



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

Dr. Antonio Núñez Jiménez

FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA.

**TRABAJO DE DIPLOMA**

**En opción al Título de Ingeniero Mecánico**

**EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LAS REDES  
HIDRÁULICAS PARA LA CLIMATIZACIÓN  
CENTRALIZADA A FLUJO VARIABLE.**

Autor: Pedro Cruz Del Pozo

Tutores: Dr.C. Reineris Montero Laurencio.

Ms.C Rodney Martínez Rojas

“Año 57 del Triunfo De la Revolución”

Moa, 2015

## Declaración de autoridad

---

Pedro Cruz Del Pozo, autor de este trabajo de diploma titulado: “Evaluación energética de las redes hidráulicas para la 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.

\_\_\_\_\_  
Autor:

Pedro Cruz Del Pozo

\_\_\_\_\_  
Tutor:

Dr.C Reineris Montero Laurencio.

\_\_\_\_\_  
Tutor:

M.s.C Rodney Martínez Rojas.

Diplomante: Pedro Cruz del Pozo

*PENSAMIENTO*

---

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

*Albert Einsten*

## *DEDICATORIA*

---

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

*A mis padres: Matilde y Pedro que tanto me han apoyado siempre,*

*A mis hermanos Yordania, Osyuli, Yuri, Serguei.*

*A mi familia, y en especial a Mariela.*

*A mis amigos de forma general.*

*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 a flujo variable. Esta climatización se realiza mediante los circuitos secundarios de agua fría. Para ello se hace uso de la aplicación informática Ocupahotel. El análisis permite determinar el caudal de diseño de 6,36 l/s, valor obtenido a partir de las cargas térmicas máximas existente en el ramal 6, compuesta por los espacios térmicos de las habitaciones 6319, 6318, 6223, 6222, 6120 y 6119. Estos valores nos permiten obtener la curva y modelo de pérdida de carga para los fancoil existente en el sistema, recomendados a implementar en la aplicación informática.

Se realiza un análisis a través de dicha aplicación del sistema de bombeo del ramal 6, mediante la variación de las velocidades de la bomba en un rango entre 3490 a 2345 rev/min, valor máximo de velocidad de la bomba y mínimo que garantice las presiones necesarias para extraer el calor de los espacios térmicos del ramal respectivamente que garantice una variación de los caudales en el sistema. Se obtiene el punto de trabajo adecuado para garantizar el caudal de diseño en ramal para una velocidad relativa de la bomba de 2979 rev/min.

Y la valoración técnico económica demuestra que existe un ahorro de 61.9 CUC/mes entre la instalación trabajando a capacidad máxima de velocidad y el punto de trabajo a velocidad adecuada.

## *Abstract*

---

Presently work is carried out a description of the precedent works and the theoretical elements related with the analysis and the modelación of the hydraulic nets are approached used in the air conditioning centralized to variable flow. This air conditioning is carried out by means of the secondary circuits of cold water. For it is made it spindle of the Ocupahotel computer application. The analysis allows to determine the flow of design of 6,36 l/s, obtained value starting from the existent maximum thermal loads in the brunch 6, composed by the thermal spaces of the rooms 6319, 6318, 6223, 6222, 6120 and 6119. These securities allow us to obtain the curve and loss of charge model for the existent fancoil in the system, recommended to implement in the computer application.

Is carried out an analysis through this application of the system of pumping of the brunch 6, by means of the variation of the speeds of the bomb in a range among 3490 to 2345 rev/min, maximum value of speed of the bomb and minimum that it guarantees the necessary pressures to extract the heat of the thermal spaces of the brunch respectively that it guarantees a variation of the flows in the system. The appropriate working point is obtained to guarantee the design flow in brunch for a relative speed of the bomb of 2979 rev/min.

And the economic valuation technician demonstrates that a saving of 61.9 CUC/mes exists among the installation working to maximum capacity of speed and the working point to appropriate speed.

<b>Contenido</b>		<b>Págs.</b>
	<b>Introducción</b>	01
<b>Capítulo I</b>	<b>Marco teórico</b>	05
1.1	Introducción	05
1.2	Trabajo precedentes	05
1.3	Caracterización de los sistemas de climatización centralizados por agua helada.	11
1.4	Aspectos generales de las redes hidráulicas para la climatización centralizada.	12
1.5	Componentes de las redes hidráulicas para climatización centralizada.	12
1.5.1.	Equilibrado hidráulico de las redes para climatización a flujo variable.	13
1.5.1.1.	Métodos de equilibrado hidráulico	16
1.6.	Método de cálculo de las redes cerradas.	17
1.6.1	Método del Gradiente	18
1.7.	Fundamentos teóricos generales para la modelación hidráulica.	19
1.8.	Aspectos energéticos vinculados a la operación de las redes hidráulicas para la climatización centralizada.	20
1.9.	Aplicaciones informáticas para el cálculo de redes hidráulicas de climatización.	21
<b>Capítulo II</b>	<b>Materiales y métodos</b>	25
2.1	Introducción	25
2.2.	Cálculo de redes hidráulicas.	25
2.2.1	Descripción matemática método del Gradiente	30
2.2.2.	Implementación del método en una aplicación informática.	31
2.3.	Descripción general de la aplicación a utilizar.	32
2.4.	Modelación matemática de la red hidráulica para el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el bombeo	34
2.5.	Conclusiones parciales del capítulo	38
<b>Capítulo III</b>	<b>Análisis de los resultados.</b>	40

Instituto Superior Minero Metalúrgico		Indice
3.1	Introducción	40
3.2	Aplicación informática Ocupahotel para la modelación hidráulica	40
3.3	Particularidades de la red hidráulica del circuitos secundarios de agua fría (CSAF)	41
3.3.1.	Las condiciones generales para el análisis de los circuitos secundario de agua fría (CSAF)	42
3.4.	Simulación hidráulica de un ramal del CSAF.	42
3.5.	Análisis de los resultados del sistema a caudal variable	46
3.6.	Evaluación técnico económica	49
3.7.	Conclusiones parciales del capitulo	50
	<b>Conclusiones</b>	51
	<b>Recomendaciones</b>	52
	<b>Bibliografía</b>	53
	<b>anexos</b>	-

## **Introducción**

Las redes de distribución de agua tienen diversas aplicaciones, entre ellas se destacan las redes que se utilizan para brindar el suministro a la población y a las diferentes instituciones que forman parte de la sociedad. También existen instalaciones especiales como las redes hidráulicas que se utilizan en los sistemas de climatización centralizados todo agua o agua helada (SCCAH) según se reconoce en la literatura.

Por su parte las empresas de diseño y las empresas que explotan las redes hidráulicas cuentan con determinadas herramientas para evaluar el trabajo de las mismas, sin embargo los análisis se basan mayoritariamente en las condiciones de máxima demanda. Esta insuficiencia hace pensar en utilizar aplicaciones que permitan evaluar el desempeño de las redes ante cambios topológicos en función de garantizar la seccionalización de los servicios. Esta seccionalización de los servicios se experimenta recientemente, debido que los recursos acuíferos de los distintos países van en detrimento.

Existe una diversidad de redes hidráulicas clasificadas en redes abiertas, redes cerradas y redes mixtas que brindan servicio a diferentes usuarios finales. Sin embargo ha proliferado el uso de las redes cerradas y mixtas con las cuales aumenta la cantidad de cálculos a realizar para decidir cómo explotarlas mejor ante diferentes objetivos del servicio. Para este propósito se utilizan métodos como el del gradiente que resuelve el tema de la convergencia mucho más rápido hacia los resultados finales de cálculo.

Un ejemplo práctico del cambio de topología de las redes hidráulicas lo constituye el uso de las redes empleadas en los Sistemas de Climatización Centralizada por Agua Helada (SCCAH) a flujo variable en donde la ocupación de hoteles tiene una incidencia marcada en la operación. En estas redes se hace difícil su evaluación energética debido a su dinámica operacional. La distribución del agua en los SCCAH se puede realizar a flujo constante o flujo variable a través de los denominados

circuitos secundarios de agua fría (CSAF). Existen más de 50 hoteles en Cuba con diferentes tiempos de explotación, en los que la climatización centralizada se realiza a flujo constante y en donde las tuberías poseen diferentes propiedades. El caso de estudio que se analizará en el presente trabajo está relacionado con el flujo variable, en donde la red mallada cerrada cambia su configuración topológica de acuerdo a las habitaciones en servicio.

Desde el punto de vista energético, 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 porcentaje de las cargas con la consecuente disminución de los gastos operacionales. Sin embargo el estudio de las redes hidráulicas de la climatización requiere de estudios más profundos que permitan dotar a los explotadores de los sistemas de climatización con una herramienta para el análisis y toma de decisiones durante la operación de las mismas.

A partir de los comentarios anteriores se declara como **problema** de la investigación el insuficiente conocimiento del comportamiento energético de las redes hidráulicas para la climatización centralizada a flujo variable.

#### **Objetivo general:**

Evaluar las potencialidades energéticas del cambio del flujo constante a flujo variable en los sistemas de climatización centralizado por agua helada considerando fundamentalmente la topología y las propiedades de las redes hidráulicas así como las características del fluido.

#### **Objetivos específicos**

- Describir las características generales de este tipo de redes hidráulicas para la climatización y el método del gradiente utilizado para su solución.
- Demostrar mediante un caso de estudio las potencialidades energéticas del cambio de flujo constante a flujo variable de los circuitos secundarios de agua fría de la climatización centralizada, en referencia a los cambios de topología de las redes y las características del fluido.

**Objeto de estudio**

Redes hidráulicas para la climatización centralizada.

**Campo de acción**

Eficiencia energética en la operación de las redes hidráulicas para la climatización centralizada

**Hipótesis**

Si se demuestra las potencialidades energéticas del cambio del flujo constante a flujo variable en los sistemas de climatización centralizado por agua helada se pueden tomar decisiones de operación y de diseño que favorezcan la explotación de estos sistemas.

**Métodos de Investigación:**

- Método de investigación documental y bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- Método de investigación experimental para describir y caracterizar el objeto de estudio así como sus principales regularidades.
- Método de investigación estadístico y de evaluación computacional de diferentes estados del sistema.

**Tareas de la Investigación**

- Análisis bibliográfico y conformación del marco teórico conceptual.
- Adaptación de la aplicación informática para el cálculo y análisis de las redes de topología variable para diferentes situaciones de operación.
- Selección del caso de estudio que mejor demuestren las potencialidades de análisis del tema de investigación.
- Evaluación del comportamiento energético de la operación de la red hidráulica seleccionada.
- Demostración del efecto en el comportamiento de la operación de las redes hidráulicas ante los cambios topológicos y la variación de las demás características de los componentes del sistema

## **CAPITULO I MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACION**

### **1.1. Introducción:**

Mediante un análisis bibliográfico este capítulo se refiere a diferentes aspectos relacionados con la explotación de redes hidráulicas para el caso específico de la climatización. Se abordan los aspectos teóricos de la aplicación del método del gradiente de las redes en malla. Se hace referencia a algunas características de las tuberías más difundidas en esta aplicación específica. Se destacan además los aspectos de naturaleza térmica inherente a estas redes, así como las particularidades del empleo de variadores de velocidad y caudal variable en las mismas.

### **1.2. 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

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 C0 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 energética 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 Uribaz 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 Forward 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 de los consumidores energéticos teniendo en cuenta las principales variables que inciden en la operación de la red hidráulica.

### **1.3. Caracterización de los sistemas de climatización centralizados por agua helada.**

La ocupación de hoteles tiene una incidencia marcada en la operación de las redes hidráulicas encargadas de distribuir el agua de los sistemas de climatización centralizados por agua helada (SCCAH). Esta distribución se realiza a flujo constante o flujo variable a través de los denominados circuitos secundarios de agua fría (CSAF). El caso que se analizará en el presente trabajo está relacionado con el flujo variable, en donde la red mallada cerrada cambia su configuración topológica de acuerdo a las habitaciones en servicio.

### 1.4. Aspectos generales de las redes hidráulicas para la climatización centralizada.

El empleo de los SCCAH posee una infraestructura hidráulica con requerimientos térmicos de aislamiento que garantizan el transporte eficiente del agua fría. El desempeño de las bombas centrífugas, las unidades terminales y el uso de las zonas a climatizar, convierten a esta tecnología en un sistema operacionalmente complejo. La configuración más utilizada es mediante enfriadoras trabajando en paralelo. Los condensadores de estos sistemas pueden ser enfriados por aire o por agua. En el caso del intercambiador gas-agua permite la recuperación de calor, el cual es incorporado al circuito primario de agua caliente (CPAC), como fuente de calor para el ACS. En la Figura 1 de Anexo 2 se aprecia una imagen de un SCCAH típico.

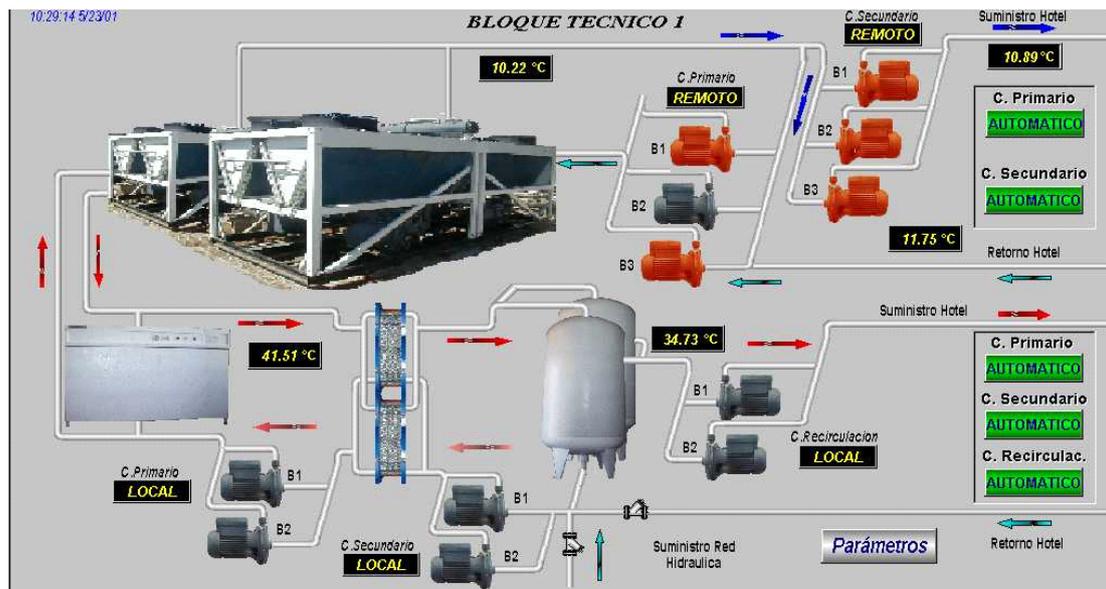


Figura 1.1. Sistema de Climatización Centralizado Todo-Agua

### 1.5. Componentes de las redes hidráulicas para climatización centralizada.

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.

#### **1.5.1. 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.



Figura1. 2. 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 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 3. 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.

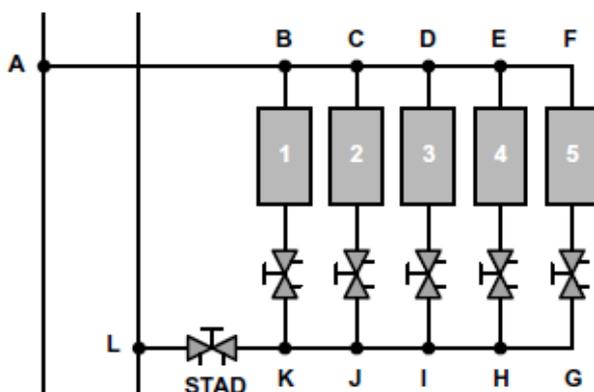


Figura 1.3. Módulo de equilibrado formado por un ramal con varios terminales.

#### 1.5.1.1. Métodos de equilibrado hidráulico

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 estas figuras se muestran las especificaciones de válvulas de equilibrado.





Figura 1.4. Válvula de control caracterizada (CCV) con control del caudal mediante sensor o control de la potencia, función de monitorización de la energía y la potencia, 2 vías, rosca interna.

### **1.6. Método de cálculo de las redes cerradas.**

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. Explicar los métodos del libro un pedacito de cada uno.

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.

### **1.6.1. 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.

Permite expresar la topología de la red, las pérdidas de carga y la continuidad de caudales, en términos de ecuaciones matriciales.

Emplea un modelo real de redes, al incorporar el concepto de las matrices de conectividad.

No es necesario estimar una solución inicial cercana al valor real.

Se ingresa una cantidad mínima de datos relativos a los nodos y tramos de la red, y no ecuaciones explícitas.

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.

Permite implementar matrices huecas en la solución de sistemas de ecuaciones simultáneas, las que hacen el cálculo extremadamente rápido y seguro.

### **1.7. Fundamentos teóricos generales para la modelación hidráulica.**

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 macro modelos; 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).

### **1.8. Aspectos energéticos vinculados a la operación de las redes hidráulicas para la climatización centralizada.**

En las unidades terminales se define la eficiencia del retiro de calor de las habitaciones, para lo cual el agua debe ser transportada a grandes distancias. El agua, por su alto calor específico, puede 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 este fluido es mucho menor que el costo que tiene mover aire.

A pesar de que los sistemas de agua son más racionales, aún 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.

Debido al flujo variable en el CSAF, la presión mínima necesaria debe mantenerse para evitar ruido en el sistema y mejorar la eficiencia. Un valor de consigna mínimo, genera el mínimo gasto energético. El punto de consumo mínimo es de 25 % de la presión de diseño y el ahorro energético es de alrededor de 33 %, aunque hay autores que refieren entre 12- 32 %.

En la Figura 5. se muestra como en la década de 1980 las bombas representaban el 18 % del consumo de electricidad de la climatización, pero ya en la década del 2000, por las mejoras implementadas en las enfriadoras, el porcentaje de las bombas se incrementó al 26 %, de aquí la importancia del estudio de los CSAF.

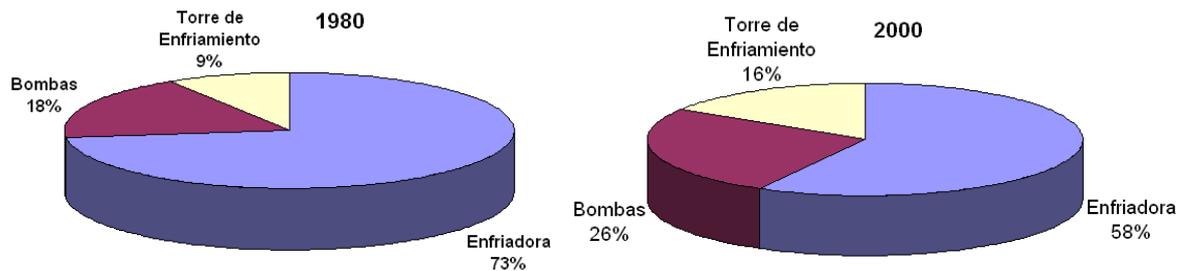


Figura 1.5. Estructura del consumo de energía eléctrica en los SCCAH.

De forma general, la eficiencia de los SCCAH se evalúa en términos de la menor cantidad de kW por toneladas de refrigerante en el caso de las enfriadoras y en términos de la mayor extracción de calor con el menor consumo de energía en el CSAF. Para mejorar estos dos aspectos, se necesita del uso de tecnologías competentes y su integración sistémica.

### 1.9. Aplicaciones informáticas para el cálculo de redes hidráulicas de climatización.

La mayoría de los métodos de solución 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 iteración la resolución secuencial de cada una de las ecuaciones (al emplear fundamentalmente el Método de Cross y sus derivados); y los segundos, 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.

Actualmente se destaca el Método del Gradiente, el cual implementa un modelo para la resolución de sistemas de tuberías a presión. El modelo está representado por un

sistema de ecuaciones lineales expresadas en forma matricial y 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 [78]. Este es un aspecto importante durante los procedimientos de optimización. Algunas ventajas del método radican en que: asegura solución única al no tener problemas de convergencia; permite expresar la topología de la red, las pérdidas de carga y la continuidad de caudales en términos de ecuaciones matriciales; emplea un modelo real de redes y no es necesario estimar una solución inicial cercana al valor real.

### Modelo de Simulación Hidráulica

El modelo hidráulico utilizado por EPANET consiste en un simulador en período extendido que resuelve el siguiente sistema de ecuaciones para cada nudo de almacenamiento  $s$  (depósito o embalse) del sistema:

$$\partial y_s / \partial t = q_s / A_s \quad (1.1)$$

$$Q_s = \sum_i q_{is} - \sum_j q_{sj} \quad (1.2)$$

$$h_s = E_s + y_s \quad (1.3)$$

Junto con las siguientes ecuaciones para cada línea  $i, j$  (entre las nudos  $i$  y  $j$ ) y cada nudo  $k$ :

$$h_i - h_j = f(q_{ij}) \quad (1.4)$$

$$\sum_i q_{ik} - \sum_j q_{kj} - Q_k = 0 \quad (1.5)$$

Donde las variables a determinar son:

$y_s$  = altura de lámina de agua en el nudo  $s$ , en ft.

$q_s$  = caudal entrante en el nudo de almacenamiento  $s$ , en cfs.

$q_{ij}$  = caudal de la línea que conecta los nudos  $i$  y  $j$ , en cfs.

$h_i$  = altura piezométrica en el nudo  $i$  ( suma de la cota más la altura de presión )  
, en ft.

Mientras que se consideran como datos conocidos:

$A_s$  = Sección transversal del nudo de almacenamiento  $s$  (en los embalses se considera infinita), en  $\text{ft}^2$ .

$E_s$  = Cota del nudo  $s$ , en  $\text{ft}$  (cota de solera si es un depósito).

$Q_k$  = Caudal consumido (+) o suministrado (-) en el nudo  $k$  en  $\text{cfs}$ .

$f(\bullet)$  = Relación funcional entre la pérdida de carga y el caudal en la línea.

La ecuación (1.1) expresa el balance de volúmenes en los nudos de almacenamiento, mientras que las ecuaciones (1.2) y (1.5) expresan lo propio para los nudos de conexión de las tuberías. La ecuación (9) representa la pérdida o ganancia de energía por el paso de caudal por la línea. Dados los niveles iniciales  $y_s$  en los nudos de almacenamiento, las ecuaciones (1.4) y (1.5) son resultas simultáneamente en los caudales  $q_{ij}$  y las alturas  $h_y$  utilizando la ecuación (1.3) como condición de contorno. Esta fase de cálculo es conocida como “equilibrado hidráulico de la red”, y es llevada a cabo utilizando una técnica iterativa para resolver el sistema de ecuaciones no lineales que aparece.

El método utilizado por EPANET para resolver el sistema de ecuaciones se conoce como “algoritmo del gradiente”<sup>1</sup> y posee varias características interesantes. Primeramente, el sistema lineal de ecuaciones a resolver en cada iteración del algoritmo es vacío, simétrico y definido-positivo. Ello permite utilizar técnicas de matrices vacías muy eficientes para su resolución.<sup>2</sup> En segundo lugar el método permite asegurar la continuidad en todos los nudos tras la primera iteración. En tercer lugar, permite considerar las bombas y válvulas sin perturbar la estructura de la matriz de ecuaciones cuando se modifica el estado de estos componentes.

Una vez obtenida la solución de las ecuaciones de la red, el caudal entrante (o saliente) de cada nudo de almacenamiento  $q_s$ , se determina mediante la ecuación (1.2) y a continuación es introducido en la ecuación (1.1) para determinar el nuevo

nivel después de un intervalo de tiempo  $dt$ . Este proceso es repetido para los intervalos sucesivos hasta completar el período de simulación.

El intervalo de tiempo utilizado normalmente por EPANET es de 1 hora, pero puede acortarse si se requiere mayor precisión. Pueden darse intervalos de

Cálculo inferiores a los establecidos cuando en un instante intermedio del cálculo se activa la condición de control de una tubería o bomba ( por ejemplo, la parada de una bomba por llenado de un depósito ) o se produce el llenado o vaciado de un depósito ( provocando el cierre de la tubería de entrada o de salida ).

### **1.10. Conclusiones**

- El sector del turismo se establece como un importante potencial económico en el desarrollo del país y con posibilidades reales de disminución de los costos de operaciones mediante un uso más racional de energía, a través de procedimientos que permitan una mejor explotación de los sistemas sin deteriorar la calidad de los servicios.
- Los sistemas de climatización de las instalaciones turísticas son los mayores consumidores de energía en estas instalaciones y son objeto de los estudios energéticos. En los SCCAH, y en particular en los CSAF, se presentan importantes potencialidades para mejorar la eficiencia energética en los hoteles que usan esta tecnología.
- Es necesario conformar un procedimiento mediante un enfoque sistémico para la optimización energética de la operación de los SCCAH, basado en una función objetivo que integre: los modelos de la red hidráulica, del ciclo de compresión mecánica del vapor y el modelo térmico del edificio, en los que intervienen cada estado del sistema, ineludiblemente relacionados con la ocupación, el clima y las características de las edificaciones.
- Se hace necesario el desarrollo de aplicaciones informáticas que favorezcan los procesos de toma de decisiones en la explotación hotelera, con énfasis en aquellas actividades que permitan un mejor desempeño energético del equipamiento tecnológico.

## Capítulo 2. Materiales y Métodos.

### 2.1. Introducción

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.

### 2.2. Cálculo de redes hidráulicas.

$$H_b - h_p = \left( z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \right) - \left( z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad (2.1)$$

En esta investigación, la operación eficiente de los SCCAH se formula a partir de una estrategia de ocupación de los locales. Esta estrategia es en principio una tarea de optimización combinatoria ya que cada ocupación (de un conjunto finito de ocupaciones posibles) debe evaluarse en la función objetivo para determinar cuál de ellas la minimiza. Si no es excesiva la magnitud del total de combinaciones, entonces se aplican Algoritmos de Búsqueda Exhaustiva; en caso contrario deberá aplicarse otro método. 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 y que contienen el principio de conservación de la energía se denomina ecuación de Bernoulli. La ecuación de *Bernoulli* puede expresarse en su forma más general como (Ravinovich, 1986; Nekrasov, 1990; Kutz, 1995; Aguirre et al., 1996a; Streeter et al., 2000; (Martínez et al., 2007).

Energía de presión,  $p/\gamma$ , 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 irre recuperable.

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).

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (2.2)$$

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 ( $m/s^2$ ).

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; Kutz, 1995; Streeter et al., 2000; Martínez et al., 2007).

$$h_l = k \frac{v^2}{2g} \quad (2.3)$$









Para este modelo, la aplicación presenta cuatro ventanas fundamentales con las cuales se logra: la identificación de los nodos y tramos; la elaboración de la matriz de conectividad de los nodos, definiéndose la topología de la red; la introducción de los datos de los tramos y nodos (incluye las pérdidas locales de las unidades terminales, las válvulas de equilibrio, la presión en los nodos conocidos, y el caudal de suministro); y la obtención de la presión del sistema a partir de la solución del algoritmo para determinar la velocidad de rotación mínima de la bomba.

Para lograr operatividad, es posible actualizar en cualquier momento los datos de todas las tablas que contienen información de la red. Es necesario definir también: el paso para la búsqueda de la velocidad de rotación de la bomba a partir de las velocidades mínima (valor que asegura la potencia mínima requerida en la bomba y que evita la saturación en el motor) y máxima iniciales; la cota del error para el cumplimiento de la presión en el nodo del punto crítico y en los nodos de las unidades terminal en comparación con el menor valor positivo posible; la cota de error para el cumplimiento de los caudales en los tramos; la viscosidad cinemática (según la temperatura promedio del agua); y el tamaño de la rugosidad de las tuberías.

Para identificar los tramos en los que se desean determinados caudales, en correspondencia con los requerimientos térmicos (especialmente en las unidades terminales), se marcan con el identificador X para que el programa identifique estas referencias. Se obtienen los coeficientes de la ecuación de la bomba a partir de la introducción de los datos nominales u otros datos en correspondencia con una respuesta de la red. Una vez reproducida la red hidráulica del caso de estudio con la aplicación CAD, se tomaron los datos necesarios para integrarlos en la aplicación "OcupaHotel MTH". Para programar y validar el Método del Gradiente en esta aplicación, se ensamblaron las ecuaciones descritas en la literatura.

### **2.3. Descripción general de la aplicación a utilizar.**

La modelación matemática de las redes hidráulicas permite tomar decisiones de diseño y operación de las mismas en cuanto al uso racional de la energía eléctrica y

la disminución de las pérdidas de carga. En este trabajo se presentan las generalidades de tres aplicaciones, mostrando los resultados a través de un mismo ejemplo, correspondiente a una red hidráulica mallada empleada en la climatización centralizada a flujo variable. Todas las aplicaciones utilizan el método del gradiente. La primera variante consiste en una aplicación CAD con múltiples bondades sobre todo desde el punto de vista gráfico. Se toman los datos validados de la red de la aplicación CAD para insertarlos en otra aplicación informática desarrollada en Delphi y de manera similar se realiza la modelación hidráulica. En la aplicación Delphi, se desarrolló un algoritmo que genera los códigos variables que facilitan la automatización del cambio de la topología de la red. De esta forma se pueden evaluar los efectos cambiantes de la topología en la potencia eléctrica requerida por la bomba. También se incorporó un algoritmo para determinar la velocidad de rotación más racional y una optimización combinatoria.

Una vez reproducida la red hidráulica del caso de estudio con la aplicación CAD, se tomaron los datos necesarios para integrarlos en la aplicación “OcupaHotel MTH” desarrollada en Delphi (ver Figura 2.1).

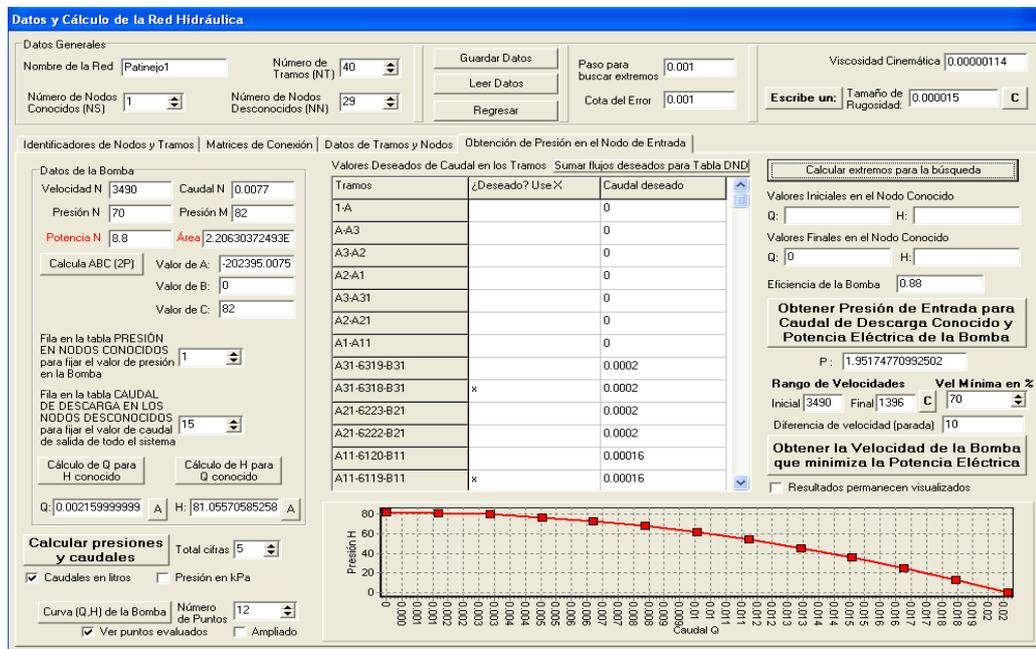


Figura 2.1. Ventana para los calculos hidráulicos de la aplicación **OcupaHotel MTH**.

La modelación hidráulica incluida en OcupaHotel MTH tiene como objetivo principal el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el bombeo. Para esta modelación, la aplicación presenta cuatro ventanas fundamentales (ver anexo #1 ) con las cuales se logra: la identificación de los nodos y tramos; la elaboración de la matriz de conectividad de los nodos, definiéndose la topología de la red; la introducción de los datos de los tramos y nodos (incluye las pérdidas locales de las unidades terminales, las válvulas de equilibrio, la presión en los nodos conocidos, y el caudal de suministro); y la obtención de la presión del sistema a partir de la solución del algoritmo de optimización de la velocidad que se presenta en la Figura 9.

#### **2.4. Modelación matemática de la red hidráulica para el cálculo de la potencia eléctrica requerida para el bombeo**

La modelación hidráulica facilita la determinación de la presión mínima que requiere el sistema y el caudal correspondiente para cumplir con los requisitos de las unidades terminales. Uno de los procesos que garantiza físicamente estos caudales es el equilibrado de la red hidráulica. La modelación permite verificar si se cumplen los requisitos del sistema sin la necesidad de repetidos experimentos invasivos, los cuales son muy difíciles y costosos de realizar en la práctica. A continuación se exponen los pasos de la modelación hidráulica de los CSAF:

1. Caracterización del agua mediante sus propiedades físicas adaptadas al proceso.
2. Obtener los datos de la red de distribución y sistematizar su configuración.
3. Modelación matemática de la bomba.
4. Modelación matemática de las pérdidas de las unidades terminales de cada local.
5. Sistematización de las características de los componentes para el equilibrado hidráulico.
6. Trazado espacial de la red de distribución y sus componentes.

7. Asignación de los caudales necesarios a cada unidad terminal para extraer el calor.
8. Obtener el modelo matemático de la red hidráulica que responda favorablemente a los cambios operacionales posibles del CSAF, definiendo los valores de caudal y presión para el cálculo de la potencia eléctrica requerida por la bomba.

Los SCCAH envían el agua del evaporador hacia la succión de las bombas del CSAF, a la temperatura prefijada en la consigna de la enfriadora. El valor sugerido por los fabricantes y las firmas especializadas es de  $7 \pm 0,3$  °C. No obstante, la configuración general de los sistemas en los que se emplean los 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. En la tabla del anexo #1 se pueden observar las propiedades termo-físicas del agua.

La configuración de la red hidráulica para un CSAF a flujo variable está caracterizada por ser una red mallada, con sistema de tuberías de retorno directo. La tendencia actual es utilizar tuberías de PVC garantizando menores pérdidas de carga.

Por su parte el accionamiento electromecánico está compuesto por el convertidor eléctrico, motor y transmisión mecánica acoplada a la máquina receptora (Escanaverino, 2007). En los CSAF estos elementos se traducen en: variador de velocidad, motor asincrónico de inducción, y un acoplamiento directo con una bomba centrífuga. La carga está constituida por una compleja red hidráulica, con tuberías, accesorios, válvulas para el equilibrado y unidades terminales.

En el caso del motor, recibe la potencia eléctrica modulada en tensión y frecuencia por un VV, entregando a su vez una potencia mecánica de rotación a la bomba centrífuga. El procedimiento determina la potencia eléctrica necesaria en el bombeo para cada variante de ocupación, consecuencia de evaluar en la expresión 2.14 (Nekrasov, 1990), el caudal total y la altura requerida por el sistema hidráulico para garantizar el confort en cada variante de ocupación.

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{1000 \cdot \eta_b}, \text{ kW.} \quad (2.14)$$

En la expresión anterior:  $\rho$  es la densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ );  $g$  aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ );

$H$  es la altura de carga requerida en el CSAF (m),  $Q$  el caudal de agua requerido en el CSAF ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\eta_b$  y  $\eta_m$  los rendimientos de la bomba y del motor respectivamente (adimensional). Ahora, mediante las leyes de proporcionalidad se puede determinar la velocidad de rotación requerida en la bomba centrífuga.

Los fabricantes de unidades terminales brindan en sus catálogos la relación entre el flujo de agua y las pérdidas de carga entre otras características (ver Anexo 2). La modelación de la red hidráulica se realiza a partir de los caudales que requieren las unidades terminales utilizadas.

En esta investigación, para el cálculo hidráulico se seleccionó el Método del Gradiente en base a sus bondades algorítmicas y asumiendo: la correcta utilización de las dimensiones de la red vistas a través de sus tramos, las alturas de los nodos, el correcto ensamblaje de las matrices que definen la topología de la red, la utilización precisa del modelo de la bomba y considerando, además, que en el nodo de retorno (donde concluye la red y coincide con la posición donde se encuentra la válvula de compensación) se tiene un caudal equivalente a la suma de los caudales necesarios en cada unidad terminal en uso.

La circulación del caudal está relacionada con la energía que el accionamiento electromecánico de la bomba le entregue al fluido. Para controlar este accionamiento, al VV se le asigna un valor de consigna de la presión a mantener en cierta zona del CSAF, que inicialmente corresponde al valor sugerido durante el diseño (en función de los flujos esperados en cada habitación del hotel), y este valor de consigna puede ser ajustado en cualquier momento. El valor de la presión se garantiza con el correspondiente valor de la velocidad del accionamiento. A partir de las variables y las interrelaciones que se establecen en el algoritmo de la Figura 2.2, se puede encontrar para una ocupación dada, la velocidad mínima de la bomba que

garantice que los caudales sean suficientes para que el CSAF funcione adecuadamente.

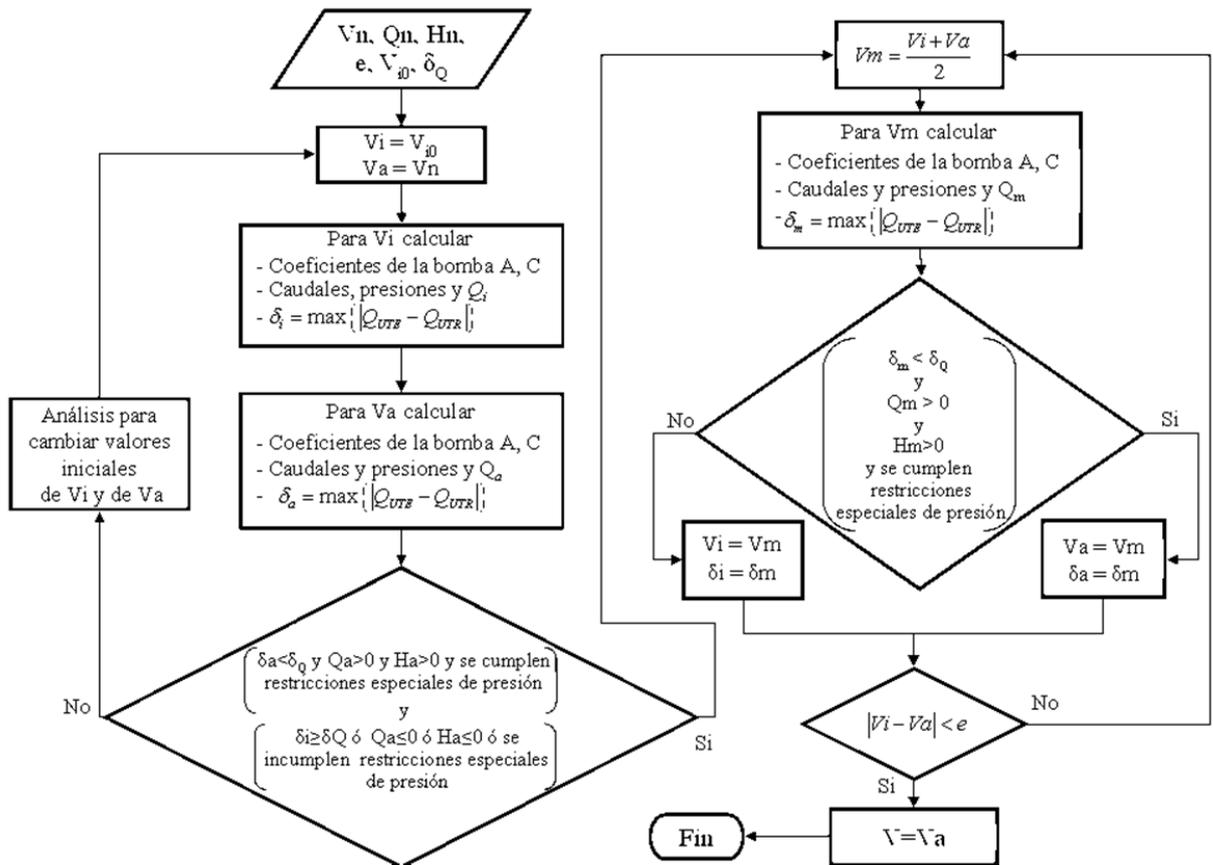


Figura 2.2. Algoritmo para determinar la velocidad de operación de la bomba del CSAF.

Conocidos para la bomba:  $V_n$  (velocidad de rotación nominal);  $Q_n$  (caudal nominal); y  $H_n$  (altura de carga nominal). Sean, además, las variables:  $V_i$  (velocidad de rotación mínima;  $V_{i0}$  es la velocidad de rotación mínima inicial que en este caso se toma positivo y se corresponde con la menor potencia permisible en el motor para evitar su saturación);  $V_a$  (velocidad de rotación máxima;  $V_{a0}$  es la velocidad de rotación máxima inicial que en este caso se toma igual a  $V_n$ );  $e$  (condición de parada del algoritmo, positiva y cercana a cero);  $Q_a$  y  $Q_i$  (valores mínimos de los caudales

calculados respectivamente para  $V_a$  y  $V_i$ );  $H_a$  y  $H_i$  (valores mínimos de las presiones calculadas respectivamente para  $V_a$  y  $V_i$ );  $\delta Q$  (cota para el módulo de la diferencia máxima entre los caudales requeridos y calculados en las unidades terminales); QUTE (caudal requerido en una unidad terminal); y QUTR (caudal real en una unidad terminal). Además se considera la ecuación que relaciona caudal y presión de la bomba  $H = -A \cdot Q^2 + C$  donde sus coeficientes  $A$  y  $C$  son funciones de la velocidad de rotación de la bomba. También se tienen restricciones especiales con respecto a la presión mínima en las unidades terminales y en el nodo crítico (donde el fluido vence la altura geométrica máxima en su retorno).

Puesto que, para cada ocupación particular del hotel, el sistema hidráulico adquiere una determinada topología, una tendencia actual consiste en calcular en cada caso un nuevo valor de consigna de la presión. Entonces resulta esencial encontrar para cada ocupación una velocidad tal, que garantizando los flujos necesarios para cada ocupación, se minimice la potencia eléctrica. Al minimizar la velocidad, también se minimiza el consumo energético por bombeo.

## 2.5. Conclusiones

- El procedimiento que se presenta como estrategia de modelado, integra la modelación hidráulica de la red, las expresiones para el cálculo del trabajo de compresión y la generación de las variantes de ocupación de los locales.
- La modelación hidráulica, inserta de manera adecuada a la red a flujo variable en el SME, calculando las pérdidas de energía, los caudales y la velocidad de rotación de la bomba con el respectivo valor de presión, satisfaciendo las diferentes condiciones de ocupación.
- Se hace necesario concebir un sistema computacional que permita integrar la estrategia de modelado para la operación de los SCCAH con CSAF a flujo

variable, mediante el cual se indique el valor de la variable de decisión a través de una adecuada EOCE.

## **Capítulo 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **3.1. Introducción**

En el presente capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos mediante el sistema CAD (OcupaHotel) desarrollado para poder evaluar distintas condiciones de operación de los Circuitos Secundarios de Agua Fría (CSAF) en SCCAH. Se presentan las características de la red hidráulica para su modelación lo cual incluye todos los datos referentes a los nodos, tramos y accesorios (anexo 6). se realizan los cálculos hidráulicos, correspondientes a tres ramales del hotel. Estos ejemplos demuestran los requerimientos energéticos para diferentes situaciones de la bomba y red para el trabajo a caudal variable.

### **3.2. Aplicación informática Ocupahotel 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 utilizar la aplicación CAD (Ocupahotel). Obtenida por profesores del Centro de Estudio de Energía y Tecnologías Avanzadas de Moa, (Montero, 2014). La aplicación incluye como metodología de cálculo el método del gradiente el cual fue explicado en el epígrafe 2.2.1.

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 ramales 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 ramal 1 que contiene las siguientes unidades terminales (6319, 6318, 6223, 6222,6120 y 6119) y B constituye el nodo de salida del ramal. (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 ramal 1. Para mejor entendimiento ver la figura 3.1.

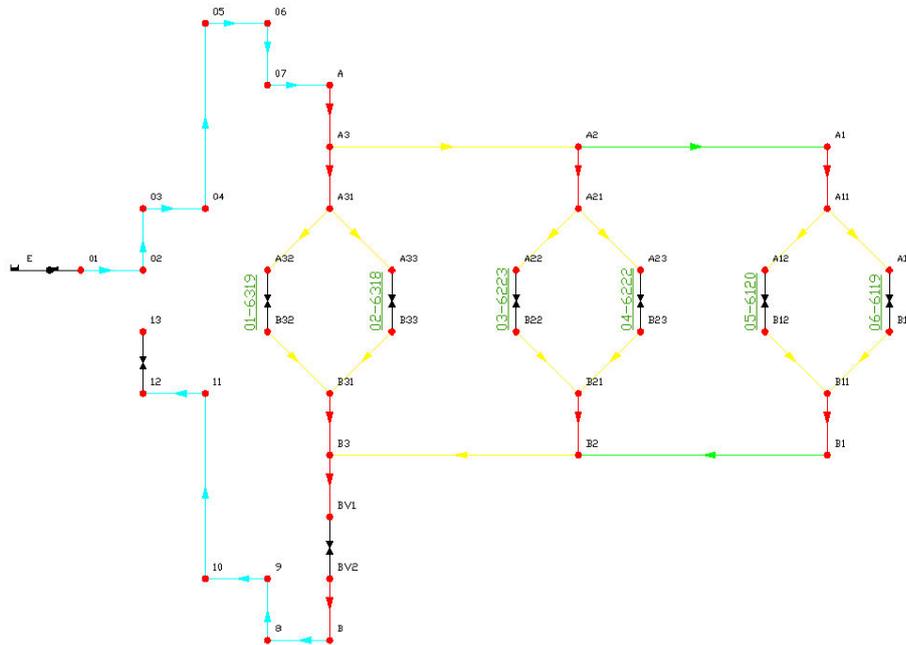


Figura 3.1. Esquema de un ramal del CSAF

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.

### 3.3. Particularidades de la red hidráulica del circuitos secundarios de agua fría (CSAF)

La red hidráulica está compuesta por 273 tramos de tubería presentando diferentes longitudes y diámetros los cuales pueden apreciarse en el anexo 6. 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.

Los caudales de diseño y los resultados de la carga térmica fueron obtenidos a través de la aplicación Ocupahotel y el trabajo realizado por Sánchez (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.

### **3.3.1. 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 significan 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.

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.

### **3.4. Simulación hidráulica de un ramal del CSAF.**

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. Se escogió para el cálculo y la simulación un Circuito Secundario de Agua Fría que garantiza la climatización centralizada de un edificio del hotel

El CSAF está 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.

La tabla 3.1 muestra las características por chapa de las bombas centrifugas instaladas en el ramal 6. En el anexo 2 se encuentra la características por catalogo de las mismas

**Tabla 3.1. Características de las bombas centrifugas del circuito secundario de agua fría.**

<b>Bombas del CSAF</b>	<b>Zona</b>	<b>Potencia</b>	<b>Características</b>
<b><i>Bomba 5 y 10</i></b>	<b>6</b>	<b>12.5 kW</b>	<b><math>Q = 28 \text{ m}^3/h</math> <math>H = 70m</math></b>

A cada bomba en funcionamiento se encuentra conectado un variador de velocidad (VV) ALTIVAR 31 con un controlador PI incorporado. En la figura 3.2 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 3.2 Distribución de las bombas del circuito secundario de agua fría.

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

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

En la figura 3.3 se puede apreciar una simulación del ramal 1 para las condiciones que actualmente se opera el sistema a una presión constante, correspondiente a una velocidad relativa de la bomba de un 100% (3490 rev/min). 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. 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 mediante la aplicación Ocupahotel de cada uno de las 59 habitaciones de la zona para todo año característico, se determina la carga térmica máxima por espacios térmicos del sistema (ramales y habitaciones).

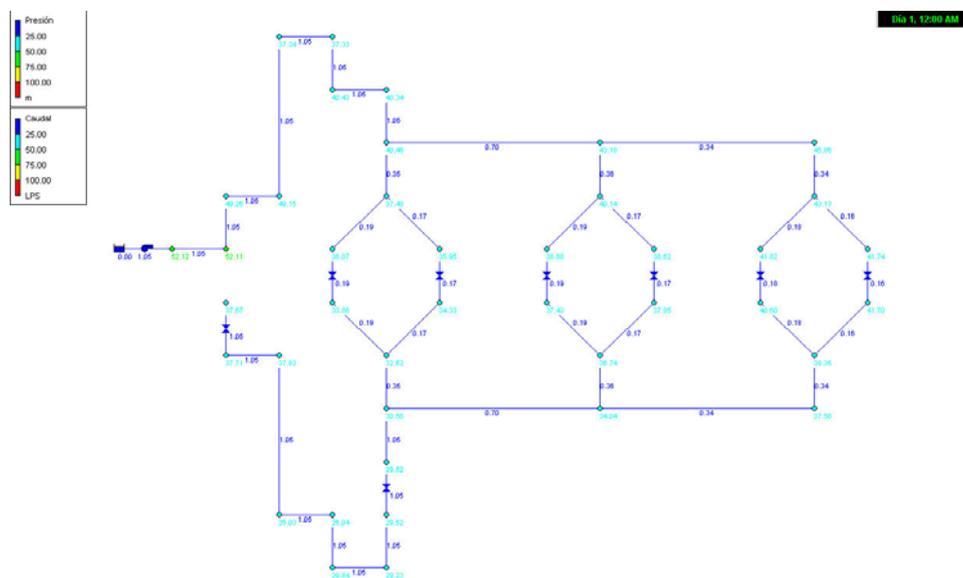


Figura.3.3. Simulación para ocupación máxima de las habitaciones en el ramal 6 del sistema.

Con el valor de carga térmica máxima horaria para un año característico obtenido con la aplicación 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 3.2.

**Tabla 3.2 Carga térmica máxima, caudales y pérdidas de carga en los fancoil**

Habitación	Ct (kW)	Qt (l/s)	Perdida de carga FC (m.c.a)
6319	3,19	1,36	2,214
6318	2,68	1,23	1,622
6223	2,34	1,10	1,254
6222	1,85	0,80	0,768
6120	2,31	1,08	1,224
6119	1,82	0,79	0,747
Total	14,19	6,36	7,829

Se observa que a partir de la carga térmica obtenida se hace necesario un caudal de diseño para extraer el calor de los espacios térmicos del ramal 6, compuestas por las habitaciones 6319, 6318, 6223, 6222, 6120 y 6119, de alrededor de 6,36 l/s (22,896 m<sup>3</sup>/h)

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 (m.c.a). 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 3.4.**

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.

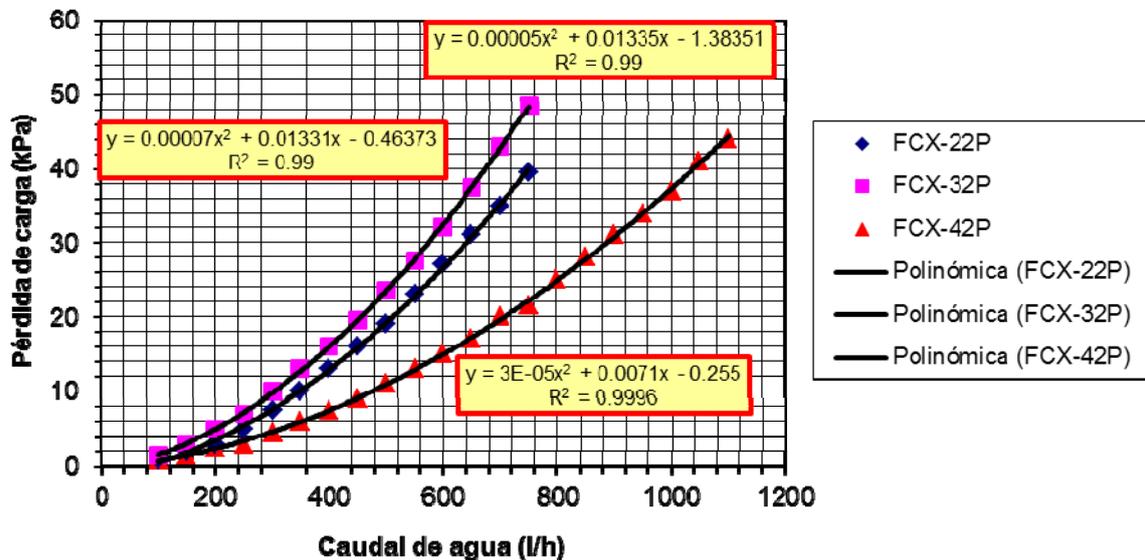


Figura 3.4. Pérdidas de carga en las unidades terminales en función del caudal

A partir de las expresiones obtenidas en la figura 3.4 se obtienen los valores de pérdida de carga en correspondencia de los caudales correspondientes como muestra la tabla 3.2. dicha expresión es de utilidad para implementación de la aplicación Ocupahotel.

### 3.5. Análisis de los resultados del sistema a caudal variable

Para tener una mejor idea de que ocurre con las leyes de proporcionalidad para diferentes condiciones de operación del sistema a caudal variable. A partir de la aplicación informática Ocupahotel se obtienen las curvas de la bomba a partir de la variación de la velocidad máxima relativa en correspondencia a los valores para las condiciones actuales, el valor mínimo de velocidad corresponde al mínimo valor permitido (33,7 m) para lograr presiones suficientes en todos los tramos y nodos del ramal 6.

Se plantea que la curva queda definida por una relación altura-caudal, que regularmente representara el punto de funcionamiento deseado o nominal de la bomba.

Como se observa en la figura 3.5 la aplicación Ocupahotel parte de tres puntos de la curva uno a caudal nulo cuya, altura es el 133% de la altura nominal, un punto medio o nominal y el último a la altura cero, cuyo caudal se asume que es el doble del nominal. Esta opción está disponible en la ventana mostrada en el anexo A.1.6, en el que se puede obtener el modelo de la bomba.

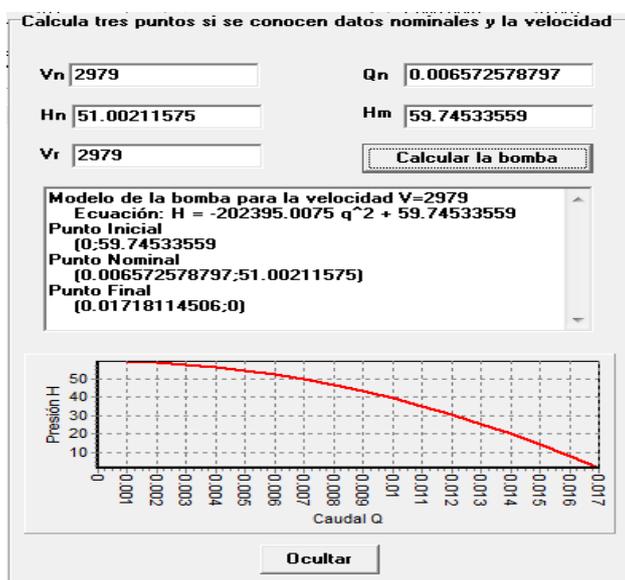


Figura 3.5. Ventana para la obtención de la curvas modelos de la bomba a diferentes velocidades (aplicación Ocupahotel)

La tabla 3.3. Modelos de la curva de la bomba a diferentes velocidades.

Velocidad (rev/min)	Modelo de la curva de la bomba
3490	$H = -202395,0075 Q^2 + 82,00$
3200	$H = -202395,0075 Q^2 + 68,94$
2979	$H = -202395.0075 Q^2 + 59.74$
2750	$H = -202395.0075 Q^2 + 50.91$
2500	$H = -202395.0075 Q^2 + 42.08$
2345	$H = -202395.0075 Q^2 + 37.02$

A partir de los modelos obtenidos tabla 3.3 y mediante la aplicación Excel se obtiene mediante un gráfico  $H=f(Q)$  figura 3.6, la familia de curva a diferentes velocidades para el trabajo de una bomba en el ramal estudiado. Desde el valor máximo de velocidad permitida por la bomba (3490 rev/min) hasta el valor mínimo de velocidad posible, cuyo valor obtenido corresponde al número de presión mínimo (33,8 m.c.a) dado por la bomba, en el que se garantiza las presiones suficientes en todos los tramos y nodos que conforman el ramal estudiado.

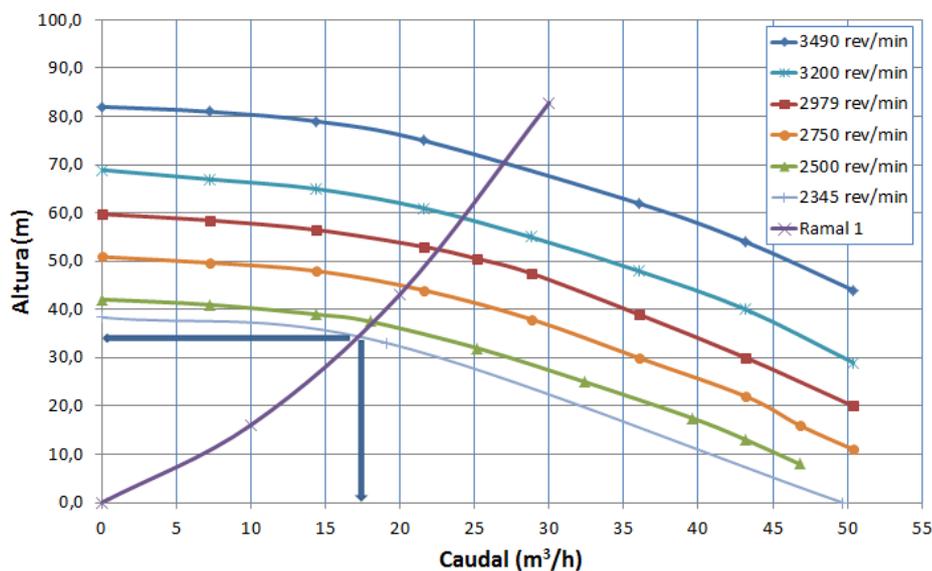


Figura 3.6. Curvas de la bomba a diferentes velocidades

Al obtener la curva de la red del ramal 1, se obtiene el punto de trabajo de la bomba a diferentes velocidades, comprobándose que para una velocidad de 2345 rev/min, se obtiene un caudal de trabajo de  $17,5 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $4,72 \text{ l/s}$ ), con una altura de 34 m valor mínimo que garantice las presiones en todo el ramal, observándose que el flujo de agua obtenido en este punto es insuficiente para extraer el calor dado por la carga térmica máxima de las habitaciones.

La figura 3.7 muestra el punto de trabajo y velocidad óptimo para garantizar las condiciones adecuadas en las habitaciones que conforman el ramal.

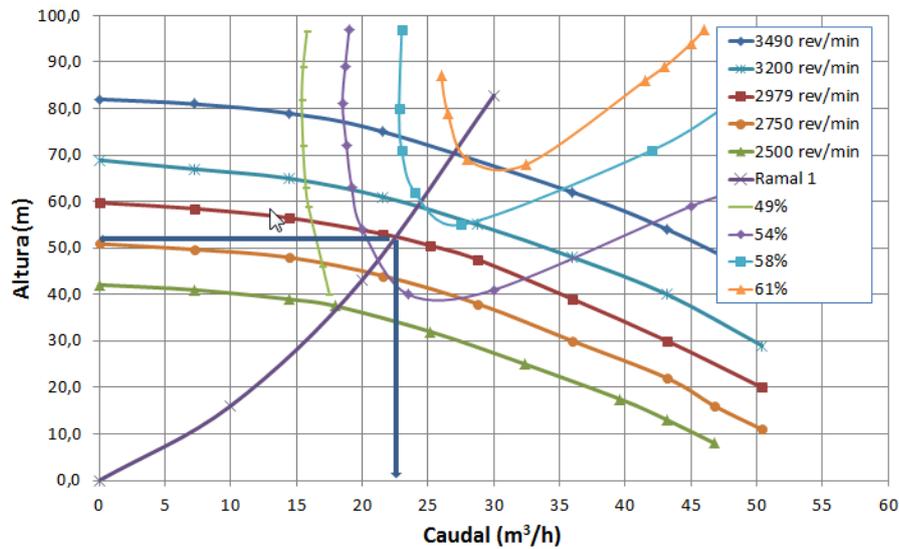


figura 3.7. Punto de trabajo y velocidad adecuada en el sistema

Se comprueba que el punto de trabajo adecuado para garantizar el flujo de agua necesaria para extraer el calor de las habitaciones es de 23 m³/h (6,38 l/s) y una altura de 51 m, que garantiza las presiones necesarias en todo el ramal, y la bomba trabajará a un rendimiento de un 56 %.

### 3.6. Evaluación técnico económica

El análisis de los costos de operación del sistema de transporte bajo los factores antes mencionados, conduce a la determinación de los parámetros racionales de operación, ya sea, caudal y velocidad adecuada.

El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido por el ramal se expresa mediante las siguientes ecuaciones (Laurencio 2010):

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_b} \cdot N_h \cdot 10^{-3}$$

Donde:

$C_{bom}$  - costo de bombeo de la instalación; (CUC/h).  $N_h$  - Potencia hidráulica; (W).  $t_{el}$  - tarifa eléctrica; (CUC/ kW·h).

$t_r$  - tiempo de trabajo del equipo; (h/año).  $\eta_b$  - rendimiento de la bomba; (adimensional).

Para el análisis se tiene en cuenta el caudal de trabajo adecuado obtenido al realizar un variación de velocidad del motor de la bomba, que permita ajustar el sistema al caudal adecuado, y el punto de trabajo a máxima velocidad de la bomba. Todo para un ramal del sistema.

Tabla 3.4. Parametros para el cálculo del costo de tranportación del agua en el una bomba del ramal 6.

Punto de trabajo	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Altura (m)	Potencia (kWh)	Costo de bombeo CUC/h
Optimo	0,0064	51	0,003185	0,1776
Máximo	0,0075	70	0,005144	0,2631
	0,0011	19	0,001959	0,0855
<b>Ahorro CUC/mes</b>				<b>61,56</b>

Por tanto, los resultados obtenidos nos muestran que el control del sistema a caudal variable, reporta un ahorro en el transporte de agua por un ramal del circuito secundario de agua fría (CSAF) del sistema de climatización del hotel, de alrededor de 61,56 CUC/mes

### 3.7. Conclusiones parciales del capítulo

1. Se establece una ecuación para la perdida de carga en las unidades terminales en función del caudal.
2. Se establecen los caudales de diseño necesario para extraer el calor de las habitaciones y total del ramal 6 a partir de la carga térmica máxima.
3. Se obtienen el punto de trabajo adecuado a partir de la variación de la velocidad de rotación de las bombas la bomba

**CONCLUSIONES**

1. A partir de la aplicación informática Ocupahotel se obtiene la carga térmica del ramal 6 conformado por 6 habitaciones, que permitió obtener el caudal de diseño de 6,36 l/s (22,89 m<sup>3</sup>/h) necesario para extraer el calor del espacio térmico del ramal.
2. La evaluación del sistema de bombeo del ramal con la variación de las velocidades de la bomba entre 3490 – 2345 rev/min, permitieron obtener el punto de trabajo adecuado de 23 m<sup>3</sup>/h (6,38 l/s) y una altura de 51 m, que garantiza el flujo de agua necesaria para extraer el calor de las habitaciones y las presiones suficientes en todo el ramal, con un rendimiento de un 56 %.
3. El análisis de las potencialidades energéticas del sistema de bombeo de agua del ramal 6 del circuito secundario de agua fría. Permite obtener un ahorro en el transporte de agua de 61,56 CUC/mes.

**RECOMENDACIONES**

1. Utilizar los modelos de pérdidas de carga obtenidos para los fancoil, para implementarlos en la aplicación informática Ocupahotel.
2. Implementar los resultados obtenidos en el análisis del sistema de bombeo para facilitar la toma de decisiones en cuanto a definir cuales locales se deben ocupar para disminuir el consumo de energía eléctrica en el bombeo.
3. 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. Bermúdez, A. Herramientas para la predicción energética en el hotel Blau Costa Verde. Tesis de Grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2009.
2. Pérez, C; Campbell, H; Monteagudo, J; Borroto, A; Vázquez, A. Análisis de cubiertas reflectivas como alternativa de ahorro de energía por climatización en edificaciones turísticas. Universidad Autónoma de Baja California, México 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, O. Reflexiones sobre el consumo del sector turístico Cubano.
5. Chen Xu, Q, David E. Claridge, Dan Tuner and Song Deng.
6. Delgado, O. 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, J. Parker, J. Spitler. Calefacción Ventilación y Aire Acondicionado. Editora LIMUSA WILEY, 622p. 2008
8. Hernández, J (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, R. Redes hidráulicas en la CC de hoteles
11. Sánchez, M, 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. Montelier, S. Reducción del consumo de energía en instalaciones con sistemas de climatización centralizadas todo agua a flujo. Tesis Doctoral. Universidad de Cienfuegos. 2008
13. Montero, R.; [et]. Diagnóstico Energético Hotel Super Club Breezes Costa Verde. Grupo de Eficiencia Energética de Moa, ISMMM, 2001. 58p
14. Montero, R.; [et]. Diagnóstico Energético Hotel LTI Costa Verde Beach Resort. Grupo de Eficiencia Energética de Moa, ISMMM, 2002. 81p
15. Montero, R.; [et]. Diagnóstico Energético Hotel Blau Costa Verde. Centro de Estudios de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, ISMMM, 2008. 79p
16. Montero, 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, Reineris; [et]. Aspectos termohidraulicos en la operación de los circuitos secundario de agua fría a caudal variable en la climatización centralizada.
18. Montero, 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 , Maikel y Rodríguez, Y. 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, P. del Toro, R. Martínez, H. Ahorro Energético en los Sistemas Climatización y Refrigeración. 2002. 14p.
22. Pérez, C., "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, Y. 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. Uribazó, E. R... [et.al.]. Identificación del sistema de climatización de un hotel. Centro de Estudios de Automatización (CEA). 2004.(arreglar bien estas referencias).
27. Uribazó, 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, M.; Costa, 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. García, Y 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.

**Anexo 1.** Aplicación “OCUPAHOTEL” para la optimización de la operación de la climatización centralizada a flujo variable.

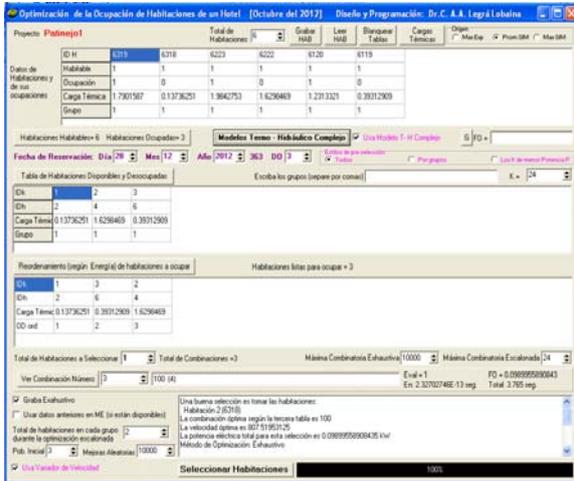


Figura A.1.1. Primera ventana:

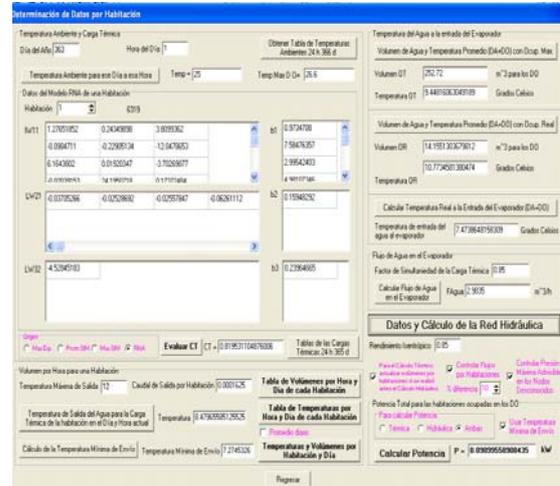


Figura A.1.2. Segunda ventana:

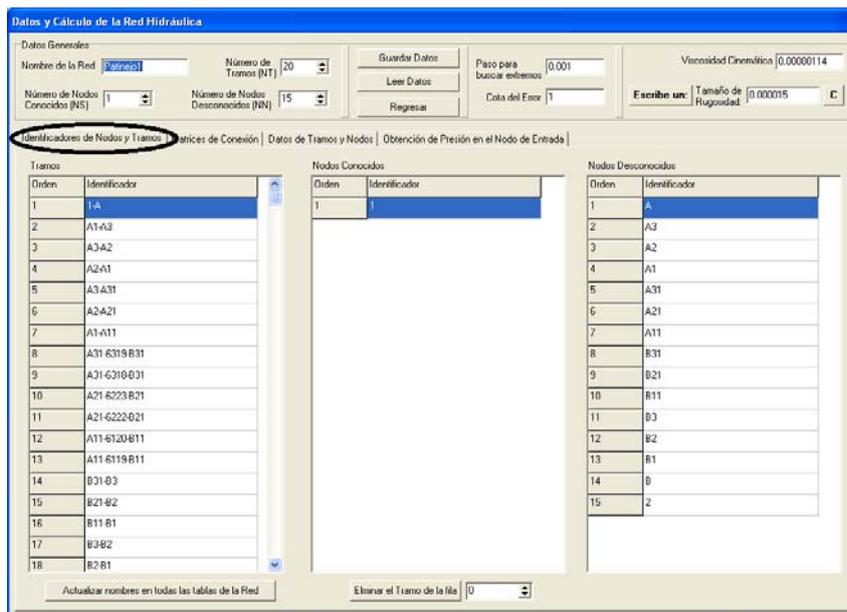


Figura A.1.3. Tercera ventana: Datos y cálculo de la red hidráulica. Identificación de nodos y tramos

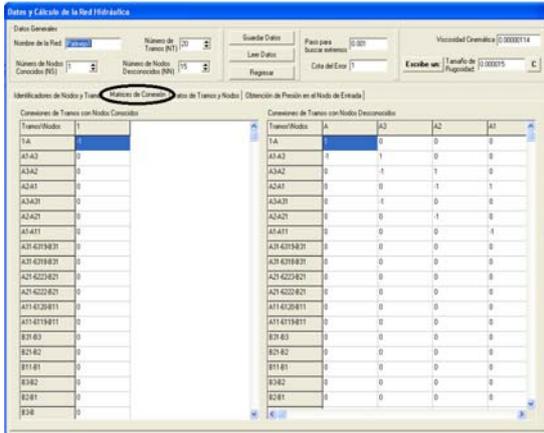


Figura A.1.4. Matrices de conexión.

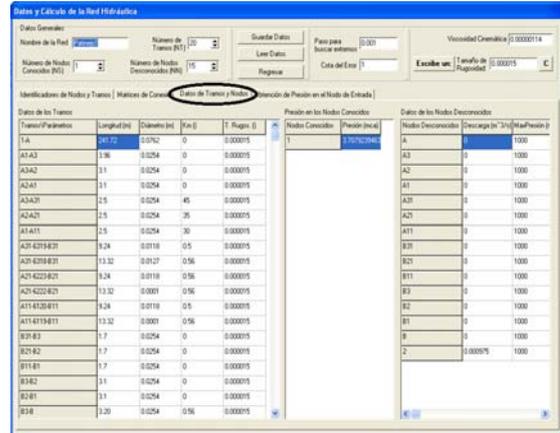


Figura A.1.5. Datos de tramos y nodos

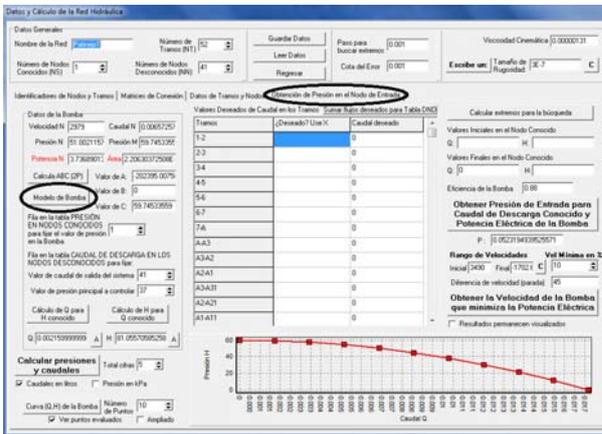


Figura A.1.6. Obtención de presión en el nodo de entrada.

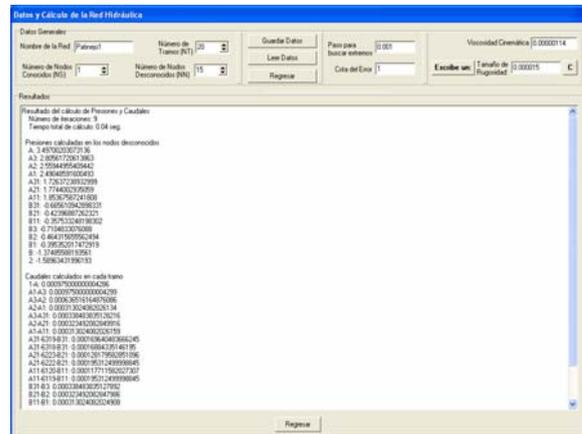


Figura A.1.7. Pagina de resultados

Esta modelación se realiza con el metodo del gradiente según se presenta en la obra “Hidráulica de Tuberías” de Juan G. Saldarriaga V.(1998) y determinadas mejoras en la búsqueda del calor de presión que reduce el consumo de energía y garantiza los caudales exigidos por el sistema tanto en tramos como en nodos de suministro.

- Se definen:
  - número de tramos NT
  - número de nodos conocidos NN
  - numero de nodos desconocidos ND
- Esto define las dimensiones de la matrices que forman parte del método del gradiente.
- Se llenan los datos de las tablas de identificadores de nodos y tramos.

- Se actualizan los nombres de todas las tablas de la red.
- Se puede eliminar un tramo y sus informaciones correspondientes en las diferentes matrices del método , actualizándose los datos automáticamente para los cálculos de la nueva red.
- Se llenan los datos de los tramos y nodos
  - Datos de tramos(longitud(m), diámetro(m), coeficiente de pérdida local ( $k_m$ ), rugosidad de la tubería(m), presión de los nodos conocidos(mca)).
  - Caudal de descarga en los nodos desconocidos ( $m^3/s$ ).
- Se introducen los siguientes datos para los cálculos correspondientes.
  - Paso para buscar extremos en donde pueden estar la presión mas racional para el sistema y que garantiza los caudales de descarga en los nodos desconocidos y en los tramos que se requiera un determinado caudal previa selección (paso 0,5).
  - Cota del error del método (0,001).
  - Viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )
  - Tamaño de la rugosidad de las tuberías (m) según selección del tipo de tuberías disponibles en tabla.
- Obtención de la presión en el nodo de entrada.
  - Se marca con una x y se definen los caudales deseados en los diferentes tramos de la red(unidades terminales).
  - Se llenan los datos de la bomba(velocidad nominal, caudal nominal, presión nominal, potencia nominal).
- Se define la fila en la tabla de caudal de descarga en los nodos desconocidos para fijar el valor del caudal en la salida de todo el sistema.
- Se introducen los valores de  $Q_1(Q_0, H_0)$  y  $Q_2(Q_n, H_n)$  para calcular los coeficientes de la ecuación de la bomba y se copian los valores para las celdas correspondientes. Se oculta el cálculo de los coeficientes.
- Se calcula H para Q conocida actualizando el valor.
- Se calcula Q para el valor de H conocido tomado del paso anterior.
- Se busca el menos valor de C correspondiente al valor de  $H_0$  de la bomba con el paso definido en el programa.

- Se calcula los extremos para la búsqueda del nuevo valor de  $H_n$ .
- Se calcula  $H$  para el  $Q$  conocido y se actualiza el valor de  $H$ .
- Se calcula  $Q$  para  $H$  actualizada conocida.
- Se verifica que se cumpla  $Q$  en el nodo de suministro y en los tramos de las unidades terminales que participan en el análisis.
- Se calculan los nuevos valores de los coeficientes de la ecuación de la bomba  $y=C + AX^n$  para el nuevo valor de  $(0,C)(Q_0, H_0)$  y el nuevo valor de  $(Q_n, H_n)$ .
- Se actualizan los valores de los coeficientes de la bomba.
- Se obtiene el valor de la nueva potencia necesaria para el sistema desde el punto de vista hidráulico.
- Optimización de la velocidad de la bomba...

## Anexo 2. Familias de curvas que se pueden presentar ante el trabajo a flujo variable de 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 una sola bomba).
- Grafico a partir del cual se selecciona una bomba de los catálogos.

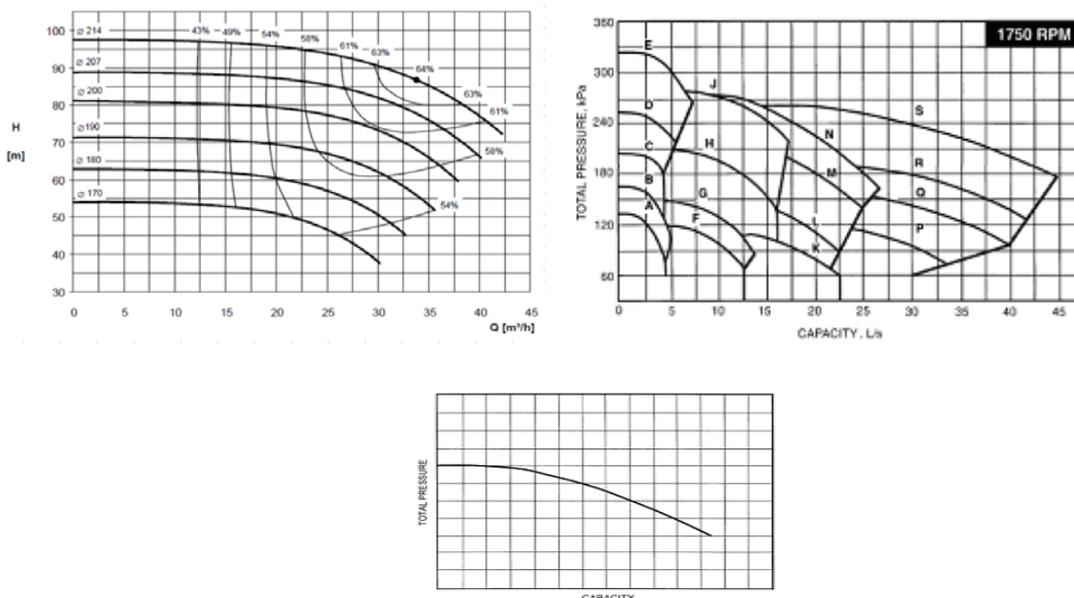


Fig. 12 Typical Pump Curve

**Anexo 3. Ejemplos de elementos y conexiones básicas de los SCCAH a flujo variable**

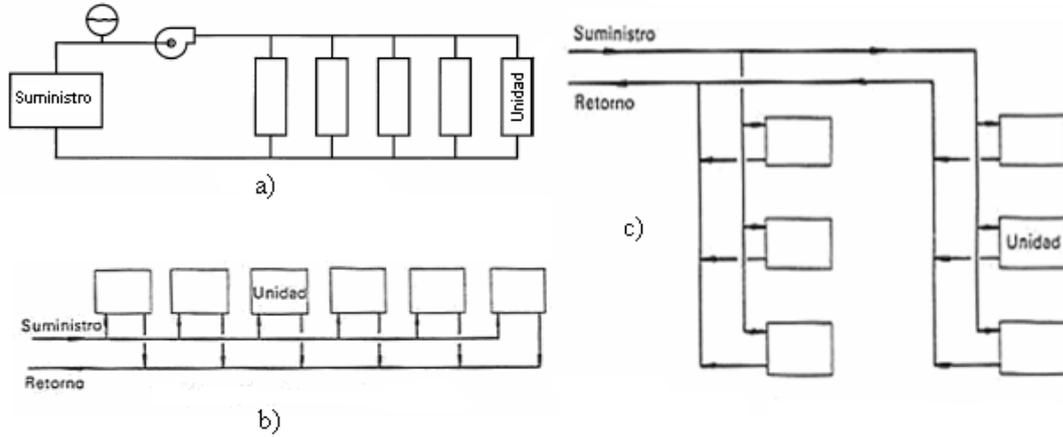


Figura. 1 Red hidráulica en malla con retorno directo empleada en los CSAF.  
 a) Esquema general simplificado, b) unidades conectadas horizontalmente y  
 c) unidades conectadas verticalmente (fuente Hydronic System, Carrier Pág. )

**Anexo 4. Configuración general de los SCCAH a flujo variable y propiedades termofísicas del agua (Fuente: Crane),**

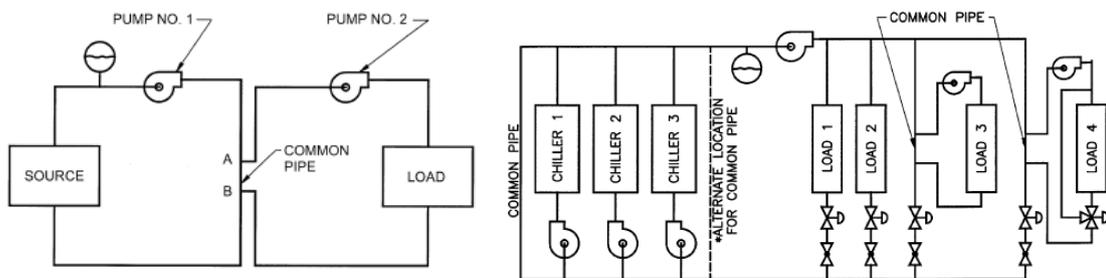


Figura 1. Configuración de los SCCAH a flujo variable en relación a los CSAF:  
 a) Configuración simple; b) configuración compleja. Fuente (Hydronic System).

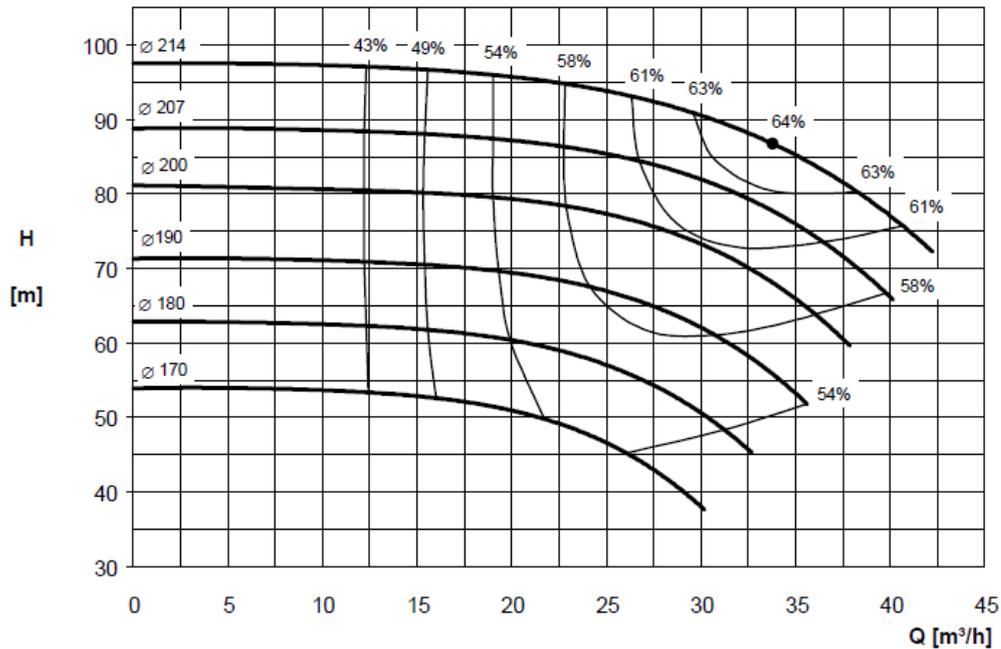
Extraído del Libro Flujo de Fluidos en válvulas accesorios tuberías, CRANE y de Propiedades termofísicas del agua saturada....Pág. 846 Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Incropera

Temperatura (K)	Temperatura (°C)	Volumen específico (m <sup>3</sup> /kg)	Calor específico (kJ/kg.K)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
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 5. Curva nominal de la bomba.

<b>SIHI<sup>SuperNova</sup> 032200B</b>		<b>Nennzahl / nominal speed</b> <b>3500 min<sup>-1</sup></b>					
<b>Baureihe / series</b>	ZLND	ZLKF	ZTND	ZTKD			



**Anexo 6. Tabla de los datos hidráulicos de los Tramos de tubería (PVC)**

Tramo	Long.	Diám.	Caudal	Pérdidas	Tramo	Long.	Diám.	Caudal	Pérdidas
	<m>	<mm>	<l/s>	(/1000m)		<m>	<mm>	<l/s>	(/1000m)
1-2	0,65	76,2	7,78	45,5	J23-J21	1	12,7	0,23	497,99
3-4	98,9	76,2	7,78	45,5	J25-J21	11,02	12,7	0,11	120,58
2-3	2,35	76,2	7,78	45,5	J21-J2	1,65	12,7	0,33	1044,68
4-5	11,8	76,2	7,78	45,5	J11-J1	1,65	12,7	0,31	942,87
5-6	7	76,2	7,78	45,5	J1-J2	3,1	19,05	0,31	117,53
6-7	3,1	76,2	7,78	45,5	J12-J12	3,85	12,7	0,11	134,97
7-A	81	76,2	7,78	45,5	J13-J12	6,38	12,7	0,10	109,74
12-13	2,35	76,2	7,78	45,5	J12-J11	1	12,7	0,21	449,6
11-12	98,9	76,2	7,78	45,5	J14-J14	3,85	12,7	0,05	33,84
M-O	8	38,5	1,51	64,34	J15-J14	6,38	12,7	0,05	26,95
A-A3	2,25	25,4	1,01	250,3	J14-J11	11,02	12,7	0,10	109,47
A3-A2	3,1	25,4	0,66	110,98	J24-J25	3,85	12,7	0,06	37,58
A2-A1	3,1	19,05	0,32	123,91	J25-J25	6,38	12,7	0,05	30,28
B2-B3	3,1	25,4	0,66	110,98	J22-J23	3,85	12,7	0,12	151,34
B1-B2	3,1	19,05	0,32	123,91	J23-J23	6,38	12,7	0,11	119,22
A3-A31	2,5	12,7	0,35	1170,66	I-I3	2,25	25,4	0,96	227,42
A31-33	5,4	12,7	0,16	276,12	I3-I31	2,5	12,7	0,32	965,41
A31-32	4,05	12,7	0,19	347	I3-I2	3,1	25,4	0,64	105,96
A2-A21	2,5	12,7	0,34	1087,73	I31-I32	4,05	12,7	0,17	292,76
A21-22	4,05	12,7	0,18	325,55	I31-I33	5,4	12,7	0,15	223,88
A21-23	5,4	12,7	0,16	254,61	I2-I21	2,5	12,7	0,33	1044,68
A1-A11	2,5	12,7	0,32	995,38	I21-223	1	12,7	0,23	497,99
A11-12	4,05	12,7	0,17	301,48	I21-245	11,02	12,7	0,11	120,58
A11-13	5,4	12,7	0,15	230,81	I23-I22	4,05	12,7	0,12	151,34
B32-31	3,85	12,7	0,19	347	I23-I23	5,4	12,7	0,11	119,21
B33-31	6,38	12,7	0,16	276,12	I25-I24	4,05	12,7	0,06	37,58
B31-B3	1,65	12,7	0,35	1170,66	I25-I25	5,4	12,7	0,05	30,28
B22-21	3,85	12,7	0,18	325,55	I2-I1	3,1	19,05	0,31	117,52
B23-21	6,38	12,7	0,16	254,61	I1-I11	2,5	12,7	0,31	942,87
B21-B2	1,65	12,7	0,34	1087,73	I13-I12	4,05	12,7	0,11	134,97
B12-11	3,85	12,7	0,17	301,48	I13-I13	5,4	12,7	0,10	109,74
B13-11	6,38	12,7	0,15	230,81	I11-I13	1	12,7	0,21	449,61
B11-B1	1,65	12,7	0,32	995,38	I11-I15	11,02	12,7	0,10	109,47
A-C	8	76,2	6,77	34,85	I15-I14	4,05	12,7	0,05	33,84
C-E	8	76,2	5,78	25,82	I15-I15	5,4	12,7	0,05	26,95
C-C3	2,25	25,4	0,98	237,58	K-K3	2,25	25,4	0,62	97,84
C3-31	2,5	12,7	0,34	1110,3	K3-K31	2,5	12,7	0,31	925,69
C31-32	4,05	12,7	0,18	331,37	K3-K2	3,1	25,4	0,31	26,55
C31-33	5,4	12,7	0,16	260,48	K31-32	4,05	12,7	0,17	279,57
C3-C2	3,1	25,4	0,64	105,44	K31-33	5,4	12,7	0,14	216,11
C2-C1	3,1	19,05	0,31	117,86	K2-K21	2,5	12,7	0,31	905,53
C2-21	2,5	12,7	0,33	1031,62	K21-22	4,05	12,7	0,16	272,84
C21-22	4,05	12,7	0,18	310,93	K21-23	5,4	12,7	0,14	212,2
C21-23	5,4	12,7	0,15	240,16	K-M	8	50,8	2,35	36,39
C1-11	2,5	12,7	0,31	945,59	I-K	8	50,8	2,97	56,74

C11-12	4,05	12,7	0,17	286,22	L32-31	3,85	12,7	0,17	279,57
C11-13	5,4	12,7	0,15	219,97	L33-31	6,38	12,7	0,14	216,11
D32-31	3,85	12,7	0,18	331,37	L31-L3	1,65	12,7	0,31	925,69
D33-31	6,38	12,7	0,16	260,48	L22-21	3,85	12,7	0,16	272,84
D31-3	1,65	12,7	0,34	1110,3	L23-21	6,38	12,7	0,14	212,2
D22-21	3,85	12,7	0,18	310,93	L21-L2	1,65	12,7	0,31	905,53
D23-21	6,38	12,7	0,15	240,16	L2-L3	3,1	25,4	0,31	26,55
D21-2	1,65	12,7	0,33	1031,62	L3-LV1	1,05	25,4	0,62	97,84
D2-D3	3,1	25,4	0,64	105,44	LV2-L	1,2	25,4	0,62	97,84
D1-D2	3,1	19,05	0,31	117,86	N-L	8	50,8	2,35	36,39
D12-11	3,85	12,7	0,17	286,22	NV2-N	1,2	25,4	0,84	174,41
D13-11	6,38	12,7	0,15	219,97	P-N	8	38,5	1,51	64,34
D11-1	1,65	12,7	0,31	945,59	N31-N3	1,65	12,7	0,29	812,53
D3-V1	1,05	25,4	0,98	237,58	N3-NV1	1,05	25,4	0,84	174,42
DV2-D	1,2	25,4	0,98	237,58	N2-N3	3,1	25,4	0,55	77,78
B3-V1	1,05	25,4	1,01	250,3	N32-31	3,85	12,7	0,15	241,91
BV2-B	1,2	25,4	1,01	250,29	N33-31	6,38	12,7	0,14	194,02
D-B	8	76,2	6,77	34,85	N22-21	3,85	12,7	0,15	224,09
F-D	8	76,2	5,78	25,82	N23-21	6,38	12,7	0,13	182,1
FV2-F	1,2	25,4	0,88	189,81	N21-N2	1,65	12,7	0,28	756,09
H-F	16	76,2	4,91	18,9	N12-11	3,85	12,7	0,14	207,25
F31-F3	1,65	12,7	0,34	1086,48	N13-11	6,38	12,7	0,13	166,4
F3-FV1	1,05	25,4	0,88	189,81	N11-N1	1,65	12,7	0,27	693,88
F2-F3	3,1	25,4	0,54	75,3	N1-N2	3,1	19,05	0,27	87,16
F1-F2	3,1	19,05	0,21	55,28	M3-M2	3,1	25,4	0,55	77,78
F21-F2	1,65	12,7	0,33	1030,27	M2-M1	3,1	19,05	0,27	87,16
E-E3	2,25	25,4	0,88	189,81	M2-21	2,5	12,7	0,28	756,09
E3-E31	2,5	12,7	0,34	1086,48	M21-22	4,05	12,7	0,15	224,09
E3-E2	3,1	25,4	0,54	75,3	M21-23	5,4	12,7	0,13	182,1
E31-32	4,05	12,7	0,18	325,23	M3-31	2,5	12,7	0,29	812,53
E31-33	5,4	12,7	0,16	254,29	M31-33	5,4	12,7	0,14	194,02
F32-31	3,85	12,7	0,18	325,23	M31-32	4,05	12,7	0,15	241,91
F33-31	6,38	12,7	0,16	254,29	M-M3	2,25	25,4	0,84	174,42
E2-E21	2,5	12,7	0,33	1030,27	M1-11	2,5	12,7	0,27	693,88
E21-22	4,05	12,7	0,18	310,57	M11-12	4,05	12,7	0,14	207,25
E21-23	5,4	12,7	0,15	239,82	M11-13	5,4	12,7	0,13	166,4
F22-21	3,85	12,7	0,18	310,57	P31-P3	1,65	12,7	0,27	705,31
F23-21	6,38	12,7	0,15	239,82	P3-PV1	1,05	25,4	0,78	151,38
E2-E1	3,1	19,05	0,21	55,28	P2-P3	3,1	25,4	0,51	67,6
E1-E11	6,55	12,7	0,21	434,49	PV2-P	1,2	25,4	0,78	151,37
F11-F1	6,55	12,7	0,21	434,49	R-P	8	31,75	0,73	43,66
E-G	16	76,2	4,91	18,9	RV2-R	1,2	25,4	0,73	135,51
G-I	4	63,5	3,93	31,2	R31-R3	1,65	12,7	0,25	631,43
G-G3	2,25	25,4	0,98	233,51	R2-R3	3,1	25,4	0,48	60,58
G3-31	2,5	12,7	0,32	990,45	R3-RV1	1,05	25,4	0,73	135,5
G31-33	5,4	12,7	0,15	229,67	P11-P1	1,65	12,7	0,25	600,78
G31-32	4,05	12,7	0,17	300,05	P1-P2	3,1	19,05	0,25	75,75
G3-G2	3,1	25,4	0,65	108,81	P22-21	3,85	12,7	0,14	197,46
G2-G1	3,1	19,05	0,32	120,66	P23-21	6,38	12,7	0,12	156,36

G2-21	2,5	12,7	0,34	1073,37	P21-P2	1,65	12,7	0,26	655,91
G2-23	5,4	12,7	0,11	121,88	P32-1	3,85	12,7	0,14	210,19
G223-2	4,05	12,7	0,12	155,94	P33-31	6,38	12,7	0,13	169,43
G21-23	1	12,7	0,23	511,62	P12-11	3,85	12,7	0,13	183,15
G21-24	11,02	12,7	0,11	123,7	P13-11	6,38	12,7	0,12	141,83
G45-24	4,05	12,7	0,06	38,61	O-O3	2,25	25,4	0,78	151,38
G45-25	5,4	12,7	0,05	31,16	O3-O31	2,5	12,7	0,27	705,31
H24-45	3,85	12,7	0,06	38,61	O3-O2	3,1	25,4	0,51	67,6
H25-45	6,38	12,7	0,05	31,16	O2-O21	2,5	12,7	0,26	655,91
H45-21	11,02	12,7	0,11	123,7	O21-23	5,4	12,7	0,12	156,36
H22-23	3,85	12,7	0,12	155,94	O21-22	4,05	12,7	0,14	197,46
H23-23	6,38	12,7	0,11	121,88	O31-32	4,05	12,7	0,14	210,19
H23-21	1	12,7	0,23	511,62	O31-33	5,4	12,7	0,13	169,43
H21-2	1,65	12,7	0,34	1073,37	O2-O1	3,1	19,05	0,25	75,74
H2-H3	3,1	25,4	0,65	108,81	O1-O11	2,5	12,7	0,25	600,79
H1-H2	3,1	19,05	0,32	120,66	O11-12	4,05	12,7	0,13	183,15
H23-11	1	12,7	0,22	461,86	O11-13	5,4	12,7	0,12	141,83
H45-11	11,02	12,7	0,10	112,29	O-Q	8	31,75	0,73	43,66
H11-H1	1,65	12,7	0,32	968,67	Q-Q3	2,25	25,4	0,73	135,51
H31-H3	1,65	12,7	0,32	990,45	Q3-Q31	2,5	12,7	0,25	631,43
H32-31	3,85	12,7	0,17	300,05	Q3-Q2	3,1	25,4	0,48	60,58
H33-31	6,38	12,7	0,15	229,67	Q31-32	4,05	12,7	0,14	191,12
H3-HV1	1,05	25,4	0,98	233,5	Q31-33	5,4	12,7	0,12	149,91
HV2-H	1,2	25,4	0,98	233,51	Q2-Q21	2,5	12,7	0,25	587,49
H12-23	3,85	12,7	0,11	139,12	Q2-Q1	3,1	19,05	0,23	67,82
H13-23	6,38	12,7	0,10	112,15	Q21-22	4,05	12,7	0,13	179,74
H14-14	3,85	12,7	0,05	34,8	Q21-23	5,4	12,7	0,11	138,3
H15-14	6,38	12,7	0,05	27,82	Q1-Q11	2,5	12,7	0,23	536,23
G1-G11	2,5	12,7	0,32	968,67	Q11-13	5,4	12,7	0,11	126,69
G11-12	1	12,7	0,22	461,87	Q11-12	4,05	12,7	0,13	164,25
G11-14	11,02	12,7	0,10	112,29	R32-31	3,85	12,7	0,14	191,12
G15-14	4,05	12,7	0,05	34,8	R33-31	6,38	12,7	0,12	149,91
G14-15	5,4	12,7	0,05	27,82	R22-21	3,85	12,7	0,13	179,74
G13-12	4,05	12,7	0,11	139,12	R23-21	6,38	12,7	0,11	138,3
G12-13	5,4	12,7	0,10	112,14	R21-R2	1,65	12,7	0,25	587,49
JV2-J	1,2	25,4	0,96	227,42	R12-11	3,85	12,7	0,13	164,25
J-H	4	63,5	3,93	31,2	R13-11	6,38	12,7	0,11	126,69
L-J	8	50,8	2,97	56,74	R11-R1	1,65	12,7	0,23	536,23
J31-J3	1,65	12,7	0,32	965,41	R1-R2	3,1	19,05	0,23	67,82
J3-JV1	1,05	25,4	0,96	227,41	10-11	11,8	76,2	7,78	45,5
J2-J3	3,1	25,4	0,64	105,96	9-10	7	76,2	7,78	45,5
J32-J31	3,85	12,7	0,17	292,76	8-9	3,1	76,2	7,78	45,5
J33-J31	6,38	12,7	0,15	223,88	B-8	81	76,2	7,78	45,5