexo 1.2 se muestran las especificaciones de válvulas de equilibrado.

1.4 Red hidráulica en malla

Las redes en mallas, se pueden obtener uniendo entre sí los extremos libres de las tuberías ramificadas o a punto de otros ramales, es decir, que las tuberías principales se comunican unas con otras, formando circuitos cerrados y se caracterizan por el hecho de que la alimentación de las tuberías puede efectuarse por sus dos extremos indistintamente, según se comporten las tuberías adyacentes, de manera que el sentido del flujo no es siempre, forzosamente, el mismo.

En el caso de las redes hidráulicas en malla la distribución se efectúa en mallas concentradas, de forma que un punto de consumo puede recibir agua de ramales, donde en ocasiones, la circulación no es en el mismo sentido, sino que por equilibrio de

presiones el agua acude al punto de consumo desde puntos que disponen de una presión más elevada, otra de sus características es que, un punto cualquiera de la red puede abastecerse por varios caminos, lo que hace que se reduzcan las pérdidas de carga, y que por otra parte una interrupción determinada no afecta a otros puntos aguas abajo ya que puede abastecerse por otro camino. La red quedará dividida en sectores mediante llaves de paso, de manera que, en caso necesario, cualquiera de ellos pueda quedar fuera de servicio y de este modo facilitar las operaciones de limpieza y de mantenimiento que son necesarias efectuar con carácter periódico.

Este tipo de red presenta las siguientes ventajas: indistinto sentido de la circulación del agua; mejor distribución de la presión y ante una avería puntual puede aislarse un tramo y dar servicio a través de otros tramos de la malla, disponiéndose de una mayor seguridad de servicio.

Los inconvenientes de la misma son los siguientes: en general las redes en malla tienen un mayor costo económico y serán precisos varios tanteos para conseguir que se cumplan los requisitos de que, la suma algebraica de las pérdidas de carga producidas a lo largo de un circuito cerrado sea nula.

1.4.1 Análisis de las redes de distribución malladas

En este tipo de redes los caudales que circulan por las líneas de la red no pueden ser determinados únicamente a partir de los caudales consumidos y aportados, sino que dependen también de las características hidráulicas de las líneas y de las alturas piezométricas en los nodos.

De hecho, el sistema de ecuaciones de continuidad está compuesto por $N-1$ ecuaciones, pero incluye como incógnitas L caudales de línea q_{ij} , cumpliéndose en general que $L > N-1$, por lo que resulta evidente que el sistema de ecuaciones de continuidad es insuficiente para determinar las incógnitas q_{ij} .

Las formulaciones de análisis en régimen permanente más comúnmente utilizadas para este tipo de redes complejas son:

- Formulación por líneas (ecuación en q).
- Formulación por nodos (ecuaciones en H).
- Formulación por mallas (ecuaciones en Δq).

En el caso de la formulación por mallas, las variables empleadas (caudales correctores) no tienen sentido físico alguno, pero permiten resolver el problema de análisis de la red con el mínimo número de ecuaciones. Por el contrario, esta formulación requiere una descripción precisa de la topología de la red, para poder construir las ecuaciones de continuidad en los nodos.

1.4.2 Métodos de cálculo de las redes de distribución mallada

La característica común a todas las formulaciones expuestas es que el sistema de ecuaciones a resolver es no lineal, al menos en una parte de las ecuaciones, característica que viene determinada no por la propia formulación de las leyes de equilibrio, sino por el comportamiento no lineal que siguen los elementos que componen el sistema. No existe hasta el presente ningún método de resolución directa y es por tanto necesario recurrir a métodos iterativos.

La inmensa mayoría de los métodos de resolución que han sido propuestos en el campo de las redes de distribución se pueden agrupar en dos grandes familias: los primeros, basados en las conocidas técnicas iterativas de Gauss-Seidel y Jacobi, los cuales resuelven el sistema, al efectuar en cada interacción, la resolución secuencial de cada una de las ecuaciones (al emplear fundamentalmente el método de Cross y sus derivados); y los segundos, denominados métodos de equilibrio paso a paso, basados en la linealización del sistema de ecuaciones, de forma que el problema original se transforme en la resolución simultánea de un sistema de ecuaciones lineales, denominados métodos de equilibrio simultáneo de las variables.

Actualmente existen otros tipos de métodos como el del Gradiente y cuasi-Newton que evitan el ensamblado de las matrices, así como variaciones de los procedimientos ya comentados.

1.4.3 Método del Gradiente

El *Método del Gradiente* es un eficiente método de cálculo hidráulico que implementa un modelo para la resolución de sistemas de tuberías a presión, representado por un sistema de ecuaciones lineales expresadas en forma matricial, tiene como principal ventaja que evita el ensamblado de las matrices por lo que disminuye la cantidad de procesos a realizar en comparación con otros métodos. Aspecto muy importante durante los procedimientos de optimización.

A continuación se enuncian algunas de las ventajas de la implementación computacional del *Método del Gradiente* aplicado a los sistemas de tuberías a presión: Asegura solución única al no tener problemas de convergencia, debido a que la solución del sistema de ecuaciones a resolver, pasa por obtener la inversa de una matriz simétrica y definida positiva.

1. Permite expresar la topología de la red, las pérdidas de carga y la continuidad de caudales, en términos de ecuaciones matriciales.
2. Emplea un modelo real de redes, al incorporar el concepto de las matrices de conectividad.
3. No es necesario estimar una solución inicial cercana al valor real.
4. Se ingresa una cantidad mínima de datos relativos a los nodos y tramos de la red, y no ecuaciones explícitas.
5. Puede ser aplicado a redes malladas y/o ramificadas. Lo cual se considera ventajoso comparado con otros algoritmos iterativos, que requieren una reformulación de la red a un conjunto de circuitos equivalentes.
6. Permite implementar matrices huecas en la solución de sistemas de ecuaciones simultáneas, las que hacen el cálculo extremadamente rápido y seguro. La explicación del cálculo se encuentra en el anexo 1.3.

1.4.4 Modelación matemática de las redes de distribución de agua

La modelación matemática tiene como objetivo fundamental reproducir con la mayor exactitud posible el comportamiento real del sistema físico que representa, es la base que se utiliza en el cálculo hidráulico para simular diferentes estados que se producen en la red de distribución de agua sin tener que llegar a experimentarlos físicamente.

El proceso de elaborar un modelo matemático para una red de distribución de agua presupone recopilar toda la información posible acerca de su estructura y funcionamiento y tratarla posteriormente para que pueda ser asimilada por los programas de análisis correspondientes. El modelo matemático permite calcular todas las variables que caracterizan su comportamiento, al tener en cuenta el conjunto de líneas y nodos que representan a las tuberías, las bombas y estaciones de bombeo, las válvulas reguladoras y las automáticas, los depósitos y embalses, y los puntos de consumo o inyección que forma la red.

Existen dos tipos fundamentales de modelos hidráulicos:

- Modelos estáticos: simulan el estado de la red en un instante determinado, generalmente en momentos en que se producen presiones mínimas (situación punta de consumo) o presiones máximas (situación valle de consumo).
- Modelos que simulan el comportamiento de la red a lo largo de un período de tiempo, entre los que se encuentran: (Modelos dinámicos, Modelos cuasi-estáticos o en período extendido)

Los modelos también se pueden clasificar de acuerdo al grado de detalles con que se pretenda realizar, se destacan los Modelos estratégicos o macromodelos; Modelos de detalle y Modelos de calidad

La principal ventaja de la aplicación y uso de los modelos matemáticos reside en su decisivo apoyo en la difícil tarea de la toma de decisiones, a la que se enfrenta

continuamente el responsable del diseño o de la operatividad de una red de distribución de agua, para resolver de manera eficaz las diferentes combinaciones de los problemas que se presentan.

En la actualidad los modelos están siendo utilizados para satisfacer un amplio rango de necesidades en lo referente a la operación del sistema (Araujo et al., 2006; Bicik et al., 2009a, 2009b), constituyen herramientas de apoyo a la planificación, diseño y explotación de una red (Olsson et al., 2009; Tabesh et al., 2009)

1.5 Motor de inducción

El motor asincrónico o motor de inducción es, en la actualidad, el motor eléctrico mas utilizado en la industria. Su principal ventaja reside en la ausencia de contactos eléctricos deslizantes, lo que nos pone ante una estructura sencilla y robusta, fácil de construir. El campo de potencia va desde unos cuantos vatios a varios megavatios.

Conectado directamente ala red industrial a tenciones y frecuencias constantes, gira a una velocidad poco distinta ala velocidad sincrónica. Este motor se utiliza para realizar prácticamente todos los accionamientos eléctricos a velocidad constante. Pero el motor asincrónico permite también realizar accionamientos velocidad variable y el lugar que ocupa en este campo sigue creciendo día a día.

Existe un gran número de posibles procedimientos para hacer variar la velocidad de estos motores, sin necesidad de reducir los sofisticados sistemas, mediante un importante número de aplicaciones.

Esta gran variedad de procesos de variación de velocidad del motor sincrónico hace muy delicada la presentación del mismo. Una presentación sencilla y rápida del funcionamiento en régimen permanente del motor alimentado a tensión y frecuencia constante permite mostrar los procesos de variación de velocidades los que los regimenes transitorios pueden conciderarce como una sucesión de regimenes permanentes.

1.5.1 Motor de inducción a cargas variables con regulación de frecuencia

En ocasiones, cuando se intenta mejorar la eficiencia en los accionamientos que utilizan motores, las acciones a realizar se centran en el motor, y tal vez su controlador. Este enfoque puede ser producto a que el motor es el usuario final. De hecho, el motor es simplemente otro dispositivo en la cadena de conversiones de energía, desde la fuente de suministro de electricidad hasta el usuario final de la cadena de energía (unidad de bombeo, espacio ventilado (EECA; EMANZ, 2007)

Los motores eléctricos forman parte del accionamiento de los más diversos equipos y maquinarias industriales. Los mismos según estadísticas son los responsables de entre el 40 y el 70% de la energía consumida en los hoteles. Si las condiciones de operación de un motor no son las más favorables o este tiene algún desperfecto, la magnitud de las pérdidas, pueden aumentar, provocando consecuentemente la disminución de la eficiencia.

La eficiencia de un motor se define como:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} * 100(\%) \tag{1.19}$$

Donde

P_m : Potencia mecánica de salida.

P_e : Potencia eléctrica de entrada.

y como:

$$P_m = P_e - p_t \tag{1.20}$$

p_t : Pérdidas totales

Se tiene que:
$$\eta = 1 - \frac{p_t}{P_e} * 100$$

Los motores de inducción están diseñados para operar cerca del punto de saturación de sus curvas de magnetización: por lo tanto, el aumento del flujo debido a la

disminución de frecuencia causará un flujo excesivo de corriente de magnetización en el motor. Para evitar este problema, es costumbre disminuir el voltaje aplicado al estator en proporción directa a la disminución de la frecuencia siempre que la frecuencia se encuentre por debajo de la nominal del motor. La siguiente expresión muestra cómo debe ser variada la tensión y la frecuencia en relación con la carga mecánica a mover:

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{f_1'}{f_1} \sqrt{\frac{M'}{M}} \quad (1.21)$$

U_1' y M' son la tensión y el momento correspondientes a la frecuencia f_1' , y U_1 y M , correspondientes a la frecuencia f_1 .

Cuando el momento es proporcional al cuadrado de la frecuencia: $M \sim f_1^2$. entonces:

$$\frac{U_1'}{U_1} = \left(\frac{f_1'}{f_1} \right)^2, \quad (1.22)$$

Es decir, la tensión aplicada al motor debe variar proporcionalmente al cuadrado de la frecuencia.

Mediante el circuito equivalente del motor de inducción se puede determinar el comportamiento del momento electromagnético en función del deslizamiento $M_{em}=f(s)$. A partir de la fórmula simplificada del circuito equivalente se puede apreciar en la Ec.1.24 que representa el cambio de frecuencia con respecto a la tensión.

$$s_m \approx \frac{R_2}{X_{c.c}} = \frac{R_2}{X_1 + X_2}. \quad (1.23)$$

$$M_{m\acute{a}x} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{4\pi f_1 \sigma_1 (r_1 + x_1 + \sigma_1 x_2')}. \quad (1.24)$$

1.6 Bombas centrífugas a caudal variable

Después de los motores eléctricos, las bombas y los ventiladores son las máquinas que más se utilizan en el mundo. Esto significa que una combinación de motor y bomba constituyen áreas importantes donde el uso de la energía puede hacerse más eficiente Percy, (2010).

En los sistemas de climatización generalmente se utilizan bombas centrífugas. Una bomba centrífuga (BC) convierte la energía mecánica que recibe desde un motor, en energía de presión para mover un líquido a determinada altura. Es decir, convierte la energía cinética rotacional en energía de presión al fluido desde el ojo o centro del impelente. El fluido entonces incrementa su velocidad debido a la fuerza centrífuga y rotacional que lo empuja.

La regulación electrónica de velocidad en el motor que arrastra a la bomba se presenta como un método energéticamente eficaz para regular el caudal. Desde el punto de vista de mantenimiento, es un buen sistema de regulación que evita golpes de ariete al disponer de rampas de frenado suaves, y evita las altas intensidades de arranque al efectuar arranques progresivos, además, se consigue abaratamientos en la manipulación, al funcionar de manera autónoma.

El ahorro energético con el uso de variadores de velocidad en los CSAF es evidente, sin embargo, la posición donde se coloca el sensor de presión es crítica. El ahorro de energía se consigue con el sensor puesto junto a la descarga de las bombas secundarias.

1.6.1 Leyes de proporcionalidad

Estas leyes describen la dependencia que existe entre el flujo (caudal), presión y el consumo energético. Al variar dentro de pequeños límites la frecuencia de rotación N de una bomba centrífuga, los cambios de su caudal Q , altura de presión H y potencia consumida P se determinan a través de las leyes de afinidad sus expresiones se muestran en el próximo capítulo. En el anexo 1.4 se encuentra la familia de curvas de dichas bombas.

1.7 Elementos componentes de la red hidráulica para climatización centralizada:

1.7.1 Tuberías y Accesorios

Las Tuberías y Accesorios que más se utilizan son las de PVC debido a que resisten la mayoría de los ácidos, álcalis, soluciones salinas y productos químicos industriales, sin mostrar el más mínimo deterioro a través de los años. Asimismo son inmunes a los gases y líquidos corrosivos de los sistemas de desagüe. Las paredes interiores lisas facilitan el flujo de los desechos y por lo tanto rara vez se tapan, reduciendo considerablemente las pérdidas de presión por fricción. Los diámetros de estas tuberías son generalmente mayores a las de otros materiales, estas dos cualidades permiten usualmente utilizar un diámetro inferior o una pendiente menor. Estas tuberías son inmunes a la acción galvanoplástica o electrolítica que destruye las tuberías metálicas, de acero galvanizado o de cobre. Por lo tanto pueden colocarse bajo tierra, bajo agua o en contacto con metales, no comunican olor ni sabor debido a esta propiedad son ideales para el transporte de agua potable.

Estas tuberías resisten golpes que irremediablemente romperían las tuberías convencionales y son considerablemente más livianas que las tuberías metálicas o de asbesto-cemento facilitando enormemente su manipulación, almacenaje e instalación. El Conduit PAVCO por ejemplo, pesa seis veces menos que el de acero, por lo tanto, es muy fácil su manejo y transporte en las construcciones. En el Anexo

1.5 Accesorios típicos que producen pérdidas singulares o locales y Pérdidas de Carga de los Codos de las redes con tuberías de pvc.

1.7.1.1 Trazado de las tuberías

La experiencia obtenida en el trabajo conjunto con empresas que tienen como objeto social la proyección de SCCAH y dada la necesidad de tomar en consideración solo los tramos factibles según requerimientos, se ha considerado que la confección de las trayectorias, debe ser definida por los especialistas al considerar como elemento inicial, los planos arquitectónicos de la obra, así como requisitos estéticos y técnicos para la explotación y el mantenimiento; además, factores subjetivos que permitan integrar la tarea de diseño al *Sistema de Mayor Envergadura*.

En el trazado de SCCAH es un requisito realizar simultáneamente el trazado del sistema de retorno, junto al sistema de distribución. La selección de las tuberías y los accesorios se realizará a partir de los catálogos y manuales emitidos por los diferentes fabricantes, donde se obtendrá el valor de las pérdidas energéticas que generan para su utilización en los cálculos de hidráulicos. En todos los casos el punto de partida es el fluido a trasegar y sus características. Además, debe tenerse en cuenta los costos de cada elemento para poder evaluar el presupuesto de la obra en estrecha coordinación con los inversionistas.

La tendencia en la actualidad es la utilización de tuberías plásticas para todo el tendido de tuberías, y de acero negro para las salas de máquinas, aunque ya algunos inversionistas solicitan la totalidad del uso del PVC, teniendo en cuenta el bajo nivel de pérdidas que le proporciona al sistema y su maniobrabilidad en la instalación, mantenimiento y operación.

En el caso de los accesorios la tendencia es la misma, aunque existen algunos elementos que no varían con el material de la tubería. Ejemplo de ellos son los diferentes tipos de válvulas a emplear en el sistema, como válvulas de corte, cheques,

de purga de aire, de corte de flujo, de globo, ver figura 1 anexo 2, otras más complejas para el equilibrado hidráulico, las cuales constan con elementos mecánicos de precisión y aditamentos electrónicos para el control y la operación, ver figura 1.8.



Figura 1.8 Dispositivo CSI para lograr el equilibrado de los bucles de control.

1.7.2 Unidades Terminales (Ventilo convectoras Fan-coil).

Para la selección de las unidades terminales, el diseñador deberá remitirse a los catálogos y documentación existente sobre los productos de este tipo que se encuentren en el mercado. Estas deberán seleccionarse teniendo en cuenta el cumplimiento de las normas establecidas en el territorio para el diseño de sistemas de climatización, las mismas son: Norma Cubana NC 45-7-1999, y Procedimiento para la Ejecución de un Proyecto de Climatización del Ministerio de la Construcción, código: P 09-05-006. Ambas especifican los tipos de unidades a emplear en los diferentes tipos de edificaciones, así como, sus características constructivas y de instalación. Entre las unidades terminales mayormente empleadas en sistemas de climatización centralizada por agua fría se encuentran las unidades ventilo-convectoras, conocidas como Fan-Coil, y unidades manejadoras de aire ó climatizadores.

La selección parte de la carga térmica requerida en el local, así como el volumen de *Red hidráulica y requerimientos de potencia eléctrica en climatización centralizada aflujo variable*

aire frío a inyectar en el mismo para garantizar los parámetros de temperatura y humedad previstos en el diseño. Deberá escogerse siempre una unidad terminal con una carga térmica mayor o igual a la calculada. En los casos de locales voluminosos como, restaurantes, teatros, recepciones u otros, donde el volumen de aire a enfriar sea elevado y la carga térmica exceda las 5 toneladas de refrigeración, se recomienda el uso de manejadoras de aire.

Existen catálogos emitidos por los diferentes fabricantes de equipos de climatización que muestran las características técnicas de los equipos, así como tablas y gráficos que puedan facilitar su selección por parte del proyectista. Puede citarse el ejemplo de algunas firmas de fabricantes reconocidas como Carrier, Interclisa, y en el territorio nacional, FríoClima. Los parámetros de las unidades terminales se expresan en el Anexo 1.6 y en el anexo 1.7 podemos observar algunos ejemplos de elementos conexiones básicas de los SCCAH a flujo variable.

Capítulo 2. Procedimiento para la modelación hidráulica de los Circuitos Secundarios de Agua Fría en Climatización Centralizada

En este capítulo se efectúa un análisis del comportamiento de la red hidráulica y sus partes componentes, los cuales influyen directamente en el consumo de energía eléctrica, y guardan estrecha relación con el funcionamiento de los Sistemas de Impulsión de Agua Fría (SIAF) y Agua Caliente Sanitaria (ACS). A partir de los resultados obtenidos se podrá establecer estrategias y variantes de solución que disminuyan el consumo de portadores energéticos en estos sistemas.

2.1 Materiales y métodos

En la actualidad el análisis y la toma de decisiones para la operación de los sistemas de climatización es una tarea compleja, existe una modelación térmica de los locales implicados en el análisis lo que permite definir los caudales de diseño de las unidades terminales.

En años recientes, cada vez más la operación de los SCCAH se ha visto influenciada por el énfasis en la conservación de la energía sin descuidar los aspectos de calidad del aire, el impacto ambiental, la seguridad y la economía. El propósito de minimizar el consumo energético no puede apartarse del objetivo de los sistemas en mantener el confort de las zonas bajo las distintas condiciones. A partir de estas pretensiones se deben cumplir los parámetros de diseño sobre todo para el trabajo eficiente de las unidades terminales.

El presente capítulo tiene como objetivo la utilización de un sistema implementado basado en el método del gradiente el cual permite realizar los cálculos pertinentes de las redes hidráulicas, así como la descripción del procedimiento para la modelación hidráulica y la modelación energética para las condiciones de flujo variable.

Los requerimientos de potencia eléctrica en el bombeo que garantice el confort de las

Red hidráulica y requerimientos de potencia eléctrica en climatización centralizada aflujo variable

habitaciones serán evaluados mediante la aplicación informática VisualLISP para las distintas situaciones operacionales correspondientes a las ocupaciones. El problema consiste en determinar la ocupación que minimiza la función la cual se tiene en cuenta el consumo de energía por trabajo de bombeo. Sin embargo, el conjunto de habitaciones escogidas tendrá una influencia importante en las pérdidas de energía cumpliéndose el equilibrio hidráulico del sistema y garantizando los caudales de diseño necesarios para que las unidades terminales mantengan el confort en los locales. Para todo esto se hace necesario el uso de técnicas que permitan encontrar aquellas soluciones que sean factibles bajo múltiples criterios.

2.2 Algoritmo del procedimiento para la modelación hidráulica

Cuando se emplean las redes hidráulicas para el abasto de agua resulta menos difícil simular los resultados, debido a que los nodos de suministro se le asignan la demanda máxima y por lo general el suministro se realiza trasegando el fluido por toda la red. Sin embargo en las redes hidráulicas para climatización a flujo variable el fluido cambia sus trayectorias en función de las unidades terminales que se estén utilizando, en este caso solo existe un nodo de suministro al final del retorno del sistema. Toda el agua que se distribuye por la red mallada retorna a un punto con la misma cota en donde se inicia el envío. A partir de los resultados de la modelación térmica, mediante la cual se obtienen los datos para determinar los caudales de diseño a las unidades terminales, se impone la necesidad de una adecuada modelación hidráulica. La modelación hidráulica garantiza los requisitos del fluido mediante el correcto equilibrado. A continuación se exponen los pasos del algoritmo para integrar los resultados de la modelación térmica con el contexto de operación hidráulica de los CSAF:

1. Caracterización del agua mediante sus propiedades físicas adaptadas al proceso.
2. Captura y sistematización de la configuración y datos de la red de distribución.
3. Captura, sistematización y modelación del accionamiento electromecánico para el bombeo.

4. Captura, sistematización y modelación de las pérdidas de carga de las unidades terminales de cada local.
5. Captura, sistematización y modelación de los componentes del equilibrado hidráulico.
6. Trazado espacial de la red de distribución y sus componentes.
7. Determinación y asignación del caudal de diseño a cada unidad terminal para las condiciones de máxima carga térmica de enfriamiento, derivada del modelo en RNA.
8. Equilibrado hidráulico de la red.
9. Determinación de caudales y presiones en el sistema

2.2.1 Caracterización del agua mediante sus propiedades físicas adaptadas al proceso.

Los SCCAH de forma general envían el agua fría del evaporador hacia la succión de las bombas del CSAF a la temperatura prefijada en el valor de consigna de la enfriadora. El valor sugerido por los fabricantes y las firmas especializadas es de 7°C. No obstante la configuración general de los sistemas en los que se emplean en el CSAF a flujo variable, poseen un colector común en el que confluye el agua que no se envía a las unidades terminales debido a las cargas parciales y el agua que retorna del intercambio térmico del edificio. Las propiedades termo físicas del agua próximas a los valores que se pueden manifestar tanto en el envío como en el retorno de los CSAF aparecen en el anexo 2.1.

2.2.2 Captura y sistematización de la configuración y datos de la red de distribución

Se conoce que la configuración de la red hidráulica para un CSAF a flujo variable esta caracterizada por ser una red en malla, con sistema de tuberías de retorno directo, y unidades conectadas horizontal o verticalmente. Los datos de las redes pueden ser obtenidos mediante los planos de las edificaciones pero se recomienda verificar en el terreno las dimensiones exactas en función de lograr una mejor precisión en los

cálculos. La tendencia actual es utilizar tuberías de PVC garantizando menores pérdidas de carga ante otros tipos de tuberías metálicas.

2.2.3 Captura, sistematización y modelación del accionamiento electromecánico para el bombeo

Un accionamiento electromecánico está compuesto por el convertidor eléctrico, motor eléctrico y transmisión mecánica acoplada a la máquina receptora. En el caso particular de los CSAF estos elementos se traducen en Variador de Velocidad, un motor asíncrono particularmente de inducción Néstor Ramos, (1994, BV y C) y un acoplamiento directo con una bomba centrífuga. La carga del sistema está constituida por una compleja red hidráulica en malla con sus respectivos componentes de transporte, de equilibrado y unidades terminales.

Al VV se le asigna un valor de consigna que en el caso del procedimiento general planteado en la investigación corresponde al valor de la presión que resulte del proceso de optimización del consumo de energía eléctrica. El valor de inicial de la presión corresponde al valor sugerido durante el diseño. El uso de los VV en los SCCAH es de probada eficiencia, la cual depende además del algoritmo de control incorporado. En este algoritmo se destacan los valores de los parámetros del regulador PI incorporado, los cuales deciden su desempeño.

En el caso del motor recibe la potencia eléctrica modulada en tensión y frecuencia por el VV entregando a su vez una potencia mecánica de rotación a la bomba centrífuga.

La aplicación informática desarrollada en la presente investigación, se encarga de determinar la potencia eléctrica necesaria para el trabajo de bombeo en cada variante de ocupación planteada. La determinación de la potencia necesaria en el motor es una consecuencia de evaluar en la ecuación el caudal total del sistema y las pérdidas de carga.

Una vez conocida la potencia eléctrica necesaria en el motor determinada a través de la información del caudal y las pérdidas de carga totales del sistema, mediante las leyes

de afinidad que se presentan en las ecuaciones de la tabla 2.1, se puede determinar la velocidad relativa de rotación requerida para el accionamiento.

Tabla 2.1. Leyes de afinidad de las bombas centrífugas

Función	Cambio de velocidad	Cambios del diámetro del impelente
Flujo	$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)$	$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)$
Presión	$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)$	$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)$
Potencia	$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)$	$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)$

2.2.4 Captura, sistematización y modelación de las pérdidas de carga de las unidades terminales de cada local

Los fabricantes de las unidades terminales, ya sean fan-coils o unidades manejadoras brindan en sus catálogos la relación entre el flujo de agua y las pérdidas de carga dada una configuración específica (número de filas del intercambiador de calor). En los anexos se pueden apreciar estas y otras características que se ofrecen de las unidades terminales. Para la aplicación específica que se desarrolla en la presente investigación se parte de que no se conocen las efectividades térmicas, por tanto juega un papel más protagónico las pérdidas de carga. Al modelo informático en lo referido a la modelación hidráulica se le incorporan los modelos de las curvas de pérdidas de carga obtenidos mediante regresión de los datos de catálogos en correspondencia con el tipo de unidades utilizadas en el objeto de estudio.

2.2.5 Captura, sistematización y modelación de los componentes del equilibrado hidráulico

Cada componente que interviene en el equilibrado hidráulico (válvula de equilibrado, válvula de compensación, válvulas controladoras de presión y válvulas de control) poseen características y realizan funciones específicas en correspondencia con el lugar que ocupan en la red hidráulica. La propiedad más importante de estos elementos constituye la capacidad de variar la resistencia hidráulica en puntos específicos para lograr los caudales y presiones de diseño en las unidades terminales favoreciendo a la vez a racionalizar el consumo energético.

Las válvulas de equilibrado son las más utilizadas. A continuación se representa la expresión que permite relacionar a partir de las informaciones de los catálogos, en relación con el número de vueltas de estas válvulas y el coeficiente de variación de flujo K_v , el comportamiento del caudal (q) y de las pérdidas de carga (Δp).

$$K_v = \frac{0,01 \cdot q}{\sqrt{\Delta p}} \qquad q(l/h), \quad \Delta p = (kPa)$$

$$K_v = \frac{36 \cdot q}{\sqrt{\Delta p}} \qquad q(l/s), \quad \Delta p = (kPa)$$

En los anexos se puede apreciar los modelos matemáticos basados en una regresión, obtenidos para tres tipos de válvulas de equilibrado en la que se relaciona el K_v con el número de vueltas. También aparece un ejemplo de cómo varían los precios en el mercado en función de los caudales y los diámetros.

2.2.6 Trazado espacial de la red de distribución y sus componentes

El trazado de la red se realiza mediante una herramienta CAD sustentada en el AUTOCAD versión del 2004. Esta aplicación posee los requisitos necesarios para a la vez que se realizan los trazos de la red y sus componentes se les vayan asignando

todos los detalles técnicos. La aplicación tiene su base en el entorno de programación VisualLISP que permite la interacción con diferentes algoritmos de cálculo elaborados para el procedimiento general.

Otro elemento importante en el trazado de la red hidráulica representa la codificación utilizada para cada tramo y ramales. Esta codificación permite diferenciar las entradas y salidas del fluido a cada una de las unidad terminal, diferenciar los niveles (pisos) en que se encuentran, e identificar los patinejos (baterías de unidades terminales dispuestas en diferentes niveles). Esta codificación sirve además para mejorar la eficiencia de los algoritmos computacionales.

Los componentes utilizados son muy coincidentes con los utilizados por el software EPANET para la simulación de redes hidráulicas, lo que permite que realicen las mismas funciones y además la posterior validación de los resultados en este software. El EPANET constituye el sistema base para diferentes programas de cálculo de redes utilizados en todo el mundo. Los principales componentes utilizados son:

- Tuberías.
- Bombas.
- Puntos de consumo de agua (nodos de demanda).
- Válvulas Reductoras de Presión (PRVs en inglés ó VRPs en español).
- Válvulas Sostenedoras de Presión (PSVs en inglés ó VSPs en español).
- Válvulas de Rotura de Carga (PBVs en inglés ó VRCs en español).
- Válvulas Controladoras de Caudal (FCVs en inglés ó VCQs en español).
- Válvulas Reguladoras por Estrangulación (TCVs en inglés ó VRGs en español).

Las especificaciones de los diferentes elementos aparecen en el manual de usuario del EPANET 2 (Rossman, 2001).

2.2.7 Determinación del caudal de diseño y de operación de las unidades terminales

A partir de los modelos basados en RNA de la modelación térmica de los locales, se obtienen los valores de carga térmica bajo las condiciones de un año promedio. Para determinar el caudal de diseño se evalúan las condiciones correspondientes a la máxima carga térmica. También se puede obtener el caudal necesario a cargas parciales. Para todos estos cálculos de caudal se utiliza la expresión del calor.

$$Q_t = mcp\Delta t$$

Donde:

Q_t : carga térmica (kW)

M : flujo másico (kg/s)

Δt : diferencia de temperatura (°C)

C_p : calor específico del agua (KJ/kg. °C)

Luego se obtiene el caudal de agua necesario al dividir el flujo másico por la densidad (ρ)

$$Q_{H_2O} = \frac{m}{\rho}$$

(xx)

ρ = densidad del agua (kg/ m³)

2.2.8 Equilibrado hidráulico de la red

Para realizar el equilibrado se toman los valores del número de vueltas de las válvulas de equilibrado emplazadas en la red lo cual permite definir su K_v . Con estos valores de K_v se determina la resistencia hidráulica que ofrecen cada uno de los componentes y se le asignan a cada posición específica que ocupan las válvulas en la red. Una vez calibrado el modelo informático con mediciones realizadas en el objeto de estudio, entonces se procede a evaluar las diferentes variantes de ocupación de los locales en

el modelo hidráulico. Los resultados de la simulación se resumen en los siguientes pasos:

1. Concentrar la sumatoria de los caudales individuales necesarios para extraer el calor en los locales ocupados, en el nodo de retorno del sistema.
2. Variar la velocidad relativa de la bomba hasta obtener una presión mínima en el nodo crítico.

Cuando se habla de nodo de retorno del sistema, es donde concluye la red, por lo general coincide con la posición donde se encuentra la válvula de compensación. En la simulación, al variar la velocidad relativa de la bomba, mediante las formulaciones correspondiente se determina y se asigna un caudal de suministro que cumpla con los caudales de diseño de las unidades terminales. De forma paralela se va verificando en el punto crítico del sistema (donde en el retorno el agua vence la cota mas elevada en su trasiego hacia el colector) que se mantenga una presión mínima positiva correspondiente al valor mínimo de presión necesaria en estas redes hidráulicas (100 kPa). Esto garantiza que el agua al vencer este punto crítico retorne sin dificultad ayudado por la aceleración de la gravedad.

El elemento hidráulico utilizado para simular el fan-coil, lo constituye una válvula de ruptura de carga adaptada a las condiciones de caudal necesarias en cada ramal y su correspondiente caída de presión. Las VRCs fuerzan el valor de la caída de presión a través de la válvula. El flujo a través de la válvula en la aplicación específica de los CSAF esta dirigido es una única dirección. Estas válvulas no representan a ningún componente físico, pero son muy útiles para modelar situaciones en las que la caída de presión a través de la válvula es conocida (Rossman, 2001). La asignación o no de caudal implica la obtención de trayectorias del fluido en la red hidráulica.

2.2.9 Determinación de caudales y presiones en el sistema

Para poder integrar el modelo hidráulico a la optimización de la operación del sistema, son evaluadas las variantes de ocupación. Al obtenerse el valor de caudal y de altura de carga totales, se integran estos valores a la función objetivo. En el caso del caudal

también constituye información básica para el algoritmo en el que se definen los parámetros de trabajo por compresión junto con la información de la carga térmica. En los resultados de la modelación hidráulica está implícito los requerimientos de presión del sistema. Los menores valores de potencia eléctrica necesaria en el bombeo y en el trabajo de compresión son consecuencia de aplicar estrategia ocupacional basada en un código variable de soluciones mediante la integración de los aspectos térmicos e hidráulicos. El caudal de agua máximo es equivalente al flujo de agua que se debe experimentar en el CPAF, los demás valores corresponden a las cargas parciales. La aplicación informática implementada en la presente investigación permite tener información no solo del punto de suministro, también aporta la información de todos los caudales y presiones de tramos y nodos.

Todos los aspectos del algoritmo para la modelación hidráulica anteriormente expuestos se integran en el diagrama de bloques que se presenta en la figura 2.1.

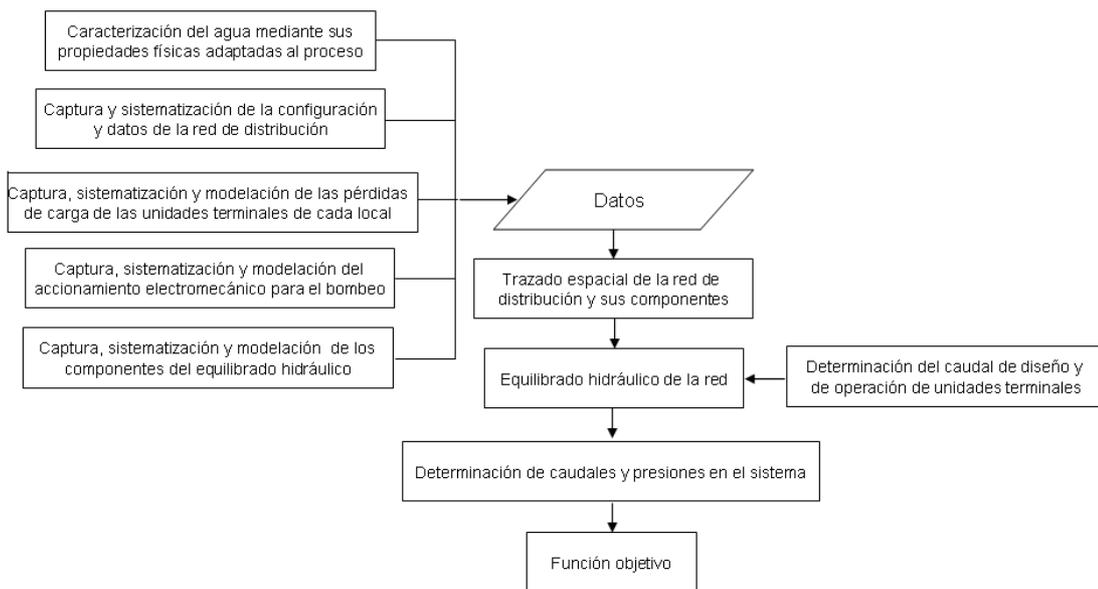


Figura 2.1 Algoritmo del procedimiento específico para la modelación hidráulica

2.3. Estrategias de operación que incrementan la eficiencia en los Circuitos Secundarios de Agua Fría

Después de ejecutadas las inversiones, los sistemas mecánicos de la climatización centralizada deben quedar calibrados. No pasa mucho tiempo en el que se muestran irregularidades principalmente el desempeño de las redes hidráulicas en su conjunto y en otros aspectos de naturaleza térmica. Muchas decisiones se toman al calor del proceso inversionista y es cuando los cálculos ingenieriles dejan de ser exactos. Adicionalmente la dinámica de explotación va marcando las regularidades de los sistemas.

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

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

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

Un elemento importante lo constituye, las redes hidráulicas. Hay que señalar tres aspectos de las mismas, su configuración, el material de fabricación y el aislamiento térmico. La configuración y equilibrado de la red en malla ofrece un buen desempeño del sistema, el no control de este aspecto puede provocar pérdidas hasta de un 20% de la energía eléctrica.

El aislamiento térmico es un elemento importante en el aspecto térmico del fluido. Se debe realizar primero una elección del espesor más económico además de los materiales que recubren el aislamiento para mejorar la emisividad y la absorptividad de las superficies. Menos ganancia térmica a través de las redes hidráulicas significa menos trabajo de compresión y de bombeo. Aun existen instalaciones cuyas redes son de tuberías metálicas, las cuales pueden ser sustituidas por las plásticas o de PVC con la posibilidad de ahorrar la energía eléctrica mediante la disminución de la fricción del fluido.

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

2.4.1 Eficiencia energética en los Circuitos Secundarios de Agua Fría

En instalaciones donde la energía debe ser transportada a grandes distancias, se requiere de un sistema de transporte que utilice un líquido como intermediario. Esto se debe a que el agua por su alto calor específico, pueden transportar mayores cantidades de energía por volumen que el aire. Con este sistema no solo se pueden utilizar tuberías más delgadas sino que el costo de la energía para mover estos fluidos es mucho menor que el costo que tienen mover aire. Sin embargo el cambio de un medio a otro requiere de pasos adicionales para el intercambio de calor que no son necesarios en los sistemas que funcionan solo con aire. A pesar de que los sistemas de agua son

más racionales para las condiciones ambientales de Cuba, aun quedan posibilidades de realizar mejoras en el transporte. Por ejemplo las pérdidas de carga en las redes hidráulicas se reducen entre un 15 y 20 % cuando se sustituyen las tuberías metálicas por las de PVC representando un ahorro en potencia de bombeo de un 10% como promedio.

La variante de utilizar un variador de velocidad en las bombas de agua helada permite la reducción del consumo de energía en las condiciones de cargas parciales al circular menos agua por el sistema. Los ahorros de energía reportados pueden llegar hasta un 30 % con respecto al consumo de un sistema con flujo constante.

Existe un conjunto de situaciones y perturbaciones que influyen en el comportamiento energético de los CSAF entre ellas: las características climatológicas de la región, la bioclimática y propiedades de la edificación, las ganancias de calor adicionales, la ocupación de los locales, las propiedades de las redes hidráulicas para el transporte, la dinámica de la demanda de confort y el equilibrado de las redes.

En la figura 2.2 se muestran los elementos componentes de la impulsión del agua fría de la climatización centralizada bajo un enfoque que muestra como interrelacionan los elementos para lograr mejoras energéticas en los CSAF. La presente investigación se centra en los CSAF debido a que en ellos se define la eficiencia del retiro de calor de los espacios térmicos para cada situación específica.

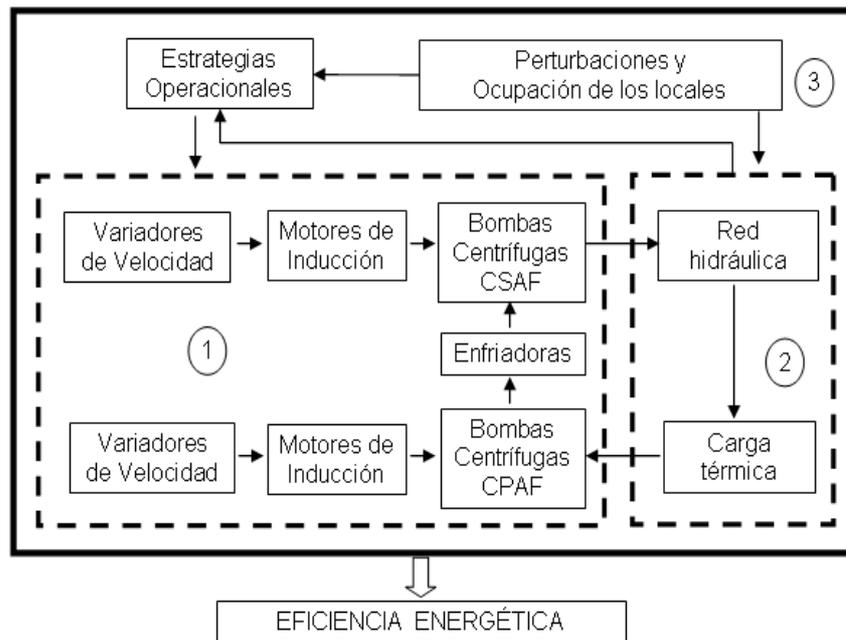


Figura 2.2. Interrelación de los componentes del SCCAH para lograr mejoras energéticas en los CSAF.

Para enfocar de manera energética y desde el punto vista operacional la impulsión de agua fría existen tres subsistemas cuyas interacciones definen la eficiencia de los CSAF:

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

En la figura 1.9 el subsistema de potencia esta compuesto por los VV y los motores tanto de los CPAF como del CSAF, este subsistema recibe las señales de mando correspondiente a una estrategia de operación definida. En el subsistema termo hidráulico se localizan las enfriadoras, las bombas, la red hidráulica y la carga térmica. Todas las características de los elementos anteriores, unidas a las perturbaciones y regímenes de explotación de los espacios térmicos deciden el comportamiento energético de los CSAF. La presente investigación se propone establecer un procedimiento que minimice el consumo de energía eléctrica e estos sistemas para el caso del flujo variable bajo un enfoque más integral.

Otros autores como Chen Xu divide los SCCAH en tres subsistemas: Planta energética (incluye enfriadoras y CPAF; redes de distribución de tuberías (incluye las redes hasta los CSAF); y la carga del sistema (constituida por las bombas de los CSAF, la redes hidráulicas y los elementos finales de las zonas). No obstante este enfoque es menos integrador pues no consideran un conjunto de perturbaciones incidentes como el clima y características específicas de las cargas de enfriamiento.

2.3.2 Modelación energética de en los Circuitos Secundarios de Agua Fría

Los CSAF mediante convección forzada, intercambia calor el agua fría que pasa por las baterías de fan-coils con el aire circulante en los espacios térmicos después de haber trasegado el agua por toda la compleja red de tuberías. Para la modelación física del sistema se pudiera realizar un balance de masa y energía característico pero las grandes dimensiones de la red y las disímiles ganancias térmicas asociadas dificultarían el trabajo, además del volumen de cálculo implícito.

Varios son los métodos para realizar el cálculo del volumen de agua a suministrar en estas instalaciones. Primero se determinan las cargas térmicas y luego se seleccionan el equipamiento para climatizar las zonas. Para garantizar los parámetros de los intercambiadores de calor se le garantiza un determinado caudal de agua. Estos cálculos parten de la aplicación de la ecuación de Bernoulli.

En ocasiones, cuando se intenta mejorar la eficiencia en los accionamientos que utilizan motores, las acciones a realizar se centran en el motor, y tal vez su controlador. Este enfoque puede ser producto a que el motor es el usuario final de la energía suministrada. De hecho, el motor es simplemente otro dispositivo en la cadena de conversiones de energía, desde la fuente de suministro de electricidad hasta el usuario final de la cadena de energía, que es en realidad el agua bombeada o espacio ventilado EECA; EMANZ,(2007)

Un estudio realizado por la Oficina de Tecnologías Industriales del Departamento de Energía (DOE) de EEUU estima que el 20 % de los ahorros de la energía están asociados con las mejoras en la eficiencia de los motores y los sistemas de suministro eléctrico. Para obtener el otro 80 %, es necesario que se tome un enfoque de los sistemas, teniendo en cuenta todas las partes que los conforman, incluyendo la carga impulsada y el proceso. La corrección en la distribución eléctrica representa el 8 % del total del ahorro posible, la eficiencia del motor representa el 4 %, el sistema mecánico el 44 % y la optimización del proceso el 44 % EECA; EMANZ, (2007)

El método de utilizar un variador de velocidad en las bombas de agua fría permite la reducción del consumo de energía en las condiciones de cargas parciales al circular menos agua por el sistema Wulfinghoff, (1999) Hartman, (2001). Los ahorros de energía reportados pueden llegar hasta un 30 % con respecto al consumo de un sistema con flujo constante ASHRAE, (2000) Pérez; et.al, 82002). Aun los sistemas ya en flujo variable para determinadas estrategias de operación basadas en un alto grado de automatización entorno a la distribución del agua y su modelación han logrado entre el 12 -30% de ahorro adicional Ma; Wang, (2009). En este caso el grado de instrumentación que se alcanza no siempre es posible por carencia de recursos financieros y el modelo es representativo de los nodos de distribución principal y no de toda la red.

A continuación se presenta la descripción de las variables más importantes presentes en los CSAF. Esta descripción permite sentar las bases de un sistema de monitoreo para cualquier experimentación en estos sistemas y sobre todo para definir la termo hidráulica general de la instalación.

Caudal de envío: El caudal de agua fría (AF) es de vital importancia para conocer cual es la masa de agua que se encarga de absorber todo el calor a través de las unidades terminales contenidos en los locales. En el caso de los sistemas que tienen variadores de velocidad este caudal total se distribuye por toda la batería de los fan-coil y el valor puntual del caudal depende fundamentalmente de las disímiles combinaciones que se logran al conectarse y desconectarse las válvulas de dos vías. Este variable también

esta en función del valor de consigna de la presión el cual se prefija en el VV del sistema.

Presión de envío: Esta presión es una manifestación de la variación de la resistencia hidráulica de la red como consecuencia de la conexión y desconexión de los fan-coil de los locales. Cuando el sistema trabaja a lazo cerrado las pequeñas variaciones con respecto al valor de consigna también depende de los parámetros del controlador del (VV). No siempre la presión a lazo cerrado es la más racional. En caso del sistema estar trabajando a lazo abierto o frecuencia constante, esta presión se vuelve muy cambiante durante todo el día y esta en dependencia de la ocupación instantánea.

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

Temperatura de retorno: Esta variable depende fundamentalmente de intercambio térmico que haya tenido el fluido durante su paso a través de toda la red hidráulica. Esta temperatura no solo está influenciada por la convección forzada que ocurre en los fan-coils sino que también esta influenciada por todos los procesos de transferencia de calor que ocurren a lo largo de la red hidráulica. A pesar que la red hidráulica tiene aislamiento térmico siempre existe un flujo que atraviesa de forma unidireccional hacia el agua y en este proceso esta implícito la transferencia de calor por radiación y convección en lo fundamental.

Presión de retorno: La presión de retorno es una manifestación del equilibrio hidráulico de la red, además expresa la energía que ha perdido el fluido desde su impulsión hasta el punto donde culmina la red

Frecuencia del (VV): Como se conoce los (VV) varían la frecuencia y la tensión para entregar una potencia acorde con el mecanismo al que están instalado. En este caso la

frecuencia tiene una relación lineal con el caudal y a su vez es la variable manipulada, tomando como referencia la presión de envío.

Temperatura ambiente: Esta variable es considerada por varios autores como lo principal perturbación en los sistema de climatización. A medida que se conozca mejor su comportamiento en el lugar específico que se encuentra la instalación, se podrá determinar con mayor precisión su influencia.

Analizando las variables generales relacionadas con la operación de los CSAF como un objeto de control se puede decir que las variables dependientes son, la potencia activa del accionamiento, la temperatura de retorno y la presión en el retorno. Como variables independientes pueden establecerse la presión de envío, el caudal, la temperatura de entrada, la temperatura ambiente y los locales ocupados.

En los sistemas de monitoreo y control existentes en los hoteles con SCCAH se observa que las variables incorporadas a estos sistemas SCADA son las relacionadas con el trabajo de las enfriadoras en lo fundamental, no sucediendo así, con las variables termo hidráulicas y energéticas asociadas a los circuitos de impulsión. Los CSAF presentes en los hoteles cubanos realizan preferentemente la impulsión de agua a caudal constante. Se conoce que es importante una generalización en el sentido de implementar los variadores de velocidad (VV) en este accionamiento, no obstante las pocas aplicaciones que existen no han sido estudiadas a profundidad. Dada la complejidad termo hidráulica de este sistema se hace necesario en la impulsión de agua fría conocer en lo fundamental los siguientes elementos:

- La ganancia de calor de la sustancia de trabajo (AF) para las distintas condiciones de operación del edificio en relación a la carga térmica.
- La variación de la resistencia hidráulica de red en malla que suministra y retorna el AF.
- El comportamiento de la temperatura ambiente como principal perturbación en los procesos de carácter térmicos que ocurren en los espacios de climatización.
- Las ocupaciones de los locales.

Se hace difícil una vez que los sistemas a caudal variable estén diseñados, cambiar los parámetros de las variables de consigna de la presión de envío, la cual tiene estrecha relación con el caudal y la energía que demanda el sistema. Es por ello que constituye una pretensión de este trabajo manipular el valor de consigna como resultado de un proceso de optimización de la variable en consecuencia con cada estado particular del sistema y para una condición de operación más racional en la que tiene un papel decisivo que locales se ocupan.

Capítulo 3. Resultados de los requerimientos de potencia eléctrica a partir de la modelación hidráulica.

En el presente capítulo se describen las generalidades del sistema CAD desarrollado para poder evaluar distintas condiciones de operación de los Circuitos Secundarios de Agua Fría (CSAF) en SCCAH. La aplicación informática se programó en VisualLISP sobre AUTOCAD y permite la automatización de tareas. Se presentan las características de la red hidráulica para su modelación lo cual incluye todos los datos referentes a los nodos, tramos y accesorios. Mediante un caso de estudio se realizan los cálculos hidráulicos, correspondientes a un patinejo de una edificación dentro de un hotel. Este ejemplo demuestra los requerimientos energéticos para diferentes situaciones de ocupación así como la adaptación de la bomba para el trabajo a caudal variable. Para todos los casos se respetan los caudales de diseño de cada unidad terminal. Se detallan aspectos relacionados con el equilibrado de la red hidráulica, definiéndose las habitaciones críticas que obligan a ejecutar cambios en el modelo informático en función del equilibrado.

3.1 Aplicación CAD para la modelación hidráulica

Para realizar la correcta modelación hidráulica de los CSAF debido a la gran cantidad de cálculos que se deben realizar se decide automatizar estas operaciones mediante una aplicación CAD. Esta aplicación es el resultado de la investigación conjunta entre el centro de estudio CAD/CAM de la Universidad de Holguín y el Centro de Estudio de Energía y Tecnologías Avanzadas de Moa. La aplicación incluye como metodología de cálculo el método del gradiente el cual fue explicado en el epígrafe 1.4.3.

Se hizo necesario establecer un sistema de codificación el cual permite identificar con facilidad a que punto específico de la red corresponde los resultados de los cálculos. Las entradas de los patinejos están señalizadas con las letras del abecedario de forma consecutiva. También se identifica las unidades terminales con su especificidad del piso

en que se encuentra así como el número específico de la habitación según la nomenclatura del hotel. A continuación se presenta una breve explicación de algunos códigos:

(A) es entrada al patinejo 1 que contiene las siguientes unidades terminales (6319, 6318, 6223, 6222, 6120 y 6119) y B constituye el nodo de salida del patinejo.

(A3, A2 y A1) son las entrada a las unidades terminales (Fan-coil) de los pisos 3, 2 y 1.

(B3, B2 y B1) salidas de las unidades terminales (Fan-coil) del patinejo 1. Para mejor entendimiento ver la figura 3.5.

Una de las facilidades que permite la aplicación informática es que se puede activar o desactivar las unidades terminales mediante la operación de las válvulas de propósito general ubicadas en la posición donde se encuentran las unidades terminales. En el sistema también se puede cambiar la velocidad relativa de la bomba hasta el valor que permita la distribución adecuada del fluido por todos los ramales de la red. Una vez realizados los cálculos hidráulicos se exportan al Excel los resultados finales de las presiones en cada uno de los nodos y las velocidades en cada uno de los tramos. Entre otras bondades del sistema se destacan las diferentes informaciones visuales y que además pueden ser impresas en forma de planos que permitan las siguientes facilidades:

1. Planos con la codificación de datos de los nodos y tramos de la red hidráulica.
2. Planos informativos de las cotas de cada uno de los nodos y los diámetros de cada uno de los tramos.
3. Codificación en colores del comportamiento de las presiones en todos los tramos del circuito hidráulico
4. Planos informativos de las propiedades de los tramos de tubería principalmente los coeficientes de rugosidad y el tipo de material.

A continuación en la figura 3.1 se muestra una imagen de la aplicación CAD para la modelación hidráulica:

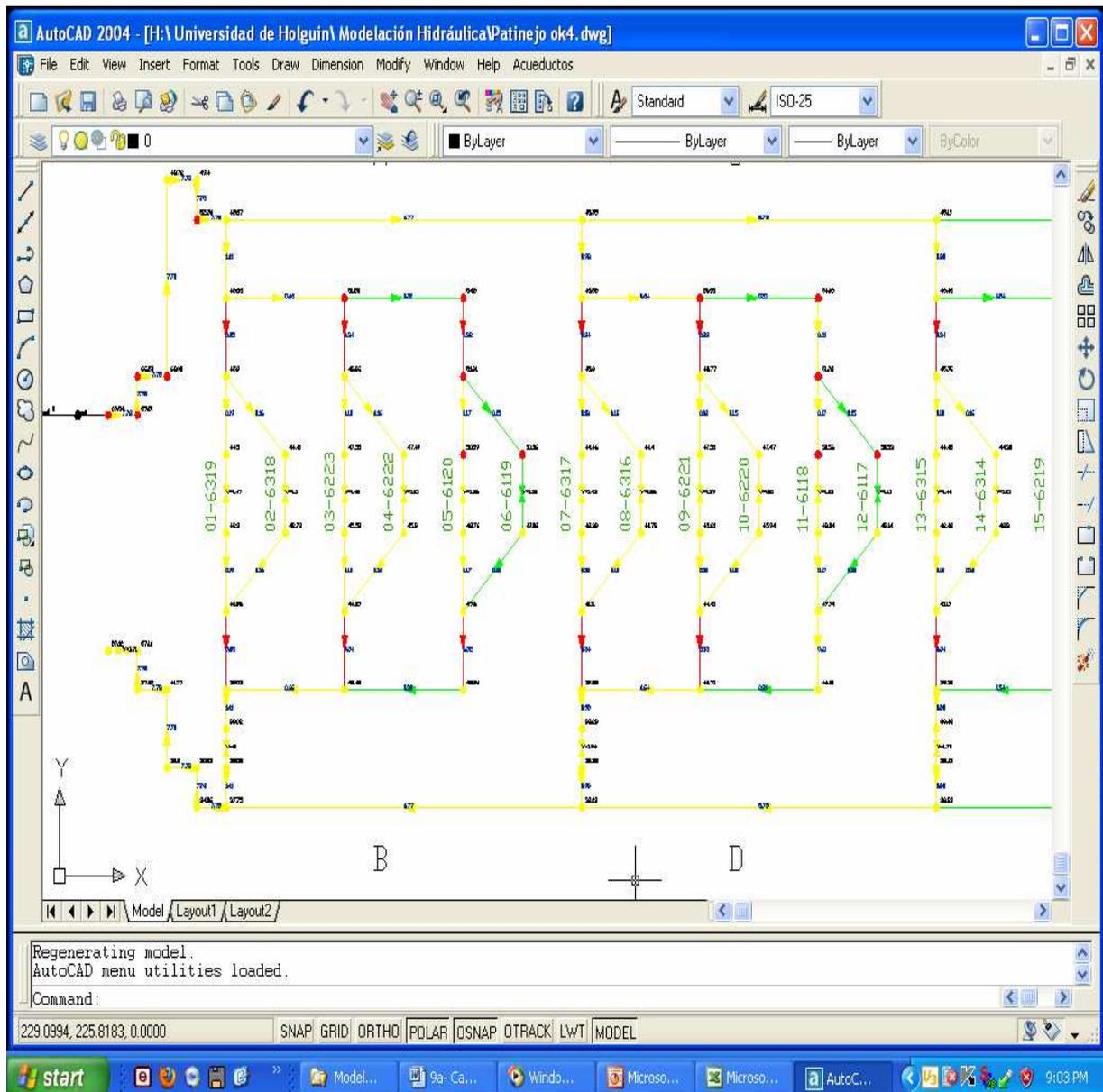


Figura 3.1 imagen de la aplicación CAD para la modelación hidráulica.

3.1 Validación de los resultados en el software EpaNET

La validación del Sistema CAD con EpaNET se efectúa tomando en consideración el Sistema Internacional de unidades (SI) y los mismos datos iniciales de cada uno de los elementos hidráulicos (incluye el valor de la viscosidad del agua). Por otra parte, ambos programas utilizan la misma ecuación para determinar las pérdidas de energía por fricción y tienen implementado el *Método del Gradiente* por lo que hay mayor garantía en la equivalencia de los resultados obtenidos en el cálculo hidráulico con uno u otro sistema.

3.2 Particularidades de la red hidráulica

La red hidráulica esta compuesta por 273 tramos de tubería lo cuales tiene diferentes longitudes y diámetros los cuales pueden apreciarse en el anexo 3.1. Los diámetros de las tuberías del envío y el retorno son de 75 mm de diámetro. Los diámetros de las tuberías que entran en los patinejos son de 25 mm y los del interior de los patinejos de 12,5 mm. Al aumentar el diámetro de dichos tramos de tubería se produce una reducción de las perdidas pero a la vez aumenta el valor relativo de la velocidad para lo que se requiere un mayor consumo de energía eléctrica, por lo que se puede afirmar que los datos hidráulicos de la red varían en dependencia del cambio de diámetro.

Para facilitar la definición de la combinación de diámetros para cada tramo de tubería, se crearon diálogos en el Sistema CAD que permiten, a partir de la experiencia del operador evaluar aspectos subjetivos, escoger cuales diámetros se asignarán a cada tramo. Este proceso permite reducir considerablemente el espacio de búsqueda de las soluciones de operación, incrementa la probabilidad de obtener soluciones satisfactorias y favorece la fiabilidad en los circuitos de la red mallada al definir diámetros similares a los tramos de tuberías conectados a un mismo nodo. En la figura 3.2 se muestra uno de los tramos de la red que viaja por las azoteas.



Figura 3.2 Imagen de la red hidráulica

Los caudales de diseño fueron calculados mediante la metodología descrita en el epígrafe 2.2.7 y los resultados de la carga térmica obtenidos en otras investigaciones anteriores (Miguel Ángel Sánchez Pazos. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2010). A través de la expresión del calor ($Q_t = mcp\Delta t$) se determina los caudales de diseño que corresponden a la cantidad de agua que debe circular por las unidades terminales para eliminar el calor contenido en el espacio térmico. Los valores de los caudales de diseño aparecen en el anexo 3.1.1.

3.2.2 Las condiciones generales para el análisis de los circuitos secundario de agua fría (CSAF)

Las condiciones generales para el análisis de los Circuitos Secundarios de Agua Fría (CSAF) se definen sobre la base de un sistema en operación real. La presencia de flujo variable y un régimen de control a presión constante de hecho significa una apertura del sistema a reducir el consumo de energía. Por tanto el consumo de electricidad de las bombas también es variable. El sistema tiene la capacidad de asegurar mediante la acción modulante del trabajo de un variador de velocidad en la presión de envío respetando los criterios de diseño de la instalación.

Otro elemento importante es que la cantidad de locales a climatizar es finita. Se consideran las condiciones climatológicas de la región como elemento decisivo en las *Red hidráulica y requerimientos de potencia eléctrica en climatización centralizada aflujo variable*

características térmicas de la edificación. Se conocen además las características técnicas de los fancoil que climatizan los locales pero no se conocen las efectividades térmicas de la convección forzada.

Para las simulaciones térmicas e hidráulicas se considera de manera general la temperatura de 9 grados Celsius de entrada y 13 grados de salida cercano a las recomendadas para la explotación y verificadas en el sistema real. El análisis individual del CSAF es factible debido a la no iteración con el Circuito Primario de Agua Fría debido al empleo del colector común y al flujo constante existen en el mismo.

La variable a controlar es la presión de envío del sistema y de esta forma garantizar el menor consumo de energía eléctrica cumpliendo los requerimientos del fluido y de la red. La red hidráulica es mallada con sistema de tuberías con retorno directo con unidades conectadas verticalmente. Las válvulas empleadas en los fancoil son motorizadas de dos vías y se considera equilibrado el sistema hidráulico. En el anexo 3.2 se presentan las características de las variables generales presentes en un CSAF a flujo variable.

3.3 Ejemplo de requerimientos de potencia mediante la simulación hidráulica de un patinejo del CSAF caso de estudio

La operación de los CSAF constituyen un complejo sistema termo hidráulico donde la interacción entre cada uno de los componentes tributa a la operación eficiente del sistema. Existen dos categorías de componentes en estos sistemas, el componente hidráulico compuesto por las redes de tuberías y la estación de bombeo y el componente térmico constituido por las unidades ventocovectoras, el comportamiento térmico del edificio y el aislamiento de la redes. Se escogió para realizar la simulación de un Circuito Secundario de Agua Fría que garantiza la climatización centralizada de un edificio de un hotel. En la figura 3.4 se puede apreciar, señalado por flechas las habitaciones escogidas y una vista parcial de la red hidráulica que garantiza el transporte del agua hasta las habitaciones analizadas (patinejo # 1 de los 9 existentes).

El CSAF esta compuesto por 14 bombas, las cuales se encuentran ubicadas en pareja por cada una de las 7 zonas a una de ellas se le denomina principal y a la otra reserva. Estas bombas alternan su funcionamiento después de 7 días de trabajo continuo, la zona escogida para realizar el estudio fue la numero 6 en la cual se encuentran las bombas 5 y 10. En la siguiente tabla se exponen sus características principales.

Tabla 3.3 Características de las bombas del circuito secundario de agua fría.

Bombas del CSAF	Zona	Potencia	Características
Bomba 1 y 14	2	12.5 kW	Q = 43m ³ /h H = 50m
Bomba 2 y 13	1	12.5 kW	Q = 28m ³ /h H = 50m
Bomba 3 y 12	3	8.6 kW	Q = 28m ³ /h H = 47m
Bomba 4 y 11	4	6.3 kW	Q = 28m ³ /h H = 44m
Bomba 5 y 10	6	12.5 kW	Q = 28 m³/h H = 70m
Bomba 6 y 9	5	8.6 kW	Q = 28m ³ /h H = 60m
Bomba 7 y 8	7	12.5 kW	Q = 42m ³ /h H = 60m

A cada bomba en funcionamiento se encuentra conectado un variador de velocidad (VV) ALTIVAR 31 con un controlador PI incorporado. En la figura 3.3 aparece una vista parcial de la Sala de Máquinas en donde se resaltan las bombas centrifugas del CSAF las cuales poseen un eje vertical y bocas de aspiración e impulsión en línea.



Figura 3.3. Bombas del CSAF

En el patinejo seleccionado están dispuestas un conjunto de 6 unidades ventoconvectoras fancoil, dos en cada uno de los tres pisos del edificio. Los fancoil de un mismo piso están conectados de forma paralela con respecto a la tubería de suministro que desciende por el patinejo y a la vez, estos fancoil están en serie con los demás pisos. Este elemento significa que existe una conexión mixta en el interior de los patinejos.



Figura 3.4. Habitaciones escogidas y vista parcial de la red hidráulica correspondiente.

Las habitaciones involucradas en este análisis corresponden a las denominadas 6319, 6318, 6223, 6222, 6120 y 6119 de un total de 59 existentes. En la figura 3.5 aparece un esquema general de la red hidráulica objeto de análisis en donde se aprecia los

códigos seleccionados para identificar a los nodos y como consecuencia a los tramos de las tuberías. El esquema se obtuvo de una aplicación incorporada al AUTOCAD diseñada para la proyección de redes hidráulicas (Hechavarria, 2009).

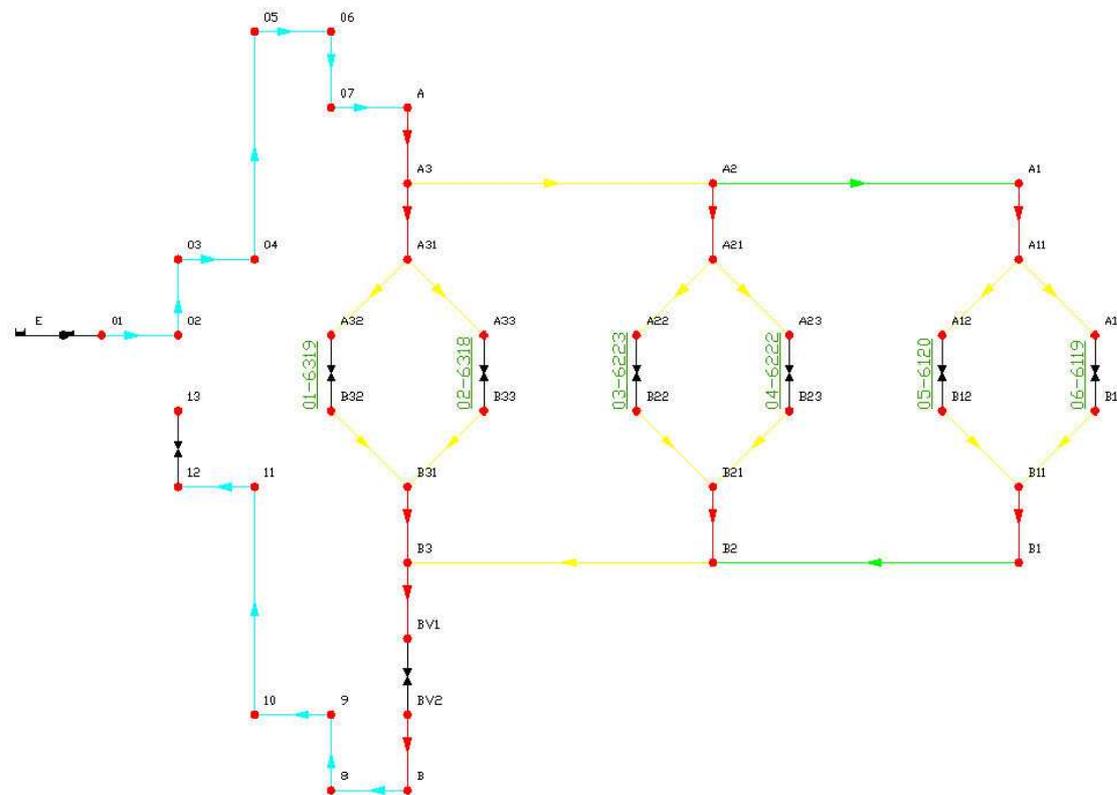


Figura 3.5. Esquema en AUTOCAD con las nomenclaturas de los componentes de la red hidráulica.

Los resultados de la simulación se obtuvieron mediante la siguiente metodología que se resume en los pasos generales siguientes:

3. Garantizar el caudal suficiente para cada una de las operaciones en correspondencia con la carga térmica individual a extraer por cada fancoil.
4. Concentrar la sumatoria de los caudales individuales en el nodo de retorno del sistema.
5. Variar la velocidad relativa de la bomba hasta obtener una presión mínima en el nodo crítico.

En la figura 3.6. se puede apreciar la simulación en el software EPANET del patinejo 1 para las condiciones que actualmente se opera el sistema a una presión constante de 52 m(5 bar.), correspondiente a una velocidad relativa de la bomba de un 54,3%. Estos datos constituyen la línea base para el análisis del sistema operando a toda su capacidad en este ejemplo y considerando el valor de presión sugerido por diseño. El elemento hidráulico para simular el fancoil, lo constituye una válvula de ruptura de carga adaptada a las condiciones de caudal necesarias en cada ramal y su correspondiente caída de presión. Las Válvulas de Ruptura de Carga (VRCs) fuerzan el valor de la caída de presión a través de la válvula. El flujo a través de la válvula puede ser en cualquier dirección. Estas válvulas no representan a ningún componente físico, pero son muy útiles para modelar situaciones en las que las caída de presión a través de la válvula es conocida (Rossman, 2001).

Para lograr el resultado de las simulaciones fue necesario cumplir con los pasos de la metodología propuesta los cuales se detallan a continuación:

Al realizar la simulación térmica de cada uno de las 59 habitaciones de la zona para todo año característico, se determinó la carga térmica máxima. Se empleó en este caso el simulador de cargas térmicas desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad autónoma de Baja California (UABC).

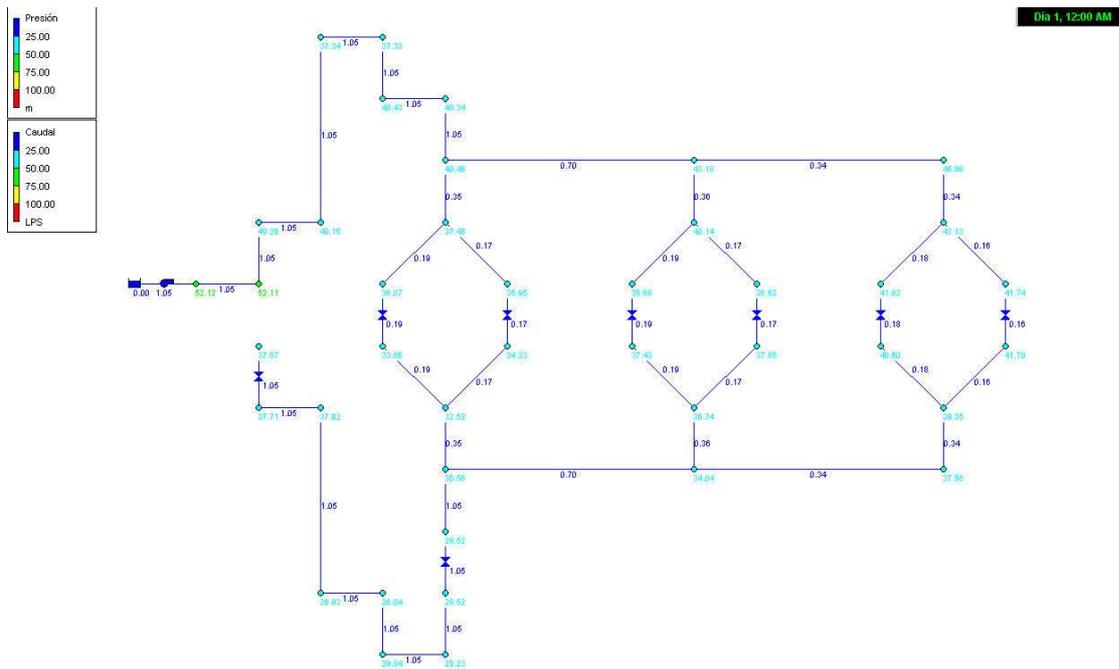


Figura.3.6. Simulación en EPANET para ocupación máxima de las habitaciones.

Con el valor de carga térmica máxima horaria para un año característico y a partir de la expresión del calor se determinó el flujo de agua necesario para extraerlo. Se consideró una temperatura de entrada del agua de 9 grados Celsius y una salida de 13 grados Celsius valores promedios obtenidos en mediciones efectuadas en el sistema. Los valores de caudal calculados aparecen en la tabla 3.4.

Tabla.3.4 Carga térmica máxima, caudales y pérdidas de carga en los fancoil

Habitación	Qt(kW)	Qt(L/s)	Perd FC (MCA)
6319	3.19	0.190	2.2139
6318	2.68	0.160	1.6222
6223	2.34	0.140	1.2544
6222	1.85	0.110	0.7677
6120	2.31	0.138	1.2239
6119	1.82	0.109	0.7473

Para asignar de manera correcta cada uno de los caudales a los fancoil, fue necesario determinar la pérdida de carga en función de sus características técnicas. Con el apoyo del catálogo de Unidades Ventocovectoras de FRIOCLIMA se calcularon las pérdidas en Metros de Columna de Agua (MCA). A manera de sintetizar el cálculo se obtuvo una expresión que correlaciona el caudal con las pérdidas de carga. La gráfica y ecuación característica se destacan en la figura 3.7.

Los resultados generales indican a partir de los valores máximos de carga térmica de cada habitación que existe un 63% de las habitaciones adecuadas para los fan-coil de tres filas de la firma AERMEC, FCX 32 con 2210 kcal de capacidad y un 37% para fan-coil FCX 42 de 3400 kcal. Estos fan-coil son los que se emplean en la zona y no en todas las habitaciones coincide la carga térmica con el equipo instalado.

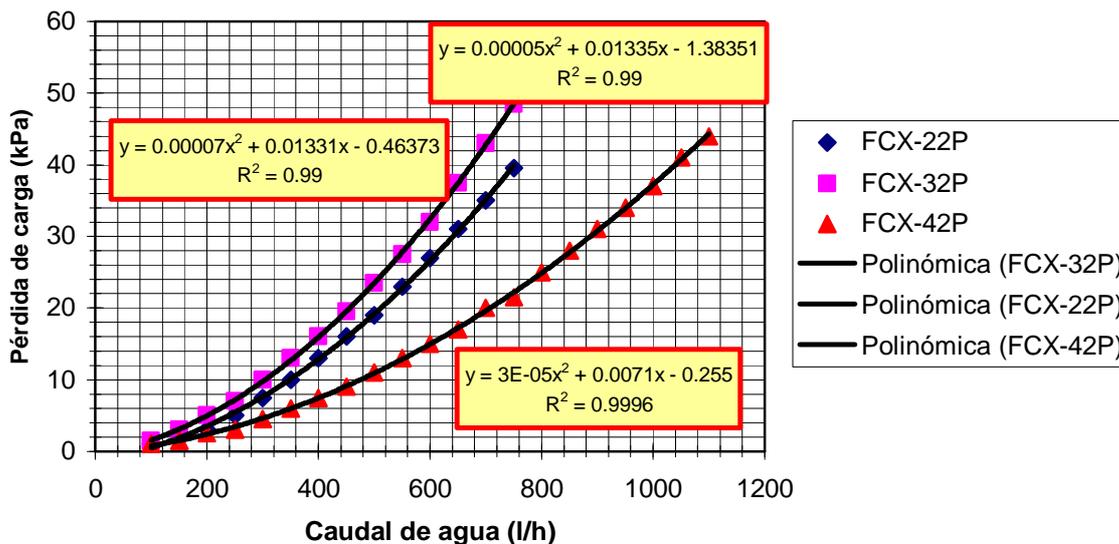


Figura 3.7. Pérdidas de carga en las unidades terminales en función del caudal

A partir de las expresiones de pérdidas de carga se establecen en la tabla 1 las pérdidas con su correspondiente caudal.

Para realizar la simulación y conocer los aportes de cada una de las cargas térmicas al comportamiento energético de la red hidráulica, en cada simulación se colocó en el nodo de retorno del sistema el caudal que exige cada fancoil de forma individual y la *Red hidráulica y requerimientos de potencia eléctrica en climatización centralizada aflujo variable*

sumatoria de los caudales de todas las habitaciones. Para estas condiciones se lograron los resultados que aparecen en la tabla 3.5.

Tabla.3.5 Datos para el análisis de operación del CSAF

Habitacion	Q (L/s)	H (m)	VR	PPC(m)	KWh	kWh/día	Costo kWh/día(CUC)	Ahorro día en(CUC)	Costo para SP-52 m	Ahorro Mes	Ahorro Año
6319	0.19	22.3	0.489	1.08	0.0665	1.596	0.21	2.47	2.68	74.09	889.10
6318	0.16	21.5	0.48	1.07	0.0539	1.294	0.17	2.51	2.68	75.27	903.21
6223	0.14	19.4	0.456	1.04	0.0425	1.020	0.13	2.54	2.68	76.34	916.05
6222	0.11	18.6	0.446	1.06	0.0321	0.771	0.10	2.58	2.68	77.31	927.70
6120	0.14	19.5	0.457	1.05	0.0422	1.012	0.13	2.55	2.68	76.37	916.41
6119	0.11	18.6	0.446	1.03	0.0317	0.762	0.10	2.58	2.68	77.34	928.12
6 hab SPmin	1.05	27.1	0.543	1.06	0.4463	10.712	1.39	1.28	2.68	38.54	462.46
6 hab SPactual	1.05	52.1	0.75	26.04	0.8581	20.594	2.68		2.68	0	0

Una mejor comprensión de los datos de la tabla anterior se garantiza con una explicación de algunas nomenclaturas usadas.

- Q = caudal de agua necesaria en el nodo para retirar el calor dadas las propiedades del los fancoil.
- H = Altura de carga correspondiente al caudal necesario para extraer la carga térmica
- VR -Valor relativo de la velocidad de trabajo de la bomba que garantiza la presión mínima en el punto más crítico del sistema.
- PPC = Presión en el punto mas crítico del sistema.
- kWh = Energía consumida por la bomba para garantizar el caudal en cada habitación.

Costo kW/día = Costo de la energía necesaria para mantener el caudal durante el día

En la figura 3.8. se muestra donde se localiza el punto mas crítico del sistema, que necesariamente no esta en las unidades finales del sistema como toman de referencia algunos trabajos. En este caso el punto mas crítico en este sistema cerrado es donde el fluido vence la cota máxima de su trayectoria para regresar ayudado por la gravedad hasta donde culmina el retorno del sistema.

El retorno del sistema también constituye un punto fundamental, pues es donde se coloca durante la simulación los datos de caudal total. Es decir, en la simulación constituye el nodo de suministro más importante. En la figura 8 se observa también el nodo de retorno. Esta simulación corresponde al sistema trabajando con las 6 habitaciones ocupadas, pero con la presión de envío que garantiza la presión mínima de 1 m en el punto más crítico correspondiente a 27 m.

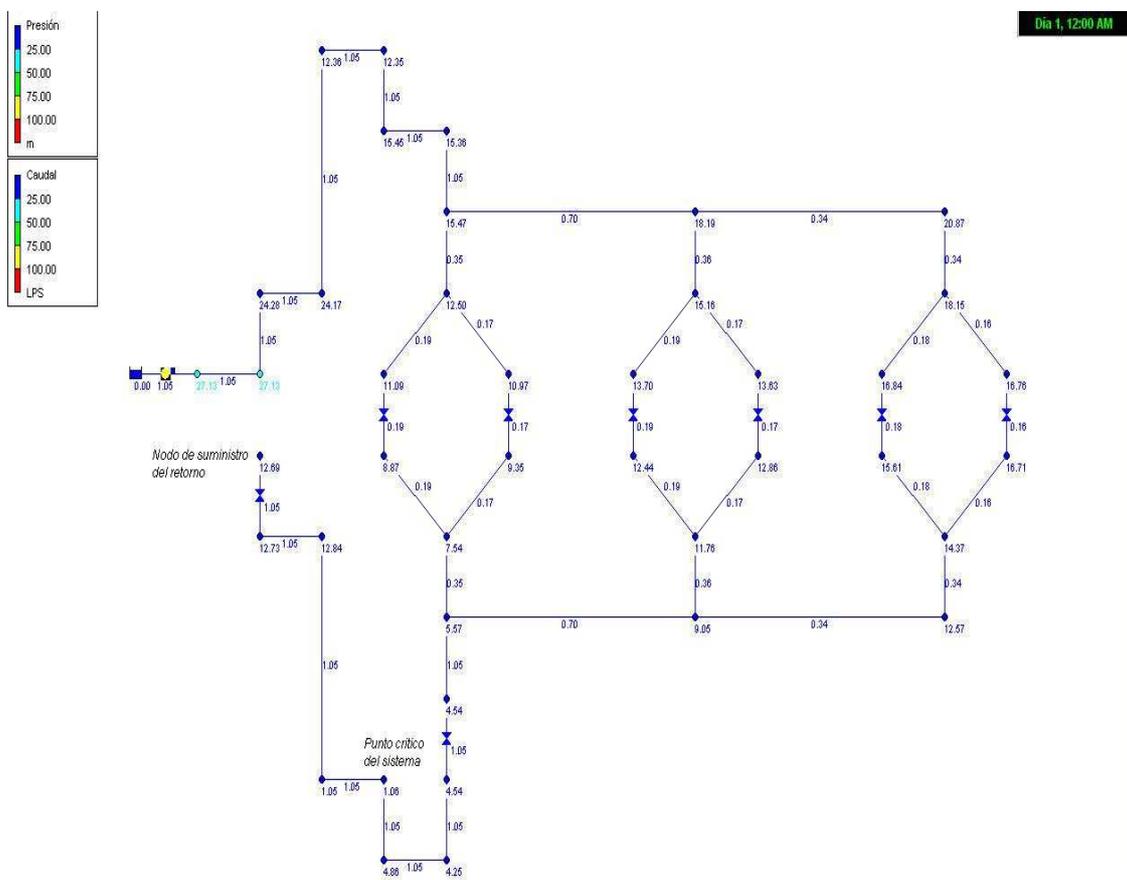


Figura.3.8. Simulación de hidráulica teniendo en cuenta la presión mínima en el punto más crítico.

Análisis de los resultados de la simulación hidráulica.

Para tener una mejor idea de que ocurre con las leyes de proporcionalidad para diferentes condiciones de operación del caso de estudio, se presenta la figura 3.9. En esta figura se aprecian los valores de caudal, altura de carga, potencia eléctrica necesaria para el bombeo y la velocidad relativa en correspondencia a los valores de consigna (set point) para las condiciones actuales de 52 m de altura de presión, condiciones mínimas de 27 m y para cada una de las habitaciones cuando se utilizan de forma individual.

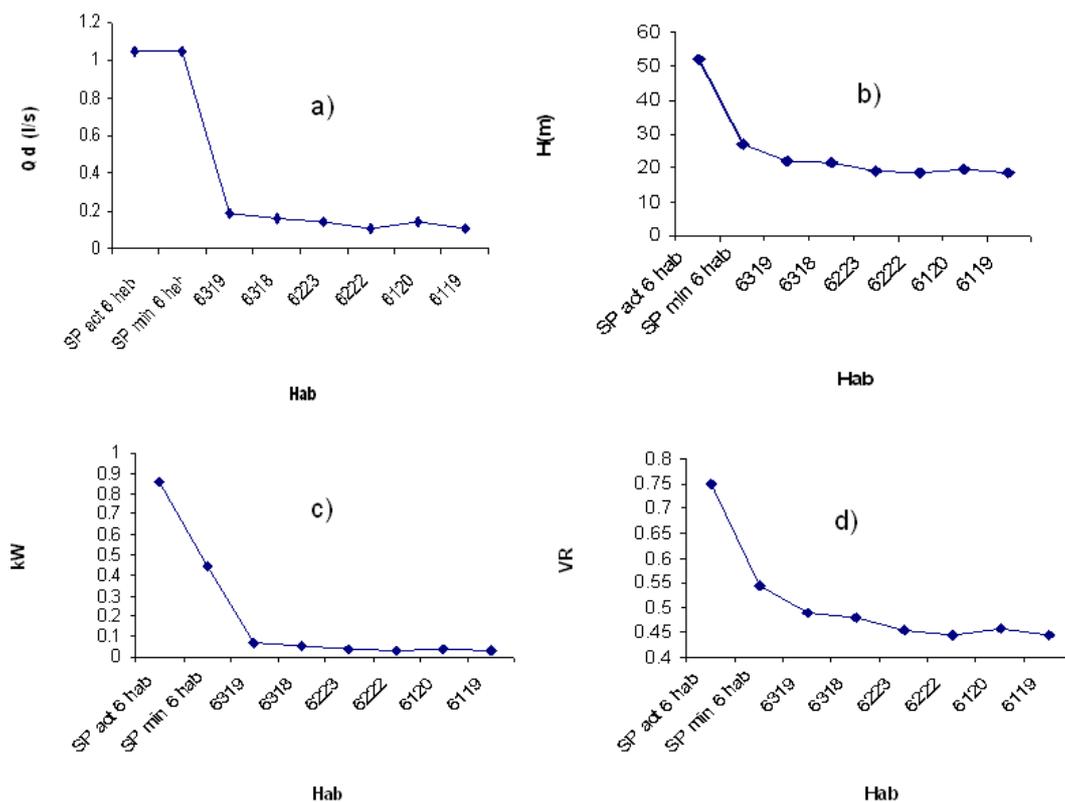


Figura. 3.9. Comportamiento de altura de carga, caudales, potencia y velocidad relativa para diferentes condiciones de operación de la red hidráulica.

En el gráfico (a) de la figura 3.9 se aprecia que independiente del valor de set point para condiciones actuales y mínimas el sistema requiere unicamente de un caudal de 1.05 (l/s). También se puede apreciar la diferencia de los caudales de diseño para cada una de las habitaciones que componen el patinejo. Las habitaciones 6319 y 6318 requieren mas caudal que las restantes debido a que poseen mayores cargas térmicas al estar ubicadas en el tercer piso y recibir una mayor radiación solar.

En el grafico (b) de la figura 3.9. aparece la altura de presión para las 8 condiciones de explotación que se evalúan en el caso de estudio. Se debe resaltar que operando las 6 habitaciones a la vez no es necesario una altura de presión de la bomba de 52m, con solo 27m de altura de carga el fluido es capaz de llegar con todo su requerimiento en cuanto a respetar los caudales de diseño de cada unidad Terminal. Esto se puede lograr variando la velocidad relativa de la bomba y como se aprecia en el grafico (d) es posible adaptar a la bomba a las diferentes condiciones de operación en función de los locales que se ocupan.

En el grafico (c) de la figura 3.9. se aprecian los requerimientos de potencia eléctrica del conjunto motor-bomba, los cuales también responden a los diferentes valores de velocidad relativa y diferentes situaciones del uso de los locales.

Las curvas de la bamba para las 6 habitaciones a condiciones de set point y para cada una de las 6 habitaciones de forma individual fueron construidas con la utilización del criterio mostrado en la pagina 30 del manual de usuario del EpaNET el cual plantea que una curva de un solo punto queda definida por una relación altura-caudal, que normalmente representara el punto de funcionamiento deseado o nominal de la bomba. El EpaNET añade dos puntos mas a la curva uno a caudal nulo cuya, altura es el 133% de la altura nominal y otro a la altura cero, cuyo caudal se asume que es el doble de el nominal, dichas curvas se muestran en las figuras 3.10 y 3.11.

La figura 3.10. representa la curva de la bomba las 6 habitaciones a diferentes condiciones de set point (actual y mínimo) donde se observa que a pesar que los

caudales se mantienen constantes la altura de carga para las condiciones actuales es mucho mayor que para las condiciones mínimas. Las curvas de la bomba que garantizan la climatización de las 6 habitaciones para las diferentes condiciones de set point son:

- Set point actual $H = -15.831Q^2 + 0.2481Q + 69.293$
- Set point mínimo $H = -8.2245Q^2 + 0.129Q + 36.043$

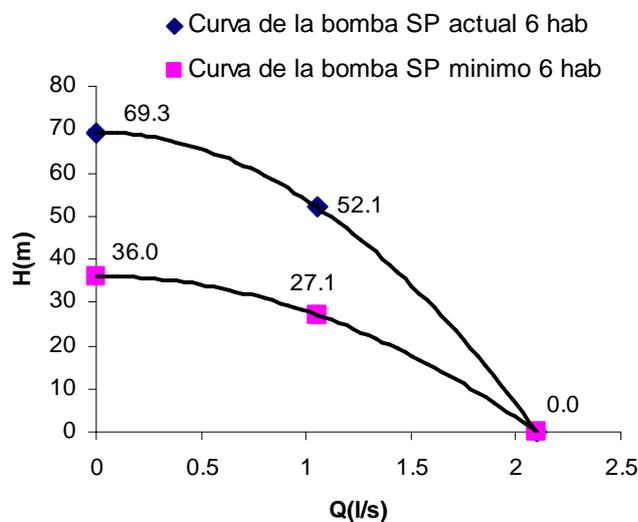


Figura 3.10 curvas de la bomba para las 6 habitaciones a condiciones de set point actual y mínimo respectivamente.

Para los dos casos de la figura 3.13 las velocidades relativas de las bombas corresponden a los valores de 0,75 para set point de 52 m y 0,54 para set point de 27 m.

En la figura 3.11.se observa las curvas de las bombas debido a las diferentes configuraciones de la red, para garantizar el caudal de diseño en cada habitación de forma individual. En el caso correspondiente a suministrar agua solo a la habitación

6319 la ecuación de la curva corresponde a la expresión siguiente es $H = -206,94Q^2 + 0,5868Q + 29,659$. De la misma forma las curvas que garantizan los caudales de diseño individuales para las otras habitaciones corresponden a las expresiones siguientes:

- Habitación 6318 $H = -281.35Q^2 + 0.6719Q + 28.595$
- Habitación 6323 y 6120 $H = -331.58Q^2 + 0.6229Q + 25.802$
- Habitación 6222 y 6119 $H = -514.96Q^2 + 0.8455Q + 24.738$

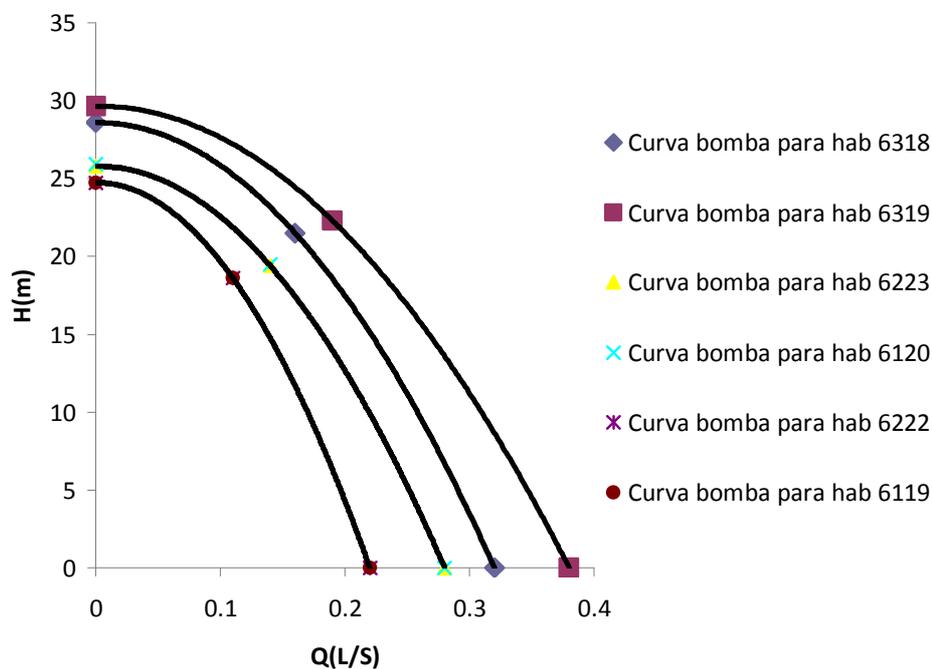


Figura. 3.11. Curva de la bomba para cada una de las 6 habitaciones de forma individual.

Estas curvas reflejan que para garantizar los caudales de diseño para diferentes configuraciones de la red las curvas de las bombas se desplazan de forma paralela a la curva nominal. La curva nominal aparece en el anexo 3.3, donde corresponde la información de la grafica al catálogo de la bomba existente en el sistema.

Con la presente investigación el hotel Blau Costa Verde cuenta con un material técnico para la evaluar la incidencia de la red hidráulica en los requerimientos de potencia eléctrica. El empleo de válvulas especiales que garantiza los caudales de diseño se ve limitado debido a los altos precios. Sin embargo, no emplear estos elementos conlleva a un alto consumo de energía producto al incremento de caudales en determinadas unidades terminales para garantizar los caudales de diseño en otras. Según los resultados obtenidos anteriormente se puede plantear que hidráulicamente las habitaciones del primer y el segundo piso consumen la misma cantidad de energía para garantizar la climatización, ambas de forma individual consumen 38% más de energía que las del tercer piso. Operar las 6 habitaciones a la vez, actualizando el valor del set point de la presión a 27 m, garantizando la presión mínima de 1 m en el punto mas crítico, determinan un 48% menos de consumo de energía eléctrica que trabajar el sistema en las condiciones actuales de presión constante de 52 m. Esta nueva condición significa al precio promedio de 0.13 CUC/kWh un ahorro mensual de 38.54 CUC y 462.46 CUC al año.

3.4 Consideraciones del equilibrado hidráulico y comportamiento energético

Los principales causantes del consumo desmedido de *energía eléctrica* en la climatización Centralizada de hoteles lo constituyen los sobrecaudales, para evitar este indeseado factor es necesario lograr el equilibrado hidráulico el cual es imprescindible para el buen funcionamiento de la red hidráulica. Para lograr un equilibrado hidráulico perfecto es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- El caudal de diseño debe estar disponible en todas las terminales.
- La presión diferencial sobre las válvulas de control no debe variar demasiado.
- Los caudales deben ser compatibles con las interfases del sistema.

Una instalación hidráulica se diseña para poder combatir las cargas térmicas máximas. Si la instalación no puede producir o distribuir la potencia, por no estar equilibrada en las condiciones de operación, no podrá rentabilizarse la inversión efectuada. *Con una inversión inferior al 1% del costo de la instalación, el equilibrado rentabiliza la misma al*

permitir distribuir y emitir la potencia máxima instalada. Esta es la razón fundamental por la que el equilibrado hidráulico de una instalación tanto a caudal variable como constante debe hacerse en las condiciones de carga máxima.

Las habitaciones críticas son aquellas en las que los caudales se incrementan significativamente por encima de los caudales de diseño hasta que se logre que las habitaciones del patinejo dejen de tener caudales por debajo del de diseño. En la tabla 3.6 se muestran las habitaciones críticas de cada uno de los patinejos:

Patinejo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Habitaciones críticas	6222	6221	6116	6312	6310	6208	6206	6104	6202

Tabla 3.6 habitaciones críticas de cada uno de los patinejos

CONCLUSIONES

- Para hacer un análisis integral de la operación de la red hidráulica en los Circuitos Secundarios de Agua Fría en climatización centralizada a flujo variable, a partir de los cambios generados por la ocupación de los locales se hace necesario valorar: las redes hidráulicas en malla, el equilibrado, las propiedades de las tuberías y accesorios, motores de inducción, bombas centrifugas y las unidades terminales.
- El correcto equilibrado de las redes hidráulicas malladas en los Circuitos Secundarios de Agua Fría en los Sistemas de la Climatización Centralizada por Agua Helada, garantiza un consumo de energía eléctrica racional y el adecuado confort de los locales a través de las unidades terminales.
- La aplicación informática sustentada en un sistema CAD permite la automatización de tareas y facilita la obtención de los valores de presión en todos los nodos y la velocidad en cada uno de los tramos. Se facilita a través de la simulación la evaluación de las diferentes condiciones de operación de la red hidráulica con la consecuente definición de los requerimientos energéticos del sistema.
- El análisis conjunto de los aspectos térmicos relacionados con la carga de los locales y los aspectos hidráulicos relacionados con los caudales de diseño se integran en el procedimiento para la modelación hidráulica que se propone. Los resultados de las simulaciones del sistema facilita la toma de decisiones en cuanto a definir cuales locales se deben ocupar para disminuir el consumo de energía eléctrica en el bombeo.

RECOMENDACIONES

- Perfeccionar la aplicación informática que facilita la mejor adaptación a la toma de decisiones en cuanto a definir con antelación que locales ocupar para racionalizar el consumo energético en el bombeo.
- Utilizar los resultados de la investigación como material didáctico que facilitaría la comprensión de temas electromecánicos dirigidos al uso racional de la energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar Bermúdez, José Carlos. Herramientas para la predicción energética en el hotel Blau Costa Verde. Tesis de Grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2009.
2. Análisis de cubiertas reflectivas como alternativa de ahorro de energía por climatización en edificaciones turísticas. Carlos Pérez Tello¹, Héctor E. Campbell Ramírez¹, José P. Monteagudo Yanes², Aníbal Borroto Nordelo², Ana María Vázquez Espinoza¹ ¹ Universidad Autónoma de Baja California, México ² Universidad de Cienfuegos, Cuba.
3. Artículo de retos turísticos referidos a la influencia de las variables climatológicas en el consumo de energía ASHRAE. "Improving the Efficiency of Chilled Water Plants - Avery", Gil ASHRAE, May, 2001.
4. Cabrera Gorrín, Osmel. Reflexiones sobre el consumo del sector turístico Cubano.
5. Chen Xu, Quiang Chen, David E. Claridge, Dan Tuner and Song Deng.
6. Delgado Velásquez, Orlando. Componentes de la climatización centralizada en hoteles: propuestas para racionalizar el consumo energético. Tesis de Grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2009
7. Faye C. McQuiston, Jerald D. Parker, Jeffrey D. Spitler. Calefacción Ventilación y Aire Acondicionado. Editora LIMUSA WILEY, 622p. 2008
8. Hernández Velásquez, Jorge (2005). Cambio a caudal variable del sistema de clima central de la villa del Hotel Brisas Guardalavaca. Tesis en opción del título de Master en Automática. Universidad de Oriente. 135p.
9. Hydraulic modeling of large district energy systems for placing purposes.
10. Méndez, B Robelkis. Redes hidráulicas en la CC de hoteles
11. Miguel Angel Sánchez Pazos, Procedimiento para estimar y reducir el consumo de electricidad en un circuito secundario de agua fría en la climatización centralizada. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2010.
12. Montelíer Hernández, Sergio. Reducción del consumo de energía en instalaciones con sistemas de climatización centralizadas todo agua a flujo. Tesis Doctoral. Universidad de Cienfuegos. 2008

13. Montero Laurencio, R.; [et]. Diagnóstico Energético Hotel Super Club Breezes Costa Verde. Grupo de Eficiencia Energética de Moa, ISMMM, 2001. 58p
14. Montero Laurencio, R.; [et]. Diagnóstico Energético Hotel LTI Costa Verde Beach Resort. Grupo de Eficiencia Energética de Moa, ISMMM, 2002. 81p
15. Montero Laurencio, R.; [et]. Diagnóstico Energético Hotel Blau Costa Verde. Centro de Estudios de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, ISMMM, 2008. 79p
16. Montero Laurencio, R. La asimilación de tecnologías en el sector del turismo y su impacto en el consumo energético. 23p. examen de mínimo de PSCT.
17. Montero Laurencio, Reineris; [et]. Aspectos termohidraulicos en la operación de los circuitos secundario de agua fría a caudal variable en la climatización centralizada.
18. Montero Laurencio, Reineris. Disminución del consumo energético en los circuitos secundarios de agua fría de la climatización centralizada de hoteles. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2004. Muñoz, A, 1996, Aplicación de técnicas de redes neuronales artificiales al diagnóstico de procesos industriales (en línea), Tesis Doctoral, Madrid, (Consulta: Abril 4, 2008). Disponible en <<http://www.iit.upco.es>
19. NC -220-1, 2,6-9. Bases del diseño para el turismo.
20. Núñez Estenoz, Maikel y Yosvani Rodríguez Rodríguez. Sistema Automático de Medición para variables termohidráulicas en la Climatización Centralizada del Hotel Blau Costa Verde. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2009.
21. Pérez Ajo, Pablo. Raúl Mario del Toro Matamoro, Héctor Martínez Ochoa. Ahorro Energético en los Sistemas Climatización y Refrigeración. 2002. 14p.
22. Pérez Tello, Carlos., "Comportamiento Térmico de Edificios", Instituto de Ingeniería Universidad Autónoma de Baja California, México, 2003.
23. Ruedas, J.A. Consideraciones de diseño para disminuir el consumo energético en Hoteles de Sol y Playa en Cuba. 2003. 15p.
24. Sierra Aguilera, Yuniel. Comportamiento del Motor de Inducción en la Climatización Centralizada de hoteles. Tesis de Grado. Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa. 2009.
25. Tim Salsbury (1997) Sistemas de ventilación por válvulas de dos vías.
26. Uribaz Arzuaga, E. R... [et.al.]. Identificación del sistema de climatización de un hotel. Centro de Estudios de Automatización (CEA). 2004.(arreglar bien estas referencias. *Red hidráulica y requerimientos de potencia eléctrica en climatización centralizada aflujo variable*

27. Uribaz Arzuaga, E. R... [et.al.]. Control Borroso del clima de un hotel. Centro de Estudios de Automatización (CEA). Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente.
28. Vilaragut Llanes, M.; Costa Montiel, A. Análisis y simulación de accionamientos de velocidad variable con optimización de la eficiencia utilizando lógica difusa. Convención Internacional de Ingeniería en Cuba, 2008. 10p.
29. Hechavarría, J.R. (2009): "Optimización del diseño de redes de distribución de agua bajo criterios técnico-económicos". Tesis en opción al grado de doctor en ciencias técnicas. 130p, 2009.
30. Rossman, L. (2001): "EPANET 2.0 Users Manual". Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH 45268.
31. Yosvany García Font, Aspectos relacionados con el control de los Circuitos Secundarios de Agua Fría de la Climatización Centralizada en el Hotel Blau Costa Verde. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2010.

ANEXOS

Anexo 1.1

Las tres condiciones para el control hidráulico perfecto

Condición 1 – el caudal de diseño debe estar disponible en todas las terminales.

Condición 2 – la presión diferencial sobre las válvulas de control no debe variar demasiado. De nuevo es necesario el equilibrado hidráulico para que esta condición se cumpla. De hecho, el equilibrado hidráulico es la única manera de identificar y resolver las causas reales de los problemas operativos de la instalación.

Condición 3 – Los caudales deben ser compatibles con las interfases del sistema para cumplir esta condición el equilibrado hidráulico es también necesario, de esta manera se puede suministrar la potencia instalada en la instalación. El procedimiento de equilibrado le permite localizar y resolver problemas hidráulicos.

Dimensionamiento de las válvulas de equilibrado

Tabla de selección						Pérdidas de carga en tuberías en Pa/m										
STAD	Kvs	Caudal de agua		Caudal de agua		Válvula abierta		DN válvula + 1		DN válvula		DN válvula + 1		DN válvula		
DN		l/h		l/s		Ap en kPa	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
10	1,47	100	430	0,028	0,119	0,5	8,6	17	390	76	1332	0,14	0,59	0,23	0,97	
15	2,52	350	750	0,097	0,208	1,9	8,9	62	244	268	1085	0,27	0,57	0,48	1,04	
20	5,7	650	1600	0,181	0,444	1,3	7,9	61	312	184	990	0,31	0,77	0,49	1,21	
25	8,7	1300	2400	0,361	0,667	2,2	7,6	55	167	213	664	0,36	0,66	0,62	1,15	
32	14,2	2000	3800	0,556	1,056	2,0	7,2	57	183	119	391	0,41	0,77	0,55	1,04	
40	19,2	2800	5700	0,778	1,583	2,1	8,8	33	119	104	390	0,35	0,72	0,57	1,15	
50	33,0	4500	11000	1,250	3,056	1,9	11,1	19	77	100	408	0,23	0,57	0,57	1,39	
STA-DR						1,0	5,1	21	97	96	438	0,15	0,34	0,28	0,62	
15	2,00	200	450	0,056	0,125	1,0	9,0	7	53	21	167	0,10	0,29	0,15	0,46	
20	2,00	200	600	0,056	0,167	2,2	9,0	13	48	53	193	0,16	0,33	0,29	0,57	
25	4,01	600	1200	0,167	0,333	Velocidad en tuberías en m/s										
STAF						1,1	6,9	38	208	84	467	0,52	1,30	0,72	1,79	
65	95,1	10	25	2,78	6,94	2,3	10,0	31	125	113	463	0,56	1,17	0,94	1,98	
80	120	18	38	5,00	10,56	3,0	10,0	34	105	96	297	0,67	1,22	1,02	1,85	
100	190	33	60	9,17	16,67	3,4	10,0	35	97	89	251	0,77	1,33	1,12	1,94	
125	300	55	95	15,28	26,39	4,6	12,8	24	63	90	235	0,74	1,24	1,26	2,09	
150	420	90	150	25,00	41,67	3,8	12,5	20	60	63	189	0,78	1,41	1,24	2,22	
200	765	150	270	41,67	75,00	5,2	12,6	25	58	60	138	1,00	1,55	1,41	2,19	
250	1185	270	420	75,00	116,67	7,6	20,1	29	71	53	131	1,16	1,88	1,48	2,40	
300	1450	400	650	111,11	180,56											

Tabla de selección de válvulas de equilibrado para evitar sobredimensionamientos cuando se desconoce la pérdida de carga.

Anexo. 1.2 Especificaciones de válvulas de equilibrado

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

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

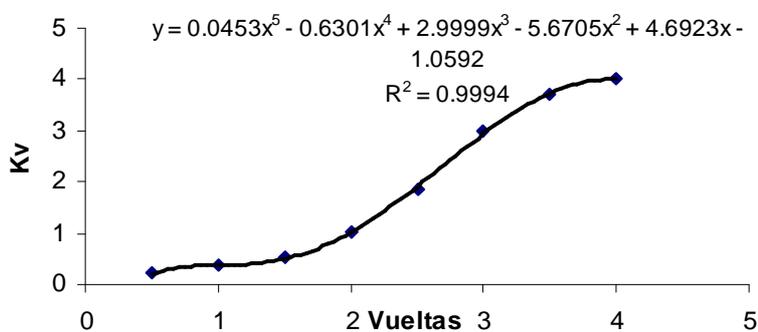


Figura 1. Relación Kv y número de vueltas de la válvula STA-DR DN 25.

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

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

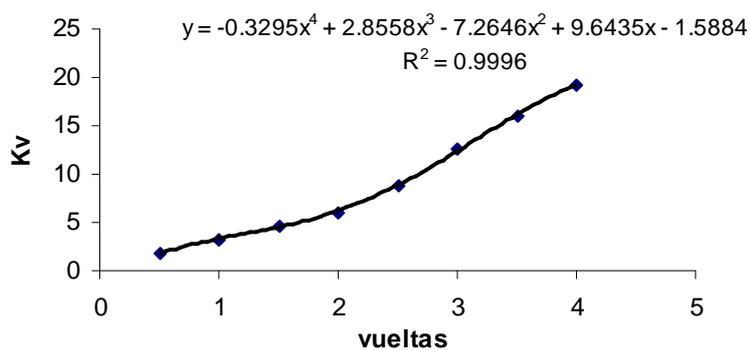


Figura 2. Relación Kv y número de vueltas de la válvula STAD DN 40.

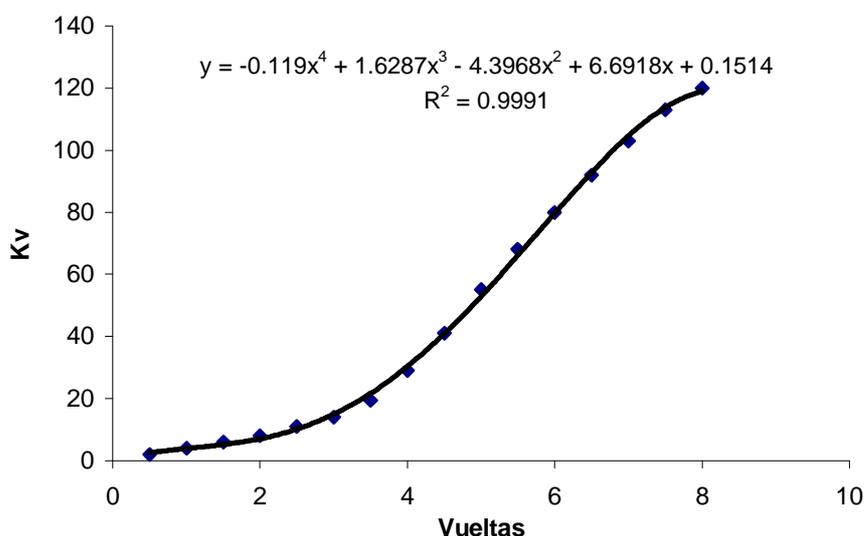


Figura 3. Relación Kv y número de vueltas de la válvula STAF DN 80.

Válvula de equilibrado, con funciones de corte, medida, ajuste y preajuste de caudal/presión/temperatura, provista de tomas de medida con volante con indicación digital de la posición de ajuste. Equipada, montada y ajustada. Modelo: TOUR & ANDERSSON HYDRONICS o similar.

ANEXO 1.3 Descripción del Método del Gradiente

Sea una red de tuberías con N nodos y NF nodos de altura dada (embalses y depósitos). La relación entre la pérdida de carga para una tubería que va del nodo i al nodo j, y el caudal de paso Q_{ij} , puede escribirse como (Rossman, 2001):

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (1.6.1)$$

Donde:

- H_i – altura piezométrica en el nodo.
- h – pérdida de carga.
- r – coeficiente de resistencia.
- Q – caudal.
- n – exponente del caudal.
- m – coeficiente de pérdidas menores.

El valor del coeficiente de resistencia depende de la fórmula utilizada para el cálculo de las pérdidas. Para las bombas, la pérdida puede representarse mediante una fórmula potencial del tipo:

$$h_{ij} = -\omega^2 \left(h_0 - r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega} \right)^n \right) \quad (1.6.2)$$

Donde:

- h_0 – altura a caudal nulo.
- w – velocidad relativa de giro.
- r – coeficiente de la curva de la bomba.
- n – coeficiente de la curva de la bomba.

Los términos reconocidos como, coeficiente de la curva de la bomba, r y n , son referenciados por otros autores como: coeficiente de resistencia y exponente del caudal respectivamente. En la práctica, al proporcionar la altura a válvula cerrada h_0 y otros dos puntos de la curva característica de una bomba, se pueden calcular estos valores.

El segundo sistema de ecuaciones a cumplir está configurado por la condición de equilibrio para los caudales en todos los nodos:

$$\sum_{i=1}^n Q_{ij} - D_i = 0 \quad (1.6.3)$$

Donde:

- D_i – caudal de demanda en el nodo i .

El cual por convención se toma como positivo cuando entra al nodo. Dados los valores de las alturas en los nodos de altura prefijada, se trata de encontrar una solución para las alturas H_i en los restantes nodos, y para los caudales Q_{ij} de todos los tramos de tuberías.

El método de resolución del Gradiente comienza con una estimación inicial del caudal por cada tubería, sin necesidad de cumplir la ecuación de continuidad. En cada iteración del método, se obtienen las alturas piezométricas en los nodos y se resuelve el sistema de ecuaciones:

$$AH = F \quad (1.6.4)$$

Donde:

A – matriz Jacobiana (N x N).

H – vector de incógnitas nodales (N x 1).

F – vector de términos independientes (N x 1).

Los elementos de la diagonal principal de la matriz Jacobiana vienen dados por:

$$A_{ii} = \sum_j p_{ij} \quad (1.6.5)$$

y los elementos no nulos fuera de la diagonal principal, por:

$$A_{ij} = -p_{ij} \quad (1.6.6)$$

Donde:

p_{ij} – la inversa de la derivada respecto al caudal, de la pérdida de carga en la línea que va del nodo i al j. Su expresión para las tuberías es:

$$p_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|} \quad (1.6.7)$$

y para las bombas:

$$p_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega}\right)^{n-1}} \quad (1.6.8)$$

Los términos independientes están constituidos por el caudal residual en el nodo no equilibrado, más un factor de corrección dado por:

$$F_i = \left(\sum_j Q_{ij} - D_i \right) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f \quad (1.6.9)$$

Donde:

$p_{if} H_f$ – sólo para tuberías que conectan el nodo i con un nodo de altura conocida f .

La expresión del factor de corrección del caudal y_{if} para las tuberías donde:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{Si } x > 0 \\ -1, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

se define como:

$$y_{ij} = p_{ij} \left(r |Q_{ij}|^n + m |Q_{ij}|^2 \right) \text{sgn}(Q_{ij}) \quad (1.6.10)$$

para las bombas

$$y_{ij} = -p_{ij} \omega^2 \left(h_0 - r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega} \right)^n \right) \quad (1.6.11)$$

Donde:

Q_{ij}

– siempre es positivo.

Una vez calculadas las nuevas alturas, se resuelven las ecuaciones, los nuevos caudales se obtienen mediante la expresión:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \left(y_{ij} - p_{ij} (H_i - H_j) \right) \quad (1.6.12)$$

Si la suma, extendida a todas las líneas, del valor absoluto de la variación relativa del caudal respecto al caudal total en la línea, es mayor que una cierta tolerancia (p. ej.

0,001), las ecuaciones (2.10) y (2.18) se resuelven de nuevo. Obsérvese que la fórmula de actualización (2.18) conduce al equilibrio de los caudales en los nodos, tras la primera iteración. La descripción del método así como la implementación pueden ser consultadas en (Rossman, 2001).

Anexo 1.4 Familias de curvas que se pueden presentar ante el trabajo a flujo variable del la bomba.

- Curvas obtenidas de los artículos de la ASHRAE (ejemplos similares se pueden apreciar en familias de curva a diferente rpm).
- Curvas de las bombas trabajando en paralelo (lo mas frecuente es el trabajo en paralelo o un as ola bomba).
- Grafico de una bomba para cambios de la bomba y de la red de manera simultánea (ver el libro de accionamiento a velocidad variable).
- Grafico a partir del cual se selecciona una bomba de los catálogos.

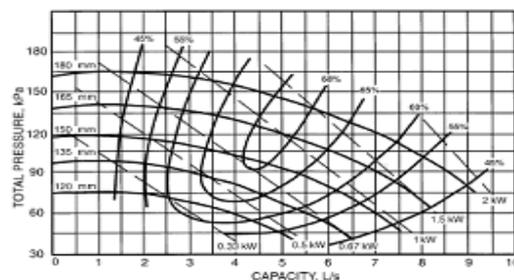


Fig. 11 Typical Pump Performance Curve

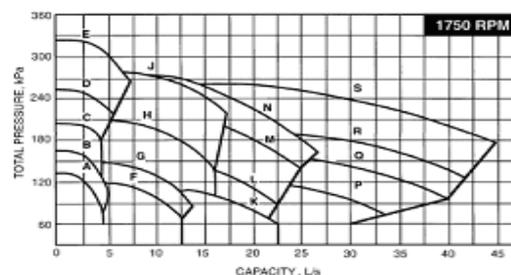


Fig. 14 Typical Pump Manufacturer's Performance Curve Series

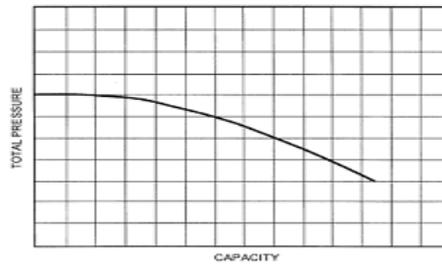


Fig. 12 Typical Pump Curve

Anexo 1.5 Accesorios típicos que producen pérdidas singulares o locales

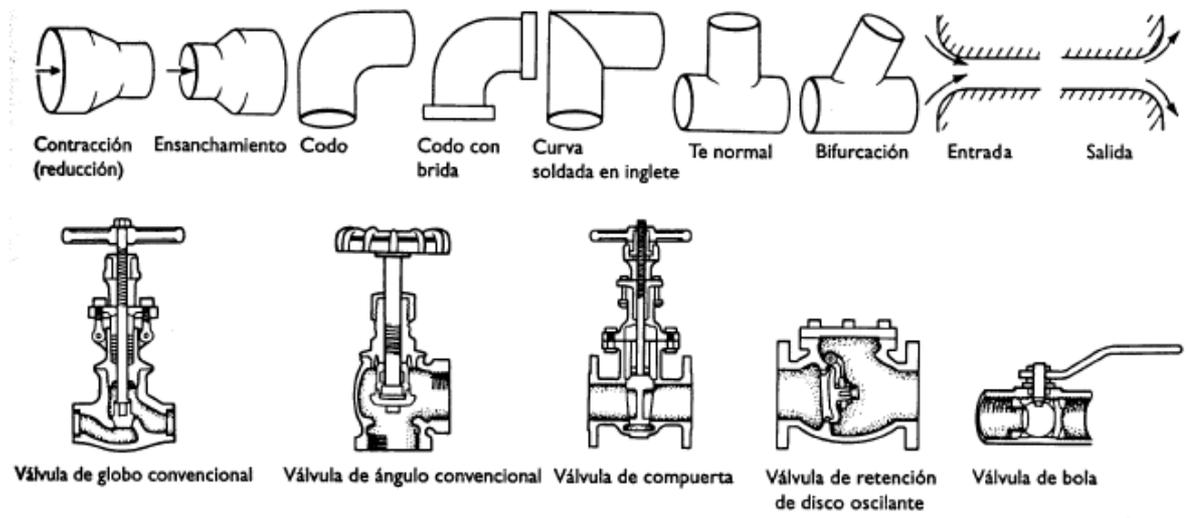


Tabla 1.5. Pérdidas de Carga de los Codos expresados en Longitud Equivalente

DIÁMETRO EXTERIOR		CODOS						T			
Acero	Cobre	Radio pequeño 90°	Radio grande 90°	Macho Hembra 90°	Radio pequeño 45°	Macho Hembra 45°	Radio pequeño 180°	Cambio de dirección	PASO DIRECTO		
									Sin reducción	Reducción 1/4	Reducción 1/2
17,2	1/2	0,42	0,27	0,70	0,21	0,33	0,70	0,82	0,27	0,36	0,42
21,3	5/8	0,48	0,30	0,76	0,24	0,40	0,76	0,91	0,30	0,43	0,48
26,9	7/8	0,61	0,42	0,98	0,27	0,49	0,98	1,2	0,42	0,58	0,61
33,7	1 1/8	0,79	0,51	1,2	0,39	0,64	1,2	1,5	0,51	0,70	0,79
42,4	1 3/8	1,0	0,70	1,7	0,51	0,91	1,7	2,1	0,70	0,95	1,0
48,3	1 5/8	1,2	0,80	1,9	0,64	1,0	1,9	2,4	0,80	1,1	1,2
60,3	2 1/8	1,5	1,0	2,5	0,79	1,4	2,5	3,0	1,0	1,4	1,5
73	2 5/8	1,8	1,2	3,0	0,98	1,6	3,0	3,6	1,2	1,7	1,8
88,9	3 1/8	2,3	1,5	3,6	1,2	2,0	3,6	4,6	1,5	2,1	2,3
101,6	3 5/8	2,7	1,8	4,6	1,4	2,2	4,6	5,4	1,8	2,4	2,7
114,3	4 1/8	3,0	2,0	5,1	1,6	2,6	5,1	6,4	2,0	2,7	3,0
141,3	5 1/8	4,0	2,5	6,4	2,0	3,3	6,4	7,6	2,5	3,6	4,0
168,3	6 1/8	4,9	3,0	7,6	2,4	4,0	7,6	9,1	3,0	4,2	4,8
219,1	8 1/8	6,1	4,0	-	3,0	-	10,4	10,7	4,0	5,4	6,1
273	-	7,7	4,9	-	4,0	-	12,8	15,2	4,9	7,0	7,6
323,9	-	9,1	5,8	-	4,9	-	15,3	18,3	5,8	7,9	9,1
355,6	-	10,4	7,0	-	5,4	-	16,8	20,7	7,0	9,1	10,4
406,4	-	11,6	7,9	-	6,1	-	18,9	23,8	7,9	10,7	11,6
457,2	-	12,8	8,8	-	7,0	-	21,4	26,0	8,8	12,2	12,8
508	-	15,3	10,4	-	7,9	-	24,7	30,5	10,4	13,4	15,2
609,6	-	18,3	12,2	-	9,1	-	28,8	35,0	12,2	15,2	18,3

Anexo 1.6. Características operacionales y parámetros de las unidades terminales, fan – coil.

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

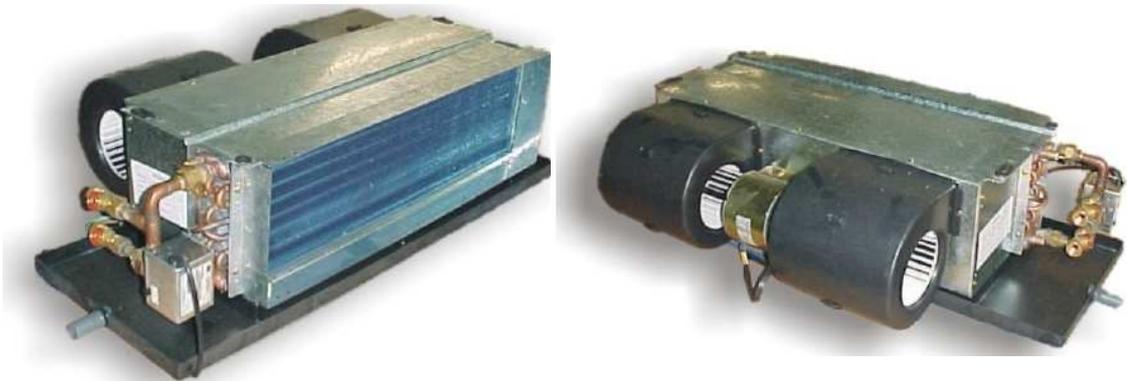
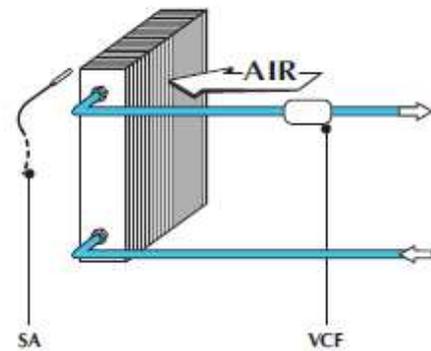


Figura 1. Unidades terminales básicas fan-coil modelos FBHA.



- SW Water temperature probe
- VCF Solenoid valve (Heating / Cooling)
- VC Solenoid valve (Heating),
- VF Solenoid valve (Cooling)
- SA Ambient temperature probe
- V3, V2, V1 Maximum, Average, Minimum Fan Coil speed.
- RX Resistance
- PC Plasmacluster

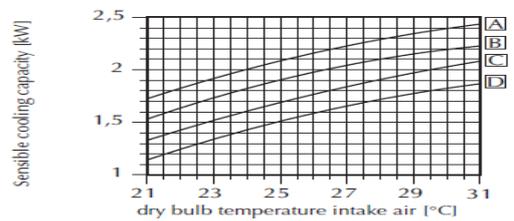
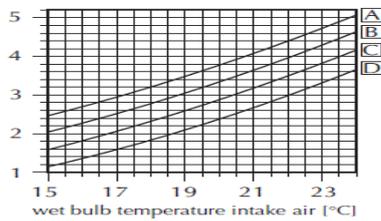
TECHNICAL DATA

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

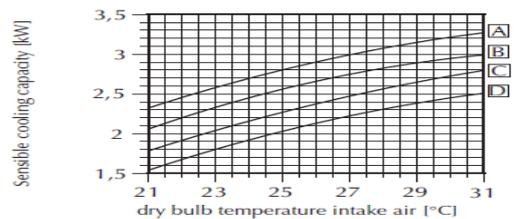
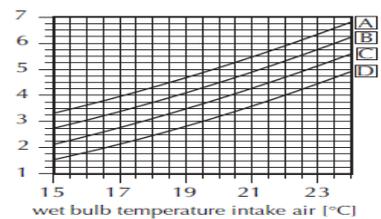
Mod.		FCX 17	FCX 22	FCX 32	FCX 42	FCX 50	FCX 62	FCX 82	FCX 102
Heating									
Heating capacity	W (max.)	2490	3400	4975	7400	8620	12920	15140	17020
	W (med.)	2070	2700	4085	6415	7530	10940	13350	15240
	W (min.)	1610	1915	3380	5115	5420	8330	10770	12560
Heating capacity* (water inlet 50°C)	W (E)	1360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

Evaporation temperature: **A = 2,5 °C** **B = 5 °C** **C = 7,5 °C** **D = 10 °C**

FCX 32

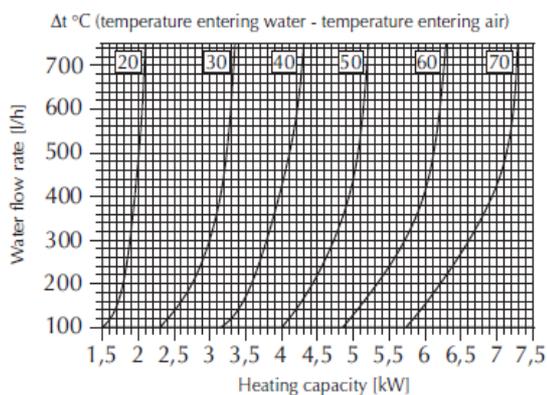


FCX 42

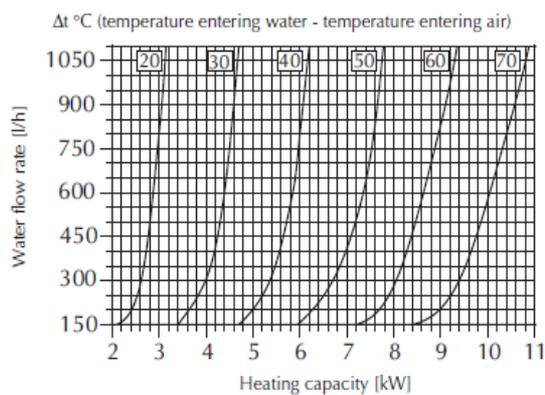


HEATING POWER YIELD 3-ROW COIL

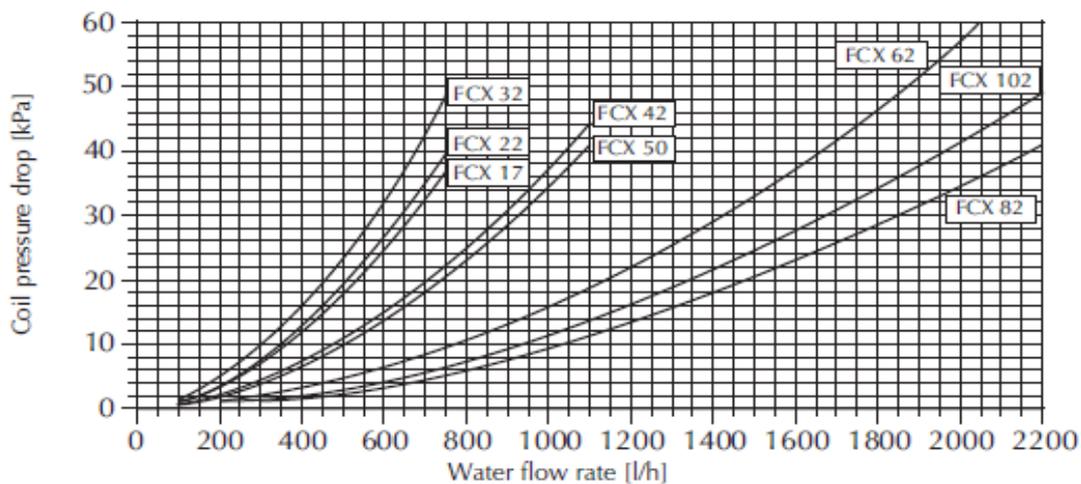
FCX 32



FCX 42



3-ROW COIL PRESSURE DROP



La caída de la presión en el grafico encima se refiere al average de la temperatura del agua de 10 grados. La siguiente tabla muestra las correcciones que hay que aplicarle a la caída de presión con la variación en el promedio de la temperatura del agua.

Average water temperature °C	5	10	15	20	50	60	70
Correction factor	1,03	1	0,96	0,91	0,78	0,75	0,72

SOUND POWER LEVEL RATED IN dB (A)

FCX32	Max.	43,6	48,8	46,4	42,7	39,0	31,3	17,7	52,3	48 (E)
	Med.	37,0	43,0	39,7	35,7	29,9	24,0	5,4	45,9	41 (E)
	Min.	28,9	36,1	32,2	29,0	22,9	19,2	3,1	38,8	34 (E)
FCX42	Max.	46,6	51,8	49,4	45,7	42,0	34,3	20,7	55,3	51 (E)
	Med.	39,6	44,8	42,4	38,7	35,0	27,3	13,7	48,3	44 (E)
	Min.	31,9	39,1	35,2	32,0	25,9	22,2	6,1	41,8	37 (E)

OPERATING

LIMITS

Maximum water inlet temperature 80 °C
Maximum working pressure 8 bar
Operating Voltage230V (±10%) ~ 50Hz
Room Temperature 0÷45°C
Room Humidity<85% U.R.

Water flow limits (3-row coil):

MOD.	FCX	17	22	32	42	50	62	82	102
Minimum water flow	[Vh]	100	100	100	150	150	300	300	300
Maximum water flow	[Vh]	750	750	750	1100	1100	2200	2200	2200

Minimum average water temperature

Para evitar la congelación en el exterior de la unidad mientras el ventilador opera, el promedio de la temperatura del agua no debe caer por debajo de los límites mostrados en la tabla siguiente, determinado por el termo hidrométrico de las condiciones del ambiente. Estos límites se refieren a la unidad de operación con el ventilador a la velocidad máxima.

En caso de que se forme congelación sobre el exterior de la unidad si el agua fría circula por el intercambiador de calor mientras el ventilador este apagado por un periodo de tiempo prolongado, es aconsejable una válvula de tres vías adicional.

MINIMUM AVERAGE WATER TEMPERATURE

Dry bulbe air temperature [°C]

		21	23	25	27	29	31
Wet bulbe air temperature °C	15	3	3	3	3	3	3
	17	3	3	3	3	3	3
	19	3	3	3	3	3	3
	21	6	5	4	3	3	3
	23	-	8	7	6	5	5

COOLING CAPACITY FCX 32

Water temp. inlet [°C]	Δt	TOTAL COOLING CAPACITY [kW] Wet bulbe air temperature [°C]					SENSIBLE COOLING CAPACITY [kW] Dry bulbe air temperature [°C]					
		15	17	19	21	23	21	23	25	27	29	31
3	3	1300	1066	2572	2148	-	1134	1368	1612	1817	2004	2184
	4	1618	2281	2921	-	-	1351	1604	1851	2053	2253	2438
	5	1413	2026	2728	2479	-	1231	1480	1750	1973	2176	2371
	6	1231	1793	2502	3228	3968	1088	1360	1623	1887	2090	2293
	7	1064	1536	2246	3070	3770	997	1222	1493	1753	2007	2210
4	3	1387	2241	-	-	-	1347	1593	1831	2029	2220	2409
	4	1407	2013	2693	-	-	1230	1477	1713	1954	2153	2340
	5	1236	1780	2491	3188	3924	1103	1366	1623	1867	2076	2272
	6	1056	1552	2275	2984	3722	974	1236	1494	1753	1989	2193
	7	960	1332	1964	2709	3328	906	1104	1368	1630	1895	2106
5	3	1363	1989	-	-	-	1279	1479	1726	1928	2120	2313
	4	1205	1758	2456	3138	-	1095	1353	1604	1849	2054	2246
	5	1069	1532	2210	2947	3681	987	1240	1488	1750	1973	2174
	6	929	1341	1936	2733	3489	879	1114	1377	1610	1884	2090
	7	871	1132	1705	2459	3272	817	997	1248	1501	1759	2004
6	3	1174	1723	2403	-	-	1084	1349	1593	1827	2022	2212
	4	1056	1525	2193	2893	-	990	1213	1476	1744	1980	2181
	5	942	1327	1938	2693	3438	879	1114	1372	1623	1868	2072
	6	841	1161	1750	2448	3228	793	990	1255	1507	1755	1989
	7	-	1012	1490	2170	2997	727	906	1120	1382	1626	1896
7	3	1042	1475	2162	-	-	981	1221	1477	1722	1921	2115
	4	952	1320	1912	2649	-	881	1114	1357	1616	1840	2046
	5	843	1152	1688	2413	3182	764	1007	1248	1492	1752	1970
	6	-	1009	1472	2158	2939	695	881	1128	1386	1632	1882
	7	-	911	1275	1881	2693	633	817	1003	1263	1561	1771
8	3	942	1264	1872	-	-	875	1089	1348	1591	1819	2013
	4	847	1121	1633	2388	3112	774	997	1240	1491	1743	1940
	5	-	1014	1447	2113	2914	683	891	1114	1376	1624	1864
	6	-	900	1291	1864	2680	622	793	1008	1266	1513	1755
	7	-	-	1104	1621	2378	542	727	906	1145	1389	1628
9	3	839	1095	1600	2320	-	769	983	1224	1474	1716	1914
	4	-	1067	1400	2078	2837	661	891	1109	1359	1615	1844
	5	-	909	1258	1833	2636	574	778	1010	1254	1503	1749
	6	-	-	1102	1618	2355	512	693	895	1148	1392	1624
	7	-	-	963	1308	2078	448	633	817	1015	1274	1524
10	3	-	892	1263	2033	-	661	880	1091	1349	1587	1813
	4	-	804	1212	1793	2579	546	793	1003	1242	1491	1737
	5	-	-	1087	1583	2316	483	667	902	1141	1379	1622
	6	-	-	971	1390	2030	419	603	798	1021	1274	1517
	7	-	-	-	1209	1789	347	542	727	911	1109	1405
11	3	-	891	1172	1739	-	552	774	987	1210	1472	1709
	4	-	-	1063	1534	2267	482	672	898	1114	1359	1610
	5	-	-	971	1353	1993	391	574	792	1019	1260	1503
	6	-	-	-	1198	1754	321	512	695	911	1158	1394
	7	-	-	-	1042	1534	238	448	635	817	1003	1291

COOLING CAPACITY FCX 42

Water temp. Inlet [°C]	At	TOTAL COOLING CAPACITY [W] Wet bulb air temperature [°C]					SENSIBLE COOLING CAPACITY [W] Dry bulb air temperature [°C]					
		15	17	19	21	23	21	23	25	27	29	31
		3	2671	-	-	-	-	2336	2730	3088	3407	3715
5	4	2491	3516	4327	-	-	2349	2550	2942	3279	3602	3907
	5	2156	3110	4241	5329	-	1900	2332	2752	3134	3468	3791
	6	1888	2717	3825	5010	6191	1648	2113	2530	2955	3320	3653
	7	1602	2278	3368	4635	5854	1344	1800	2236	2737	3155	3507
	8	1491	2497	-	-	-	2131	2542	2918	3240	3552	-
6	4	2166	3103	4194	-	-	1939	2349	2755	3112	3437	3749
	5	1879	2730	3852	4963	6126	1706	2143	2554	2962	3303	3628
	6	1563	2343	3426	4626	5816	1496	1908	2337	2754	3150	3489
	7	1457	1924	2962	4204	5460	1402	1685	2094	2528	2957	3339
	8	2146	3071	-	-	-	1929	2336	2730	3076	3391	3702
7	4	1882	2742	3825	4898	-	1740	2160	2551	2941	3275	3592
	5	1621	2375	3400	4579	5751	1523	1944	2343	2760	3133	3465
	6	1413	2014	2967	4223	5423	1355	1679	2138	2558	2960	3322
	7	1321	1689	2556	3471	5048	1260	1564	1878	2338	2754	3163
	8	1850	2704	3761	-	-	1740	2156	2537	2909	3238	3540
8	4	1647	2382	3381	4523	-	1564	1948	2357	2754	3108	3439
	5	1482	2040	3013	4185	5357	1354	1753	2160	2561	2958	3298
	6	1279	1757	2601	3748	5010	1216	1507	1940	2353	2763	3151
	7	-	1518	2395	3297	4616	1118	1402	1695	2140	2559	2975
	8	1644	2324	3342	-	-	1571	1954	2334	2729	3064	3379
9	4	1482	2033	2967	4128	-	1388	1753	2166	2554	2956	3267
	5	1266	1782	2588	3741	4954	1169	1557	1962	2369	2758	3131
	6	-	1513	2233	3297	4588	1074	1355	1733	2172	2565	2964
	7	-	1386	1859	2846	4129	976	1260	1540	1932	2362	2760
	8	1482	1995	2926	-	-	1398	1746	2135	2536	2899	3215
10	4	1312	1769	2581	3683	4869	1203	1581	1961	2357	2750	3100
	5	-	1563	2246	3284	4332	1027	1368	1722	2169	2560	2956
	6	-	1350	1924	2846	4109	932	1214	1534	1977	2380	2762
	7	-	-	1613	2446	3619	831	1118	1402	1718	2169	2572
11	3	1320	1727	2517	3625	-	1224	1577	1938	2333	2732	3032
	4	-	1579	2395	3245	4448	1010	1405	1767	2168	2547	2929
	5	-	1392	1927	2852	4083	885	1178	1584	1990	2371	2757
	6	-	-	1647	2465	3613	788	1074	1361	1720	2186	2570
	7	-	-	1450	2098	3153	684	976	1260	1547	1966	2372
12	3	-	1566	2349	3149	-	1047	1407	1755	2136	2529	2883
	4	-	1412	1907	2800	4072	841	1226	1598	1984	2358	2741
	5	-	-	1669	2433	3580	744	1027	1402	1794	2177	2561
	6	-	-	1466	2117	3142	642	932	1211	1574	1999	2385
	7	-	-	-	1789	2710	529	831	1118	1402	1768	2189
13	3	-	1405	1850	2730	-	863	1233	1584	1945	2329	2717
	4	-	-	1669	2375	3313	698	1027	1422	1780	2172	2545
	5	-	-	1502	2104	3103	600	885	1206	1604	2003	2374
	6	-	-	-	1824	2691	491	788	1072	1382	1808	2195
	7	-	-	-	1544	2317	359	684	976	1260	1564	2004

Anexo 1.7. Ejemplos de elementos y conexiones básicas de los SCCAH a flujo variable

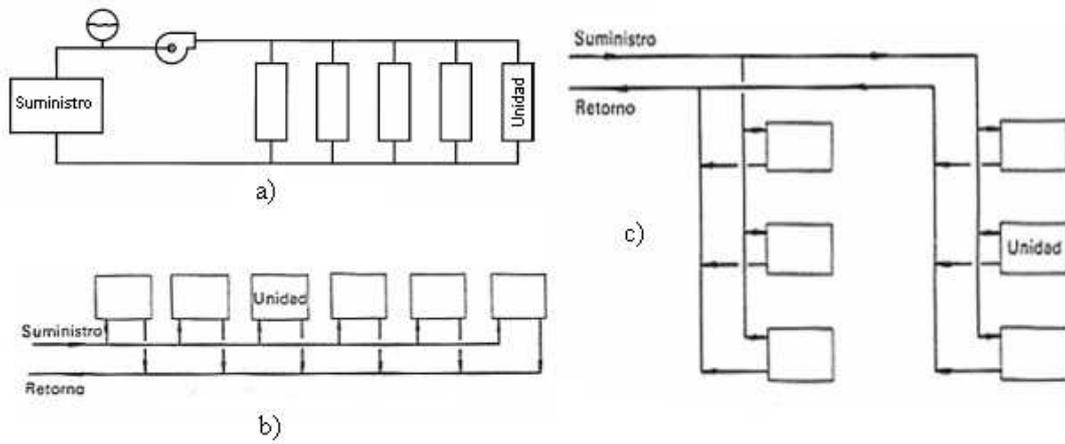


Figura. 1 Red hidráulica en malla con retorno directo empleada en los CSAF.

a) Esquema general simplificado, b) unidades conectadas horizontalmente y c) unidades conectadas verticalmente (fuente Hydronic System, Carrier Pág.)

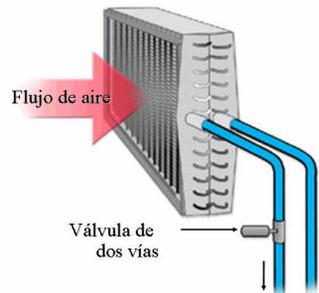


Figura 1. Unidad terminal con válvula de dos vías. (Fuente: presentación de la TRANE)

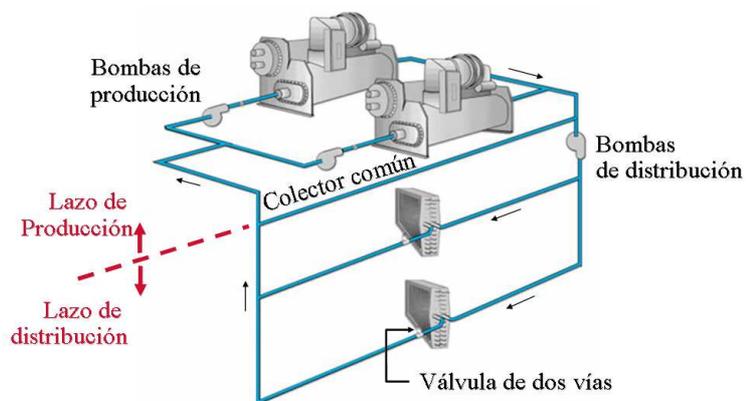


Figura 2. Configuración estándar de los SCCAH a flujo variable. (Fuente: presentación de la TRANE)

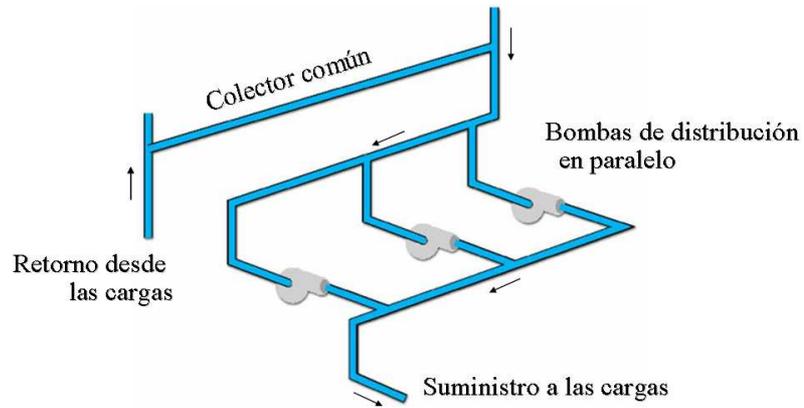


Figura 3 Sistema de distribución con bombas conectadas en paralelo.

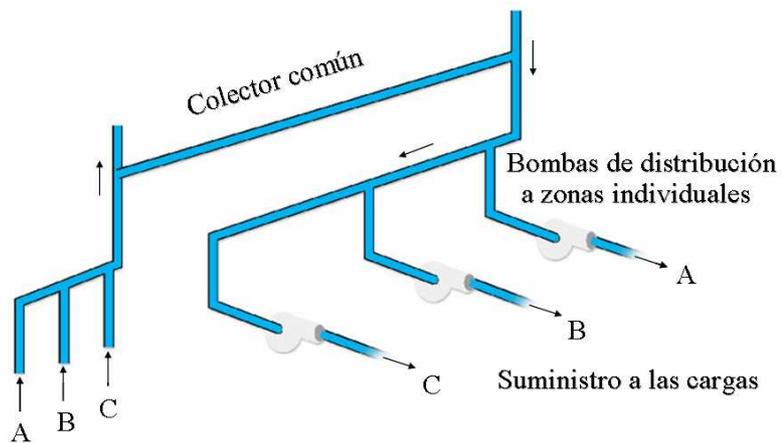


Figura 4. Sistema de distribución con bombas individuales para cada zona. (Fuente: presentación de la TRANE)

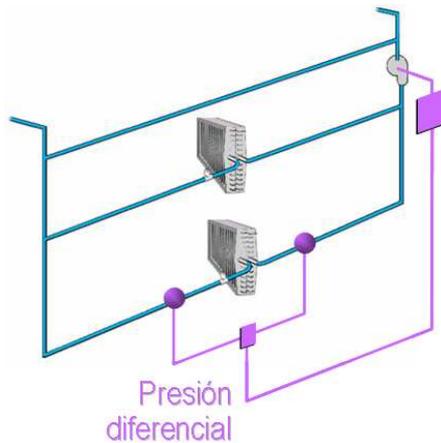


Figura 5. Referencia de la presión diferencial para el control de velocidad variable. (Fuente: presentación de la TRANE)

Anexo 2.1 Configuración general de los SCCAH a flujo variable y propiedades termofísicas del agua (Fuente: Crane),

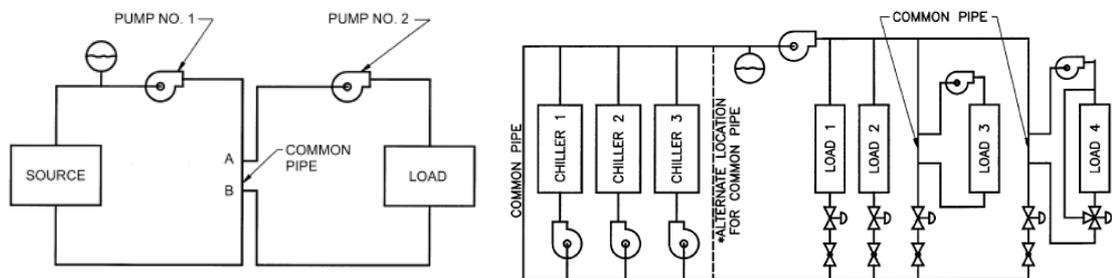


Figura 1. Configuración de los SCCAH a flujo variable en relación a los CSAF: a) Configuración simple; b) configuración compleja. Fuente (Hydronic System).

Extraído del Libro Flujo de Fluidos en válvulas accesorios tuberías, CRANE y de Propiedades termofísicas del agua saturada....Pág. 846 Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Incropera

Temperatura	Temperatura	Volumen	Calor	Densidad
-------------	-------------	---------	-------	----------

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

Nota: Los valores de la última fila corresponde a los valores promedios.

Anexo 3.1. Tabla de los datos hidráulicos de los Tramos de tubería

Tramo	Longitud <m>	Diámetro <mm>	Caudal <l/s>	Velocidad <m/s>	Pérdidas </1000m>	Coef Rug	Material
1-2	0,65	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
3-4	98,9	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
2-3	2,35	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
4-5	11,8	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
5-6	7	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
6-7	3,1	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
7-A	81	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
12-13	2,35	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
11-12	98,9	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
M-O	8	38,5	1,51	1,3	64,34	0,1	PVC
A-A3	2,25	25,4	1,01	2	250,3	0,1	PVC
A3-A2	3,1	25,4	0,66	1,3	110,98	0,1	PVC
A2-A1	3,1	19,05	0,32	1,13	123,91	0,1	PVC
B2-B3	3,1	25,4	0,66	1,3	110,98	0,1	PVC
B1-B2	3,1	19,05	0,32	1,13	123,91	0,1	PVC
A3-A31	2,5	12,7	0,35	2,77	1170,66	0,1	PVC
A31-A33	5,4	12,7	0,16	1,3	276,12	0,1	PVC
A31-A32	4,05	12,7	0,19	1,47	347	0,1	PVC
A2-A21	2,5	12,7	0,34	2,67	1087,73	0,1	PVC
A21-A22	4,05	12,7	0,18	1,42	325,55	0,1	PVC
A21-A23	5,4	12,7	0,16	1,25	254,61	0,1	PVC
A1-A11	2,5	12,7	0,32	2,55	995,38	0,1	PVC
A11-A12	4,05	12,7	0,17	1,36	301,48	0,1	PVC
A11-A13	5,4	12,7	0,15	1,18	230,81	0,1	PVC
B32-B31	3,85	12,7	0,19	1,47	347	0,1	PVC
B33-B31	6,38	12,7	0,16	1,3	276,12	0,1	PVC

B31-B3	1,65	12,7	0,35	2,77	1170,66	0,1	PVC
B22-B21	3,85	12,7	0,18	1,42	325,55	0,1	PVC
B23-B21	6,38	12,7	0,16	1,25	254,61	0,1	PVC
B21-B2	1,65	12,7	0,34	2,67	1087,73	0,1	PVC
B12-B11	3,85	12,7	0,17	1,36	301,48	0,1	PVC
B13-B11	6,38	12,7	0,15	1,18	230,81	0,1	PVC
B11-B1	1,65	12,7	0,32	2,55	995,38	0,1	PVC
A-C	8	76,2	6,77	1,48	34,85	0,1	PVC
C-E	8	76,2	5,78	1,27	25,82	0,1	PVC
C-C3	2,25	25,4	0,98	1,94	237,58	0,1	PVC
C3-C31	2,5	12,7	0,34	2,7	1110,3	0,1	PVC
C31-C32	4,05	12,7	0,18	1,43	331,37	0,1	PVC
C31-C33	5,4	12,7	0,16	1,26	260,48	0,1	PVC
C3-C2	3,1	25,4	0,64	1,27	105,44	0,1	PVC
C2-C1	3,1	19,05	0,31	1,1	117,86	0,1	PVC
C2-C21	2,5	12,7	0,33	2,6	1031,62	0,1	PVC
C21-C22	4,05	12,7	0,18	1,39	310,93	0,1	PVC
C21-C23	5,4	12,7	0,15	1,21	240,16	0,1	PVC
C1-C11	2,5	12,7	0,31	2,48	945,59	0,1	PVC
C11-C12	4,05	12,7	0,17	1,33	286,22	0,1	PVC
C11-C13	5,4	12,7	0,15	1,15	219,97	0,1	PVC
D32-D31	3,85	12,7	0,18	1,43	331,37	0,1	PVC
D33-D31	6,38	12,7	0,16	1,26	260,48	0,1	PVC
D31-D3	1,65	12,7	0,34	2,7	1110,3	0,1	PVC
D22-D21	3,85	12,7	0,18	1,39	310,93	0,1	PVC
D23-D21	6,38	12,7	0,15	1,21	240,16	0,1	PVC
D21-D2	1,65	12,7	0,33	2,6	1031,62	0,1	PVC
D2-D3	3,1	25,4	0,64	1,27	105,44	0,1	PVC
D1-D2	3,1	19,05	0,31	1,1	117,86	0,1	PVC
D12-D11	3,85	12,7	0,17	1,33	286,22	0,1	PVC
D13-D11	6,38	12,7	0,15	1,15	219,97	0,1	PVC
D11-D1	1,65	12,7	0,31	2,48	945,59	0,1	PVC
D3-DV1	1,05	25,4	0,98	1,94	237,58	0,1	PVC
DV2-D	1,2	25,4	0,98	1,94	237,58	0,1	PVC
B3-BV1	1,05	25,4	1,01	2	250,3	0,1	PVC
BV2-B	1,2	25,4	1,01	2	250,29	0,1	PVC
D-B	8	76,2	6,77	1,48	34,85	0,1	PVC
F-D	8	76,2	5,78	1,27	25,82	0,1	PVC
FV2-F	1,2	25,4	0,88	1,73	189,81	0,1	PVC
H-F	16	76,2	4,91	1,08	18,9	0,1	PVC
F31-F3	1,65	12,7	0,34	2,67	1086,48	0,1	PVC
F3-FV1	1,05	25,4	0,88	1,73	189,81	0,1	PVC
F2-F3	3,1	25,4	0,54	1,06	75,3	0,1	PVC
F1-F2	3,1	19,05	0,21	0,74	55,28	0,1	PVC
F21-F2	1,65	12,7	0,33	2,59	1030,27	0,1	PVC
E-E3	2,25	25,4	0,88	1,73	189,81	0,1	PVC
E3-E31	2,5	12,7	0,34	2,67	1086,48	0,1	PVC
E3-E2	3,1	25,4	0,54	1,06	75,3	0,1	PVC
E31-E32	4,05	12,7	0,18	1,42	325,23	0,1	PVC

E31-E33	5,4	12,7	0,16	1,25	254,29	0,1	PVC
F32-F31	3,85	12,7	0,18	1,42	325,23	0,1	PVC
F33-F31	6,38	12,7	0,16	1,25	254,29	0,1	PVC
E2-E21	2,5	12,7	0,33	2,59	1030,27	0,1	PVC
E21-E22	4,05	12,7	0,18	1,39	310,57	0,1	PVC
E21-E23	5,4	12,7	0,15	1,21	239,82	0,1	PVC
F22-F21	3,85	12,7	0,18	1,39	310,57	0,1	PVC
F23-F21	6,38	12,7	0,15	1,21	239,82	0,1	PVC
E2-E1	3,1	19,05	0,21	0,74	55,28	0,1	PVC
E1-E11	6,55	12,7	0,21	1,65	434,49	0,1	PVC
F11-F1	6,55	12,7	0,21	1,65	434,49	0,1	PVC
E-G	16	76,2	4,91	1,08	18,9	0,1	PVC
G-I	4	63,5	3,93	1,24	31,2	0,1	PVC
G-G3	2,25	25,4	0,98	1,93	233,51	0,1	PVC
G3-G31	2,5	12,7	0,32	2,54	990,45	0,1	PVC
G31-G33	5,4	12,7	0,15	1,18	229,67	0,1	PVC
G31-G32	4,05	12,7	0,17	1,36	300,05	0,1	PVC
G3-G2	3,1	25,4	0,65	1,29	108,81	0,1	PVC
G2-G1	3,1	19,05	0,32	1,12	120,66	0,1	PVC
G2-G21	2,5	12,7	0,34	2,65	1073,37	0,1	PVC
G223-G23	5,4	12,7	0,11	0,84	121,88	0,1	PVC
G223-G22	4,05	12,7	0,12	0,96	155,94	0,1	PVC
G21-G223	1	12,7	0,23	1,8	511,62	0,1	PVC
G21-G245	11,02	12,7	0,11	0,85	123,7	0,1	PVC
G245-G24	4,05	12,7	0,06	0,45	38,61	0,1	PVC
G245-G25	5,4	12,7	0,05	0,4	31,16	0,1	PVC
H24-H245	3,85	12,7	0,06	0,45	38,61	0,1	PVC
H25-H245	6,38	12,7	0,05	0,4	31,16	0,1	PVC
H245-H21	11,02	12,7	0,11	0,85	123,7	0,1	PVC
H22-H223	3,85	12,7	0,12	0,96	155,94	0,1	PVC
H23-H223	6,38	12,7	0,11	0,84	121,88	0,1	PVC
H223-H21	1	12,7	0,23	1,8	511,62	0,1	PVC
H21-H2	1,65	12,7	0,34	2,65	1073,37	0,1	PVC
H2-H3	3,1	25,4	0,65	1,29	108,81	0,1	PVC
H1-H2	3,1	19,05	0,32	1,12	120,66	0,1	PVC
H123-H11	1	12,7	0,22	1,71	461,86	0,1	PVC
H145-H11	11,02	12,7	0,10	0,8	112,29	0,1	PVC
H11-H1	1,65	12,7	0,32	2,51	968,67	0,1	PVC
H31-H3	1,65	12,7	0,32	2,54	990,45	0,1	PVC
H32-H31	3,85	12,7	0,17	1,36	300,05	0,1	PVC
H33-H31	6,38	12,7	0,15	1,18	229,67	0,1	PVC
H3-HV1	1,05	25,4	0,98	1,93	233,5	0,1	PVC
HV2-H	1,2	25,4	0,98	1,93	233,51	0,1	PVC
H12-H123	3,85	12,7	0,11	0,9	139,12	0,1	PVC
H13-H123	6,38	12,7	0,10	0,8	112,15	0,1	PVC
H14-H145	3,85	12,7	0,05	0,42	34,8	0,1	PVC
H15-H145	6,38	12,7	0,05	0,38	27,82	0,1	PVC
G1-G11	2,5	12,7	0,32	2,51	968,67	0,1	PVC
G11-G123	1	12,7	0,22	1,71	461,87	0,1	PVC

G11-G145	11,02	12,7	0,10	0,8	112,29	0,1	PVC
G145-G14	4,05	12,7	0,05	0,42	34,8	0,1	PVC
G145-G15	5,4	12,7	0,05	0,38	27,82	0,1	PVC
G123-G12	4,05	12,7	0,11	0,9	139,12	0,1	PVC
G123-G13	5,4	12,7	0,10	0,8	112,14	0,1	PVC
JV2-J	1,2	25,4	0,96	1,9	227,42	0,1	PVC
J-H	4	63,5	3,93	1,24	31,2	0,1	PVC
L-J	8	50,8	2,97	1,46	56,74	0,1	PVC
J31-J3	1,65	12,7	0,32	2,51	965,41	0,1	PVC
J3-JV1	1,05	25,4	0,96	1,9	227,41	0,1	PVC
J2-J3	3,1	25,4	0,64	1,27	105,96	0,1	PVC
J32-J31	3,85	12,7	0,17	1,34	292,76	0,1	PVC
J33-J31	6,38	12,7	0,15	1,17	223,88	0,1	PVC
J223-J21	1	12,7	0,23	1,78	497,99	0,1	PVC
J245-J21	11,02	12,7	0,11	0,84	120,58	0,1	PVC
J21-J2	1,65	12,7	0,33	2,61	1044,68	0,1	PVC
J11-J1	1,65	12,7	0,31	2,48	942,87	0,1	PVC
J1-J2	3,1	19,05	0,31	1,1	117,53	0,1	PVC
J12-J123	3,85	12,7	0,11	0,89	134,97	0,1	PVC
J13-J123	6,38	12,7	0,10	0,8	109,74	0,1	PVC
J123-J11	1	12,7	0,21	1,68	449,6	0,1	PVC
J14-J145	3,85	12,7	0,05	0,42	33,84	0,1	PVC
J15-J145	6,38	12,7	0,05	0,38	26,95	0,1	PVC
J145-J11	11,02	12,7	0,10	0,79	109,47	0,1	PVC
J24-J245	3,85	12,7	0,06	0,44	37,58	0,1	PVC
J25-J245	6,38	12,7	0,05	0,39	30,28	0,1	PVC
J22-J223	3,85	12,7	0,12	0,95	151,34	0,1	PVC
J23-J223	6,38	12,7	0,11	0,83	119,22	0,1	PVC
I-I3	2,25	25,4	0,96	1,9	227,42	0,1	PVC
I3-I31	2,5	12,7	0,32	2,51	965,41	0,1	PVC
I3-I2	3,1	25,4	0,64	1,27	105,96	0,1	PVC
I31-I32	4,05	12,7	0,17	1,34	292,76	0,1	PVC
I31-I33	5,4	12,7	0,15	1,17	223,88	0,1	PVC
I2-I21	2,5	12,7	0,33	2,61	1044,68	0,1	PVC
I21-I223	1	12,7	0,23	1,78	497,99	0,1	PVC
I21-I245	11,02	12,7	0,11	0,84	120,58	0,1	PVC
I223-I22	4,05	12,7	0,12	0,95	151,34	0,1	PVC
I223-I23	5,4	12,7	0,11	0,83	119,21	0,1	PVC
I245-I24	4,05	12,7	0,06	0,44	37,58	0,1	PVC
I245-I25	5,4	12,7	0,05	0,39	30,28	0,1	PVC
I2-I1	3,1	19,05	0,31	1,1	117,52	0,1	PVC
I1-I11	2,5	12,7	0,31	2,48	942,87	0,1	PVC
I123-I12	4,05	12,7	0,11	0,89	134,97	0,1	PVC
I123-I13	5,4	12,7	0,10	0,8	109,74	0,1	PVC
I11-I123	1	12,7	0,21	1,68	449,61	0,1	PVC
I11-I145	11,02	12,7	0,10	0,79	109,47	0,1	PVC
I145-I14	4,05	12,7	0,05	0,42	33,84	0,1	PVC
I145-I15	5,4	12,7	0,05	0,38	26,95	0,1	PVC
K-K3	2,25	25,4	0,62	1,22	97,84	0,1	PVC

K3-K31	2,5	12,7	0,31	2,45	925,69	0,1	PVC
K3-K2	3,1	25,4	0,31	0,61	26,55	0,1	PVC
K31-K32	4,05	12,7	0,17	1,31	279,57	0,1	PVC
K31-K33	5,4	12,7	0,14	1,14	216,11	0,1	PVC
K2-K21	2,5	12,7	0,31	2,43	905,53	0,1	PVC
K21-K22	4,05	12,7	0,16	1,29	272,84	0,1	PVC
K21-K23	5,4	12,7	0,14	1,13	212,2	0,1	PVC
K-M	8	50,8	2,35	1,16	36,39	0,1	PVC
I-K	8	50,8	2,97	1,46	56,74	0,1	PVC
L32-L31	3,85	12,7	0,17	1,31	279,57	0,1	PVC
L33-L31	6,38	12,7	0,14	1,14	216,11	0,1	PVC
L31-L3	1,65	12,7	0,31	2,45	925,69	0,1	PVC
L22-L21	3,85	12,7	0,16	1,29	272,84	0,1	PVC
L23-L21	6,38	12,7	0,14	1,13	212,2	0,1	PVC
L21-L2	1,65	12,7	0,31	2,43	905,53	0,1	PVC
L2-L3	3,1	25,4	0,31	0,61	26,55	0,1	PVC
L3-LV1	1,05	25,4	0,62	1,22	97,84	0,1	PVC
LV2-L	1,2	25,4	0,62	1,22	97,84	0,1	PVC
N-L	8	50,8	2,35	1,16	36,39	0,1	PVC
NV2-N	1,2	25,4	0,84	1,65	174,41	0,1	PVC
P-N	8	38,5	1,51	1,3	64,34	0,1	PVC
N31-N3	1,65	12,7	0,29	2,29	812,53	0,1	PVC
N3-NV1	1,05	25,4	0,84	1,65	174,42	0,1	PVC
N2-N3	3,1	25,4	0,55	1,08	77,78	0,1	PVC
N32-N31	3,85	12,7	0,15	1,21	241,91	0,1	PVC
N33-N31	6,38	12,7	0,14	1,08	194,02	0,1	PVC
N22-N21	3,85	12,7	0,15	1,17	224,09	0,1	PVC
N23-N21	6,38	12,7	0,13	1,04	182,1	0,1	PVC
N21-N2	1,65	12,7	0,28	2,21	756,09	0,1	PVC
N12-N11	3,85	12,7	0,14	1,12	207,25	0,1	PVC
N13-N11	6,38	12,7	0,13	0,99	166,4	0,1	PVC
N11-N1	1,65	12,7	0,27	2,11	693,88	0,1	PVC
N1-N2	3,1	19,05	0,27	0,94	87,16	0,1	PVC
M3-M2	3,1	25,4	0,55	1,08	77,78	0,1	PVC
M2-M1	3,1	19,05	0,27	0,94	87,16	0,1	PVC
M2-M21	2,5	12,7	0,28	2,21	756,09	0,1	PVC
M21-M22	4,05	12,7	0,15	1,17	224,09	0,1	PVC
M21-M23	5,4	12,7	0,13	1,04	182,1	0,1	PVC
M3-M31	2,5	12,7	0,29	2,29	812,53	0,1	PVC
M31-M33	5,4	12,7	0,14	1,08	194,02	0,1	PVC
M31-M32	4,05	12,7	0,15	1,21	241,91	0,1	PVC
M-M3	2,25	25,4	0,84	1,65	174,42	0,1	PVC
M1-M11	2,5	12,7	0,27	2,11	693,88	0,1	PVC
M11-M12	4,05	12,7	0,14	1,12	207,25	0,1	PVC
M11-M13	5,4	12,7	0,13	0,99	166,4	0,1	PVC
P31-P3	1,65	12,7	0,27	2,13	705,31	0,1	PVC
P3-PV1	1,05	25,4	0,78	1,54	151,38	0,1	PVC
P2-P3	3,1	25,4	0,51	1	67,6	0,1	PVC
PV2-P	1,2	25,4	0,78	1,54	151,37	0,1	PVC

R-P	8	31,75	0,73	0,93	43,66	0,1	PVC
RV2-R	1,2	25,4	0,73	1,45	135,51	0,1	PVC
R31-R3	1,65	12,7	0,25	2,01	631,43	0,1	PVC
R2-R3	3,1	25,4	0,48	0,95	60,58	0,1	PVC
R3-RV1	1,05	25,4	0,73	1,45	135,5	0,1	PVC
P11-P1	1,65	12,7	0,25	1,96	600,78	0,1	PVC
P1-P2	3,1	19,05	0,25	0,87	75,75	0,1	PVC
P22-P21	3,85	12,7	0,14	1,09	197,46	0,1	PVC
P23-P21	6,38	12,7	0,12	0,96	156,36	0,1	PVC
P21-P2	1,65	12,7	0,26	2,05	655,91	0,1	PVC
P32-P31	3,85	12,7	0,14	1,13	210,19	0,1	PVC
P33-P31	6,38	12,7	0,13	1	169,43	0,1	PVC
P12-P11	3,85	12,7	0,13	1,05	183,15	0,1	PVC
P13-P11	6,38	12,7	0,12	0,91	141,83	0,1	PVC
O-O3	2,25	25,4	0,78	1,54	151,38	0,1	PVC
O3-O31	2,5	12,7	0,27	2,13	705,31	0,1	PVC
O3-O2	3,1	25,4	0,51	1	67,6	0,1	PVC
O2-O21	2,5	12,7	0,26	2,05	655,91	0,1	PVC
O21-O23	5,4	12,7	0,12	0,96	156,36	0,1	PVC
O21-O22	4,05	12,7	0,14	1,09	197,46	0,1	PVC
O31-O32	4,05	12,7	0,14	1,13	210,19	0,1	PVC
O31-O33	5,4	12,7	0,13	1	169,43	0,1	PVC
O2-O1	3,1	19,05	0,25	0,87	75,74	0,1	PVC
O1-O11	2,5	12,7	0,25	1,96	600,79	0,1	PVC
O11-O12	4,05	12,7	0,13	1,05	183,15	0,1	PVC
O11-O13	5,4	12,7	0,12	0,91	141,83	0,1	PVC
O-Q	8	31,75	0,73	0,93	43,66	0,1	PVC
Q-Q3	2,25	25,4	0,73	1,45	135,51	0,1	PVC
Q3-Q31	2,5	12,7	0,25	2,01	631,43	0,1	PVC
Q3-Q2	3,1	25,4	0,48	0,95	60,58	0,1	PVC
Q31-Q32	4,05	12,7	0,14	1,07	191,12	0,1	PVC
Q31-Q33	5,4	12,7	0,12	0,94	149,91	0,1	PVC
Q2-Q21	2,5	12,7	0,25	1,94	587,49	0,1	PVC
Q2-Q1	3,1	19,05	0,23	0,82	67,82	0,1	PVC
Q21-Q22	4,05	12,7	0,13	1,04	179,74	0,1	PVC
Q21-Q23	5,4	12,7	0,11	0,9	138,3	0,1	PVC
Q1-Q11	2,5	12,7	0,23	1,85	536,23	0,1	PVC
Q11-Q13	5,4	12,7	0,11	0,86	126,69	0,1	PVC
Q11-Q12	4,05	12,7	0,13	0,99	164,25	0,1	PVC
R32-R31	3,85	12,7	0,14	1,07	191,12	0,1	PVC
R33-R31	6,38	12,7	0,12	0,94	149,91	0,1	PVC
R22-R21	3,85	12,7	0,13	1,04	179,74	0,1	PVC
R23-R21	6,38	12,7	0,11	0,9	138,3	0,1	PVC
R21-R2	1,65	12,7	0,25	1,94	587,49	0,1	PVC
R12-R11	3,85	12,7	0,13	0,99	164,25	0,1	PVC
R13-R11	6,38	12,7	0,11	0,86	126,69	0,1	PVC
R11-R1	1,65	12,7	0,23	1,85	536,23	0,1	PVC
R1-R2	3,1	19,05	0,23	0,82	67,82	0,1	PVC
10-11	11,8	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC

9-10	7	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
8-9	3,1	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC
B -8	81	76,2	7,78	1,71	45,5	0,1	PVC

Anexo 3.1.1 caudales de diseño de cada una de las habitaciones y de cada patinejo.

Patinejo	Habitación	Código	Caudal Diseño (l/s)
1	59	6319	0,18
	58	6318	0,15
	41	6223	0,12
	40	6222	0,09
	19	6120	0,12
	18	6119	0,09
	Total		0,74
2	57	6317	0,18
	56	6316	0,18
	39	6221	0,08
	38	6220	0,08
	17	6118	0,08
	16	6117	0,08
	Total		0,68
3	55	6315	0,17
	54	6314	0,15
	37	6219	0,16
	36	6218	0,14
	15	6116	0,19
	Total		0,81
4	51	6310	0,18
	50	6309	0,21
	31	6212	0,10
	30	6211	0,09
	29	6210	0,22
	28	6209	0,22
	10	6110	0,10
	9	6109	0,08
	8	6108	0,12
	7	6107	0,13
	Total		1,46

Patinejo	Habitación	Código	Caudal Diseño (l/s)
5	51	6310	0,18
	50	6309	0,15
	31	6212	0,20
	30	6211	0,20
	29	6210	0,10
	28	6209	0,10
	10	6110	0,11
	9	6109	0,12
	8	6108	0,08
	7	6107	0,10
	Total		1,34
6	49	6308	0,15
	48	6307	0,15
	27	6208	0,08
	26	6207	0,08
	Total		0,46
7	47	6306	0,14
	46	6305	0,14
	25	6206	0,10
	24	6205	0,10
	6	6106	0,12
	5	6105	0,10
	Total		0,69
	8	45	6304
44		6303	0,15
23		6204	0,08
22		6203	0,08
4		6104	0,08
3		6103	0,08
Total			0,62
9		43	6302
	42	6301	0,17
	21	6202	0,10
	20	6201	0,12
	2	6102	0,10
	1	6101	0,12
	Total		0,74

Anexo. 3.2. Características de las variables generales presentes en un CSAF a flujo variable.

Caudal de envío: El caudal de agua fría (AF) es de vital importancia para conocer cual es la masa de agua que se encarga de absorber todo el calor contenido en los locales a través de las unidades terminales. En el caso de los sistemas que tienen variadores de velocidad este caudal total se distribuye por toda la batería de fan-coil y el valor puntual del caudal depende fundamentalmente de las disímiles combinaciones que se logran al conectarse y desconectarse las válvulas de dos vías. Este variable también esta en función del valor de consigna de la presión el cual se prefija en el VV del sistema.

Presión de envío: Esta presión es una manifestación de la variación de la resistencia hidráulica de la red como consecuencia de la conexión y desconexión de las unidades terminales de los locales. Cuando el sistema trabaja a lazo cerrado las pequeñas variaciones con respecto al valor de consigna también depende de los parámetros del controlador del VV. No siempre la presión a lazo cerrado es la más racional. En caso del sistema estar trabajando a lazo abierto o frecuencia constante, esta presión se vuelve muy cambiante durante todo el día y esta en dependencia de la ocupación instantánea.

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

Temperatura de retorno: Esta variable depende fundamentalmente de intercambio térmico que haya tenido el fluido durante su paso a través de toda la red hidráulica. Esta temperatura no solo está influenciada por la convección forzada que ocurre en las unidades terminales sino que también esta influenciada por todos los procesos de transferencia de calor que ocurren a lo largo de la red hidráulica. A pesar que la red

hidráulica tiene aislamiento térmico siempre existe un flujo que atraviesa de forma unidireccional hacia el agua y en este proceso esta implícito la transferencia de calor por radiación y convección en lo fundamental.

Presión de retorno: La presión de retorno es una manifestación del equilibrio hidráulico de la red, además expresa la energía que ha perdido el fluido desde su impulsión hasta el punto donde culmina la red

Frecuencia del VV: Como se conoce los VV varían la frecuencia y la tensión para entregar una potencia acorde con el mecanismo al que están instalado. En este caso la frecuencia tiene una relación lineal con el caudal y a su vez es la variable manipulada, tomando como referencia la presión de envío.

Temperatura ambiente: Esta variable es considerada por varios autores como lo principal perturbación en los sistema de climatización. A medida que se conozca mejor su comportamiento en el lugar específico que se encuentra la instalación, se podrá determinar con mayor precisión su influencia.

Anexo 3.3 Curva nominal de la bomba.

SIHI^{SuperNova} 032200B			Nennrehzahl / nominal speed 3500 min⁻¹							
Baureihe / series	ZLND	ZLKF	ZTND	ZTKD						

