

**EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA  
DEL SISTEMA DE CIRCULACIÓN DE AGUA FRÍA EN LAS EMBARCACIONES  
TIPO NODRIZA FLUVIAL CONSTRUIDAS POR COTECMAR**

**KAROL BIBIANA LEÓN PÉREZ  
JUAN CAMILO CRUZ RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA  
CARTAGENA DE INDIAS**

**2007**

**EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN  
DEL SISTEMA DE CIRCULACIÓN DE AGUA FRÍA EN LAS EMBARCACIONES  
TIPO NODRIZA FLUVIAL CONSTRUIDAS POR COTECMAR**

**KAROL BIBIANA LEÓN PÉREZ  
JUAN CAMILO CRUZ RODRÍGUEZ**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**PhD. BIENVENIDO SARRÍA LÓPEZ**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA. DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA  
CARTAGENA**

**2007**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma de presidente del jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Cartagena de Indias D.T. y C., Enero de 2007**

*A Dios quien con sus bendiciones me ha dado la fortaleza necesaria para sobrellevarlo todo; a mis tres madres que significan el amor, el respeto y la admiración, ellas que me han convertido en la mujer que soy hoy en día, simplemente las amo; a mi papá abuelo de quien guardo los mejores recuerdos; a cada uno de mis amigos que me han brindado tan buenos momentos, saben que pueden contar conmigo; Lil, Eylin, Vicky y Eli gracias por su apoyo incondicional; al Ing. Luís Majana quien de una u otra forma me ayudó a convertirme en mejor persona; al PhD. Bienvenido Sarria porque aparte de mi maestro hoy lo considero mi amigo; a mi compañero de tesis por enseñarme tantas cosas durante todos estos meses; a cada una de las personas maravillosas que conocí en la Dirección de investigación, desarrollo e innovación de COTECMAR, tienen mi respeto, mi admiración pero sobre todo mi amistad, y de manera muy especial a tres personitas que sin querer han ido cambiando mi vida con esa maravillosa energía que irradian, los quiero.*

**Karol**

*El éxito de este triunfo lo dedico a Dios, por llenarme de fortaleza, sabiduría y bendiciones, a mis dos tesoros, Misael Cruz y Lola Rodríguez por haberme brindado todas las herramientas para hacer realidad este sueño, a mis grandes hermanos y novia por su apoyo incondicional y fuerza, a mis amigos y compañeros, a mi compañera de tesis por el apoyo y paciencia a todas las dificultades y obstáculos encontrados que poco a poco fuimos venciendo, al PhD. Bienvenido Sarria por todos los conocimientos brindados, su amistad y amabilidad, y a todos los seres queridos que de una u otra forma contribuyeron con este gran logro.*

*Gracias totales.*

***Juan Camilo***

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- ? A Dios, quien nos llenó de sabiduría y paciencia para desarrollar de manera exitosa nuestra tesis de grado.
- ? A nuestras familias que con su amor y apoyo nos acompañaron en todo este proceso.
- ? A todos nuestros amigos y seres queridos que siempre nos tuvieron paciencia y no nos dejaron desistir.
- ? Al PhD. Bienvenido Sarria López por ofrecernos su asesoría compartiéndonos sus conocimientos, pero sobre todo su amistad y apoyo incondicional. Mil gracias.
- ? Al MSc. Juan Fajardo, quien nos acompañó incondicionalmente durante la realización del presente proyecto.
- ? Al Capitán de Navío Jorge Enrique Carreño por acogernos en su dirección y apoyarnos en el desarrollo de esta investigación.
- ? Al Capitán de Corbeta Ricardo Lugo Villalba por su apoyo dentro de COTECMAR y su disposición para resolver nuestras inquietudes.
- ? Al Ing. Omar Vásquez que nos brindó su colaboración su asesoría y su amistad.
- ? A cada una de las personas que hace parte de la dirección de investigación, desarrollo e innovación, DIDESI, que nos ofrecieron su colaboración y amistad incondicional durante la elaboración de nuestra tesis.

## **AGRADECIMIENTOS**

- ? A COTECMAR en general, por ofrecernos la oportunidad de enriquecer nuestros conocimientos y colaborarnos en el desarrollo de esta investigación.
- ? A Carlos Rodríguez por su apoyo y colaboración en la tomas de datos en campo.
- ? A todos nuestros profesores que con sus conocimientos y experiencias colaboraron en nuestro crecimiento tanto académico como personal.
- ? A la Universidad Tecnológica de Bolívar que de una u otra forma se convirtió en nuestro segundo hogar.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	26
<b>1 AHORRO DE ENERGÍA</b> .....	28
<b>1.1</b> Generalidades.....	28
<b>1.2</b> Ahorro Y Reducción De Consumo.....	29
<b>1.3</b> Métodos Para Un Ahorro De Energía Eficaz.....	31
<b>2 SISTEMAS CONSUMIDORES DE ENERGÍA DE UN BUQUE TIPO NODRIZA FLUVIAL</b> .....	37
<b>2.1</b> Sistemas Energéticos Del Buque.....	37
<b>2.2</b> Sistemas Eléctricos.....	38
<b>2.3</b> Sistemas De Aire Acondicionado Y Refrigeración.....	40
<b>2.4</b> Distribución Del Consumo Energético Del Buque.....	41
<b>2.5</b> Eficiencia Energética De Los Sistemas De Climatización.....	43
<b>2.6</b> Impacto Ambiental De Los Sistemas De Climatización.....	44
<b>3 SISTEMAS DE CIRCULACIÓN DE AGUA FRÍA</b> .....	45
<b>3.1</b> Generalidades.....	45
<b>3.2</b> Componentes.....	45
<b>3.2.1</b> Bombas.....	45
<b>3.2.2</b> Bombas Centrífugas.....	48
<b>3.2.3</b> Curvas Características De Las Bombas Centrífugas.....	65
<b>3.2.4</b> Rendimiento De Las Bombas Centrífugas.....	77



3.2.5 Red De Distribución De Agua.....	87
3.2.6 Accesorios Varios.....	105
3.2.7 Unidad De Enfriamiento.....	108
3.2.8 Sistemas Fan-coils (Sistemas de Ventilconvectores).....	114
<b>4 BASES TEÓRICAS PARA REALIZAR LA EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA.....</b>	<b>115</b>
4.1 Curva Característica De La Bomba.....	116
4.2 Curva de Operación del Sistema.....	117
4.3 Método de Medición de Pérdida de Presión Global Mediante el uso de Manómetros.....	121
4.4 Cálculo De Pérdidas En Tuberías.....	122
4.5 Cálculo De Pérdidas De Carga En Accesorios.....	123
4.6 Construcción De La Curva Del Sistema.....	124
4.7 Puntos De Operación De La Bomba.....	126
4.8 Métodos De Regulación.....	128
4.9 Construir La Curva Del Sistema A Partir Del Punto De Operación De La Bomba....	131
4.10 Determinar El Gasto De Operación Promedio.....	132
4.11 Método Alternativo Para Determinar La Eficiencia De La Bomba.....	133
4.12 Leyes De Semejanza O Afinidad.....	135
4.13 Determinación Del Consumo De Energía.....	145
4.14 Determinación De Los Costos de Operación.....	145
4.15 Determinación De Los Ahorros De Energía.....	147
4.15.1 Ahorro Por Disminución De La Demanda.....	147

4.15.2 Ahorro De Energía Por Disminución En El Consumo.....	147
4.16 Determinación De Los Ahorros Económicos.....	148
4.17 Determinación De La Rentabilidad Financiera.....	150
4.17.1 Periodo Simple De Recuperación.....	150
4.17.2 Valor Presente Neto (VPN).....	150
4.17.3 Tasa Interna de Retorno (TIR).....	152
<b>5 CÁLCULOS Y ANÁLISIS DEL SISTEMA.....</b>	<b>154</b>
5.1 Generalidades.....	154
5.2 Descripción Y Cálculos Del Sistema Real.....	156
5.3 Análisis Del Sistema Mediante El Software Flow & Fluids.....	231
5.4 Análisis De Las Pérdidas Totales Del Sistema Por Equipos.....	258
5.5 Análisis De Consumo Dentro Del Sistema.....	261
5.5.1 Consumo Del Equipo (Conjunto Bomba-Motor).....	261
5.5.2 Consumo Estimado Para El Sistema Con Un Incremento De Eficiencia.....	265
5.6 Estimación De Un Nuevo Trazado De Tuberías En Función De La Constante R.....	271
<b>6 POSIBLES MEDIDAS PARA OPTIMIZAR EL SISTEMA.....</b>	<b>276</b>
6.1 Principales Vías De Ahorro Para La Evaluación De Un Sistema De Este Tipo.....	276
6.1.1 Selección De Bombas.....	277
6.1.2 Ahorros Energéticos En Sistemas De Agua.....	277
6.1.3 Bombas Con Control De Velocidad.....	278
6.1.4 Selección De Válvulas.....	280
6.1.5 Reducción De Costos Reales.....	281
6.1.6 Soluciones Integrales De Ahorro.....	281

<b>6.1.7</b>	Diseño Para Instalaciones Energéticamente Eficientes.....	282
<b>6.1.8</b>	Ahorros Posibles En Un Sistema De Aire Acondicionado.....	282
<b>6.1.9</b>	Recomendaciones Importantes Para Ahorro En Equipos De A/A.....	286
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	288
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	291
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	293
<b>10</b>	<b>ANEXOS</b> .....	297

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1:</b> Grupo Electrónico Marino C4.4 De Caterpillar <sup>®</sup> .....	37
<b>Figura 2:</b> Distribución De Consumos Eléctricos En El Buque Según Sistemas Receptores.....	42
<b>Figura 3:</b> Tipos De Bombas.....	47
<b>Figura 4:</b> Bomba Centrífuga, Disposición, Esquema Y Partes.....	50
<b>Figura 5:</b> Tipos De Impulsores.....	52
<b>Figura 6:</b> Impulsores Abiertos y Semiabiertos.....	52
<b>Figura 7:</b> Impulsores Cerrados.....	53
<b>Figura 8:</b> Diferentes Términos De Presión.....	58
<b>Figura 9:</b> Relación Entre Potencias Y Rendimientos.....	62
<b>Figura 10:</b> Características De Las Curvas Típicas De Las Bombas Centrífugas.....	66
<b>Figura 11:</b> Curvas Características De La Bomba.....	67
<b>Figura 12:</b> Punto De Funcionamiento.....	72
<b>Figura 13:</b> Situación Del Punto De Funcionamiento.....	73
<b>Figura 14:</b> Montaje Típico De Una Bomba.....	78
<b>Figura 15:</b> Sistema Inverso De Retorno.....	90
<b>Figura 16:</b> Colectores De Retorno Inverso Con Montantes (Tubos Ascendentes) De Retorno Directo.....	90
<b>Figura 17:</b> Sistema De Tubería De Agua Con Retorno Directo.....	92

<b>Figura 18:</b> Pérdidas Por Rozamiento En Los Sistemas Cerrados De Tuberías (Tubo De Acero).....	95
<b>Figura 19:</b> Pérdidas Por Rozamiento En Los Sistemas Abiertos De Tuberías (Tubo De Acero).....	96
<b>Figura 20:</b> Pérdidas Por Rozamiento En Los Sistemas Abiertos Y Cerrados De Tuberías (Tubo De Cobre).....	97
<b>Figura 21:</b> Sistemas Fan-coils (Sistemas de Ventilconvectores).....	114
<b>Figura 22:</b> Curva Que Relaciona Las Variables Que Intervienen En El Funcionamiento De La Bomba.....	117
<b>Figura 23:</b> Sistemas De Bombeo Con Succión Positiva.....	119
<b>Figura 24:</b> Sistemas De Bombeo Con Succión Negativa.....	120
<b>Figura 25:</b> Determinación de Pérdida de Presión Mediante Puntos de Medición.....	121
<b>Figura 26:</b> Curva de Pérdidas de Fricción del Sistema.....	124
<b>Figura 27:</b> Curva De Operación Del Sistema De Bombeo.....	125
<b>Figura 28:</b> Punto De Operación Para Gasto Constante.....	126
<b>Figura 29:</b> Punto de Operación para Gasto Variable.....	127
<b>Figura 30:</b> Regulación de Gasto Mediante Estrangulación.....	129
<b>Figura 31:</b> Regulación De Gasto Mediante Recirculación.....	130
<b>Figura 32:</b> Construcción De La Curva Del Sistema A Partir Del Punto De Operación De La Bomba.....	132
<b>Figura 33:</b> Uso Incorrecto De Las Leyes De Afinidad.....	137
<b>Figura 34:</b> Uso Correcto De Las Leyes De Afinidad.....	139

<b>Figura 35:</b> Control Por Frecuencia Variable.....	141
<b>Figura 36:</b> Curva Bomba A Otra Velocidad – 1.....	142
<b>Figura 37:</b> Determinación de la Tasa Interna de Retorno.....	153
<b>Figura 38:</b> Vista Lateral De La Nodriza VI.....	159
<b>Figura 39:</b> Cuarto De Máquinas Auxiliares De Proa (Chiller Marino).....	160
<b>Figura 40:</b> Sistema De Circulación De Agua Fría Montado En La Nodriza VI.....	162
<b>Figura 41:</b> Bomba Centrífuga De 1750 Rpm.....	165
<b>Figura 42:</b> Capacities – Water Flow Vs. Presusure Drop (Flanged End Y- Strainers).....	172
<b>Figura 43:</b> Primer Tramo Común De La Trayectoria General.....	175
<b>Figura 44:</b> Segundo Tramo Común De La Trayectoria General.....	176
<b>Figura 45:</b> Tercer Tramo Común De La Trayectoria General.....	176
<b>Figura 46:</b> Trayectoria 1 (1-1).....	178
<b>Figura 47:</b> Trayectoria 2 (1-2).....	179
<b>Figura 48:</b> Trayectoria 3 (2-1).....	180
<b>Figura 49:</b> Trayectoria 4 (2-2).....	181
<b>Figura 50:</b> Trayectoria 5 (3-1).....	182
<b>Figura 51:</b> Trayectoria 6 (3-2).....	183
<b>Figura 52:</b> Trayectoria 7 (3-3).....	184
<b>Figura 53:</b> Trayectoria 8 (4-1).....	185
<b>Figura 54:</b> Trayectoria 9 (4-2).....	186
<b>Figura 55:</b> Trayectoria 10 (4-3).....	187
<b>Figura 56:</b> Trayectoria 11 (4-4).....	188

<b>Figura 57:</b> Trayectoria 12 (5-1).....	189
<b>Figura 58:</b> Trayectoria 13 (5-2).....	190
<b>Figura 59:</b> Trayectoria 14 (5-3).....	191
<b>Figura 60:</b> Trayectoria 15 (6-1).....	192
<b>Figura 61:</b> Trayectoria 16 (7-1).....	193
<b>Figura 62:</b> Trayectoria 17 (8-1).....	194
<b>Figura 63:</b> Trayectoria 18 (9-1).....	195
<b>Figura 64:</b> Trayectoria 19 (10-1).....	196
<b>Figura 65:</b> Trayectoria 20 (10-2).....	197
<b>Figura 66:</b> Trayectoria 21 (11-1).....	198
<b>Figura 67:</b> Diagrama De Moody.....	214
<b>Figura 68:</b> Recorrido Con Mayores Pérdidas – Trayectoria 16.....	223
<b>Figura 69:</b> Curva Del Sistema Específico “Nodrizas Fluvial VI”.....	225
<b>Figura 70:</b> Curva De La Bomba Proporcionada Por El Fabricante.....	227
<b>Figura 71:</b> Curva Bomba - Sistema Que Muestra El Punto De Operación.....	228
<b>Figura 72:</b> Punto De Operación Cruzado Con Las Curvas De Eficiencias Según Curva Del Fabricante.....	230
<b>Figura 73:</b> Entorno De Flow & Fluids.....	231
<b>Figura 74:</b> Especificaciones Para Los Materiales Utilizados En El Sistema.....	232
<b>Figura 75:</b> Especificaciones Del Fluido De Trabajo (Agua).....	233
<b>Figura 76:</b> Vista De La Barra De Herramientas De Flow & Fluids.....	233
<b>Figura 77:</b> Ventana Para El Ingreso De Datos Para Las Líneas De Tubería.....	234
<b>Figura 78:</b> Ventana Para El Ingreso De Válvulas Y Accesorios Del Sistema.....	235

<b>Figura 79:</b> Ventana En Donde Se Registran Los Datos Característicos De La Bomba....	236
<b>Figura 80:</b> Forma En Que Se Visualizan Las Bifurcaciones Del Sistema.....	237
<b>Figura 81:</b> Válvula Reguladora De Caudal En Estado Completamente Abierta.....	238
<b>Figura 82:</b> Vista Del Sistema Completo Listo Para Correrse Y Obtener Los Datos.....	240
<b>Figura 83:</b> Sistema Corriendo Y Arrojando Los Valores De Caudal Que Se Requieren.....	241
<b>Figura 84:</b> Modelo Completo Nodriz VI Con Todas Las Especificaciones Reales Del Sistema Para Simular.....	242
<b>Figura 85:</b> Modelo De La Nodriz VI Completo Y Corriendo, Arrojando Los Datos De Caudal Respectivo.....	243
<b>Figura 86:</b> Curva De La Bomba Según Datos Característicos Ingresados Al Software.....	258
<b>Figura 87:</b> Diagrama De Pareto De Pérdidas Del Sistema.....	260
<b>Figura 88:</b> Curva Del Sistema Actual Contra Curva Del Sistema Estimado.....	272



## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1:</b> Distribución De Consumos Eléctricos En El Buque Según Sistemas Receptores.....	42
<b>Tabla 2:</b> Velocidad Recomendable Del Agua Según Sus Aplicaciones.....	99
<b>Tabla 3:</b> Máxima Velocidad Aconsejable Del Agua Para Reducir La Erosión Al Mínimo.....	100
<b>Tabla 4:</b> Pérdida De Carga De Los Codos Angulares Expresada En Longitud Equivalente De Tubo (m).....	102
<b>Tabla 5:</b> Pérdida De Carga En Las Válvulas Expresadas En Longitud Equivalente De Tubo En Metros.....	103
<b>Tabla 6:</b> Pérdidas De Carga De Codos Y –T- Expresadas En Longitud Equivalente De Tubo En Metros.....	104
<b>Tabla 7:</b> Pérdidas De Carga De Los Cambios De Sección Expresados En Longitud Equivalente De Tubo En Metros.....	105
<b>Tabla 8:</b> Distribución Del Sistema De A/A –Modulo 501.....	157
<b>Tabla 9:</b> Distribución Del Sistema De A/A –Modulo 500.....	157
<b>Tabla 10:</b> Distribución Del Sistema De A/A –Modulo 101.....	158
<b>Tabla 11:</b> Distribución Del Sistema De A/A –Modulo 102.....	158
<b>Tabla 12:</b> Distribución Del Sistema De A/A –Modulo 103.....	159
<b>Tabla 13:</b> Trayectorias Del Sistema Para Su Análisis.....	163
<b>Tabla 14:</b> Datos Del Valor De Cv. Para Una Válvula De Ajuste De Flujo De ¾”.....	171
<b>Tabla 15:</b> Caída De Presión Para Los Equipos Y Accesorios Varios.....	173

<b>Tabla 16:</b> Valores De Los Diámetros Usados Con Sus Áreas Respectivas.....	200
<b>Tabla 17:</b> Valores De Rugosidad Y Relaciones e/d Para Cobre Y Acero.....	201
<b>Tabla 18:</b> Valores Viscosidad y Densidad Para El Agua.....	201
<b>Tabla 19:</b> Fracciones De Flujo Para Cada Uno De Los Caudales Del Sistema.....	219
<b>Tabla 20:</b> Ecuaciones De Las Pérdidas De Carga Total Por Trayectorias.....	220
<b>Tabla 21:</b> Valores De H (Pérdidas En Metros) Por Trayectorias.....	222
<b>Tabla 22:</b> Valores De Q Y H Para Graficar La Curva Del Sistema.....	224
<b>Tabla 23:</b> Valores De Q Y H Para Graficar La Curva Característica De La Bomba.....	226
<b>Tabla 24:</b> Registro De Datos Y Unidades Básicas Para Trabajar En El Software.....	245
<b>Tabla 25:</b> Registro De Datos Y Especificaciones Que Describen Las Tuberías Del Sistema.....	247
<b>Tabla 26:</b> Datos Y Especificaciones De Las Tuberías Del Sistema Con Respecto A Las HL.....	249
<b>Tabla 27:</b> Valores De Reynolds Para Las Diferentes Tuberías Del Sistema.....	250
<b>Tabla 28:</b> Valores Respetivos De K Para Cada Tipo De Accesorio.....	254
<b>Tabla 29:</b> Datos Arrojadados Para Los Tanques, Válvulas Y Algunos Nodos Del Sistema.....	255
<b>Tabla 30:</b> Valores Registrados Para Las Demandas Del Sistema Indicando Sentido Del Flujo, Presiones, Flujo Y Elevación.....	256
<b>Tabla 31:</b> Datos Característicos De La Bomba IHM Modelo 3x18 Utilizada En El Sistema.....	257
<b>Tabla 32:</b> Especificaciones Y Características De Los Materiales Utilizados En Las Tuberías.....	257

**Tabla 33:** Especificaciones Y Características Del Fluido Del Sistema.....257

**Tabla 34:** Pérdidas Totales Del Sistema Por Equipos.....259

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO A:</b> Plano Esquemático Del Sistema De Aire Acondicionado Del Buque Nodriza Fluvial VI.....	297
<b>ANEXO B:</b> Modelo Tridimensional Del Sistema De Circulación De Agua Fría Montado En La Nodriza Fluvial VI.....	298
<b>ANEXO C:</b> Modelo Tridimensional Del Sistema Mostrando Los Sentidos De Los Caudales Para Cada Nodo.....	299
<b>ANEXO D:</b> Listado De Los Valores De K Respectivos Para Cada Uno De Los Accesorios Presentes En El Sistema.....	300
<b>ANEXO E:</b> Ver CD Incluido Con Los Respectivos Cálculos Realizados En El Programa De Excel.....	306
<b>ANEXO F:</b> Modelo Tridimensional De La Trayectoria Con Mayores Pérdidas En El Sistema.....	307

## **RESUMEN**

### **Título del Trabajo**

Evaluación Y Diagnóstico Para la Optimización Energética Del Sistema De Circulación De Agua Fría En Las Embarcaciones Tipo Nodrizas Fluviales Construidas Por Cotecmar.

### **Autores**

Karol Bibiana León Pérez

Juan Camilo Cruz Rodríguez

### **Objetivo general**

Realizar un diagnóstico energético del conjunto “bomba-sistema” del circuito de circulación de agua fría para los equipos de aire acondicionado del buque, con el fin de evaluar las pérdidas producidas en el sistema y proponer medidas de ahorro que reduzcan el consumo de energía y a su vez se vean reflejados positivamente en un ahorro económico y un mejor trato con el medio ambiente.

### **Metodología**

En la presente tesis de grado se realizó una investigación detallada de temas referentes al ahorro de energía y al uso eficiente de la misma con el fin de tener bases sólidas que permitieran identificar oportunidades concretas de disminuir el consumo de energía en el buque a partir del estudio y evaluación del sistema de circulación de agua fría, lo que se

hizo por medio de una descripción detallada del conjunto “bomba-sistema” montado actualmente en la Nodriza.

Uno de los aspectos que hace más complejo el análisis del tipo de sistemas montados en los buques tipo Nodriza Fluvial es el hecho de ser un circuito de tipo mixto o ramificado, ya que generalmente se encuentran sistemas de tipo serie y paralelo mucho más simples que los descritos para este sistema de circulación de agua fría, que al ser tan extenso y del tipo más complejo requiere de consideraciones especiales que enmarcan un alto grado de dificultad, y precisión para su estudio, además de un procedimiento específico descrito claramente en la literatura referente a la mecánica de fluidos y los sistemas de tuberías, con lo que se logró elaborar el listado de pasos a seguir para el estudio de tuberías ramificadas de este tipo.

Inicialmente se realizó la descripción del circuito hidráulico, por lo que después se hizo necesario efectuar los cálculos respectivos con base en la teoría de la mecánica de fluidos para determinar las pérdidas del sistema y las condiciones de operación del mismo, evaluando trayectoria por trayectoria y recalculando los datos obtenidos durante el diseño del sistema se obtuvo un recorrido crítico que produjo mayores pérdidas y que fue el centro del presente análisis, ya que es la trayectoria que presente más pérdidas la que determina en últimas la selección de la bomba. De esta manera, se obtuvo valores de caudal, factores de fricción, números de Reynolds, velocidades del fluido y otros datos que hicieron posible la elaboración de la curva del sistema para contraponerla con la curva de la bomba, proporcionada por el fabricante, y obtener así el punto de operación del sistema,

reevaluando a su vez el punto de mayor eficiencia en que podría tabajar el conjunto, comprobando todo este procedimiento mediante la simulación del sistema en el Software de fluidos “Flow & Fluids” obteniendo a partir de este análisis medidas de ahorro en el consumo y oportunidades para llegar a una posible mejora en la eficiencia de los equipos montados en la embarcación, ya sea por modificaciones en ellos y en su operación o por la sustitución de los mismos por otros más eficientes.

## **Resultados**

A partir del análisis de los resultados del trabajo realizado se pudo determinar que en la embarcación tipo “Nodriza Fluvial VI” existen oportunidades concretas de ahorro de energía en el sistema de circulación del agua fría para el acondicionamiento del aire que permitan disminuir el consumo de combustible, generen ahorros económicos y sobre todo que produzcan un trato amable para con el tan dañado medio ambiente.

Los resultados específicos más destacables de esta tesis son:

- ? Compendio bibliográfico realizado sobre bombas, sistemas de tuberías y cálculo de pérdidas en sistemas hidráulicos.
- ? Metodología específica para el cálculo de las pérdidas del sistema real instalado por su complejidad al no ser exactamente un sistema ni serie ni paralelo.
- ? Programa en Excel para el cálculo de la carga del sistema, aplicado a cada una de las trayectorias seleccionadas y evaluadas en el estudio.

- ? Ecuación de pérdida de carga del sistema representativo y de las trayectorias que conforman el sistema.
- ? Curva característica del sistema.
- ? Determinación del punto de operación con todos sus parámetros respectivos que incluye: *eficiencia, pérdida de carga total, gasto, potencia y carga neta de succión positiva (NPSH)*.
- ? Distribución de las pérdidas en un diagrama de pareto.
- ? El 68% de las pérdidas de energía se concentran en pérdidas por longitud y accesorios.
- ? El 22% de las pérdidas de energía se concentran en los fan coils del sistema de acondicionamiento de aire de la embarcación.
- ? El ahorro estimado por el hecho de llevar la bomba de un rendimiento del 62% solo hasta un 68% es de:

***kW: 0,063 kW***

***Combustible: 42,179 galones/año***

***Pesos: \$197.385,637***

- ? Se determinó por estimación que un nuevo trazado de la tubería del sistema de circulación de agua fría con una curva que reduzca el valor de ***R*** (que abarca tramos rectos, accesorios y fan coils) ( $H=RQ^2$ ) aproximadamente en un 40% logra un aumento del rendimiento actual de la bomba hasta un 68%.
- ? Los resultados del cálculo de la potencia demandada por la bomba IHM modelo 3x18 es de 1 HP y los datos de placa son de 2 HP, esto nos puede indicar que la



bomba puede estar sobredimensionada, lo cual es necesario validar en estudios posteriores.

? Como resultado se tienen una serie de recomendaciones importantes:

- 1) Estudiar posibles cambios en los fan coils para disminuir pérdidas.
- 2) Reevaluar el trazado del sistema de tuberías, incluyendo el ruteado con sus respectivos accesorios y un posible cambio del material.
- 3) Cambio desarrollo y/o selección de la bomba de mejor rendimiento y disminución del consumo de energía.

**Asesor**

PhD. Bienvenido Sarria López

## INTRODUCCIÓN

Sin la energía, que es considerada como la sangre de la vida moderna, el desarrollo económico y social de todos los pueblos no podría suceder de manera simple y sencilla, sin embargo, este recurso viene dado por un precio, un precio que es monetario y también ambiental.

La amenaza del agotamiento de las reservas energéticas es sin duda una realidad mundial que pone de manifiesto la necesidad de impulsar investigaciones y leyes para la detección y utilización de fuentes renovables de energía que permitan enfrentar este fenómeno y contribuyan de alguna manera a la solución de problemas ambientales como la contaminación y el efecto invernadero que surgen del uso de combustibles fósiles [1], por otro lado también se hace necesario estudiar las posibilidades de optimizar los sistemas energéticos y utilizar de la manera más eficiente y racional los equipos y recursos que están a disposición ya que hoy por hoy el compromiso con la mejor gestión de la energía debe ser no sólo un compromiso de las industrias, sino también de los gobiernos, las empresas generadoras de energía, y los centros de investigación y estudios, cómo divulgadores y concientizadores de una nueva cultura que permita una visión renovada del uso de la energía.

Las unidades tipo nodriza fluvial son buques diseñados y construidos por el astillero de COTECMAR en la ciudad de Cartagena de Indias y utilizados por la Armada Nacional para la vigilancia y control del orden publico a lo largo y ancho de los ríos del país. Tomando

como referencia el estudio realizado por el Capitán de Corbeta Ricardo Lugo Villalba se puede establecer que en la actualidad, el diseño y/o selección de los elementos que conforman los sistemas de aire acondicionado, más específicamente el sistema de circulación de agua fría, se ha realizado con base en métodos tradicionales y sin los procedimientos recomendados por la cultura del uso eficiente de la energía, además estos sistemas representan un alto porcentaje del consumo eléctrico total de la embarcación, por lo que los ahorros alcanzados repercutirán de manera considerable en el análisis energético y económico del buque comprobando la existencia de un potencial de ahorro gigantesco mediante el recalcu de los sistemas que en la actualidad funcionan.

Es así como cabe realizar una investigación de los sistema de mayor consumo de energía en el buque, estudiando los impactos y riesgos sobre la tripulación y el medio ambiente en las embarcaciones tipo nodriza fluvial con el propósito de alcanzar un uso racional y eficiente de la energía, minimizando el impacto ambiental sin afectar la maniobrabilidad y la calidad de vida de la tripulación, con el fin de orientar a la COTECMAR hacia el diseño de embarcaciones con mayor eficiencia energética, partiendo de una base investigativa y de innovación permanente, que satisfagan las necesidades de la Armada Nacional, y del mercado nacional e internacional conduciendo a una excelente calidad en el servicio prestado por la corporación.

# 1 AHORRO DE ENERGÍA

## 1.1 Generalidades

Hoy cuando el mundo atraviesa una nueva y fuerte tendencia al aumento en el precio de los combustibles, y además se incrementan los niveles de contaminación, se hace nuevamente menester estudiar, analizar e implementar eficazmente un sistema que esté plenamente comprometido con la detección, prevención y eliminación de los desperdicios y que permita lograr un uso más productivo de la energía.

Consumir energía es sinónimo de actividad, de transformación y de progreso, siempre que ese consumo esté ajustado a nuestras necesidades y trate de aprovechar al máximo las posibilidades contenidas en la energía.

Desde las necesidades más básicas y primitivas, a las más modernas y sofisticadas, la mejora de las condiciones de vida de los hombres o de su nivel de bienestar han exigido siempre disponer de un excedente de energía que pudiese ser consumido. El consumo de energía, es por tanto sinónimo de progreso, de aumento en la infraestructura, los bienes y servicios disponibles y de la misma satisfacción de las necesidades.

Como tal un principio esencial para el ahorro de energía consiste en conocer cómo funcionan los equipos y aparatos que están a nuestra disposición, los diferentes tipos de energía que consumen y el distinto aprovechamiento que podemos obtener de ellos.

Es importantísimo tener en cuenta que la trascendencia y la complejidad que hoy en día supone el consumo de energía, hoy a su vez genera una gran posibilidad de hacer un buen

uso de esta energía y utilizarla con la mayor eficiencia, para sacar el mejor provecho de todos los recursos que poseemos.[2]

## **1.2 Ahorro Y Reducción De Consumo**

El ahorro es, en cierta forma, un concepto económico que está asociado al concepto tiempo y a su vez, a la calidad de la explotación de los equipos, un equipo consume tanta energía dependiendo de la cantidad de tiempo que funcione o de cómo sea la calidad de la energía con que el equipo esté operando. Energéticamente cuesta más dinero si el equipo funciona largas jornadas, o si no se están utilizando los recursos de la manera más eficiente posible, en este sentido, el ahorro debe ser una preocupación del usuario del equipo, es decir, del consumidor energético, el cual debe tener también la adecuada sensibilidad frente a la conservación de la energía y el medio ambiente. [3]

Hay diversos métodos para llegar a un ahorro de energía y colaborar con el medio ambiente pero el método más efectivo es quemar menos combustibles fósiles y en especial, combustibles ricos en carbono como el carbón y el petróleo. Estos combustibles dan lugar a emisiones de carácter ácido y causan la lluvia ácida. De ello se desprende que la protección del medio ambiente es hoy el mayor incentivo para el ahorro de energía. [4]

Hoy por hoy se hace evidente la presencia de oportunidades de ahorro específicas para distintas aplicaciones que conlleven a la optimización de los sistemas energéticos por medio de la gestión energética, que es definida como el manejo sostenible de la energía con el mayor aprovechamiento de su disponibilidad, respecto a esto es importante tener claro que “manejo sostenible de la energía” incluye lo que corresponde a su:

? <b>Administración</b>	<b>Selección</b>
? <b>Uso</b>	<b>Organización</b>
? <b>Planeación</b>	<b>Dirección</b>
? <b>Control</b>	<b>Identificación</b>
? <b>Evaluación</b>	<b>Mantenimiento</b>
? <b>Operación</b>	<b>Estandarización</b>

En la actualidad surge la necesidad de evaluar que oportunidades generarían cambios positivos en cuanto al uso racional y eficiente de la energía a nivel económico y ambiental, y es aplicando los conceptos de la gestión energética que se hace posible llegar a transformaciones precisas a la hora de diseñar, seleccionar y operar equipos y sistemas energéticos, algunas de las medidas que todo usuario debería buscar con el fin de conseguir grandes beneficios en cuanto a consumo son:

- ? Buenas prácticas de operación
- ? Buen estado técnico de equipos
- ? Mantenimiento dirigido a la eficiencia
- ? Planeación energética
- ? Planeación productiva teniendo en cuenta consumos energéticos
- ? Medición y control de indicadores de eficiencia
- ? Control de los consumos energéticos no asociados a la producción
- ? Racionalización de procesos productivos
- ? Uso de residuos energéticos

- ? Control y optimización de los regímenes de operación
- ? Estandarización de procesos
- ? Reducción de reprocesos
- ? Cambio de fuentes energéticas
- ? Acomodos de demandas
- ? Acercamiento de la producción energética a la demanda en el tiempo
- ? Capacitación y motivación del personal clave
- ? Paso de operación reactiva a proactiva
- ? Vigilancia tecnológica

Es de esta manera como muchos procesos deben cambiar para así obtener mejores resultados pero con una reducción en el consumo de energía y un mejor trato con el medio ambiente, de esta manera se hace indispensable invertir en la adecuación de medidas de ahorro que permitan ajustar desde el diseño cada uno de los sistemas para los servicios energéticos y los sistemas de conversión de energía. [5]

### **1.3 Métodos Para Un Ahorro De Energía Eficaz [4]**

El ahorro de energía mediante el aumento de la eficacia en su manipulación se puede lograr, por lo que respecta a la parte del suministro, a través de avances tecnológicos en la producción de electricidad, mejora de los procesos en las refinerías y otros. En cambio, por lo que respecta a la parte de la demanda (la energía empleada para la climatización de instalaciones, aparatos eléctricos, iluminación etc.), durante la explotación de los equipos y

el uso de la energía misma, existen múltiples oportunidades para el ahorro en relación con la parte del suministro, existiendo un margen amplio para su mejora.

El ahorro de electricidad se puede conseguir mediante sistemas avanzados de control de potencia, la instalación de motores eléctricos modernos para ventiladores, bombas, mecanismos de transmisión etc., y la instalación de equipos de iluminación de alta eficacia.

La conservación de la energía sólo se puede conseguir si se introduce un plan de gestión de la energía con un seguimiento riguroso y metas de progreso.

En la actualidad existen principales áreas de oportunidad para el ahorro y la reducción de los costos energéticos en instalaciones industriales y de servicio, algunas de las más comunes son: [6]

### **Sistemas De Suministro Y Accionamientos Eléctricos**

- ? Contratación de tarifa eléctrica
- ? Control de la demanda máxima y del consumo de energía eléctrica
- ? Mejora del factor de potencia
- ? Eliminación de motores eléctricos y transformadores trabajando en vacío
- ? Selección adecuada de la potencia de los motores y transformadores eléctricos.
- ? Uso de motores y de transformadores de alta eficiencia.
- ? Aplicación de accionamientos eficientes.
- ? Operación económica de transformadores.



### **Sistemas De Generación Y Uso Del Vapor**

- ? Selección adecuada de la capacidad de las calderas. Administración de las cargas en calderas que operan en paralelo.
- ? Preparación adecuada del combustible.
- ? Ajuste de la combustión.
- ? Recuperación de calor de gases de salida.
- ? Control adecuado del régimen químico.
- ? Control automático de las purgas. Recuperación de calor de las purgas.
- ? Mantenimiento de sistema de combustión y superficies de calentamiento.
- ? Selección y ajuste de la presión de vapor en las calderas, líneas de distribución y equipos de uso final.
- ? Aislamiento de tuberías y equipos.
- ? Trampas de vapor. Selección adecuada. Programa de revisión y mantenimiento de trampas.
- ? Recuperación de condensado.

### **Sistemas De Aire Comprimido**

- ? Evaluación correcta de las necesidades de aire comprimido
- ? Uso apropiado del aire comprimido
- ? Diseño adecuado del sistema. Reducción de la caída de presión.
- ? Control de la presión del sistema.
- ? Regulación de la capacidad de producción de aire comprimido.

- ? Reducción de las fugas.
- ? Recuperación del calor de compresión.
- ? Mantenimiento adecuado del sistema.
- ? Realización de auditorías energéticas.

### **Sistemas De Bombeo Y Ventilación**

- ? Diseño adecuado del sistema
- ? Selección de las bombas y ventiladores
- ? Evitar las bombas y ventiladores sobredimensionados.
- ? Recorte o cambio de impelentes.
- ? Sistemas con bombas múltiples.
- ? Bombas “booster”.
- ? Mantenimiento adecuado.
- ? Cambio de velocidad de la bomba.
- ? Accionamientos de velocidad variable.
- ? Métodos de control de flujo en ventiladores más eficientes: alabes guías en la succión, reducción de la velocidad del ventilador o variadores de velocidad.

### **Sistemas De Refrigeración Y Climatización**

- ? Reducción de la carga frigorífica del sistema
  - o Incrementar la temperatura del agua helada en los chillers o en las cámaras al máximo admitido por los procesos y productos.
  - o Introducir los productos en las cámaras a la menor temperatura posible.

- Aprovechamiento máximo de la capacidad de las cámaras y reducción del número de cámaras en operación. Maximizar superficie común entre cámaras en operación. Seccionalización de cámaras.
- Mantener el aislamiento en buen estado y evaluar si en las condiciones actuales su espesor resulta el económico.
- Reducir las entradas de aire exterior mediante adecuada hermeticidad de las puertas, empleo de puertas automáticas, cortinas, y antecámaras, y reducir el tiempo de apertura de las puertas mediante medidas organizativas.
- Reducir la potencia de los equipos interiores. Apagado de lueces en cámaras cerradas, uso de iluminación y equipos eficientes.
- Reducción de empaques y soportes innecesarios en el almacenamiento de productos.
- Mantener condiciones de circulación del aire adecuadas dentro de las cámaras, espacios entre los productos que aseguren la circulación de aire y la uniformidad de temperatura. Mantener la velocidad del aire sobre los productos entre 2 y 7 m/s.

? Incremento de la eficiencia del sistema

- Reducción de la presión (temperatura) de condensación
- Correcta ubicación de los condensadores enfriados por aire.
- Tratamiento adecuado del agua de enfriamiento para evitar incrustaciones en las superficies de transferencia de calor de los condensadores.
- Limpieza periódica de las superficies de transferencia.
- Purga continua de los gases incondensables del sistema.

- Ampliación de la capacidad de los condensadores.
- Variar la velocidad o cantidad de ventiladores en servicio en torres de enfriamiento y condensadores evaporativos.
- Lograr un correcto funcionamiento de las torres de enfriamiento.
- Operar con la mayor presión (temperatura) en el evaporador admitida por el proceso o los productos a conservar.
- Operación económica de sistemas con múltiples compresores.
- Recuperación del calor de condensación.

? Almacenamiento de frío

- Almacenamiento de agua helada
- Almacenamiento de hielo.
- Almacenamiento de salmuera.

### **Sistemas De Cogeneración**

- ? Aplicación de sistemas de cogeneración en plantas con consumo de electricidad y calor.
- ? Aplicación de sistemas de trigeneración en plantas con consumo de electricidad, calor y frío.
- ? Venta de excedentes de energía eléctrica.

## **2 SISTEMAS CONSUMIDORES DE ENERGÍA DE UN BUQUE TIPO NODRIZA FLUVIAL**

### **2.1 Sistemas Energéticos Del Buque [7]**

Las embarcaciones tipo Nodriza Fluvial son buques de río diseñados y construidos en COTECMAR y requeridos por la Armada Nacional para mejorar la seguridad y controlar el orden público en los ríos del país; aunque su diseño permite condiciones de navegación anuales hasta de 8.000 horas, por disposiciones del propietario, en la actualidad lo hacen hasta un máximo de 2.000 horas.

Estos buques en la actualidad cuentan con una fuente única de alimentación energética que corresponde al combustible diesel, y a dos grandes sistemas de transformación de la energía, que son el de generación eléctrica y el de propulsión.



**Figura 1: Grupo Electrónico Marino C4.4 De Caterpillar®**

Para entender mejor el funcionamiento de los sistemas energéticos de la Nodriza cabe mencionar que “toda la energía química del combustible que se suministra al buque es transformada en primera instancia en energía mecánica rotacional por los motores de combustión interna que hacen parte de los dos grandes transformadores y posteriormente, en los servicios energéticos en los cuales la energía es empleada en un amplio grupo de consumidores intermedios y finales” [7] que son los que garantizan las condiciones operativas y de vivienda básicas requeridas por la tripulación y por el mismo buque.

Hoy por hoy el diseño y selección de los equipos que se necesitan para el montaje de los sistemas de estas embarcaciones se realiza haciendo uso de métodos tradicionales, en muchos casos con factores de seguridad bastante altos, y sin los procedimientos establecidos por las nuevas tendencias del uso eficiente de la energía, este hecho se ve reflejado en la existencia de un enorme potencial de disminución en el consumo de energéticos, lo que se lograría “mediante el recalcu de los sistemas que en la actualidad funcionan y la implementación de los conceptos relacionados a la eficiencia energética y uso racional de la energía”.

## **2.2 Sistemas Eléctricos [7]**

El diseño de la Nodriza Fluvial cuenta con variados equipos consumidores de electricidad que operan en los distintos servicios o regímenes de trabajo y estos son clasificados como de: carga continua, régimen temporal y carga intermitente. De la misma manera existen dos rutinas básicas de operación que son Puerto y Navegación; se considera Puerto cuando el buque llega a un muelle y apaga su sistema de propulsión y los consumidores asociados a

éste, mientras que Navegación se conoce como la actividad de desplazamiento de la embarcación a través del río o el mar.

Los sub-sistemas eléctricos más importantes que existen en el buque son los de “aire acondicionado, planta frigorífica, ventilación, contra-incendio, achique, aguas negras, aire comprimido, combustible, gasolina, potencia hidráulica, iluminación, comunicaciones, agua potable, agua de río, lavandería y cocina”.

Los componentes que hacen parte de estos sub-sistemas, están accionados en su mayoría por motores eléctricos, con potencias entre 0,2 HP monofásicos a 120 V y 25 HP trifásicos a 208 V, que poseen a su vez una serie de interruptores encargados de la protección y el accionamiento de los mismos. De igual manera, existen paneles de distribución tipo centro de control de motores localizados en zonas estratégicas para un mejor funcionamiento de los sistemas.

Debido a la alta confiabilidad del suministro eléctrico que debe poseer la embarcación, ésta cuenta con generadores diesel con las características necesarias para satisfacer la demanda de los sistemas, Sin embargo, el cubrimiento total de las necesidades eléctricas del buque, se lleva a cabo sólo con uno de los dos generadores instalados, ya que la otra unidad se emplea sólo en caso de emergencia cuando no hay disponibilidad del generador principal.

La generación de electricidad y la producción de potencia mecánica se convierten en el primer proceso importante de transformación energética en la embarcación. Del total de la

energía que ingresa a los motores a manera de combustible, sólo se aprovecha la fracción que se obtiene como energía mecánica rotacional en los ejes de salida. Esto representa que gran cantidad de la energía total que ingresa a los motores, es desaprovechada en forma de calor no útil y enviada a la atmósfera en forma de radiación y gases de combustión, que a su vez están incrementado las condiciones de contaminación y calentamiento global que aquejan hoy en día al planeta.

### **2.3 Sistemas De Aire Acondicionado Y Refrigeración**

El sistema de aire acondicionado de la embarcación está conformado en su diseño por una unidad marina para refrigerante, con una capacidad que depende de las toneladas de refrigeración obtenidas durante la etapa de los cálculos de ingeniería, además se cuenta con varias unidades tipo fan coil instaladas en el buque, que son alimentadas a través de una bomba centrífuga que impulsa el flujo de agua fría a través de la red de tubería que también hace parte del sistema.

Otro punto importante durante el diseño de los sistemas son los parámetros del confort para la climatización, ya que la comodidad de la tripulación juega un papel decisivo a la hora de seleccionar los equipos y realizar el montaje de los mismos, de esta manera se puede decir que el clima de forma simplificada, depende de cuatro parámetros objetivos:

- ? *Temperatura del aire*
- ? *Radiación de las superficies*
- ? *Humedad relativa*



### ? *Velocidad del movimiento del aire*

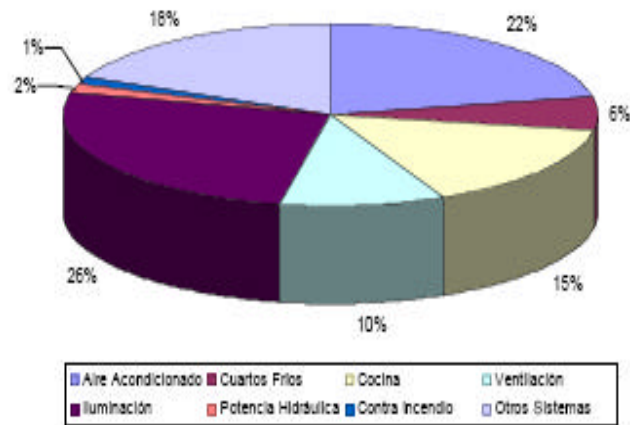
La combinación correcta entre estos cuatro factores (y no solo entre temperatura y humedad del aire) crea las condiciones de confort humano que pueden establecerse con temperaturas de aire entre 15 y casi 30 °C. No obstante, hablar de clima es también hablar de la forma que cada uno de nosotros lo percibe, que varía de cultura y hasta de persona en persona. Una climatización bien resuelta debería permitir la regulación de los cuatro factores objetivos y además disponer de suficiente flexibilidad (regulación, confort, sectorización, etc.) como para adaptarse a distintos usuarios. [8]

#### **2.4 Distribución Del Consumo Energético Del Buque [7]**

A partir de la toma de datos y las lecturas que se registran en campo y según las horas promedio de operación de cada sistema, se identifican los equipos que demandan más energía de la total requerida por el buque, aunque es claro establecer que los datos de los consumos son variables dependiendo de los diferentes estados en que se encuentre la embarcación ya sea puerto, navegación, combate, maniobra o emergencia, sin duda los más importantes son puerto y navegación en las que se invierte en promedio 8 y 4 meses al año respectivamente con respecto a los otros estados que usualmente tienen corta duración

Según la información recolectada sobre los tiempos, los horarios y las frecuencias de uso que tienen los diferentes sistemas durante la rutina de puerto debido a la operación típica de los consumidores, se tomó como referencia La Figura 2, la cual organiza varios grupos de

consumidores comunes en función de las demandas promedio registradas en cada una de las rutinas o estados mencionados.



**Figura 2: Distribución De Consumos Eléctricos En El Buque Según Sistemas Receptores. [7]**

SISTEMAS DEL BUQUE	PORCENTAJE DE CONSUMO
Aire Acondicionado	22 %
Iluminación	26 %
Cuartos Fríos	6 %
Potencia Hidráulica	2 %
Cocina	15 %
Contra Incendio	1 %
Ventilación	10 %
Otros Sistemas	18 %

**Tabla 1: Distribución De Consumos Eléctricos En El Buque Según Sistemas Receptores. [7]**

Es aquí donde se hace evidente que los sistemas de aire acondicionado y refrigeración son los consumidores de mayor importancia en función a su demanda, su consumo y su rutina de operación, por tal motivo en estos sistemas existe una oportunidad potencial de ahorro debido a la gran incidencia que tienen dentro del consumo total del buque, es por esto que el estudio energético del sistema de circulación de agua fría se convierte en un punto de gran interés a la hora de hablar de optimizaciones energéticas de la embarcación.

## **2.5 Eficiencia Energética De Los Sistemas De Climatización**

Todo sistema de climatización consume energía, ya sea ésta del tipo no renovable (la mayoría de los casos) o renovable por lo que es clave tener presente que cuanto más energía necesitamos para alcanzar y mantener las condiciones de confort en una instalación el sistema tendrá mayor impacto tanto energético como ambiental.

El consumo de energía de un sistema de climatización depende, dados un clima y una condiciones de sitio determinados, de los siguientes parámetros:

- ? Diseño de la instalación considerado en su orientación, forma, materiales tipo y dimensión de huecos y carpinterías, etc.
- ? Utilización de mecanismos de aislamiento e inercia térmica
- ? Tipos de infiltraciones y ventilación
- ? Usos y costumbres de los usuarios
- ? Disponibilidad de sistemas de gestión

## **2.6 Impacto Ambiental De Los Sistemas De Climatización**

Climatización es energía y energía es de cierta manera impacto ambiental. El uso de energías no renovables, aumenta el incesante desperdicio de recursos naturales que estamos agotando y que no podremos reponer jamás. Emplear energías no renovables es también enviar al aire grandes emisiones de CO<sub>2</sub>, causa principal de los cambios climáticos que sufrimos, subidas de temperaturas, deshielo, temporales, inundaciones, etc.

El consumo energético de climatización en una instalación estándar, supone el 45% de la energía y el 39% de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas totales [9]. Por tanto, es fundamental:

- ? Diseñar el sistema de climatización para satisfacer las necesidades de su máxima carga utilizando un consumo energético óptimo
- ? Utilizar el máximo posible de energías renovables.

### 3 SISTEMAS DE CIRCULACIÓN DE AGUA FRÍA

#### 3.1 Generalidades

El agua, en estado puro o con aditivos se emplea como fluido caloportador para transportar la energía térmica ya que la ventaja del agua respecto del aire está en el mayor calor que es capaz de transportar por unidad de volumen, de esta manera el correcto diseño de los sistemas de circulación de agua para la climatización cobran vital importancia a la hora de sacar el mejor provecho de sus propiedades, teniendo en cuenta aspectos como la densidad,  $\rho$ , el peso específico  $\gamma$ , la presión (absoluta, relativa, atmosférica), la altura  $H$  (geométrica, manométrica, aspiración, impulsión) y las pérdidas de carga entre otras.

#### 3.2 Componentes

##### 3.2.1 Bombas

Una necesidad muy antigua presentada al ser humano, fue la necesidad de transportar el agua de un lugar a otro, por lo que empezó a idear diversos mecanismos para su solución, iniciando así el desarrollo tecnológico en sistemas de bombeo.

Comúnmente las bombas son accionadas por motores eléctricos o por turbinas. Las bombas se incluyen en un sistema de tuberías para convertir la energía mecánica (suministrada por un mecanismo impulsor) en energía hidráulica. Esta energía permite transportar un fluido de un lugar a otro, cuando no es factible que fluya por gravedad, elevarla a cierta altura o

recircularlo en un sistema cerrado. En general el efecto de una bomba en un sistema es incrementar la energía total en una cantidad  $H$ , generando presión y velocidad en el fluido [10], en conclusión.

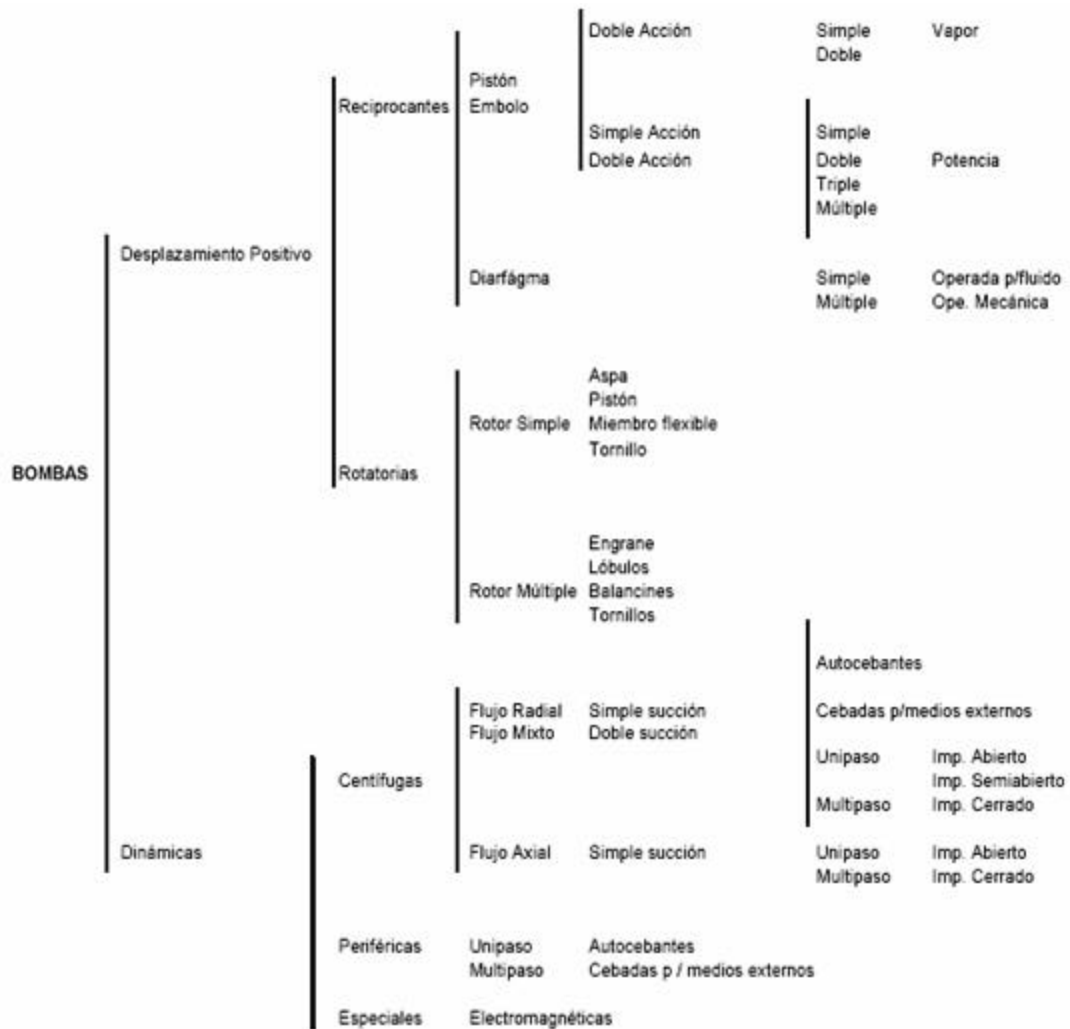
*“La misión de una bomba es provocar el movimiento del agua por una instalación, venciendo las resistencias que impone el circuito hidráulico al paso del agua, mediante la aplicación de una energía”. [11]*

Hay una diversidad de mecanismos de bombeo (bombas), cuya capacidad, diseño y aplicación cubren un amplio rango que va desde pequeñas unidades utilizadas para dosificación de cantidades mínimas, hasta bombas centrifugas que son capaces de manejar grandes volúmenes para surtir de agua a las grandes concentraciones urbanas. Su variedad de diseños cubren desde diferentes principios de operación, hasta bombas especiales para manejo de sustancias tan diversas como el agua, metales fundidos, concreto, etc., gastos diferentes y materiales de construcción.

### **? Tipos Y Aplicaciones De Las Bombas.**

Debido a la diversidad de bombas que existen, hay muchas formas de clasificarlas: por rangos de volúmenes a manejar, por fluidos a mover, etc. Sin embargo, la clasificación más general es en función de la forma en que las bombas imprimen el movimiento al fluido, separándose en dos tipos principales: las dinámicas y las de desplazamiento positivo como se aprecia en la Figura 3.

Además es importante reconocer que los factores más importantes que permiten escoger un tipo de sistema de bombeo adecuado para una determinada aplicación son la presión última, la presión de proceso, la velocidad de bombeo, el tipo de fluido a bombear, lo que indica que la eficiencia de cada bomba variará según el tipo de fluido que se esté utilizando y del sistema hidráulico.



**Figura 3: Tipos De Bombas**

La clasificación anterior, nos permite apreciar la gran diversidad de tipos que existen y si a ello agregamos materiales de construcción, tamaños diferentes para manejo de gastos y presiones sumamente variables y los diferentes líquidos a manejar, etc., entenderemos la importancia de este tipo de maquinaria.

Dentro de ésta clasificación los tipos de bombas más comúnmente utilizadas son las llamadas Centrífugas, Rotatorias y Reciprocantes, pero concentraremos éste estudio en las Bombas Centrífugas.

### **3.2.2 Bombas Centrífugas.**

Si tenemos un cubo lleno de agua atado al extremo de una cuerda, y lo ponemos a girar, el agua contenida en el cubo permanecerá ahí, pegándose al extremo del cubo con una fuerza originada por la velocidad rotacional. Esa es la fuerza centrífuga, y es la base del principio de operación de las bombas centrífugas. Imaginando un impulsor en reposo dentro del agua. Si dicho impulsor se pone a girar, el agua saldrá impulsada por entre los alabes del mismo. A medida que el agua es arrojada fuera de los alabes, más agua llega al centro del impulsor, por ser ésta la zona de menor presión; por ello es ahí donde generalmente se coloca la succión. Al continuar girando el impulsor, más agua es expulsada y más agua llega al centro del impulsor, manteniéndose así un flujo continuo, sin variaciones de presión; estas son las características principales de las bombas centrífugas. Si el impulsor se coloca dentro de un envolvente o carcasa, el flujo es dirigido hacia donde es requerido, para lograr de ésta manera el objetivo deseado. [12]



Este tipo de bombas son las empleadas en los sistemas de climatización, calefacción o refrigeración; producen un flujo continuo de agua, por otro lado el par de arranque es pequeño, lo que hace fácil su accionamiento, además tiene algunas características básicas que permiten obtener datos base para determinar el comportamiento real del sistema.

Este tipo de bombas tiene ciertas características básicas entre ellas el caudal ( $\text{m}^3/\text{h}$  o  $\text{l/h}$ ), la presión suministrada o altura  $h$ , la altura de aspiración, la potencia consumida y la presión máxima que puede soportar.

Entre sus ventajas cabe destacar que son de sencilla construcción, no requieren tolerancias estrictas, no necesitan válvulas, no tienen movimientos alternativos, son compactas y de poco peso, tienen vida prolongada y fácil mantenimiento, en cuanto a desventajas, en ocasiones presenta bajos rendimientos con caudales pequeños; y no se autocebaban.

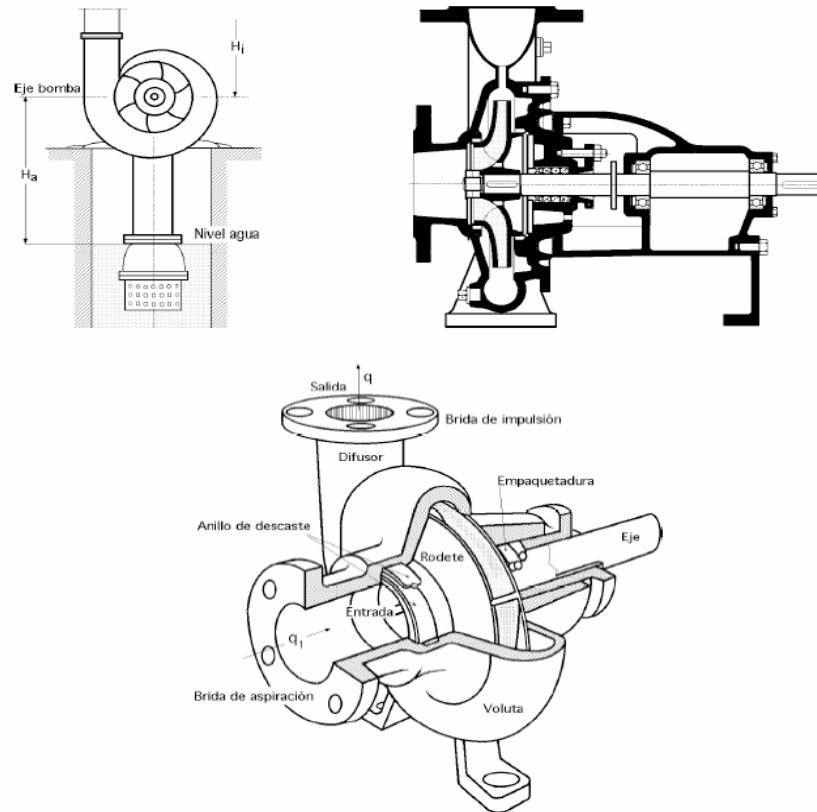
Algunas de las propiedades de estas bombas son las siguientes:

- ? Descarga de flujo continuo, sin pulsaciones.
- ? Puede bombear todo tipo de líquidos, sucios abrasivos, con sólidos, etc.
- ? Altura de succión máxima del orden de 4.5 metros de columna de agua.
- ? Rangos de presión de descarga hasta de  $150 \text{ kg/cm}^2$ .
- ? Rangos de volúmenes a manejar hasta de  $20,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ .

Partes y/o Elementos

a) *Una tubería de aspiración*, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.

b) *El impulsor o rodete*, formado por un conjunto de álabes que pueden adoptar diversas formas, según la misión a que vaya a ser destinada la bomba, los cuales giran dentro de una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor, y va unido solidariamente al eje, siendo la parte móvil de la bomba. Ver figura:



**Figura 4: Bomba Centrífuga, Disposición, Esquema Y Partes**

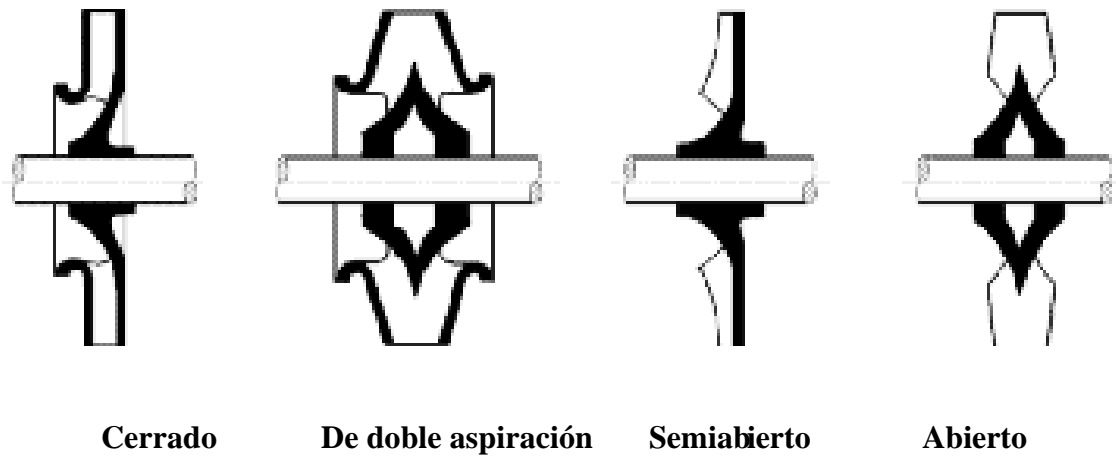
El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, pasando a radial, (en las centrífugas), o permaneciendo axial, (en las axiales), acelerándose y absorbiendo un trabajo.

Los alabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, creando una altura dinámica de forma que abandonan el rodete hacia la voluta a gran velocidad, aumentando también su presión en el impulsor según la distancia al eje. La elevación del líquido se produce por la reacción entre éste y el rodete sometido al movimiento de rotación.

El impulsor es el corazón de la bomba centrífuga, pues es el componente que imprime la velocidad al fluido; consiste en un cierto número de aspas o alabes curvados con una forma tal que permite un flujo continuo del fluido a través de ella. El diseño de los impulsores se hace en función del fluido a bombear, pudiendo ser abiertos, semicerrados y cerrados.

### **? Tipos de Impulsores**

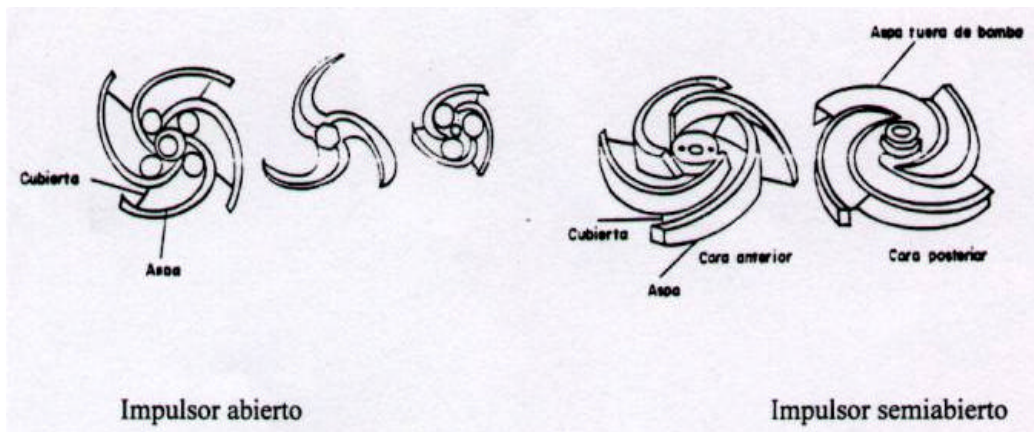
El impulsor tiene la función fundamental de comunicarle al fluido la energía. Los impulsores pueden ser abiertos, semiabiertos y cerrados, Figuras 5, 6 y 7.



**Figura 5: Tipos De Impulsores**

**Abiertos:**

Estos impulsores manejan líquidos ligeramente sucios, aunque tienen la desventaja de tener que trabajar con claros reducidos entre éste y la carcasa, Figura 6.



**Figura 6: Impulsores Abiertos y Semiabiertos**

### **Cerrados:**

Los impulsores cerrados trabajan con claros mayores entre éstos y la carcasa, ya que el líquido se lleva entre las tapas integrales que cubren ambos lados del impulsor y las aspas.

Estos impulsores son los más utilizados en aplicaciones generales en bombas de simple succión y doble succión, así como en bombas de varios pasos, Figura 7.



**Figura 7: Impulsores Cerrados**

*c) La voluta* es una parte fija que está dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, a su salida, de tal manera que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior, y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión. Su misión es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.

La voluta es también un transformador de energía, ya que frena la velocidad del líquido, transformando parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión, que crece a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta, presión que se suma a la alcanzada por el líquido en el rodete.

En algunas bombas existe, a la salida del rodete, una corona directriz de álabes que guía el líquido antes de introducirlo en la voluta.

La carcasa o voluta de una bomba centrífuga, también con la posibilidad de ser de diferentes diseños, tiene la función de hacer la conversión de energía cinética o de velocidad que se imparte al fluido por el impulsor, en energía de presión o potencial. Existen dos tipos básicos de carcasas: de tipo espiral y de tipo difusor.

En las carcasas de tipo espiral, el impulsor descarga el fluido en un área que se expande gradualmente, disminuyendo así la velocidad para irse convirtiendo en energía de presión.

La carcasa de tipo difusor, se basa en unas guías estacionarias con una trayectoria definida, que va ampliando el área desde el impulsor hacia la propia carcasa, haciendo también la conversión de energía cinética (velocidad) a energía potencial en el flujo (presión). Este tipo de carcasa es más utilizado en bombas de varias etapas.

Si la carga total (presión que se tiene que vencer con la bomba) que se requiere es mayor de la que se puede desarrollar con un solo impulsor, se puede hacer una combinación de ellos, con el flujo en serie donde el primer impulsor descarga a la succión del segundo, y así sucesivamente; en éstos casos el gasto se mantiene constante a lo largo de los distintos impulsores, pero la presión va adicionándose de impulsor en impulsor. Estas bombas se conocen como multietapas o de varias etapas.

A diferencia de otros tipos de bombas, las centrífugas, operando a velocidad constante proporcionan un flujo desde 0 hasta su valor máximo, en función de la carga, diseño propio y condiciones de succión.

***d) Una tubería de impulsión,*** instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba.

***e) Empaquetaduras y cierres mecánicos,***

Se llaman empaquetaduras o cierres, a ciertos dispositivos cuyo fin es proporcionar un cierre que reduzca la cantidad de líquido que se pierde por fugas entre una parte en movimiento y otra fija de un equipo. Ver Figura 4.

No obstante, y cuando las características del líquido que se bombea lo permitan, esa empaquetadura no está diseñada para crear una total estanqueidad, ya que estas mismas fugas sirven para lubricar las partes móviles y fijas en contacto.

Las formas más simples de empaquetaduras están formadas por varios anillos de un material flexible insertados dentro de una cámara circular que se llama caja de empaquetaduras. Un anillo circular que se mantiene mediante pernos ajustables, ejerce presión contra los anillos, apretándolos fuertemente contra el eje.

Los cierres mecánicos están sustituyendo paulatinamente a los sistemas de empaquetaduras; su principal ventaja sobre éstas radica en la reducción de las fugas o pérdidas. Su uso por ahora está limitado para bombas en las condiciones de temperatura y presión inferiores a 250°C y 35 Kg. /cm<sup>2</sup>, aún cuando su diseño y duración van mejorando continuamente.

Los anillos de las empaquetaduras se construyen con diferentes tipos de materiales según el servicio que deban prestar. Cualquier fuga de un producto que hierva por debajo de 95°C se puede perder.

Los productos pesados pueden ir a un sumidero y ser recuperados, pero la solución más económica es impedir que escapen de la máquina y se pierdan.

Estos son, en general, los componentes de una bomba centrífuga aunque existen distintos tipos y variantes. La estructura de las bombas centrífugas es análoga a la de las turbinas hidráulicas, salvo que el proceso energético es inverso; en las turbinas se aprovecha la altura de un salto hidráulico para generar una velocidad de rotación en la rueda, mientras que en las bombas centrífugas la velocidad comunicada por el rodete al líquido se



transforma, en parte, en presión, lográndose así su desplazamiento y posterior elevación.

[13]

### Características Básicas

#### ? **Capacidad (Gasto)**

Se refiere al volumen del fluido bombeado por unidad de tiempo. También llamado “gasto”, y se expresa en litros por minuto ( $l/min$ ), metros cúbicos por minuto ( $m^3/min$ ), galones por minuto ( $g/min$ ), o unidades equivalentes.

Algunos factores de conversión útiles son los siguientes:

?  $1 \text{ ft}^3/\text{seg.} = 448.8 \text{ gpm}$

?  $1'000,000 \text{ galones/día} = 694.4 \text{ gpm}$

?  $1,000 \text{ barriles por día} = 29.2 \text{ gpm}$

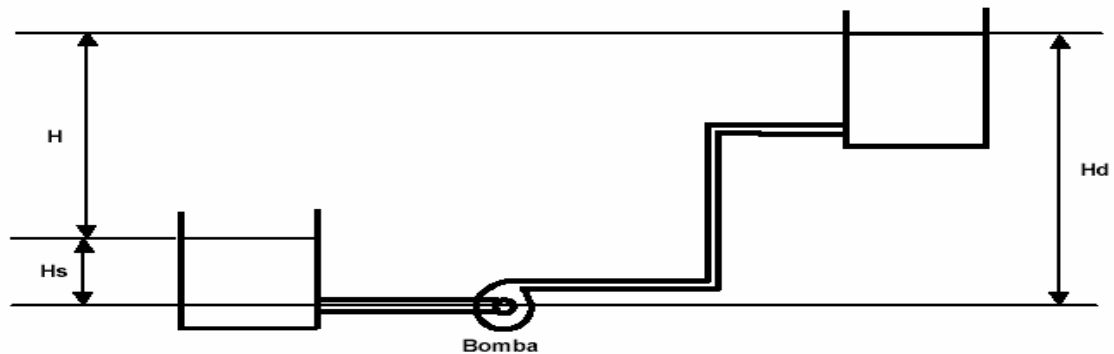
?  $\text{litro por segundo} = 15.95 \text{ gpm}$

#### ? **Presión de Descarga, Presión de Succión y Carga Total**

En un sistema típico de bombeo, se involucran tres términos diferentes de presión, que deben identificarse claramente, estos son: Presión de descarga, Presión de succión y Presión o Carga Total, de donde:

$$P_t = (P_d) + (P_s)$$

$P_s$ , puede ser negativa o positiva.



**Figura 8: Diferentes Términos De Presión**

En el arreglo típico de la anterior figura se muestra la manera de identificar los tres diferentes términos de presión, relacionados con la posición de la bomba. La presión de descarga se refiere a la altura a la cual puede ser bombeado un fluido, expresándose en unidades de longitud de columna de agua ( $m H_2O$ ,  $mm Hg$  o  $ft H_2O$ ) o en unidades de presión ( $Kg/cm^2$  o  $Psig$ ). La presión de succión se refiere a la altura desde la cual el fluido puede ser succionado por la bomba, pudiendo ser presión de succión positiva o negativa, dependiendo de la posición relativa de la bomba con el nivel el fluido. La presión total se refiere a la diferencia entre la presión de descarga y la presión de succión. En una bomba centrífuga, la carga total dinámica se expresa así:

$$H = H_d - H_s + \frac{(V_d)^2}{2g} - \frac{(V_s)^2}{2g}$$

***Hd*** = Carga a la salida o descarga de la bomba, medida en la tobera de descarga, expresada en pies de columna referida a la línea de centros de la flecha de la bomba.

***Hs*** = Carga de succión, expresada en pies de columna, también referida a la línea de centros de la flecha de la bomba.

***Vd*** = Velocidad del flujo de descarga de la bomba.

***Vs*** = Velocidad del flujo de succión de la bomba.

Los últimos dos términos representan la diferencia de energía cinética o carga de velocidad entre toberas de succión y descarga.

### ? **Carga Neta Positiva de Succión (NPSH)**

NPSH (iniciales para Net Positive Suction Head), en español conocida como la carga neta positiva de succión, se define como la lectura de presión, medida en pies o metros de columna de líquido, tomada de la boquilla de succión, referida a la línea de centro de la bomba, menos la presión de vapor del líquido correspondiente a la temperatura del líquido, más la carga de velocidad en el mismo punto. Es la carga estática que recibe la bomba en la succión menos las pérdidas en la propia tubería de succión.

$$NPSH = \frac{P_s - P_{vp}}{\rho \cdot g} + h_s + h_{fs}$$

$P_s$  = Presión de succión en pies.

$P_{vp}$  = Presión de vapor del fluido, en Psi.

$h_s$  = Carga estática en pies.

$h_{fs}$  = Pérdidas por fricción a la succión en pies.

Una bomba no puede operar adecuadamente si no tiene un mínimo de NPSH especificado, para cada diseño y condiciones de operación.

$$NPSH \geq P_{atm} / \rho - h_s - h_{fs} - \frac{V_s^2}{2g}$$

Donde  $P_{atm}$  = Presión atmosférica

$h_s$  = Carga estática en pies.

$h_{fs}$  = Pérdidas por fricción a la succión en pies.

$V_s$  = Velocidad en la succión

$g$  = Constante gravitacional

Por otra parte, existen dos NPSH. [11]

**NPSH requerido:** es una característica de la bomba.

**NPSH disponible:** es una característica del circuito de aspiración, debe superar al requerido en un orden de 0,5m.

## ? **Eficiencia**

El grado de perfección mecánico o hidráulico de una bomba es juzgado por su eficiencia bruta, definida como sigue:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Salida de la Bomba}}{\text{BHP}} = \frac{QgH}{550 * \text{BHP}} = \frac{\text{gpm} * H}{3960 * \text{BHP}}$$

Donde:

$Q$  = Capacidad o gasto en  $\text{ft}^3 / \text{seg}$ .

$g$  = Peso específico del líquido =  $62.4 \text{ lb.} / \text{ft}^3$

$BHP$  = Potencia recibida por la flecha de la bomba.

$H$  = Carga total del punto de operación para el sistema

$gpm$  = Flujo en unidades de galones por minutos

$550$  = Factor de conversión a Hp con gasto en unidades de  $\text{ft}^3 / \text{seg}$ .

$3960$  = Factor de conversión a Hp con gasto en unidades de gpm

### ***Determinación De La Eficiencia***

Conociendo la eficiencia mínima, se realiza la evaluación de eficiencias admisibles y no admisibles. Cuando no se cuente con el dato de placa relativo a la capacidad del motor, deben compararse los Kw. de la potencia de entrada del mismo, con el fin de determinar el mínimo porcentaje de eficiencia con que deberá operar el sistema (equipo, cárcamo de bombeo etc.)

Todos los sistemas de bombeo deben ser evaluados periódicamente con objeto de calificar su eficiencia electromecánica.

### ? Potencia De Una Bomba Centrífuga [12]

Llamaremos:  $N$  a la potencia aplicada al eje de la bomba

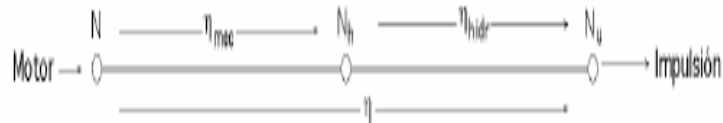
$N_h$  a la potencia cedida al líquido

$N_u$  a la potencia útil o disponible en la bomba

$\eta$  al rendimiento global,  $\eta_{vol}$  al rendimiento volumétrico y  $\eta_{mec}$  al rendimiento mecánico

$\eta_{hid} = \eta_{vol} * \eta_{man}$  al rendimiento hidráulico, donde  $\eta_{man}$  es igual al rendimiento manométrico.

La relación entre estas potencias y rendimientos se expresa mediante el siguiente esquema:



**Figura 9: Relación Entre Potencias Y Rendimientos**

Se puede considerar que las pérdidas de caudal  $q^*$  en los intersticios de la bomba a través de los diversos órganos de cierre, hacen que el caudal impulsado  $q$  sea menor que el aspirado  $q_1$ , es decir:

$$q_1 = q + q^*$$

Lo cual implica la aparición de un rendimiento volumétrico de la forma:

$$\eta_{vol} = \frac{q_1 + q^*}{q_1} \quad \text{Por lo tanto} \quad \eta_{vol} = \frac{q}{q_1}$$

De esta forma:  $q_1 = \frac{q}{\eta_{vol}}$

El caudal aspirado que corresponde a la carga total  $H_t$ , y la potencia hidráulica  $N_h$  cedida al líquido es:

$$N_h = q_1 H_t$$

Donde:

$$q_1 = \frac{q}{\eta_{vol}} \quad \text{Y} \quad \eta_{man} = \frac{H_m}{H_t}$$

Donde  $H_m$  = altura manométrica creada por la bomba

Sustituyendo  $q_1$  y  $\eta_{man}$  tenemos que:

$$N_h = \frac{q}{\gamma_{vol}} \frac{H_m}{\gamma_{man}} = \frac{\gamma_{hidr} q H_m}{\gamma_{vol} \gamma_{man}}$$

Finalmente:

$$N_h = \frac{N_u}{\gamma_{hidr}}$$

Si las tuberías de aspiración e impulsión tienen el mismo diámetro y las bridas de aspiración e impulsión están a la misma cota, en estas condiciones, la potencia útil y la potencia hidráulica necesarias para impulsar el caudal  $q$  son:

$$N_u = q H_m$$

Donde:  $\gamma_{hidr} H_m$  y por otro lado  $q \gamma_{hidr} (p_s - p_e)$  de esta forma:

$$N_h = \frac{q \gamma_{hidr} (p_s - p_e)}{\gamma_{hidr}}$$

Siendo  $\frac{p_s - p_e}{\gamma_{hidr}}$  la altura de presión creada en la bomba entre las bridas de entrada y salida.

$p_s$  = Presión en la impulsión

$p_e$  = Presión en la aspiración

Las pérdidas de carga  $\gamma_{hidr} e$  en las tuberías de aspiración e impulsión son:



$$h_e = \frac{u_F^2}{D} L^* + \frac{8L^*}{gD^5} q^2$$

Donde:  $k = \frac{8L^*}{gD^5}$  para obtener finalmente que

$$h_e = k \cdot q^2$$

Siendo:  $k$  una constante que depende del coeficiente de rozamiento  $\lambda$ , del diámetro de la tubería  $D$ , de la longitud equivalente de las tuberías de aspiración e impulsión  $L^*$ , en la que se han incluido las pérdidas de carga accidentales.

El valor de  $h_e$  para el agua, en función de  $q$  es:  $h_e$  en  $m$ ;  $q$  en  $1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $h_e$  en  $\text{kg/m}^2$

El rendimiento global de la bomba es:  $\eta = \frac{N_u}{N} = \eta_{mec} \eta_{man} \eta_{vol}$

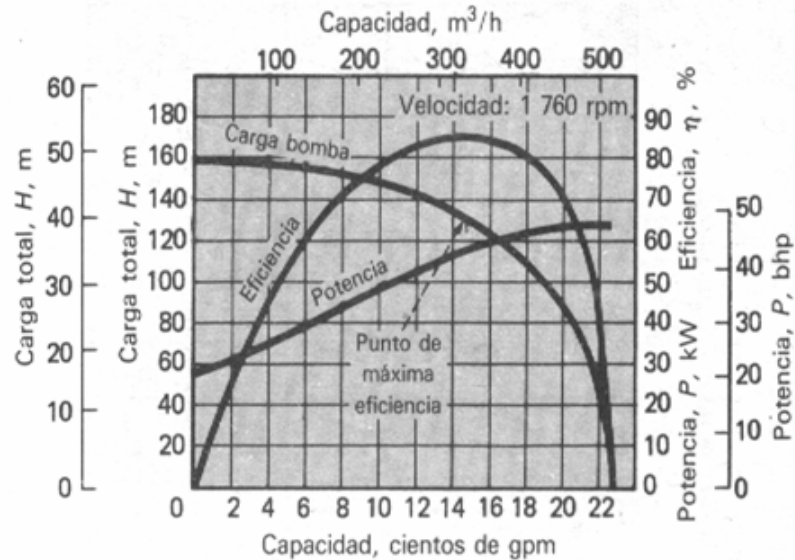
### 3.2.3 Curvas Características De Las Bombas Centrífugas

Un aspecto importante para el estudio y evaluación de las bombas corresponde a estas curvas características, típicas, del tipo centrífugas, donde se puede interrelacionar:

? La presión de descarga (carga)

? Capacidad (gasto)

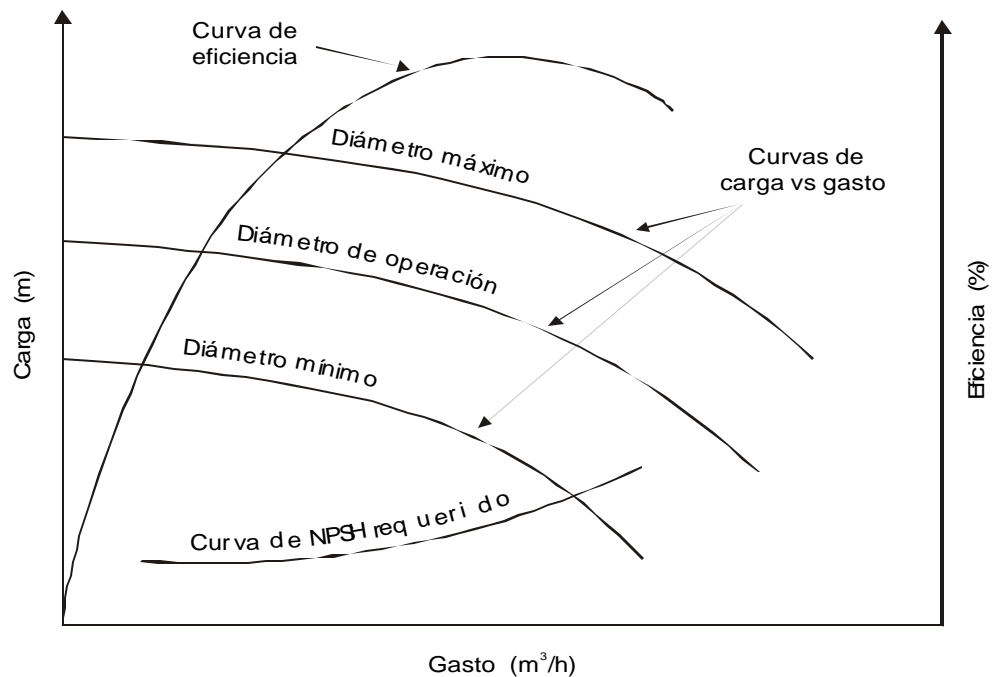
- ? *Potencia requerida*
- ? *Eficiencia de operación de la bomba*
- ? *Carga Neta Positiva de Succión (NPSH)*



**Figura 10: Características De Las Curvas Típicas De Las Bombas Centrifugas**

Las características principales de la bomba: carga, capacidad y potencia al freno se determinan experimentalmente mediante pruebas. Las principales curvas que relacionan tales variables e intervienen en el funcionamiento de la bomba son:

- ? *Carga vs. Gasto*
- ? *Eficiencia vs. Gasto*
- ? *NPSH vs. Gasto*
- ? *Potencia en la Flecha vs. Gasto*



**Figura 11: Curvas Características De La Bomba**

**Curva Característica Carga vs. Gasto**

Esta curva relaciona los posibles puntos de funcionamiento en cuanto a carga y gasto para una bomba centrífuga. En principio la bomba puede funcionar en cualquiera de estos puntos, sin embargo, no es recomendable, por las siguientes razones:

- ? La eficiencia es muy baja en ciertos puntos de la curva.
- ? Se pueden originar inestabilidades, vibraciones y cavitación que producen problemas mas graves en la bomba.

La curva Carga vs. Gasto corta a los ejes de coordenadas de la forma siguiente:

- ? Eje de ordenadas. En el punto de corte de la curva con el eje de ordenadas, el gasto es 0 y se obtiene la presión máxima.
- ? Eje de abscisas. En el punto de corte de la curva con el eje de abscisas se obtiene el gasto máximo, dando una altura manométrica nula.

Se puede ver en la Figura 11 que existe un punto de la curva Carga vs. Gasto para el cual la eficiencia es máxima y un entorno de dicho punto, en el cual las eficiencias son buenas. Por lo tanto, es muy importante seleccionar la bomba para que trabaje en los puntos cercanos a la máxima eficiencia.

La curva Carga vs. Gasto se determina para diámetro constante. Sin embargo, los fabricantes presentan una serie de diámetros para una misma bomba. La modificación de diámetro de los impulsores se hace con dos finalidades principales:

- ? Para adaptar la bomba sobredimensionada a un régimen de funcionamiento concreto y reducir la potencia consumida.
- ? Para concebir series de bombas, de características distintas a partir de un modelo único de voluta y de un modelo único de impulsor.

Las modificaciones de diámetro se hacen mediante un torno y además son limitadas en su extensión. Por ello no es conveniente modificar un impulsor en más del 10-15% de su

diámetro primitivo. Dentro de cada tipo de bomba, el fabricante ofrece una serie de 3 a 6 impulsores con diferentes diámetros con respecto al diámetro del impulsor tomado como base.

### **Curva Característica Eficiencia vs. Gasto**

Tal como se observa en la Figura 11, esta curva relaciona a la eficiencia de la bomba para cada gasto de operación de la misma. Cabe mencionar que no es posible medir la eficiencia directamente, pero puede calcularse.

Se puede apreciar que la curva característica de eficiencia contra gasto es de forma parabólica y presenta los siguientes puntos notables:

- ? Para un gasto  $Q = 0$ , la eficiencia global es 0 puesto que no hay efecto útil, ya que aunque se genera presión, ésta no se aplica a ningún fluido.
- ? Para un punto de gasto intermedio, la eficiencia toma su valor máximo o próximo a él.

### **Curva Potencia En La Flecha vs. Gasto**

En el caso de las dos curvas características anteriores, si se calcula la potencia hidráulica, es decir, la absorbida por el fluido en un punto de funcionamiento determinado de la curva carga vs. gasto y se toma el valor de la eficiencia correspondiente a dicho punto, se puede calcular la potencia que tendrá al eje de la bomba.

Estos valores de la potencia se pueden trasladar a una tercera curva, la cual sería la curva Potencia en la Flecha vs. Gasto. Aunque esta curva suele aparecer en los catálogos de los fabricantes se puede prescindir de ella, ya que es consecuencia de las dos anteriores.

### **Curva NPSH vs. Gasto**

Los fabricantes de bombas manufacturan sus equipos para operar satisfactoriamente hasta ciertos valores NPSH. A ese valor se le denomina NPSH requerido (**NPSH<sub>r</sub>**).

La curva NPSH vs. Gasto muestra cuál es el NPSH requerido de acuerdo al fabricante para cada gasto de operación de la bomba.

Cuando en la operación de una bomba el NPSH disponible es menor al requerido de acuerdo al fabricante, la bomba comenzará a trabajar con cavitación. [14]

En estas curvas es posible determinar el punto de funcionamiento que está marcado por la intersección entre la curva de la bomba y la de la tubería o sistema, lo que quiere decir que analizando en forma sobrepuesta las curvas de capacidad - carga de la bomba con la carga del sistema, se obtienen los puntos de capacidad y carga en las cuales la bomba podrá operar para la aplicación en particular.

También se tiene otro punto que hace referencia a la operación óptima del conjunto bomba-sistema ya que las bombas centrífugas se diseñan para operar eficientemente a una carga, un gasto y una velocidad específica. A este punto de operación, se le conoce como “*el punto de mejor eficiencia*”.

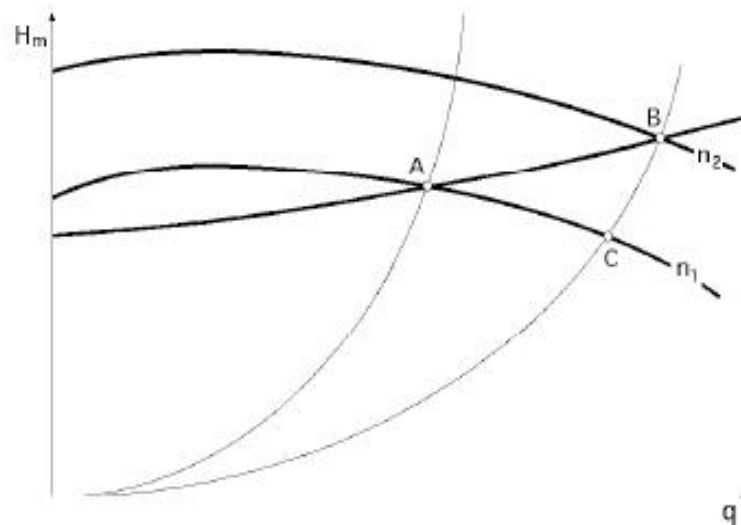
Considerando el costo de la energía, es más eficiente operar la bomba en este punto. Los equipos a menudo no operan en estas condiciones, debido a cambios en la operación del sistema y a la dificultad de igualar las condiciones de operación con el punto de mejor eficiencia de la bomba. Operar el equipo fuera de este punto, es inducir un esfuerzo adicional a algunas partes de la bomba y puede dañarse esta.

Por otra parte operar los equipos a una mayor capacidad respecto al punto de óptima eficiencia, puede provocar mayores daños, ejemplo de ello es mayor par de torsión, flexión o desviación de la flecha, la carga neta positiva de succión requerida puede ser mucho mayor que la disponible, ocasionando erosión, ruido y vibración debido a la alta velocidad del líquido. Por lo anterior las características con las cuales la bomba debe operar, siempre deberán ser discutidas y acordadas con el fabricante.

### **Punto De Funcionamiento**

El régimen de trabajo de una bomba centrífuga viene determinado por el punto de intersección de la curva característica de la bomba y de la tubería, y por eso, al ser la

característica de la tubería invariable, salvo que se actúe sobre la válvula de impulsión, el cambio del número de revoluciones de la bomba provoca el desplazamiento del punto de trabajo a lo largo de la característica de la tubería. Si por la tubería se trasiega el líquido de un nivel inferior a otro superior, y la característica de la tubería tiene la forma indicada en la Figura 12, el cambio de revoluciones de la bomba de  $n_1$  a  $n_2$  provoca el desplazamiento del punto de funcionamiento sobre la característica de la tubería de  $A$  a  $B$ , que pertenecen a distintas parábolas de regímenes semejantes, por lo que no es posible aplicar las fórmulas de semejanza de los regímenes por cuanto no se mantiene el rendimiento. En consecuencia hay que hallar un punto  $C$  sobre la curva característica inicial a  $n_1$ , intersección con la parábola de regímenes semejantes que pasa por  $B$ ; el punto  $C$  es de igual rendimiento que el  $B$ , y una vez hallado el caudal  $Q_C$ , se pueden aplicar las fórmulas de semejanza entre  $B$  y  $C$ , y así hallar el número de revoluciones  $n_2$ .



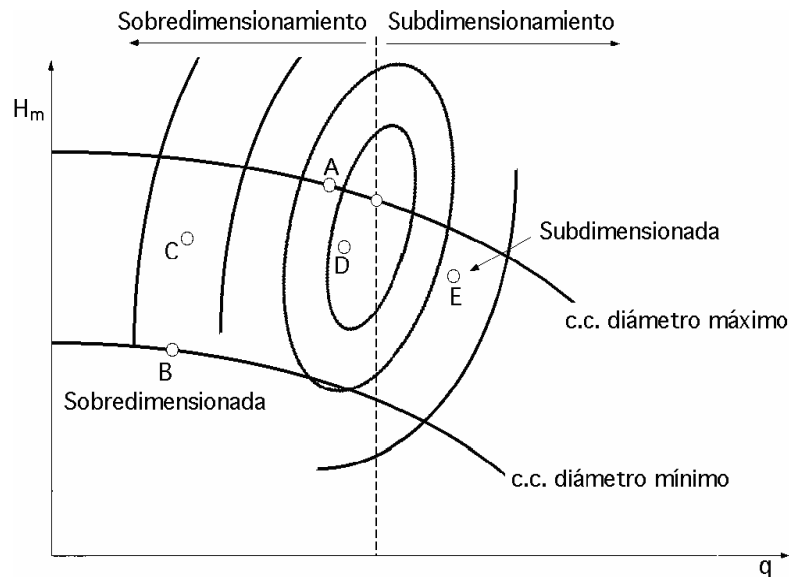
**Figura 12: Punto De Funcionamiento**



Las bombas centrífugas se construyen para que funcionen en condiciones de rendimiento máximo y, por lo tanto, en su elección parece lógico pensar que para una tubería de impulsión determinada, no sirva cualquier bomba, sino aquella que cumpla precisamente con la premisa de que su zona de máximo rendimiento, coincida con la inmediata al punto de funcionamiento.

**Situación Del Punto De Funcionamiento Sobre La Curva Característica De La Bomba.**

La Figura 13 muestra dos curvas características ( $H_m$ ,  $Q$ ) para dos diámetros de rodete, máximo y mínimo, que pertenecen a la misma bomba, y en la que se han fijado unos puntos de funcionamiento con particularidades muy diferentes.



**Figura 13: Situación Del Punto De Funcionamiento**

**A.- Punto de funcionamiento situado sobre la curva de diámetro máximo del rodete impulsor.-** Esta bomba no tiene posibilidades de aumentar su caudal y altura para el caso de verificarse una alteración en las pérdidas de carga de la tubería o se requiera una ampliación de capacidad de la instalación, ya que no dispone de un rodete de mayor diámetro.

**B.- Punto de funcionamiento situado sobre la curva de diámetro mínimo del rodete impulsor.-** Esta bomba está muy sobredimensionada para las condiciones de operación exigidas, por lo que su precio no será muy competitivo.

**C.- Punto de funcionamiento muy a la izquierda de la línea de máximo rendimiento.-** La bomba está sobredimensionada, ya que si la bomba genera una carga elevada, la pérdida de energía será notoria (bajo rendimiento).

? **Velocidad específica alta.-** Para bombas de alta velocidad específica  $n_s$  y gran caudal, un alto desplazamiento a la izquierda del punto de funcionamiento respecto del de máximo rendimiento implica:

**Un alto esfuerzo radial:** que puede provocar el contacto entre rodete y carcasa con el consecuente deterioro de la bomba.

**Un calentamiento del líquido:** (por bajo rendimiento), que afecta al aumento de su tensión de vapor y, por lo tanto, una disminución del  $NPSH_d$  en la aspiración de la bomba con una posible cavitación.

? ***Velocidad específica baja.***- Si la bomba genera una carga muy baja, siendo pequeña su velocidad específica, se intercala entre las bridas de aspiración y de impulsión de la bomba un by-pass que recirculará la diferencia entre el caudal impulsado por la bomba y el requerido por el proceso. Esto se puede llevar a cabo siempre que no se encuentre en el mercado una bomba competitiva que alcance el caudal de operación sin requerir intercalar el by-pass.

***D.-Punto de funcionamiento situado ligeramente a la izquierda de la línea de máximo rendimiento.***- Curva de funcionamiento por debajo de la correspondiente a diámetro máximo; cuando se requiera un aumento de la altura creada por la bomba como consecuencia de un incremento en la pérdida de carga de la tubería, se instala un rodete de diámetro mayor y así se alcanzan las nuevas condiciones de operación. Un aumento del caudal desplazaría el punto a la derecha por lo que el rendimiento se incrementaría y tendería al de funcionamiento óptimo.

***E.- Punto de funcionamiento a la derecha de máximo rendimiento.***- Bombas subdimensionadas, ya que al incrementar el caudal disminuye el rendimiento. Para bombas de alta velocidad específica y gran caudal, un alto desplazamiento del punto de funcionamiento a la derecha de la zona de máximo rendimiento implica un alto esfuerzo

radial que puede provocar el contacto entre partes móviles y fijas de la bomba con su consecuente deterioro.

### **Curvas Características Y Leyes De Afinidad**

La carga, capacidad y potencia requerida de una bomba varían con la velocidad de tal manera que las curvas de desempeño retienen sus características. Esta variación se le conoce como “Leyes de Afinidad”. Aplicable en cualquier punto de la curva Carga vs. Capacidad, estas leyes establecen que:

- ? Cuando la velocidad se cambia, la capacidad (flujo), varía directamente con la velocidad.
- ? La carga varía directamente con el cuadrado de la velocidad.
- ? La potencia BHP varía directamente con el cubo de la velocidad.

$$\begin{aligned} Q_1/Q_2 & \propto n_1/n_2; \\ H_1/H_2 & \propto (n_1/n_2)^2; \\ \eta_{BHP,1}/\eta_{BHP,2} & \propto (n_1/n_2)^3 \end{aligned}$$

### **Bombas Geométricamente Similares**

Cuando dos bombas, geométricamente similares se operan a la misma velocidad rotacional, la capacidad varía directamente con el cubo de la relación de diámetros de los impulsores.

La carga es proporcional al cuadrado de la misma relación y la potencia requerida varía con la quinta potencia de esa relación.

$$\begin{aligned} Q_2/Q_1 &\propto (D_2/D_1)^3; \\ H_2/H_1 &\propto (D_2/D_1)^2; \\ \eta_{BHP,2}/\eta_{BHP,1} &\propto (D_2/D_1)^5 \end{aligned}$$

Reducción del Diámetro del Impulsor: Si se conserva la velocidad rotacional constante de una bomba, se puede reducir capacidad y carga de la bomba, al reducir el diámetro el impulsor. La reducción sigue, en una forma aproximada las leyes de afinidad.

- ? La capacidad se reduce en forma directamente proporcional a la relación de diámetros.
- ? La carga decrece en función cuadrática a la relación de diámetros.
- ? La potencia se reduce en función cúbica de la relación de diámetros.
- ? La eficiencia normalmente se reduce con una reducción apreciable de diámetros.

### 3.2.4 Rendimiento De Las Bombas Centrífugas

Cuando un líquido fluye a través de una bomba, sólo parte de la energía comunicada por el eje del impulsor es transferida al fluido. Existe fricción en los cojinetes y juntas, no todo el líquido que atraviesa la bomba recibe de forma efectiva la acción del impulsor, y existe una pérdida de energía importante debido a la fricción del fluido. Esta pérdida tiene varias componentes, incluyendo las pérdidas por choque a la entrada del impulsor, estas se

producen cuando el flujo no entra en el impulsor suavemente lo que hace que el flujo se separe de los alabes. El rendimiento de una bomba es bastante sensible a las condiciones bajo las cuales esté operando.

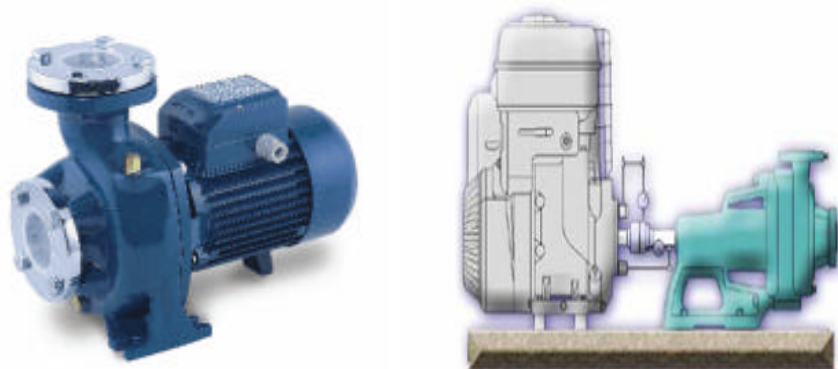
El rendimiento  $\eta$  de una bomba viene dado por:

$$\eta = \frac{\text{potencia suministrada al fluido}}{\text{potencia en el eje (al freno)}} = \frac{\eta Q h}{T \omega}$$

Donde  $\eta$ ,  $Q$  y  $h$  se definen de la forma habitual;  $T$  es el par ejercido por el motor sobre el eje de la bomba y  $\omega$  el régimen de giro del eje en radianes por segundo.

### $\eta$ Factores Que Afectan La Eficiencia

Existen condiciones que afectan negativamente la eficiencia del equipo de bombeo, en general corresponde a la fabricación del diseño del equipo. Entre las principales se tienen las siguientes:



**Figura 14: Montaje Típico De Una Bomba**

### **Pérdidas Volumétricas.**

Estas pérdidas son indicativas de una circulación de flujo del lado de alta presión al de baja presión del impulsor; aunque en general, estas pérdidas son pequeñas, pueden revestir importancia bajo condiciones de desgaste o desajuste de la bomba.

### **Pérdidas Hidráulicas.**

Constituyen la diferencia entre la carga que podría obtenerse de la energía disponible en el impulsor y aquella que realmente se desarrolla; las más importantes son por choque de entrada, generadas por el cambio de dirección del líquido y por fricción del líquido, al fluir.

### **Pérdidas Mecánicas.**

Se deben principalmente a la fricción de cojinetes, empaques o sellos y a la fricción del disco generada entre los lados del impulsor y el líquido.

### **Características Del Líquido.**

Las condiciones del fluido a manejar, tienen consecuencias sustantivas sobre la operación de las bombas centrífugas. Por un lado, afectan la construcción del equipo, por lo tanto, al

rendimiento y la potencia. Entre las más importantes tenemos la corrosión, temperatura a manejar, tamaño de partículas en el líquido y uso a que se destinará, entre otras.

Mientras más desfavorables sean las condiciones, mayores serán las exigencias constructivas en cuanto a materiales, metalurgia, tipo de impulsores, accesorios propios de la bomba etc.

### **Condiciones De Instalación.**

Existen condiciones de instalación que influyen negativamente en la eficiencia del equipo de bombeo; podemos citar las siguientes:

### **Pérdidas En Motor Y Acoplamiento.**

Aunque son externas a la bomba, es conveniente saber que estos componentes influyen en la eficiencia global. Aquí nos referimos a su rendimiento y diseño; sin embargo es importante aclarar que el montaje apropiado del conjunto bomba-motor es necesario, para asegurar la máxima eficiencia.

Una deficiente alineación impone cargas adicionales sobre los cojinetes y flexión en una o varias de las flechas del conjunto, ocasionando pérdidas de eficiencia y un mayor consumo de energía debido a la fricción y al desbalance mecánico; lo cual provoca vibraciones dañinas a los equipos, afectando la eficiencia global.



La temperatura ambiente también puede tener efectos en la eficiencia, pues en el caso de los motores la reduce a medida que sea mas alta y en caso de ser muy extrema, provoca esfuerzos y deformaciones en los equipos, es por ello que deberá tomarse en cuenta al realizar el montaje y puesta en servicio, sobre todo permitiendo que se estabilice, antes de restringir el movimiento del conjunto.

### **Pérdidas En La Bomba.**

Las vibraciones, movimientos y desbalance del equipo tienen consecuencia en la operación hidráulica, ya que se afectan tolerancias y cargas, reduciendo la capacidad real del mismo, requiriendo para ello una mayor potencia y como consecuencia disminuye la eficiencia.

La densidad menor de la mezcla líquido - vapor, provoca una reducción en el volumen real bombeado y por lo tanto la eficiencia disminuye. Asimismo, se inducen vibraciones y si el fenómeno es severo, puede causar daños internos a otras instalaciones y equipos e incluso el colapso del propio impulsor.

### **Alineación.**

La correcta alineación de la bomba y el motor, es de suma importancia para conseguir una operación mecánica libre de problemas; por lo que esta se debe verificar de acuerdo a recomendaciones del fabricante.

### **Impulsores.**

Se deben ajustar los impulsores antes de intentar poner en marcha la bomba. Una bomba nueva se debe operar con los impulsores ajustados a la mitad del juego lateral de acuerdo con recomendaciones del fabricante, esto es con el objeto de que la arena presente en el agua, no provoque un desgaste excesivo en la bomba lo cual afectaría a la bomba, especialmente a los impulsores. Una vez que el agua deje de salir con arena, los impulsores se podrán ajustar a su posición de trabajo más eficiente.

El recorte de impulsor es una técnica empleada desde hace mucho tiempo para cubrir algunas de las líneas de fabricación; de nueva cuenta enfatizamos que las relaciones de afinidad nos permitirán saber si recortando el impulsor tendremos un punto de operación óptimo.

### **Consideraciones De Operación.**

- ? *Velocidad de giro alta.*
- ? *Presión de carga excesiva.*
- ? *Peso específico del fluido.*
- ? *Sometimiento de la bomba a tensiones.*
- ? *Falta de grasa o grasa inadecuada.*
- ? *Contra presión excesiva.*
- ? *Cebado insuficiente.*

- ? *Taponamiento de tubería.*
- ? *Penetración de aire por el estopero.*
- ? *Dirección de giro.*
- ? *Velocidad de giro demasiado pequeña.*
- ? *Fuertes desgastes de las piezas interiores.*
- ? *Sellos desgastados.*
- ? *Camisa de la flecha con estrías.*
- ? *Agua de refrigeración.*
- ? *Golpeteo de la flecha.*

Estas consideraciones son sólo algunas de muchas causas de ineficiencia.

### **Sobredimensionamiento.**

El sobredimensionamiento de los equipos, es producto de un mal cálculo, falta de previsión y en algunos casos de información pobre, lo cual ocasiona que se disponga de equipos que no cumplan con las características que requiere el sistema hidráulico.

Sabemos que al sobredimensionar un equipo, se producen desventajas que ocasionan se pierda eficiencia en el sistema, obteniéndose con ello gastos de energía innecesarios.

## Cavitación

El término cavitación, se refiere a ciertas condiciones dentro de la bomba, cuando debido a una pérdida de presión localizada, el fluido manejado hierve en ese punto, formando burbujas o cavidades llenas de vapor. Esas cavidades desaparecen cuando las burbujas llegan a regiones de la bomba con mayor presión. La cavitación puede ocurrir a lo largo de partes estacionarias de la carcasa o sobre el impulsor. La reducción de la presión absoluta por debajo de la presión del fluido puede ser generalizada en la bomba, o solamente local. Cuando la reducción es generalizada, puede ser resultado de:

- ? Un incremento en la altura de succión.
- ? Un decremento en la presión atmosférica.
- ? Un decremento en la presión absoluta del sistema cuando se está bombeando de un recipiente.
- ? Obstrucciones en la succión que provocan incremento en las pérdidas.
- ? Un incremento en la temperatura del fluido en la succión.

Cuando la reducción es local:

- ? Un incremento en la velocidad.
- ? Al resultado de cambios de velocidad en el flujo, distorsiones en el mismo, cuando hay un cambio repentino en la dirección el flujo.

La cavitación se nota por ruido y vibración, una disminución en la carga y capacidad de la bomba, así como en la eficiencia y produce erosión, en los álabes de los impulsores. [15]

? **Factores Que Incrementan La Eficiencia**

Para mantener, prever o controlar la eficiencia, podemos tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- ? Selección del equipo de bombeo (motor-bomba) apropiado, teniendo el conocimiento pleno del sistema.
- ? Acabado de la superficie de los impulsores.
- ? Selección adecuada de la velocidad específica de succión.
- ? Control de líquidos viscosos.
- ? Control de concentraciones de grandes volúmenes de sólidos.
- ? Control del tamaño de sólidos.
- ? Control de fricción en cojinetes, empaques o sellos.
- ? Montaje apropiado del equipo (bomba- motor).
- ? Corregir desbalances.
- ? Reducir vibraciones.
- ? Alineación del equipo en forma programada.
- ? Controlar la temperatura de operación del motor.
- ? Evitar recortes de impulsores.

- ? Controlar la velocidad del equipo.
- ? Controlar la presión del fluido.
- ? Evitar tensiones mecánicas en tuberías.
- ? Reposición de grasa adecuada.
- ? Verificar el cebado de bomba y tubería
- ? Evitar entrada de aire.
- ? Cambiar sellos.
- ? Controlar el abatimiento del nivel dinámico.
- ? Control del peso específico del fluido que impulsa la bomba.
- ? Nivelación de la flecha.
- ? Verificar presión de succión y descarga.
- ? Mantenimiento adecuado del equipo.

Evidentemente, el mal funcionamiento, se nota en la disminución de la capacidad, presión ó un significativo cambio en la vibración o ruido durante su operación. Los pozos que utilicen la energía eléctrica como medio energético para sus fines y que derivado de un diagnóstico de eficiencia electromecánica, resulte menor o igual al 40% en forma combinada, se sugiere efectuar la rehabilitación o sustitución del equipo electromecánico. Los valores de eficiencia mínimos que deban cumplir los equipos reparados o rehabilitados, deben ser verificados con el método de prueba descrito por las Normas al respecto.

Los trabajos de rehabilitación o sustitución necesarios para lograr un incremento en la eficiencia de los equipos electromecánicos se determinan de común acuerdo, entre el propietario del equipo y el fabricante al que se le asignen los trabajos, compartiendo en partes iguales la responsabilidad en la obtención de los resultados.

### **3.2.5 Red De Distribución De Agua [16]**

#### **Sistemas De Conducción (Tuberías)**

En vista de que hemos hablado de la conservación y optimización de la eficiencia de los equipos, es importante no olvidar los elementos que conforman el sistema de aire acondicionado ya que es valioso contar con la adecuada conducción y abastecimiento del fluido para los equipos que estén en operación; por ello se debe hacer la adecuada selección del material y diámetro de la tubería y así evitar pérdidas ocasionadas por la fricción del fluido, lo cual es uno de los factores que empobrecen la eficiencia, por lo tanto es fundamental conocer las características básicas del sistema a la hora de diseñar.

#### **Disposiciones Típicas Para Sistemas De Circulación De Agua [16]**

##### **? Agua Que Circula Una Sola Vez Y Agua Recirculada**

Los sistemas de tuberías de agua generalmente tratados se dividen en dos tipos, el de agua que circula una sola vez y de agua recirculada. En el primero el agua pasa a través del

aparato solamente una vez y es descargada. En el segundo el agua no se descarga, sino que circula en un circuito repetidor desde el intercambiador de calor hasta el aparato de refrigeración, volviendo nuevamente al intercambiador de calor.

### ? **Abierto Y Cerrado**

El sistema abierto es aquel en el que el agua circula por el interior de un depósito en comunicación con la atmósfera como ocurre en las torres de enfriamiento y en los lavadores de aire.

Sistema cerrado es aquel en el que el caudal de agua no está expuesto en ningún punto a la atmósfera. Este sistema contiene normalmente un vaso o tanque de expansión en comunicación con la atmósfera, siendo insignificante la superficie de agua en contacto con ella.

### ? **Sistema De Retorno De Agua**

La instalación de agua recirculada se clasifica, además, de acuerdo con el sistema empleado para el retorno de agua. Cuando dos o más unidades están conectadas entre sí, puede usarse uno de los sistemas siguientes:

#### **1. Tuberías de retorno inverso**



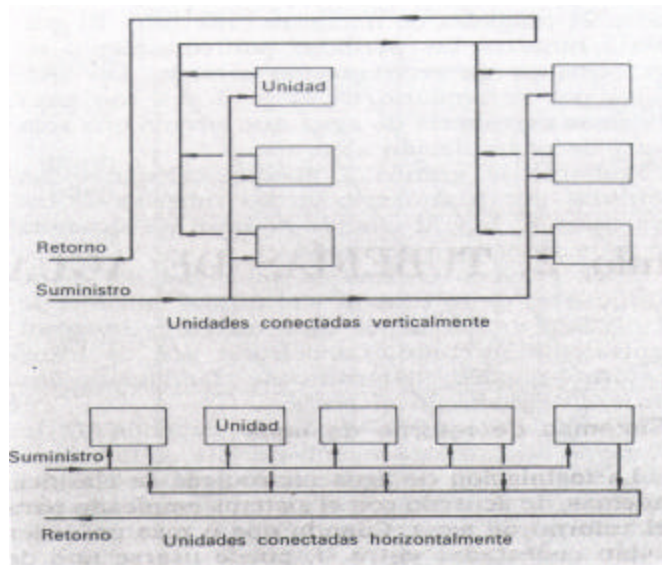
2. Colector de retorno inverso, con tramos verticales de retorno directo
3. Tubería de retorno directo

Si las unidades tienen la misma o casi la misma caída de presión a través de ellas, se recomienda uno de los sistemas de retorno inverso.

Sin embargo, si las unidades tienen diferentes caídas de presión, o necesitan válvulas auxiliares (o de descarga), entonces es generalmente más económico usar un retorno directo.

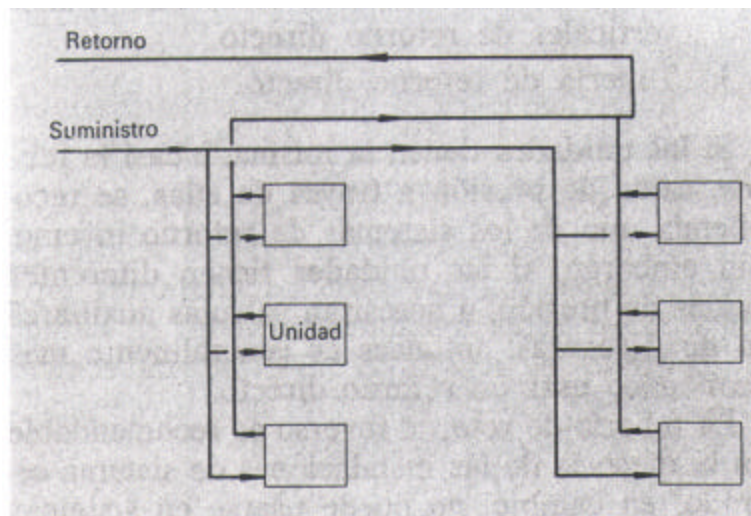
La tubería de retorno inverso es recomendable en la mayoría de las instalaciones de sistema cerrado; en cambio, no puede usarse en sistemas abiertos, siendo generalmente el más económico en las nuevas construcciones. La longitud del circuito de agua en las tuberías de retorno y de suministro es la misma para todas las unidades.

Como los circuitos de agua son iguales para cada unidad, la mayor ventaja de un sistema de retorno inverso consiste en que raras veces es necesario equilibrarlo. La figura 15 es un esquema de este sistema con unidades conectadas horizontal y verticalmente.



**Figura 15: Sistema Inverso De Retorno**

Hay instalaciones en las que, además de no ser conveniente, es antieconómico usar un sistema de tuberías de agua de retorno inverso completo. La figura 16 ilustra un sistema de tubería con colector de retorno inverso y tramo vertical de retorno directo.



**Figura 16: Colectores De Retorno Inverso Con Montantes (Tubos Ascendentes) De Retorno Directo**

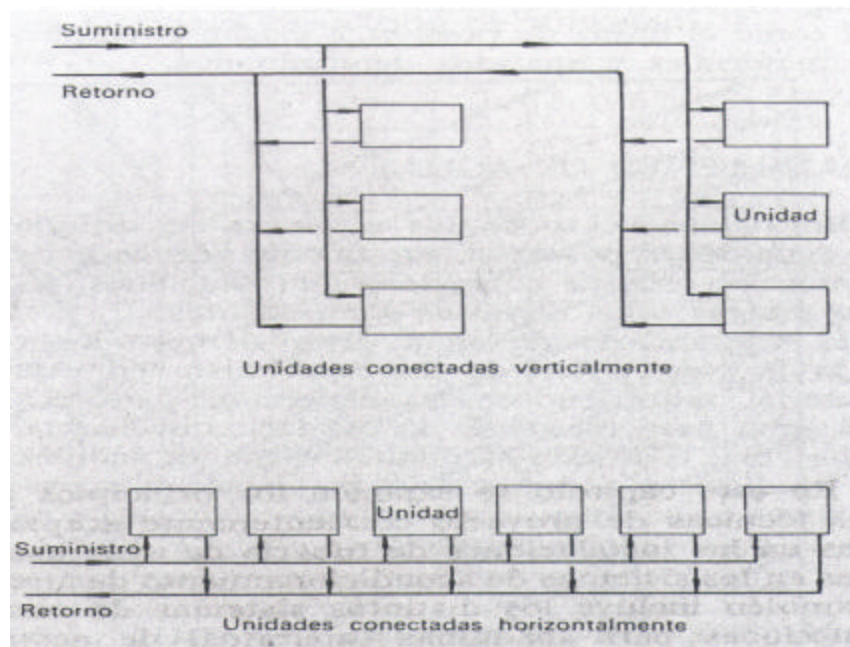
En este sistema, el caudal no es el mismo en todas las unidades en un flujo de retorno directo. La diferencia de caudales depende de la caída de presión de las tuberías de suministro y de retorno. Esta diferencia puede ser reducida a límites aceptables. La caída de presión en el tramo ascendente comprende: (1) la pérdida a través de las tuberías de suministro y retorno desde el tramo ascendente o montante a la unidad, (2) la pérdida a través de la propia unidad y (3) la pérdida en válvulas y acoplamientos. El desequilibrio excesivo en la parte de suministro y retorno directo del sistema de tubería puede dictar la necesidad de válvulas auxiliares u orificios calibrados.

Para eliminar las válvulas auxiliares debe proyectarse la caída de presión de suministro y de retorno igual a  $\frac{1}{4}$  de la suma de las caídas de presión de los anteriores apartados 1, 2 y 3.

La tubería de retorno directo es necesaria en los sistemas abiertos y recomendable en algunos sistemas cerrados. Una disposición de retorno inverso en un sistema abierto requiere una longitud de tubería que normalmente es innecesaria, ya que existen las mismas condiciones atmosféricas en todos los puntos abiertos del sistema. Se recomienda un retorno directo para un sistema de recirculación cerrado donde todas las unidades requieren válvulas auxiliares y tienen diferentes caídas de presión. *Un ejemplo de este tipo de sistema es el de varias unidades fan-coil (ventilador-serpentin) interconectadas y que necesitan diferentes caudales de agua, con capacidades y caídas de presión diferentes.*

El sistema de tubería de retorno directo siempre es desequilibrado y exige válvulas auxiliares o bocas y elementos para medir la caída de presión al objeto de poder medir el caudal de agua. Aunque los costes de material son más bajos en este sistema que en los dos sistemas de retorno inverso, el coste del montaje y el tiempo empleado en equilibrar el sistema, suelen eliminar esta ventaja.

La Figura 17 presenta unidades conectadas vertical y horizontalmente a un retorno directo.



**Figura 17: Sistema De Tubería De Agua Con Retorno Directo**

### **Proyecto Y Diseño De Una Tubería De Agua [16]**

En cualquier tubo por el que circule agua, hay una pérdida de presión. Esta pérdida depende de los siguientes factores:

- 1) Velocidad del agua
- 2) Diámetro del tubo
- 3) Rugosidad de la superficie interior
- 4) Longitud del tubo

La presión que se utiliza en el sistema no tiene efecto sobre la pérdida total de carga a lo largo del sistema. Sin embargo, las presiones más altas que las normales pueden determinar el tipo de tubo a emplear, así como acoplamiento y válvulas más robustas y elementos especiales.

Para proyectar correctamente un sistema de tubería, el ingeniero debe evaluar no solo la pérdida por rozamiento en el tubo, sino también la pérdida a través de las válvulas, acoplamientos y demás elementos. Además de estas pérdidas por rozamiento, debe considerarse un factor de diversidad en cuanto afecte a la reducción de cantidad de agua y tamaño de tubo.

### **Pérdidas Por Fricción En Tuberías**

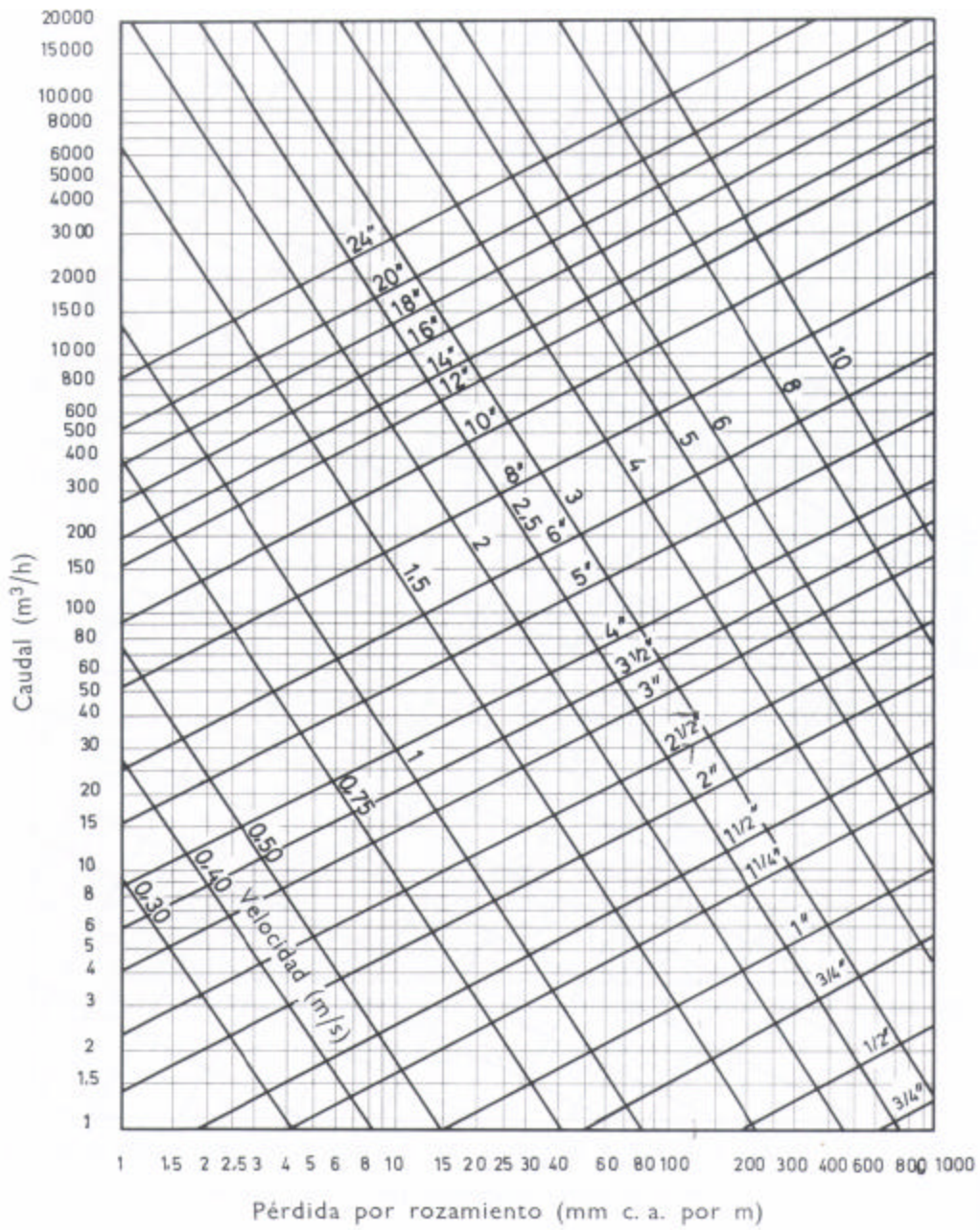
Las pérdidas en tuberías se dividen en dos categorías:

- a) aquellas provocadas por cortante en la pared de elementos de tuberías.
- b) las provocadas por componentes de tuberías.

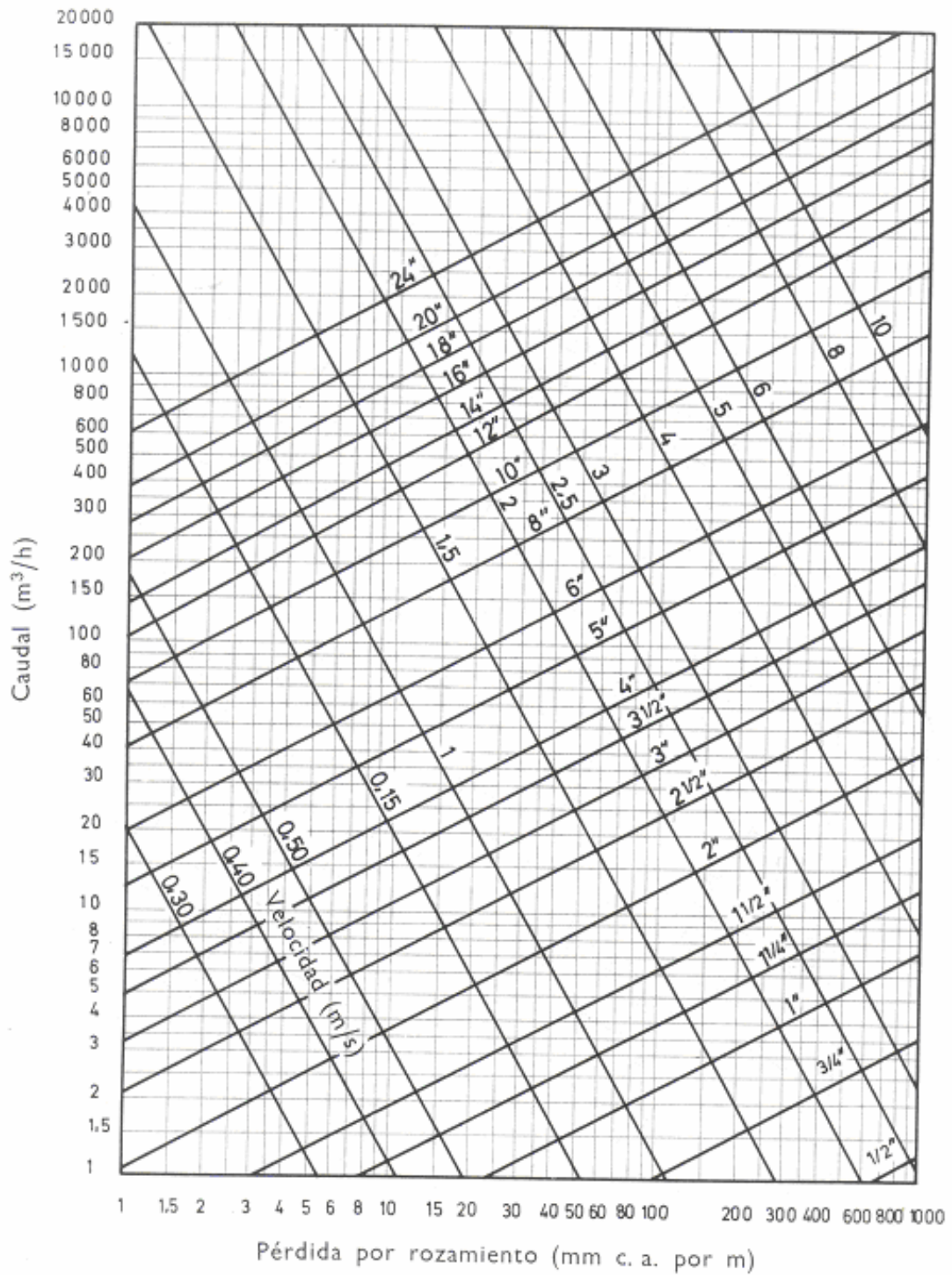
Las primeras se distribuyen a lo largo de los elementos de tuberías. Las segundas se tratan como discontinuidades discretas en la línea piezométrica y en la línea de energía y comúnmente se conocen como pérdidas menores; se deben principalmente a flujos separados o secundarios.

La pérdida por rozamiento en las tuberías de un sistema depende de la velocidad del agua, diámetro del tubo, rugosidad de la superficie interior y la longitud del tubo. Al variar cualquiera de estos factores varía la pérdida de presión producida por el tubo.

En la mayoría de instalaciones de acondicionamiento de aire reemplazan tubos de acero o de cobre. Para evaluar la pérdida por rozamiento en estos casos, véanse las Figuras 18, 19 y 20 de esta sección. [16]

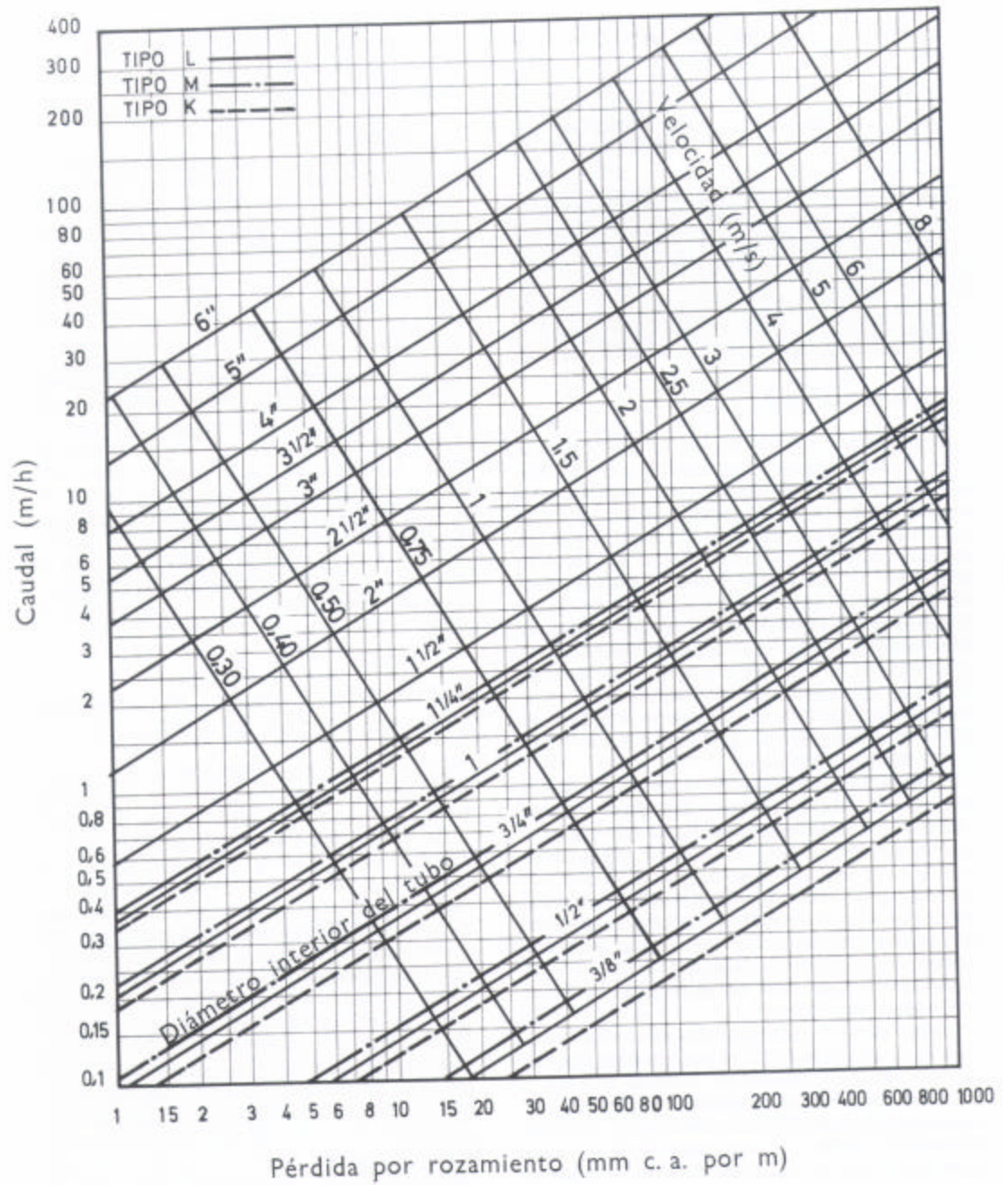


**Figura 18: Pérdidas Por Rozamiento En Los Sistemas Cerrados De Tuberías  
(Tubo De Acero)**



**Figura 19: Pérdidas Por Rozamiento En Los Sistemas Abiertos De Tuberías  
(Tubo De Acero)**





**Figura 20: Pérdidas Por Rozamiento En Los Sistemas Abiertos Y Cerrados De Tuberías (Tubo De Cobre)**

Los gráficos 18 y 19 son para tubo de acero de hasta 24 pulgadas de diámetro (610 mm). El gráfico 18 muestra las pérdidas por rozamiento en los sistemas de recirculación cerrada. Las pérdidas por rozamiento en el gráfico 19 son para sistemas de tuberías de agua que circula una sola vez y de recirculación abiertos.

Mediante el gráfico 20 pueden calcularse las pérdidas por rozamiento en las tuberías de cobre tipo K, L y M cuando se usan en sistemas de agua abiertos y cerrados.

Estos gráficos indican la velocidad del agua, el diámetro de la tubería y el caudal, además de la pérdida de carga por cada metro de longitud equivalente de tubo. Conociendo dos de estos factores pueden determinarse fácilmente los otros dos mediante el gráfico.

El caudal de agua necesario depende de la carga de acondicionamiento de aire, y la velocidad se determina mediante datos prácticos. Estos dos factores se utilizan para establecer el tamaño de tubería y el régimen de pérdida de carga.

### **Velocidad Del Agua Recomendada Para Sistemas De Circulación De Agua**

Las velocidades recomendadas para la tubería de agua dependen de dos condiciones: [16]

- 1) el servicio para el que se va a utilizar la tubería.
- 2) Los efectos de la erosión.

La Tabla 2 recomienda los valores de velocidad que deben utilizarse en los diferentes servicios. Los valores máximos indicados se basan en los niveles de sonido permisibles establecidos para agua en movimiento y de aire arrastrado, así como los efectos de erosión.

SERVICIO O APLICACIÓN	VELOCIDAD (m/s)
Descarga de la bomba	2,4-3,6
Aspiración de la bomba	1,2-2,1
Línea o tubería de desagüe	1,2-2,1
Colector o tubería principal	1,2-4,5
Montante o tubo ascendente	1-3
Servicio general	1,5-3
Suministro de agua de ciudad	1-2,1

**Tabla 2: Velocidad Recomendable Del Agua Según Sus Aplicaciones**

La erosión en los sistemas de tuberías de agua la produce el choque, en la superficie interior del tubo o tubería del agua que se mueve rápidamente conteniendo burbujas de aire, arena u otras materias sólidas. En algunos casos esto puede significar el deterioro completo del tubo o de las paredes de la tubería, particularmente en la superficie inferior y en los codos.

Como la erosión es un efecto del tiempo, de la velocidad del agua y de los materiales en suspensión en el agua, la elección de la velocidad del agua en un proyecto es cuestión de criterio. Las velocidades máximas que se indican en la Tabla 3 están basadas en muchos años de experiencia y aseguran la obtención de la duración óptima de los aparatos bajo condiciones normales.

FUNCIONAMIENTO NORMAL (h)	VELOCIDAD DEL AGUA (m/s)
1.500	3,65
2.000	3,50
3.000	3,35
4.000	3
6.000	2,75
8.000	2,45

**Tabla 3: Máxima Velocidad Aconsejable Del Agua Para Reducir La Erosión Al  
Mínimo**

### *Pérdidas De Carga*

Al proyectar el sistema de tubería de agua debe tenerse presente las pérdidas de presión por rozamiento. Los sistemas que utilizan agua suministrada por la red general, deben de estar calculados para proporcionar el caudal requerido con una pérdida de presión inferior a la presión disponible en la línea principal. Esta pérdida de presión total está formada por las distintas pérdidas que se producen en el sistema, tales como las que ocasionan el condensador, la tubería y los acoplamientos, presión estática y presión en el contador. La caída total de presión del sistema debe ser menor que la presión de la línea principal, teniendo en cuenta el caudal de agua proyectado.

El sistema de recirculación se dimensiona para proporcionar un equilibrio razonable entre la mayor potencia necesaria para el bombeo debido a la elevada pérdida por rozamiento, y

el aumento del coste inicial requerido por ser necesario tubos de gran diámetro. En las grandes instalaciones de acondicionamiento de aire, este punto de equilibrio se toma frecuentemente para una pérdida de carga correspondiente a 1 metro de columna de agua por 10 metros de longitud equivalente de tubería.





En las instalaciones normales de acondicionamiento de aire el coste de la tubería de agua predomina sobre el coste de las bombas de agua y motores. El aumento de coste producido al aumentar el diámetro de una tubería pequeña, para reducir la pérdida de carga, normalmente no es demasiado grande, mientras que, por el contrario, aumenta rápidamente cuando se aumenta el tamaño de una tubería grande (de aproximadamente 4 pulgadas [100 mm] y mayores). En la mayoría de las instalaciones, las consideraciones económicas exigen que la tubería de mayor diámetro sea dimensionada para caudales y caídas de presión más elevados que las tuberías pequeñas, diámetro que está dimensionado para caídas de presión y caudales más bajos.

A veces hay excepciones a esta norma general. Por ejemplo, la aparición de limitaciones físicas pueden exigir el empleo de tuberías de pequeño diámetro. Esto se hace frecuentemente en tramos cortos que no afectan mucho a la caída de presión total.

Cada sistema debe ser analizado separadamente para determinar el punto de equilibrio económico entre el coste inicial (tamaños de tubería, bomba y motor) y gasto de explotación (caída de presión y consumos de bomba y motor).

**Longitud De Tubería**

Para determinar la pérdida por rozamiento en el sistema de tubería de agua, el ingeniero debe considerar los tramos rectos de tubería y las longitudes equivalentes adicionales de tuberías debidas a acoplamientos, válvulas y otros elementos intercalados en el sistema. Existen las Tablas 4, 5, 6 y 7 que dan las longitudes equivalentes adicionales de tuberías para dichos componentes. La longitud recta de la tubería se mide hasta la línea media de todos los acoplamientos y válvulas. La longitud equivalente de los componentes debe sumarse a esta longitud recta de tubería.

DIÁMETRO EXTERIOR		CODOS ANGULARES			
		90°	60°	45°	30°
Acero	Cobre				
17,2	1/2	0,82	0,33	0,18	0,09
21,3	5/8	0,91	0,40	0,21	0,12
26,9	7/8	1,2	0,49	0,27	0,15
33,7	1 1/8	1,5	0,64	0,30	0,21
42,4	1 3/8	2,1	0,91	0,46	0,27
48,3	1 5/8	2,4	1,0	0,54	0,33
60,3	2 1/8	3,0	1,4	0,70	0,39
73	2 5/8	3,6	1,6	0,85	0,51
88,9	3 1/8	4,6	2,0	0,98	0,61
101,6	3 5/8	5,4	2,2	1,2	0,73
114,3	4 1/8	6,4	2,6	1,4	0,82
141,3	5 1/8	7,6	3,3	1,8	0,98
168,3	6 1/8	9,1	4,0	2,1	1,2
219,1	8 1/8	10,7	5,2	2,7	1,5
273	-	15,2	6,4	3,6	2,2
323,9	-	18,3	7,6	3,9	2,4
355,6	-	20,7	8,9	4,6	2,7
406,4	-	23,8	9,5	5,1	3,0
457,2	-	26,0	11,3	5,7	3,3
508	-	30,5	12,5	6,6	3,9
609,6	-	35,0	14,9	7,5	4,8

\* R/D sensiblemente igual a 1.  
 \*\* R/D sensiblemente igual a 1,5.

**Tabla 4: Pérdida De Carga De Los Codos Angulares Expresada En Longitud Equivalente De Tubo (m)**

DIÁMETRO EXTERIOR		60°-Y			45°-Y		VÁLVULAS DE COMPUERTA *****		VÁLVULAS DE RETENCIÓN	
		ESFÉRICAS**			ANGULARES**				OSCILANTE***	DE CIERRE VERTICAL (horizontal de retención)
ACERO	COBRE									
17,2	1/2	5,1	2,4	1,8	1,8	0,18	1,5	RECTAS COMO GRIFOS DE VÁLVULA ESFÉRICA ****		
21,3	5/8	5,4	2,7	2,1	2,1	0,21	1,8			
26,9	7/8	6,6	3,3	2,7	2,7	0,27	2,4			
33,7	1 1/8	8,7	4,6	3,6	3,6	0,30	3,6	RECTAS COMO GRIFOS DE VÁLVULA ESFÉRICA ****		
42,4	1 3/8	11,4	6,1	4,6	4,6	0,46	4,2			
48,3	1 5/8	12,6	7,3	5,4	5,4	0,54	4,8			
60,3	2 1/8	16,5	9,1	7,3	7,3	0,70	6,1	RECTAS COMO GRIFOS DE VÁLVULA ESFÉRICA ****		
73	2 5/8	20,7	10,7	8,7	8,7	0,85	7,6			
88,9	3 1/8	25,2	13,1	10,7	10,7	0,98	9,1			
101,6	3 5/8	30,5	15,2	12,5	12,5	1,2	10,7	RECTAS COMO GRIFOS DE VÁLVULA ESFÉRICA ****		
114,3	4 1/8	36,8	17,7	14,6	14,6	1,4	12,2			
141,3	5 1/8	42,6	21,6	17,7	17,7	1,8	15,3			
168,3	6 1/8	52,0	26,8	21,4	21,4	2,1	18,3	ANGULARES COMO GRIFOS DE VÁLVULA ANGULARES		
219,1	8 1/8	67,1	35,1	26,0	26,0	2,7	24,4			
273	-	85,4	44,2	32,0	32,0	3,6	30,5			
323,9	-	97,5	50,4	40,0	40,0	3,9	36,6	ANGULARES COMO GRIFOS DE VÁLVULA ANGULARES		
355,6	-	109,9	56,5	47,4	47,4	4,6	41,2			
406,4	-	125,0	64,0	55,0	55,0	5,1	45,8			
457,2	-	140,1	73,1	61,1	61,1	5,7	50,4	ANGULARES COMO GRIFOS DE VÁLVULA ANGULARES		
508	-	158,5	84,0	71,6	71,6	6,6	61,0			
609,6	-	186	97,5	81,0	81,0	7,5	73,2			

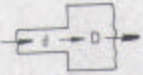
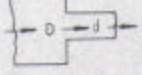




\* Valores correspondientes a la posición de abertura total.  
 \*\* Estos valores no se aplican a las válvulas de aguja.  
 \*\*\* Estos valores se aplican también a las válvulas de retención rectas con obturador esférico.  
 \*\*\*\* Para válvulas de retención inclinadas, cuyo diámetro de orificio es igual al del tubo, tomar los valores correspondientes a las válvulas con tija inclinada 60°.  
 \*\*\*\*\* Las válvulas de macho presentan la misma pérdida de carga, en la posición de abertura total, que las de paso directo.

**Tabla 5: Pérdida De Carga En Las Válvulas Expresadas En Longitud Equivalente De Tubo En Metros**

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

**Tabla 6: Pérdidas De Carga De Codos Y –T- Expresadas En Longitud Equivalente De Tubo En Metros**



DIÁMETRO EXTERIOR		Ensanchamiento brusco $d/D$ *			Contracción brusca $d/D$ *			Aristas vivas *		Orificio entrante *	
		1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Acero	Cobre										
17,2	1/2	0,42	0,24	0,09	0,21	0,15	0,09	0,46	0,24	0,45	0,34
21,3	5/8	0,54	0,33	0,12	0,27	0,21	0,12	0,54	0,30	0,54	0,46
26,9	7/8	0,79	0,46	0,15	0,36	0,30	0,15	0,85	0,42	0,85	0,67
33,7	1 1/8	0,98	0,61	0,21	0,49	0,36	0,21	1,1	0,54	1,1	0,82
42,4	1 3/8	1,4	0,91	0,30	0,70	0,54	0,30	1,6	0,79	1,6	1,3
48,3	1 5/8	1,8	1,1	0,36	0,88	0,66	0,36	2,0	1,0	2,0	1,5
60,3	2 1/8	2,4	1,5	0,49	1,2	0,91	0,49	2,7	1,3	2,7	2,0
73	2 5/8	3,0	1,9	0,61	1,5	1,2	0,61	3,6	1,7	3,6	2,6
88,9	3 1/8	4,0	2,4	0,79	2,0	1,5	0,79	4,3	2,2	4,2	3,3
101,6	3 5/8	4,6	2,8	0,91	2,3	1,8	0,91	5,2	2,6	5,2	3,9
114,3	4 1/8	5,2	3,3	1,2	2,7	2,1	1,2	6,1	3,0	6,1	4,9
141,3	5 1/8	7,3	4,6	1,5	3,6	2,7	1,5	8,2	4,2	8,2	6,1
168,3	6 1/8	8,8	6,7	1,8	4,6	3,3	1,8	10,1	5,8	10,1	7,6
219,1	8 1/8	-	7,6	2,6	-	4,6	2,6	14,3	7,3	14,3	10,7
273	-	-	9,8	3,3	-	6,1	3,3	18,3	8,8	18,3	14,0
323,9	-	-	12,5	3,9	-	7,6	3,9	22,2	11,3	22,2	17,4
355,6	-	-	-	4,9	-	-	4,9	26,2	13,7	26,2	20,0
406,4	-	-	-	5,5	-	-	5,5	29,3	15,3	29,2	23,4
457,2	-	-	-	6,1	-	-	6,1	35,0	17,7	35,0	27,4
508	-	-	-	-	-	-	-	43,4	21,4	43,2	32,0
609,6	-	-	-	-	-	-	-	49,8	25,3	49,6	39,6

\* Entrar en la tabla con el diámetro pequeño.

**Tabla 7: Pérdidas De Carga De Los Cambios De Sección Expresados En Longitud Equivalente De Tubo En Metros**

### 3.2.6 Accesorios Varios [16]

#### ? Tanques De Expansión

La misión del tanque de expansión es la de mantener constante la presión del sistema al permitir que se expanda el agua cuando aumenta su temperatura y proporcionar un

método para añadir agua al sistema. Normalmente, es necesario en el sistema cerrado, pero no en un sistema abierto. El depósito de un sistema abierto actúa como tanque de expansión.

Los vasos de expansión abiertos y cerrados son los dos tipos usados en los sistemas de tuberías, los vasos de expansión abiertos están en comunicación con la atmósfera y situados en el lado de aspiración de la bomba, y a un nivel superior al de la bomba más elevada de la instalación. En este punto el tanque proporciona la presión necesaria para vencer la resistencia de la tubería de aspiración de la bomba, evitando así la posible introducción de aire en el sistema.

### ? **Filtros**

La función principal de un filtro es la de proteger la instalación y sus accesorios. Normalmente, los filtros se colocan en la línea de entrada de las bombas, válvulas de control u otro tipo de aparatos que deban protegerse. El filtro se selecciona para la capacidad del sistema en el punto de la línea donde se ha de colocar. Los filtros para protección de la bomba no deben tener malla inferior a 40 y han de ser de bronce. Para aparatos distintos a las bombas, debe consultarse al fabricante para determinar el grado necesario de protección de filtro. Por ejemplo, una válvula de control necesita mayor protección que una bomba y, por lo tanto, exige un filtro de malla más fina.

### ? **Termómetros, Manómetros Y Manovacúómetros**

Los termómetros, manómetros y manovacúómetros se sitúan en el sistema donde el proyectista considere importante conocer la temperatura o presión del agua.

Las siguientes temperaturas y presiones son las que generalmente se consideran importantes.

- 1) Temperatura del agua que entra y sale del enfriador y condensador.
- 2) Presión de aspiración y descarga de la bomba
- 3) Temperatura del agua pulverizada y presión de entrada al purificador de aire.

Los termómetros de agua se suelen elegirse para un rango de temperaturas que varíe de -5 a 100 °C. Deben estar situados de forma que sea fácil su lectura. Los manómetros de presión se eligen de forma que la presión normal corresponda aproximadamente al punto medio de la escala del manómetro

### ? **Válvulas De Control.**

Las válvulas de control son válvulas automáticas que trabajan hidráulicamente con la presión de la línea de conducción y que tienen los siguientes objetivos:

? ***Controlar Presiones Y Gastos.***

Permiten reducir presiones, sostener presiones, regular gastos preestablecidos, a efecto de distribuir el agua de forma eficiente y efectiva dando a cada tramo de red solo lo necesario, garantizando el abasto de las partes altas y evitando sobre presiones que tengan como consecuencia la presencia de fugas.

? ***Controlar Niveles En Tanques.***

Permiten ayudar de forma efectiva en el llenado y recarga de tanques incluso elevados con lo cual se evita un derrame del vital líquido con su traducción en ahorro de energía al bombear solo lo necesario.

? ***Protección De Equipos Y Seguridad.***

Permiten el alivio de exceso de presiones que se puedan traducir en fugas y daños a la infraestructura; eliminan el golpe de ariete y sus consecuencias desastrosas y protegen equipos de bombeo ayudando a conservar su punto de operación, eficiencia y con eso evitar consumos de energía variables en paros y arranques, además de protegerlos de sobre presiones y fallos de energía.

### **3.2.7 Unidad De Enfriamiento [17]**

#### **Funcionamiento**

El sistema instalado se basa en la unidad enfriadora de agua (UEA) o en inglés "chiller" y otros dispositivos necesarios para la operación del sistema. Cabe resaltar de la manera más

sencilla posible la forma de operación del equipo conocido como la unidad enfriadora de agua (UEA).

La UEA opera mediante el ciclo de refrigeración con base en la compresión de un vapor, y lo que específicamente realiza es extraer el calor de un espacio y rechazarlo posteriormente a otro espacio seleccionado. Para ello cuenta con cuatro (4) componentes básicos y un fluido conocido como refrigerante que circula entre ellos.

En el Evaporador se absorbe el calor para el caso más común; se absorbe calor del agua y al hacer esto la misma baja su temperatura. Al desarrollar este proceso, el fluido que circula (el refrigerante) se evapora y lo toma el compresor donde se le eleva la presión y la temperatura, para luego rechazar en el Condensador el calor absorbido a un medio seleccionado.

Al rechazar el calor el refrigerante se condensa y pasa al dispositivo de control donde se le baja la presión y la temperatura y está listo para absorber calor nuevamente en el evaporador.

Generalmente en estos sistemas siempre posee un cuarto de máquinas en donde se encuentra un equipo que se le conoce con el nombre de Torre de Enfriamiento. La misma es necesaria ya que como hemos indicado anteriormente, el calor que se rechaza en el enfriador lo rechazamos al agua (Ciclo de Condensación).

El montaje incluye la distribución de equipos tipo "fan coil", en los espacios a acondicionar y pueden o no instalarse unidades manejadoras de aire (UMA) donde desde allí y a través de ductos se conducirá el aire a los diferentes espacios, a su vez después de extraer el calor y llevarlo a las UMA para que otro flujo (agua) lo absorba. Sencillamente este tipo de sistemas de aire acondicionado funcionan con procesos meramente de intercambio de calor. El agua fría generalmente se obtiene de la UEA, la llevamos por medio de tuberías y con la ayuda de la bomba de agua fría (BAF) llega a todo el recorrido; de allí la hacemos pasar a través de las UMAs y los "fan coil", así regresa al UEA para que se le extraiga el calor.

Por otro lado, en el ciclo de condensación, el calor que rechaza la UEA lo toma el otro ciclo independiente de agua y lo lleva a la torre de enfriamiento, utilizando la bomba de agua de condensación BAC, donde el aire que allí circula se encarga de extraerle el calor y rechazarlo al ambiente exterior.

Es importante hacer notar que para que existan todos los procesos de intercambio deben existir los flujos ya sea de agua o de aire según sea el caso.

### **Componentes Claves De Una Unidad Enfriadora De Agua[18]**

Los principales componentes de las unidades tipo chiller son:

- ? **Evaporador:** Componente en el cual el refrigerante líquido fluye sobre un haz de tubo y se evapora, absorbiendo calor el agua que circula a través del haz de tubo
  
- ? **Compresor:** Bombea el vapor refrigerante al condensador incrementando la presión del refrigerante (y así, la temperatura).
  
- ? **Condensador:** El componente en el cual el refrigerante se condensa en un sistema que enfría el agua dándole calor a esta.
  
- ? **Válvula de Expansión:** El refrigerante líquido de alta presión que viene del condensador pasa a través de este dispositivo de expansión, reduciendo la presión y la temperatura del refrigerante para evaporador.

### *Sistemas De Refrigeración [19]*

El proceso de refrigeración se puede efectuar tanto por compresión como por absorción. El sistema de refrigeración que más se emplea es el de compresión, en las máquinas de este tipo la parte central del sistema la constituye la bomba o compresor, que recibe vapor a baja presión y lo comprime, con esta operación se elevan considerablemente la presión y la temperatura del vapor, posteriormente este vapor comprimido y calentado fluye por el tubo de salida hasta el condensador, donde el vapor cede su calor al agua o aire frío que rodea al

condensador. En esta forma su temperatura desciende hasta el punto de condensación, y se convierte en líquido con la correspondiente liberación de calor que ocurre en estos casos.

El agente frigorífico, en estado líquido, pasa del condensador hasta un receptáculo y de allí fluye por un conducto o válvula, disminuye la presión del líquido a medida que fluye dentro del vaporizador para enfriarlo. Este vaporizador se haya en el espacio que desea refrigerar. El aire tibio de este recinto le transmite, por contacto, al vaporizador parte de su calor, y hace que el líquido se evapore. Como se puede observar, este nuevo cambio de estado, de líquido a vapor, se efectúa aumentando la temperatura. A continuación, aspira el compresor, por el tubo de succión, el vapor caliente del evaporador y después de volverlo a comprimir, lo impulsa al condensador, como se explicó anteriormente. Se repite así el proceso en ciclos continuos.

Dependiendo de las aplicaciones para las que se requiera se utilizan diferentes tipos de refrigerantes, por ejemplo para las grandes instalaciones refrigeradoras se utiliza generalmente amoníaco como agente frigorífico, mientras que en los refrigeradores domésticos se emplea anhídrido sulfuroso, cloruro de metilo y freón. Desde que se comenzó a refrigerar mediante sistemas mecánicos se ha aumentado constantemente el número de agentes frigoríficos, lo cual se debe a las investigaciones efectuadas por los químicos en su afán de hallar nuevas sustancias con características apropiadas para responder a las necesidades planteadas por los nuevos usos y tipos de instalaciones. Los refrigerantes sintéticos conocidos con el nombre de freones, constituyen un buen ejemplo del resultado alcanzado gracias a las investigaciones científicas.



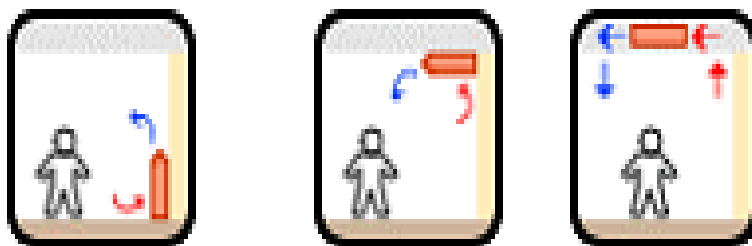
Por otro lado en el sistema de absorción se consigue el enfriamiento mediante la energía térmica de una llama de gas, de resistencias eléctricas, o de la condensación del vapor de agua a baja presión. La instalación tiene una serie de tubos de diversos diámetros, dispuestos en circuito cerrado, los cuales están llenos de amoníaco y agua. El amoníaco gaseoso que hay en la instalación se disuelve fácilmente en el agua, formando una fuerte solución de amoníaco. Al calentarse ésta en la llama de gas, o por otro medio, se consigue que el amoníaco se desprenda en forma de gas caliente, lo cual aumenta la presión cuando este gas se enfría en el condensador, bajo la acción de agua o aire frío, se produce la condensación y se convierte en amoníaco líquido. Fluye así por una válvula dentro del evaporador, donde enfría el aire circundante absorbiendo el calor de éste, lo cual produce nuevamente su evaporación. A continuación, entra el amoníaco, en estado gaseoso, en contacto con el agua, en la cual se disuelve. Esta fuerte solución de amoníaco retorna, impulsada por la bomba, al gasificador, donde la llama de gas se calienta y es entonces cuando vuelve a repetirse el ciclo.

Tanto el sistema de enfriamiento por absorción como el de compresión, están basados en los cambios de estado del agente frigorífico. Ambos sistemas tienen condensador, vaporizador y el medio adecuado para crear la presión necesaria que motive la condensación, tal como un compresor o una fuente que produzca calor.

### 3.2.8 Sistemas Fan-coils (Sistemas de Ventilconvectores) [20]

Estos equipos terminales son básicamente de acondicionamiento de aire y no de calefacción. Un fan coil está constituido por la batería de tubos de cobre por cuyo interior circula el fluido caloportador, un ventilador centrífugo, generalmente de tres velocidades y un filtro, alojados en una carcasa dotada de rejillas de impulsión.

Cuando se utiliza como sistema de calefacción, el agua de alimentación está a baja o media temperatura, por lo que es un sistema apto para integrarse con equipos de energía solar o bomba de calor. Generalmente se encuentra en dos posiciones, vertical y en disposición horizontal, apto para ser colocado en un falso techo, lo que le hace casi insustituible en instalaciones. En caso de disposición vertical, puede funcionar a ventilador parado, con lo que se convierte prácticamente en un convector, o con distintas velocidades de giro del ventilador, lo que permite graduar la potencia térmica, generalmente además se le dota de válvulas reguladoras de caudal, pudiendo en ocasiones conseguirse un control fino de la temperatura de los locales merced a las dos posibilidades de regulación que presenta.



**Figura 21: Sistemas Fan-coils (Sistemas de Ventilconvectores)**

#### **4 BASES TEÓRICAS PARA REALIZAR LA EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA [14]**

En esta parte se presentan las bases teóricas para determinar las condiciones actuales de la bomba, y también para evaluar las medidas de ahorro de energía. Estas bases constan de los siguientes puntos:

- ? Curva característica de la bomba.
- ? Curva de operación del sistema.
- ? Puntos de operación de la bomba.
- ? Método alternativo para la determinación de la eficiencia de la bomba.
- ? Leyes de semejanza.
- ? Consumo de energía.
- ? Costos de operación.
- ? Ahorros de energía.
- ? Ahorros económicos.
- ? Rentabilidad financiera.

En los siguientes apartados se muestra la forma de evaluar las condiciones actuales de operación.

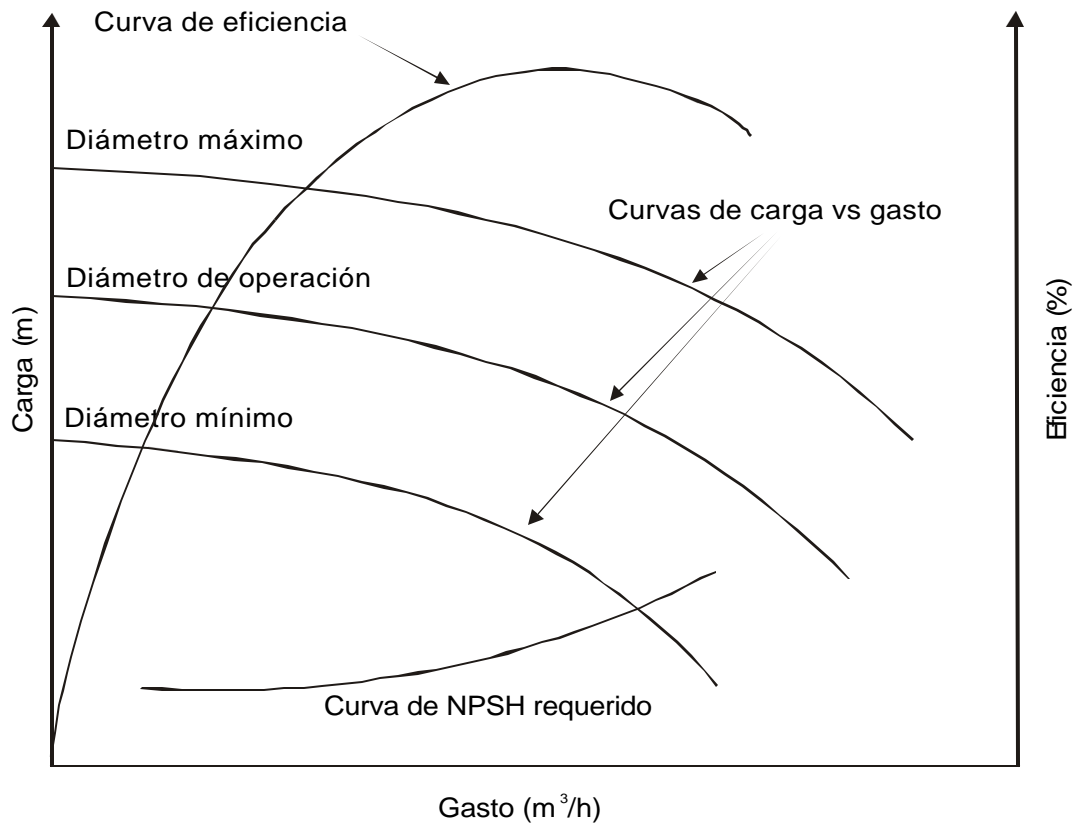
#### **4.1 Curva Característica De La Bomba**

Teniendo la información de los datos de placa de la bomba, se deben consultar los catálogos o información técnica del fabricante para obtener las curvas características de la bomba centrífuga; dichas curvas son aquellas que relacionan las variables que intervienen en el funcionamiento de la misma. Figura 22

Las curvas características de las bombas presentan datos similares independientemente del fabricante y en general incluyen:

- ? La curva de carga vs. gasto (trazada para diferentes diámetros de impulsor y a velocidad constante).
- ? La curva de NPSH vs. gasto.
- ? La curva de eficiencia vs. gasto (o curvas de isoeficiencia).
- ? La curva de potencia vs. gasto.

En caso de no contar con la información técnica del fabricante de la bomba que se desea evaluar, se podrán utilizar curvas de referencia que contengan características similares de la bomba, es decir: diámetro y tipo de impulsor, velocidad, tamaño, etc. Para ello deberá solicitarse la información técnica a fabricantes o distribuidores de bombas.



**Figura 22: Curva Que Relaciona Las Variables Que Intervienen En El Funcionamiento De La Bomba**

#### **4.2 Curva de Operación del Sistema**

La curva del sistema queda definida por la carga estática total y las pérdidas de presión en el sistema de bombeo (carga dinámica).

### ? Carga Estática Total

La carga estática total se determina conociendo la altura geométrica del nivel del líquido entre los recipientes de succión y descarga y la línea de centros de la bomba, así como las presiones en esos mismos puntos. Cuando la descarga es libre, como la mostrada en el depósito intermedio de la Figura 23, la altura a considerar será la de la tubería.

La siguiente ecuación se emplea cuando el nivel del líquido en el recipiente de succión se encuentra arriba de la línea de centros de la bomba, (succión positiva o ahogada):

$$H_{ET} = H_D + H_S + \frac{P_D - P_S}{\gamma}$$

Donde:

$H_{ET}$  : Carga estática total

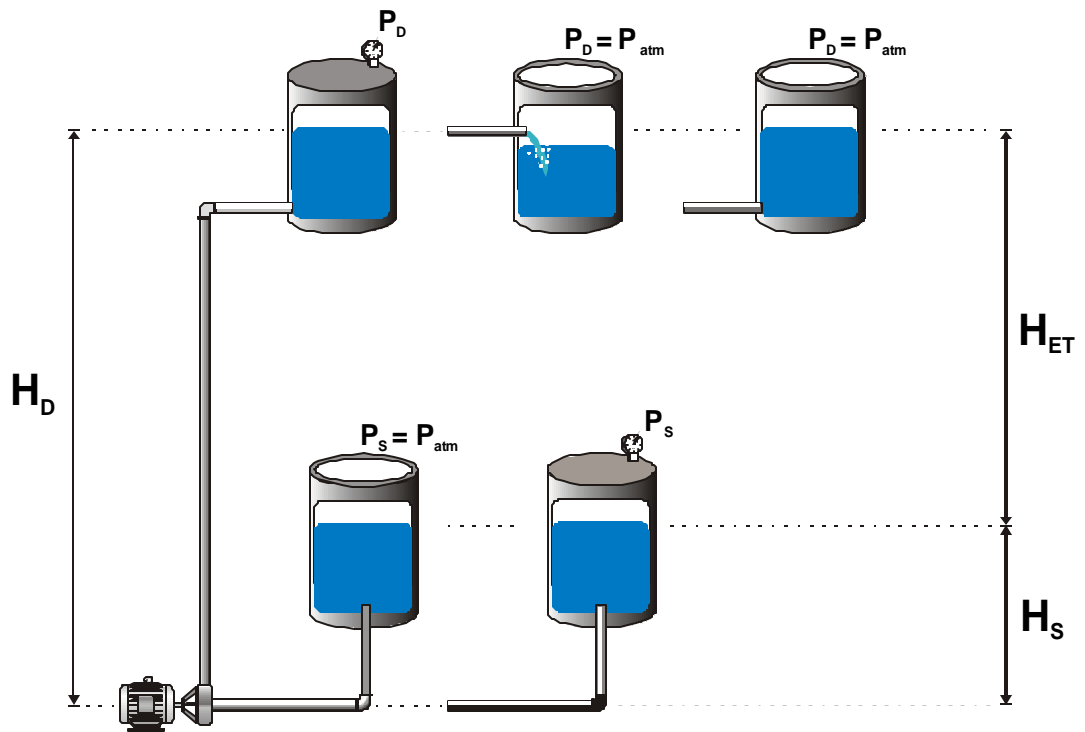
$H_D$  : Altura de descarga

$H_S$  : Altura de succión

$P_D$  : Presión en el recipiente de descarga

$P_S$  : Presión en el recipiente de succión

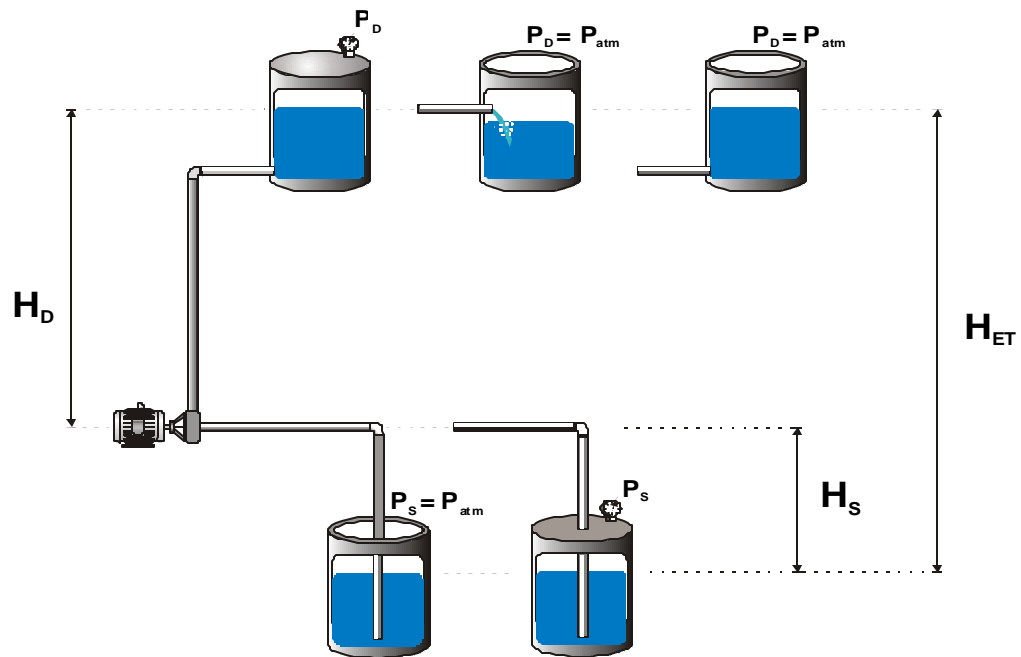
$\gamma$  : Peso específico del fluido



**Figura 23: Sistemas De Bombeo Con Succión Positiva**

La siguiente ecuación se utiliza cuando el nivel del líquido en la succión se encuentra por debajo de la línea de centros de la bomba (succión negativa, Figura 24).

$$H_{ET} ? H_D ? H_S ? \frac{P_D ? P_S}{?}$$



**Figura 24: Sistemas De Bombeo Con Succión Negativa**

**? Carga Dinámica Total**

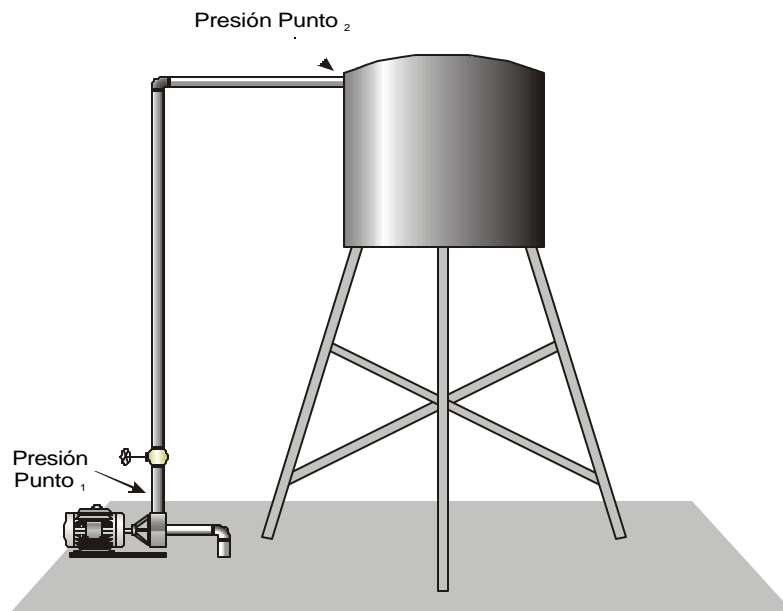
La carga dinámica total representa las pérdidas de presión, las cuales se originan por la fricción del fluido en las tuberías, válvulas, accesorios y otros componentes como pueden ser intercambiadores de calor u otros. Estas pérdidas varían proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad del gasto. También varían de acuerdo con el tamaño, tipo y condiciones de las superficies de tubos y accesorios y las características del líquido bombeado.



### 4.3 Método de Medición de Pérdida de Presión Global Mediante el uso de Manómetros

Una forma práctica de medir la caída de presión en un sistema de bombeo es a través de mediciones en campo, por ejemplo, instalando manómetros en la descarga de la bomba (inmediatamente después de la brida) y al final de la línea de suministro, ver Figura 25.

*Pérdida Presión? Presión Punto<sub>1</sub> ? Presión Punto<sub>2</sub>*



**Figura 25: Determinación de Pérdida de Presión Mediante Puntos de Medición**

#### 4.4 Cálculo De Pérdidas En Tuberías

En el cálculo de las pérdidas en tuberías se consideran todas las características del sistema de bombeo:

- ? Gasto o gastos de operación.
- ? Características del fluido.
- ? Características de tuberías y accesorios.

Las pérdidas de carga en tuberías se determinan mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_L = \frac{fLv^2}{2Dg} = \frac{8fLQ^2}{D^5g}$$

Donde:

**Q** : Gasto (m<sup>3</sup>/s)

**h<sub>L</sub>** : Pérdida de carga en tuberías (m)

**D** : Diámetro de la tubería (m)

**L** : Longitud de la tubería (m)

**g** : Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

**f** : Factor de fricción (adimensional).

**v** : Velocidad del fluido (m/s)

**p** : Constante adimensional (3.1416)

La velocidad del fluido ( $v$ ) se calcula de la siguiente manera:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Donde:

$A$  : área transversal de la tubería ( $m^2$ )

#### 4.5 Cálculo De Pérdidas De Carga En Accesorios

Estas se determinan mediante la ecuación:

$$h_A = \frac{k v^2}{2g} = \frac{8k Q^2}{D^4 g}$$

Donde:

$h_A$  : Pérdida de carga en accesorios (m)

$v$  : Velocidad del fluido (m/s)

$Q$  : Gasto ( $m^3/s$ )

$D$  : Diámetro de la tubería (m)

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$k$  : Coeficiente de resistencia (adimensional)

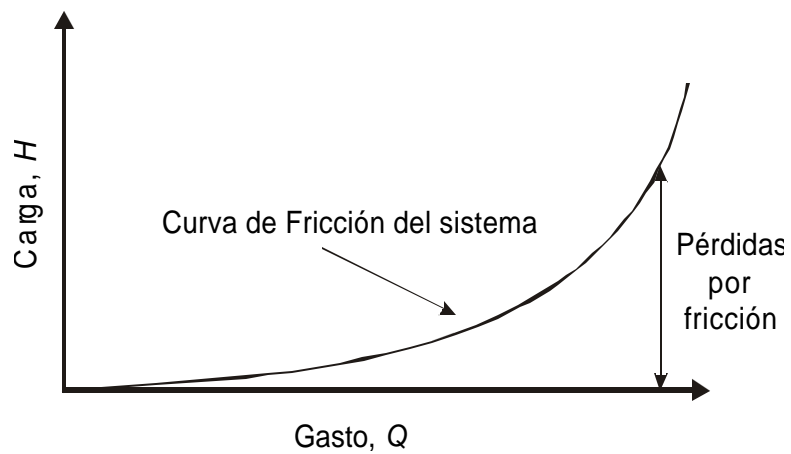
El factor “ $k$ ” es adimensional y su valor depende del tipo de accesorio y diámetro del mismo; se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio.

Algunos fabricantes pueden proporcionar su factor  $k$ , por lo tanto, deberá utilizarse ese valor, pero en el caso de no contar con esta información es conveniente utilizar las fórmulas para el cálculo del factor  $k$ .

#### 4.6 Construcción De La Curva Del Sistema

Una vez determinadas las pérdidas de fricción en tuberías se suman las pérdidas por accesorios y se construye la curva de pérdidas por fricción Figura 26.

$$H_f \text{ (pérdida total por fricción)} = H_L \text{ (pérdida por fricción en tuberías)} + H_A \text{ (pérdida por fricción en accesorios)}$$



**Figura 26: Curva de Pérdidas de Fricción del Sistema**

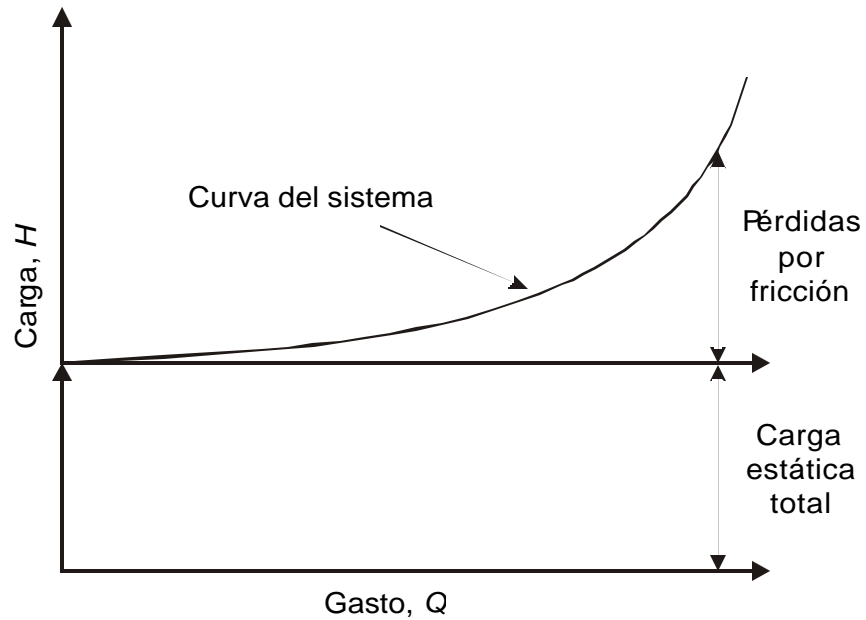
La curva del sistema es la suma de la carga estática total más la carga dinámica total, ver Figura 27.

$$\text{Carga total del sistema} = H_{(estática)} + H_{(Dinámica)}$$

Es decir:

$$H_{Total} = H_{(Estática)} + \frac{v_{Descarga}^2 - v_{Succión}^2}{2g} + \frac{fLv^2}{2Dg} + \sum \frac{k v^2}{2g}$$

Si se considera que la velocidad en la succión es igual a la de descarga de la bomba, el segundo componente de la ecuación es igual a cero.



**Figura 27: Curva De Operación Del Sistema De Bombeo**

#### 4.7 Puntos De Operación De La Bomba [14]

##### ? Gasto Constante

El punto de operación de una bomba se obtiene cuando la carga generada por la misma coincide con la que precisa el sistema de bombeo.

El punto de operación se obtiene en la intersección de la curva (carga vs gasto) de la bomba correspondiente al diámetro de operación y la curva del sistema. Al trazar una línea horizontal y otra vertical que pase por este punto pueden obtenerse los valores de carga, gasto, eficiencia y NPSH requerido Figura 28.

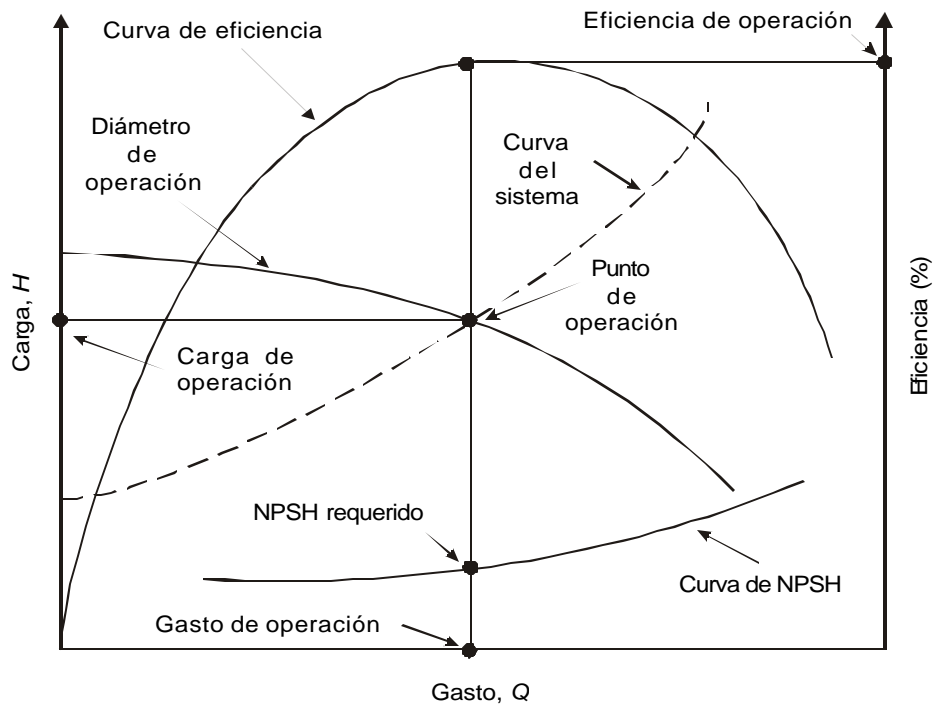


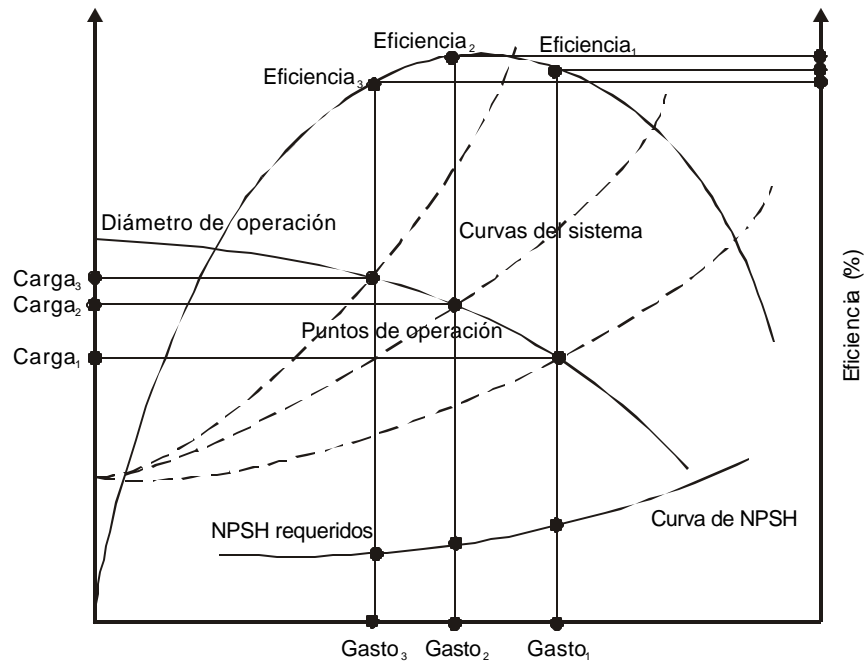
Figura 28: Punto De Operación Para Gasto Constante

## ? Gasto Variable

En general los sistemas de bombeo requieren gasto variable, lo cual significa que una bomba trabaja con diferentes puntos de operación (carga, gasto).

Como ya se mencionó, el punto de operación se establece en la intersección de la curva característica de la bomba (carga vs gasto) y la curva del sistema. Por lo tanto, si el sistema requiere un  $Gasto_1$  le corresponde una  $Carga_1$ ; para un  $Gasto_2$  corresponde una  $Carga_2$ , etc. Se muestra un ejemplo gráfico en la Figura 29.

Adicionalmente, en cada punto de operación se puede determinar el NPSH requerido y la eficiencia de la bomba.



**Figura 29: Punto de Operación para Gasto Variable**

## 4.8 Métodos De Regulación

Los procesos productivos de las empresas requieren condiciones de bombeo diferentes a las del gasto nominal, por lo tanto, es necesario aplicar algún tipo de control o regulación de gasto.

Los métodos de regulación de gasto se obtienen mediante:

- ? Regulación del gasto por estrangulación de la tubería que conduce el fluido (modificación de la curva del sistema sobre la que trabaja la bomba).
- ? Regulación del gasto mediante recirculación.
- ? Regulación del gasto por variación de velocidad de la bomba (modificación de la curva característica carga vs gasto de la bomba).
- ? Arranque o paro de la bomba.

En la regulación de gasto hay dos aspectos fundamentales:

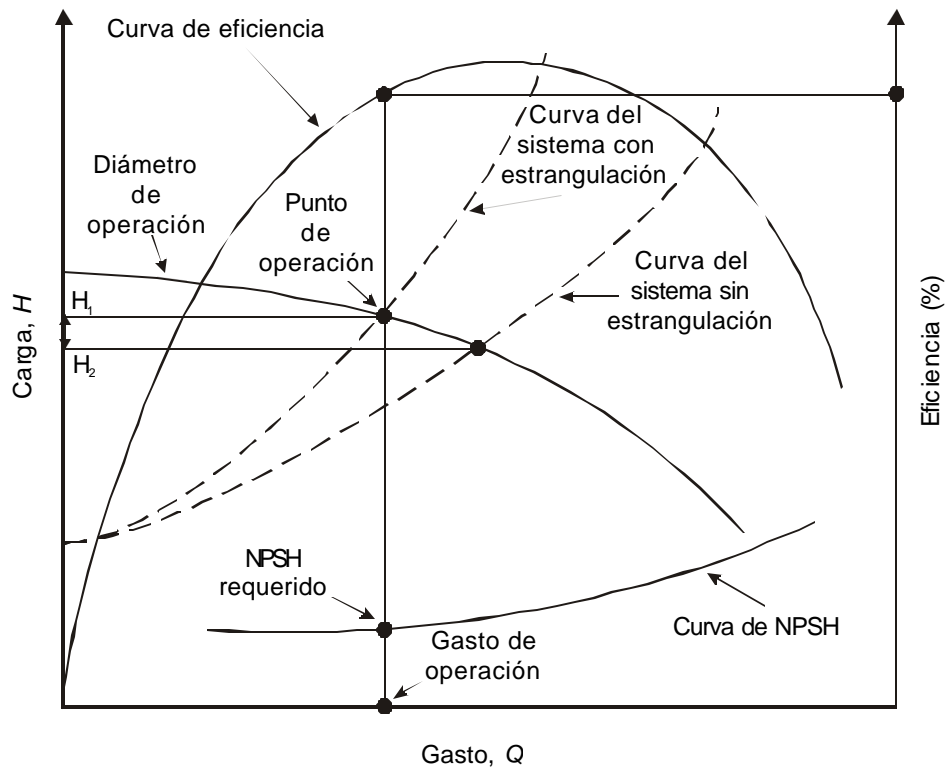
- ? Banda de regulación de gasto (se expresa como los valores máximo y mínimo de gasto).
- ? El tiempo que trabaja para los diferentes niveles de gasto entre los valores máximo y mínimo.



## ? Regulación De Gasto Mediante Estrangulación

Se obtiene mediante una válvula que va montada en la tubería en la zona de descarga de la bomba. Cerrando esa válvula se produce una pérdida de carga adicional, la cual cambia la carga total del sistema.

Al disminuir la capacidad o gasto por medio de estrangulación se altera la curva del sistema al producirse una pérdida de fricción debido a la válvula de estrangulación, tal como se muestra en la Figura 30.



**Figura 30: Regulación de Gasto Mediante Estrangulación**

## ? Regulación De Gasto Mediante Recirculación

Esta regulación se logra mediante una válvula auxiliar instalada en un tubo en derivación con la bomba (by-pass). De este modo, parte del fluido que pasa a través de la bomba se regresa al tanque de succión o al tubo que va de éste a la bomba.

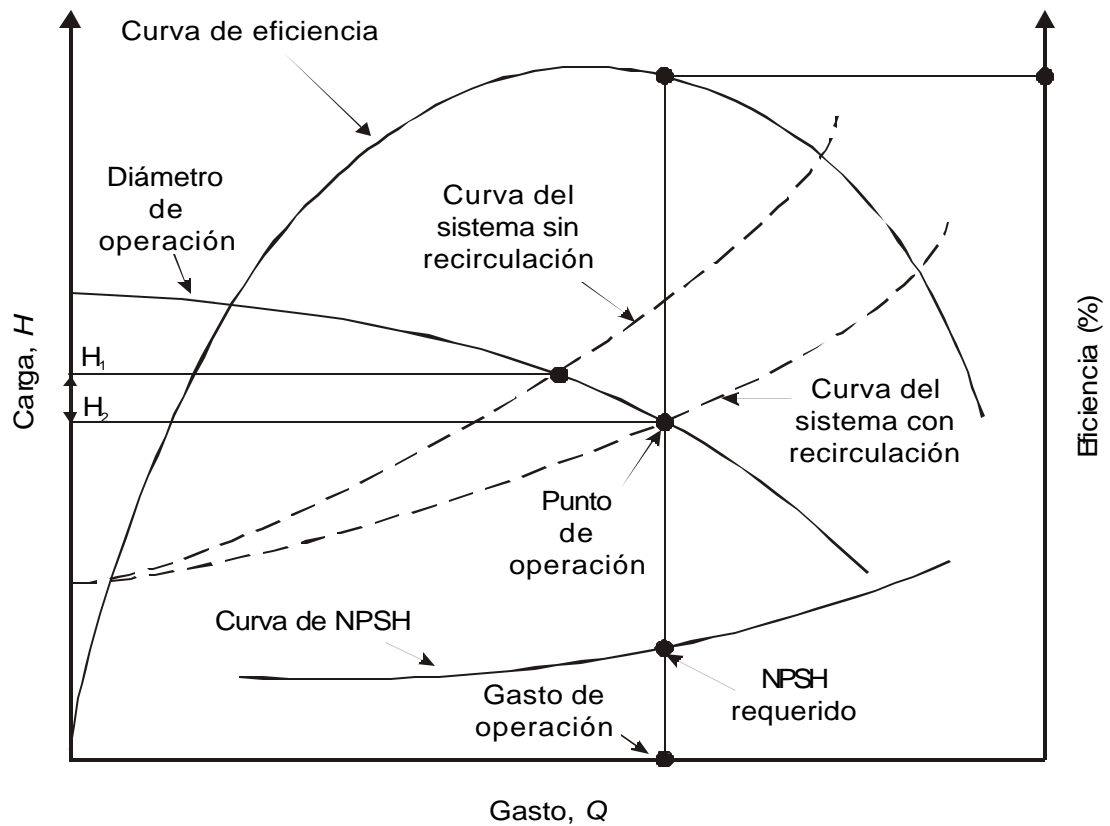


Figura 31: Regulación De Gasto Mediante Recirculación

## ? Arranque O Paro De La Bomba

Este es el método de regulación de gasto más sencillo, ya que sólo consiste en el apagado o encendido del motor de la bomba de acuerdo a la cantidad de gasto que se requiera, por ejemplo, una bomba que lleva agua a un tanque elevado mediante un control por nivel.

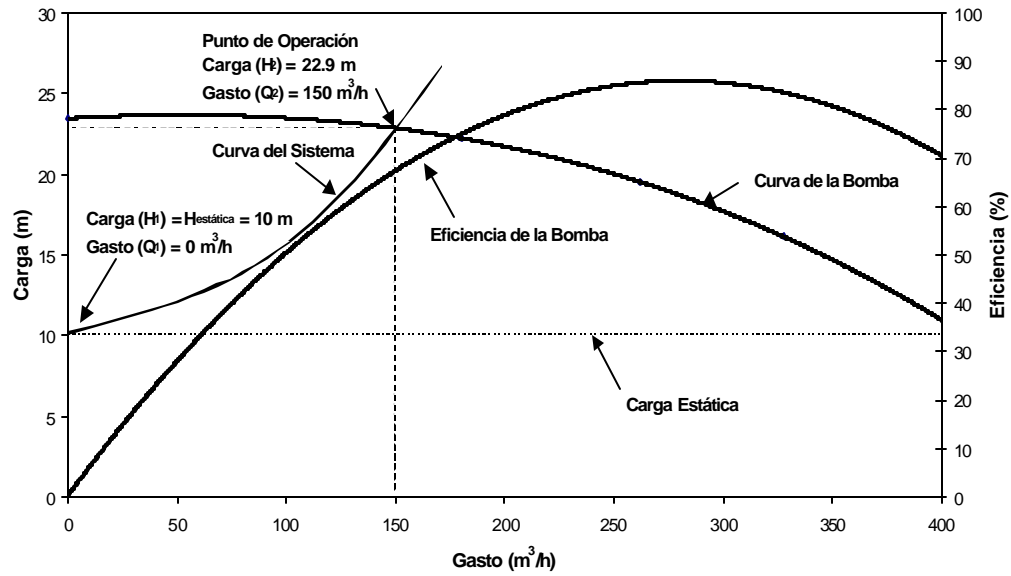
### 4.9 Construir La Curva Del Sistema A Partir Del Punto De Operación De La Bomba

La curva del sistema está compuesta por la carga estática y la carga dinámica. La carga estática se considera un parámetro constante dentro del sistema de bombeo.

Por otra parte, la carga dinámica, la cuál se origina por la fricción del fluido en la tubería, válvulas, accesorios y otros componentes (como por ejemplo intercambiadores de calor), varía proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad del fluido que maneja el sistema.

Si se conoce el punto de operación de la bomba (carga y gasto) y la carga estática del sistema, a partir de estos valores se puede generar la curva del sistema.

Para ello se traza una curva cuadrática que inicie en gasto cero pero con una carga igual a la carga estática del sistema (carga ( $H_1$ ) =  $H_{\text{estática}}$ , gasto ( $Q_1$ ) = 0), y finaliza en el punto de operación de la bomba ( $H$ ,  $Q$ ). Esto se puede ver en la Figura 32.



**Figura 32: Construcción De La Curva Del Sistema A Partir Del Punto De Operación De La Bomba**

#### 4.10 Determinar El Gasto De Operación Promedio

Es importante evaluar la duración de operación a diferentes gastos con el fin de determinar un período de operación típico y los ahorros totales a conseguir, así como para evaluar la rentabilidad de la medida. De acuerdo con la experiencia en la empresa y el tipo de servicio de la bomba, se decidirá la magnitud del período típico que deba seleccionarse (tan corto o largo como se requiera).

Conociendo el tiempo total de funcionamiento y la duración de la operación a diferentes gastos, se determina el gasto promedio ponderado como la sumatoria del producto de los

gastos con sus correspondientes tiempos de operación, dividida entre el tiempo de operación total.

$$\text{Gasto Promedio (m}^3/\text{h)} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Gasto}_i \cdot \Delta t_i)}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}$$

Donde:

$\Delta t_i$  : intervalo de tiempo con un gasto  $i$

Para poder realizar un análisis en las condiciones de operación del sistema de bombeo lo más cercanas a la realidad, es necesario determinar los valores ponderados de los demás parámetros de operación de la bomba tales como:

- Carga total y
- Potencia eléctrica del motor.

#### 4.11 Método Alternativo Para Determinar La Eficiencia De La Bomba

En caso de no contar con las curvas características de la bomba, se puede determinar la eficiencia de la bomba mediante el siguiente procedimiento:

1. Determinar la potencia requerida por la bomba en la flecha, mediante la ecuación:

$$PotenciaEnLaFlecha(hp\text{ o }kW) = PotenciaDelMotor(medida) * \eta_{motor}$$

2. Establecer la potencia hidráulica de la bomba mediante la siguiente ecuación.

$$Potencia\ Hidráulica\ (kW) = \frac{Q * H * \rho * g}{1.000\ W/kW}$$

Donde:

**Q** : Gasto (m<sup>3</sup>/s)

**H** : Carga total (m)

**ρ** : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

**g** : Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

De tal manera que la eficiencia de la bomba queda definida como:

$$\eta_{Bomba}(\%) = \frac{Q * H * \rho * g}{Potencia\ En\ La\ Flecha * 1.000\ W/kW}$$

Si se conoce la eficiencia de la bomba y la potencia hidráulica se puede determinar la potencia en la flecha (potencia requerida por la bomba o la entregada por el motor) mediante la ecuación:

$$Potencia\ En\ La\ Flecha\ (kW) = \frac{Q * H * \rho * g}{\eta_{Bomba} * 1.000\ W/kW}$$

Si se conoce la potencia en la flecha y la eficiencia del motor, se puede determinar la potencia requerida (kW) por el conjunto bomba-motor con la ecuación:

$$Potencia\ requerida\ (kW) = \frac{Potencia\ En\ La\ Flecha}{\eta_{Motor}}$$

#### 4.12 Leyes De Semejanza O Afinidad [14]

En el caso de sistemas de impulsión de fluidos, cuando las presiones no son muy altas, como es el caso de ventiladores y bombas centrífugas, existen ciertos parámetros y leyes físicas que rigen su funcionamiento; tomando en cuenta los fines y el alcance de esta metodología, no se detallará la teoría de dónde se obtienen las ecuaciones que a continuación se presentan como las “leyes de semejanza” para bombas centrífugas.

Inicialmente se presentan las relaciones en términos del diámetro del impulsor de la bomba (velocidad constante):

$$\frac{D_1}{D_2} \propto \frac{Q_1}{Q_2} \quad \frac{D_1}{D_2} \propto \frac{Q_1}{Q_2} \propto \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \quad \frac{D_1}{D_2} \propto \frac{Q_1}{Q_2} \propto \sqrt[3]{\frac{BHP_1}{BHP_2}}$$

También se pueden expresar en términos de la velocidad de rotación de la bomba, (diámetro constante):

$$\frac{N_1}{N_2} \propto \frac{Q_1}{Q_2} \quad \frac{N_1}{N_2} \propto \frac{Q_1}{Q_2} \propto \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \quad \frac{N_1}{N_2} \propto \frac{Q_1}{Q_2} \propto \sqrt[3]{\frac{BHP_1}{BHP_2}}$$

Donde:

***D*** : Diámetro del impulsor

***N*** : Velocidad de la bomba

***H*** : Carga total

***Q*** : Gasto

***BHP*** : Potencia en la flecha, requerida por la bomba

***Subíndice 1***: Condición inicial

***Subíndice 2***: Condición final o modificada

Como tal estas leyes gobiernan las relaciones entre velocidad, presión de descarga y potencia de entrada de la bomba y permiten predecir el rendimiento de la bomba a una velocidad que no sea la característica.

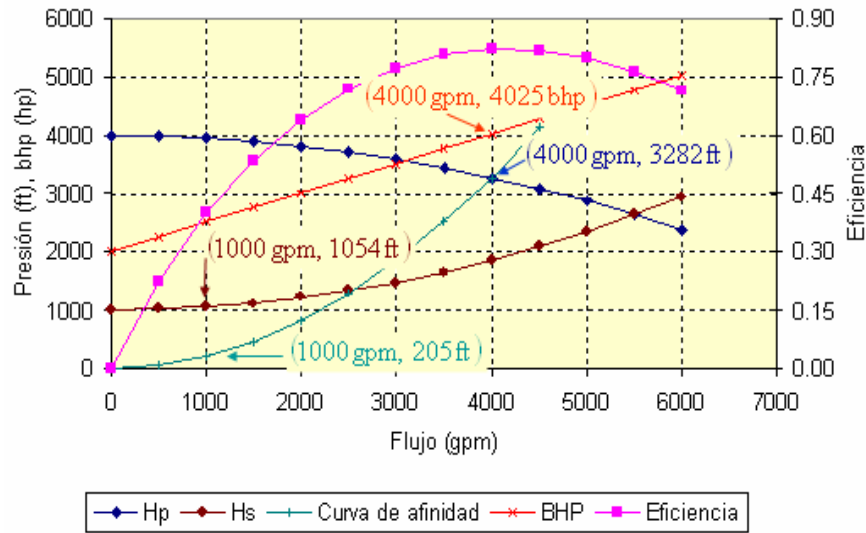
**Nota:** Estas leyes son ciertas para cambios pequeños de velocidad y diámetro del impulsor.

### ? **Error En Los Cálculos Al Utilizar Leyes De Afinidad o Semejanza**

Para determinar los ahorros en electricidad, usando un control de velocidad, con AFD, se deben determinar los ***bhp*** a velocidad fija y a velocidad ajustable.

El error más común que se comete en el caso de velocidad ajustable es el hacer uso inadecuado de las leyes de afinidad.





**Figura 33: Uso Incorrecto De Las Leyes De Afinidad**

**Ejemplo: Forma Errónea**

Determinar el ahorro en potencia al usar un AFD (controlador de frecuencia variable) para controlar una bomba que da 3282 ft de carga a un flujo de 4000 gpm y requiere 4025 hp, y en la nueva condición trabajará con 1000 gpm.

A un Q=1000 gpm, la bomba requiere 2506 bhp y el sistema requiere 1054 ft de carga de presión.

? Usando leyes de afinidad

$$H_2 = H_1 \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 = 3282 \left( \frac{1000}{4000} \right)^2 = 205 \text{ ft}$$

$$BHP_2 = BHP_1 \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^3 = 4025 \left( \frac{1000}{4000} \right)^3 = 63 \text{ hp}$$

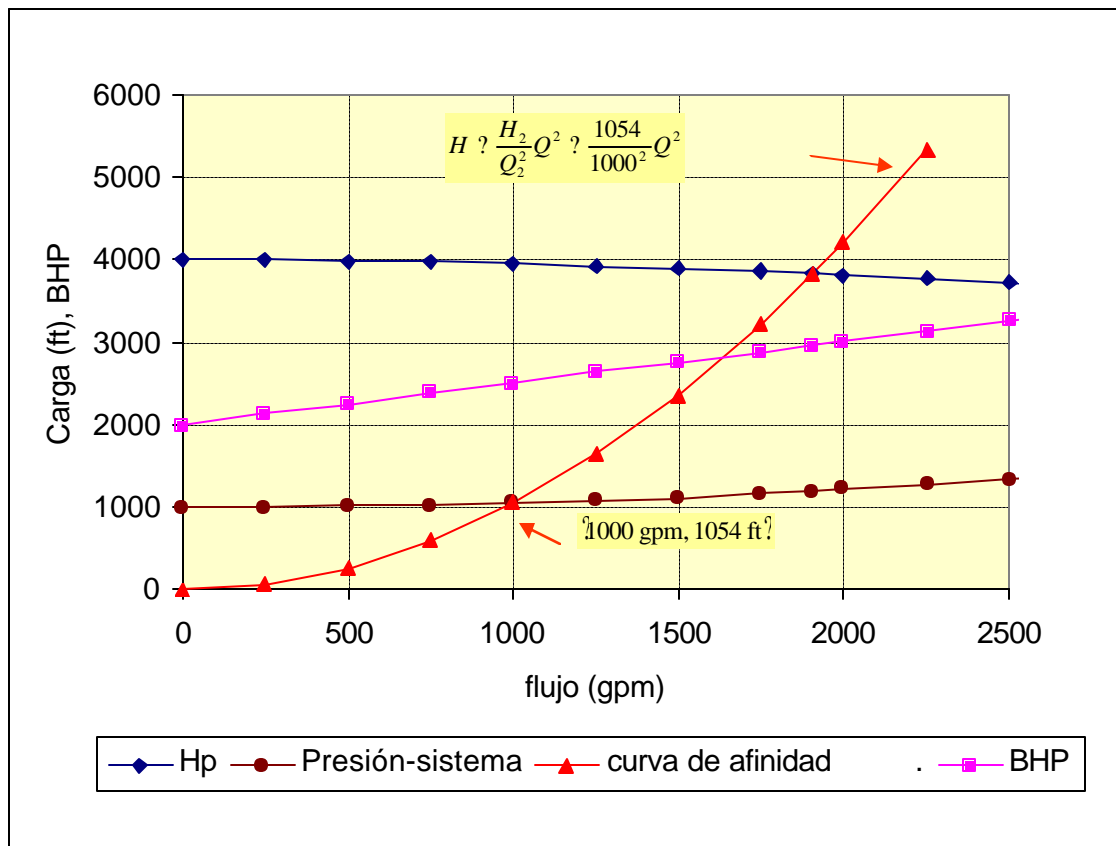
Los valores de  $Q=1000$  gpm y  $H=205$  ft no interceptan la curva del sistema por lo tanto la potencia consumida de 63 bhp no es correcta.

(Ver figura 33: Uso Incorrecto De Las Leyes De Afinidad)

En forma errónea se utilizan las leyes de afinidad al considerar una característica de operación de la bomba como los valores iniciales y realizar las operaciones con las ecuaciones de afinidad sin tomar en cuenta que la curva de afinidad construida así, no intercepta la curva de requerimientos del sistema en el flujo deseado.

#### **? Forma Correcta De Usar Las Leyes De Afinidad**

- 1.** Se debe dibujar una curva de afinidad que intersecte la curva del sistema en la condición final de flujo.
- 2.** Donde la curva de afinidad intersecte la curva de carga de la bomba se tomará como la condición inicial.
- 3.** Determinando el flujo inicial, la curva de potencia de la bomba dará la potencia inicial.
- 4.** Con la potencia inicial, flujo inicial y flujo final se determinará la potencia final



**Figura 34: Uso Correcto De Las Leyes De Afinidad**

$Q_2 \ ? \ 1000$		$Q_1 \ ? \ 1908,053$
$H_2 \ ? \ 1053,80$	$BHP_2 \ ? \ 426,9655$	$H_1 \ ? \ 3836,53$
		$BHP_1 \ ? \ 2965,95$

**Ejemplo: Forma Correcta**

Determinar el ahorro en potencia al usar un AFD para controlar una bomba que da 3283 ft de presión a un flujo de 4000 gpm, y trabajará con 1000 gpm.

La forma correcta de hacer el cálculo es:

Tomar Q=1000 gpm y H=1054 ft (el valor de la presión del sistema en esa condición de flujo), como punto de intersección de la curva de afinidad con la curva del sistema.

Construir la curva de afinidad, curva parabólica con centro en el origen y que cortará a la curva característica de la bomba en algún punto (H=3837 ft) y que corresponderá al flujo Q=1908 gpm y con la curva de potencia en 2966 bhp.

Tomar el valor de BHP=2966 bhp y Q=1908 gpm encontrados como las condiciones iniciales para calcular la potencia bhp a la condición de flujo de Q=1000 hp.

$$BHP_2 = BHP_1 \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^3 = 2906 \left( \frac{1000}{1908} \right)^3 = 427 \text{ hp}$$

**Ahorro Ficticio** = 2506 bhp - 63 bhp = 1443 bhp

**Ahorro real** = 2506 bhp - 427 bhp = 1079 bhp

**Ahorro sobrestimado** = 364 bhp

**Potencia al Freno**  $BHP = \frac{H * Q * ge}{3960 * \eta}$

**Donde:**

**H** - Carga de presión (ft)

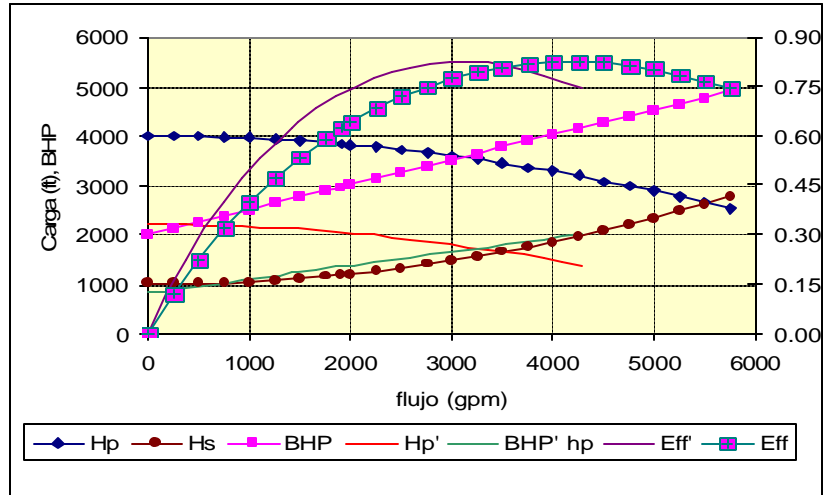
**Q** - Flujo (gal/min)

**ge** - Gravedad específica (-)

**BHP**- Potencia al freno (hp)

$\eta$  - Eficiencia de la bomba (%)

Control por frecuencia variable:



**Figura 35: Control Por Frecuencia Variable**

Frecuencia requerida dado el flujo deseado:

$$H_p = a_p + c_p Q^2$$

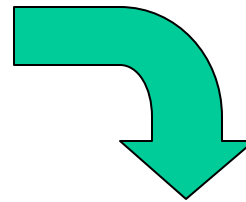
$$H_s = a_s + c_s Q^2$$

$$H_p = \left(\frac{f}{f_1}\right)^2 a_p + c_p Q^2$$

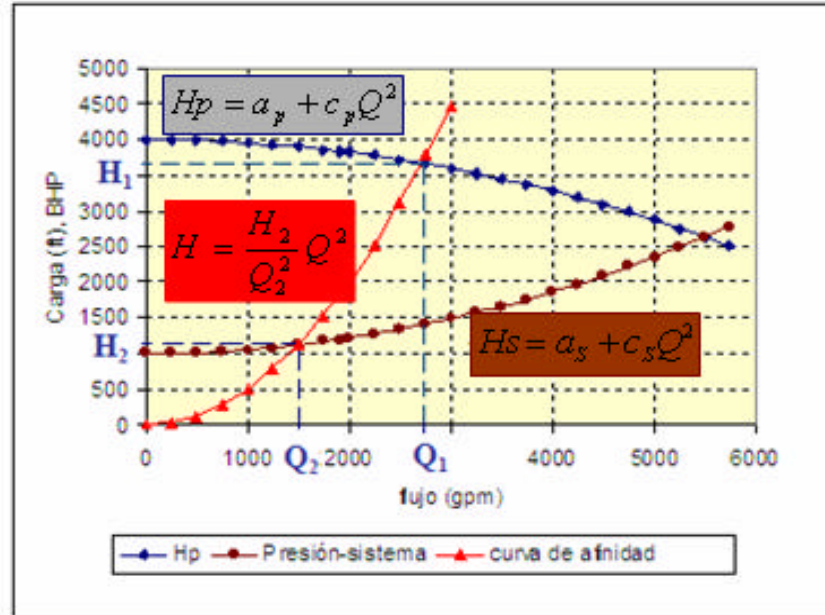
$Q_d$  = flujo deseado

$$\left(\frac{f}{f_1}\right)^2 a_p + c_p Q_d^2 = a_s + c_s Q_d^2$$

$$f = f_1 \sqrt{\frac{a_s + c_s Q_d^2}{a_p}}$$



**Curva Bomba A Otra Velocidad - 1:**



**Figura 36: Curva Bomba A Otra Velocidad - 1**

$$H_1 = a_p + c_p Q_1^2$$

$$H_2 = a_s + c_s Q_2^2$$

De acuerdo con las leyes de afinidad:

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^2$$

**Curva Bomba A Otra Velocidad - 2:**

Por lo tanto:

$$\frac{Q_1^2}{Q_2^2} \approx \frac{a_p + c_p Q_1^2}{a_s + c_s Q_2^2}$$

Podemos despejar  $Q_1$  de la siguiente manera

$$a_s + c_s Q_2^2 = a_p + c_p Q_1^2$$

$$a_s + c_s Q_2^2 - c_p Q_2^2 = a_p + c_p Q_1^2 - c_p Q_2^2$$

$$Q_1 = Q_2 \sqrt{\frac{a_p}{a_s + c_s Q_2^2 - c_p Q_2^2}}$$

### Curva Bomba A Otra Velocidad – 3:

Y de acuerdo con las leyes de afinidad

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{a_s + c_s Q_2^2 - c_p Q_2^2}{a_p}}$$

De tal forma que podemos calcular la potencia al freno

$$bhp_1 = a_{hp} + c_{hp} Q_1^3 \qquad bhp_2 = bhp_1 \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^3$$

### Curva Bomba A Otra Velocidad – 4:

Según las leyes de afinidad;

$$\frac{Hp_{N2}}{Hp_{N1}} = \left( \frac{Q_{PN2}}{Q_{PN1}} \right)^2 = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

Además

$$H_{p_{N1}} = a_{p_{N1}} + c_{p_{N1}} Q_{p_{N1}}^2$$

Despejando  $(H_p)_{N2}$  ;

$$H_{p_{N2}} = H_{p_{N1}} \left( \frac{Q_{p_{N2}}}{Q_{p_{N1}}} \right)^2$$

Sustituyendo obtenemos;

$$H_{p_{N2}} = a_{p_{N1}} \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 + c_{p_{N1}} Q_{p_{N1}}^2 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

### Curva Bomba A Otra Velocidad – 5:

$$H_{p_{N2}} = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 a_{p_{N1}} + c_{p_{N1}} Q_{p_{N1}}^2 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

Pero,

$$Q_{p_{N2}}^2 = Q_{p_{N1}}^2 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

Por lo tanto;

$$H_{p_{N2}} = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 a_{p_{N1}} + c_{p_{N1}} Q_{p_{N2}}^2$$



#### 4.13 Determinación Del Consumo De Energía

El consumo de energía se determina con la potencia que demanda el conjunto bomba-motor ( $kW$ ) y el tiempo de operación del mismo (horas al año).

Consumo (kWh) ? (Potencia medida) ? (horas de operación)

#### 4.14 Determinación De Los Costos de Operación [14]

Los costos de operación se determinan considerando los siguientes parámetros y expresiones:

- ? La tarifa aplicada en la empresa
- ? Región
- ? Costo por demanda (\$/kW)
- ? Costo por consumo (\$/kWh)
- ? La demanda promedio de la bomba-motor (kW)
- ? El consumo de energía anual (kWh/año)

El costo de la demanda es:

*Costo por demanda ? (kW en demanda)? (\$/kW) ? (12 meses/año)*

En tarifas horarias se debe considerar el costo por demanda facturable. La demanda facturable se define como se establece a continuación:

$$DF = DP + FRI + \text{MAX}(DI - DP, 0) + FRB + \text{MAX}(DB - DPI, 0)$$

Donde:

***DP*** : Demanda máxima medida en el período de punta

***DI*** : Demanda máxima medida en el período intermedio

***DB*** : Demanda máxima medida en el período de base

***DPI***: Demanda máxima medida en los períodos de punta e intermedio

El costo por consumo se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Costo por consumo} = (\text{kWh anuales}) \cdot (\$/\text{kWh})$$

Para el caso de tarifas horarias se debe considerar el costo para cada periodo de facturación (consumo de energía en horas base, intermedia, punta y semi-punta).

Entonces, el costo total de operación queda definido como la suma de los costos por demanda más los costos por consumo.

$$\text{Costo total de operación} = \text{Costo por demanda} + \text{Costo por consumo}$$

## 4.15 Determinación De Los Ahorros De Energía

### 4.15.1 Ahorro Por Disminución De La Demanda

La disminución en demanda se determina al restar la potencia que requiere el conjunto bomba-motor actualmente (se obtiene directamente mediante mediciones) y la potencia que demandará el sistema bomba-motor aplicando medidas de ahorro tales como el recorte del impulsor de la bomba para mejorar su punto de operación, la sustitución por una bomba de mayor eficiencia, la aplicación de convertidor de frecuencia en el sistema de bombeo o la sustitución de motores estándar por motores de alta eficiencia.

El ahorro por disminución de la demanda se calcula como:

$$\frac{\text{Disminución en Demanda (kW)}}{\text{Potencia Actual (kW)} - \text{Potencia Propuesta (kW)}}$$

### 4.15.2 Ahorro De Energía Por Disminución En El Consumo

#### Caso 1: Tarifas Ordinarias

El ahorro de energía se determina multiplicando el ahorro en demanda (kW) por las horas de operación (horas al año).

$$\text{Ahorro en Consumo (kWh)} = \frac{\text{ahorro en demanda (kW)}}{\text{horas de operación del motor al año}}$$

## Caso 2: Tarifas Horarias

$$\frac{\text{Ahorro en Consumo en Base (kWh)}}{\text{ahorro en demanda (kW)}} \cdot \frac{\text{horas de operación anuales del motor en base}}{?}$$

$$\frac{\text{Ahorro en Consumo en Intermedia (kWh)}}{\text{ahorro en demanda (kW)}} \cdot \frac{\text{horas de operación anuales del motor en intermedia}}{?}$$

$$\frac{\text{Ahorro en Consumo en Punta (kWh)}}{\text{ahorro en demanda (kW)}} \cdot \frac{\text{horas de operación anuales del motor en punta}}{?}$$

$$\frac{\text{Ahorro en Consumo en SemiPunta (kWh)}}{\text{ahorro en demanda (kW)}} \cdot \frac{\text{horas de operación anuales del motor en semipunta}}{?}$$

### 4.16 Determinación De Los Ahorros Económicos

#### Caso 1: Tarifas Ordinarias

El ahorro económico resultante de la disminución en demanda y del ahorro en energía se determina mediante las siguientes expresiones:

$$\frac{\text{Ahorro Económico por Demanda}}{?} \cdot \frac{\text{Disminución en Demanda (kW)}}{?} \cdot (\$/kW)$$

$$\frac{\text{Ahorro Económico por Consumo}}{?} \cdot \frac{\text{Ahorro en Consumo Anual (kWh/año)}}{?} \cdot (\$/kWh)$$

## Caso 2: Tarifas Horarias

Para el caso de las tarifas horarias el ahorro económico se calcula como:

$$\text{Ahorro Económico por Consumo} = \left( \text{Ahorro en Consumo en Base en kWh/año} \cdot \$/\text{kWh}_{\text{Base}} \right) - \left( \text{Ahorro en Consumo en Intermedia en kWh/año} \cdot \$/\text{kWh}_{\text{Intermedia}} \right) - \left( \text{Ahorro en Consumo en Punta en kWh/año} \cdot \$/\text{kWh}_{\text{Punta}} \right) + \left( \text{Ahorro en Consumo en Semipunta en kWh/año} \cdot \$/\text{kWh}_{\text{Semipunta}} \right)$$

### Cambio de Horario:

En este caso se pretende que se analice la posibilidad de que el equipo que trabaja en el horario más costoso (horario punta) cambie su operación a alguno de los horarios más económicos (horario base o intermedio), siempre y cuando el equipo en cuestión no opere de manera continua las 24 horas del día y que las condiciones de operación lo permitan. El ahorro económico que se tendría al cambiar la operación de un equipo a un horario más económico se calcula como:

$$\text{Ahorro Económico por Consumo} = \left( \text{costo en el horario actual} - \text{costo en el horario propuesto} \right) \cdot \text{kWh anuales}$$

## **4.17 Determinación De La Rentabilidad Financiera [14]**

### **4.17.1 Periodo Simple De Recuperación**

Este método consiste en determinar el tiempo simple (meses, años, etc.) que tarda un inversionista para recuperar el capital invertido, ya sea por los ingresos que produce el proyecto o por los beneficios resultantes de aplicar alguna medida de ahorro de energía (ahorros en la facturación eléctrica). El número de meses o años en que se amortiza la inversión que requiere la aplicación de la medida recibe el nombre de período simple de recuperación.

Se consideran todos los costos en términos nominales y no se considera el valor del dinero en el tiempo. El criterio de aceptación del proyecto lo establece el inversionista definiendo el período máximo en que debe de recuperarse la inversión. El período simple de recuperación se calcula como:

$$\text{Periodo de Recuperación ? } \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorros Anuales}}$$

### **4.17.2 Valor Presente Neto (VPN)**

Consiste en traer a valor presente todos los componentes del flujo de efectivo, mediante una tasa de interés, durante el período de análisis de un proyecto dado; la tasa de actualización debe ser superior al costo de capital, a fin de satisfacer el interés del inversionista.

El VPN representa la magnitud absoluta en que los ingresos equivalentes de un flujo de efectivo superan o son superados por los egresos equivalentes de dicho flujo. Es decir, si el valor presente neto del flujo de efectivo es positivo, significa que los ingresos son mayores que los costos y que el rendimiento que se espera obtener del proyecto que demandó la inversión es mayor que el rendimiento mínimo establecido por la empresa o el inversionista. En tal caso el proyecto es factible de llevarse a cabo.

Para usar esta técnica en la evaluación, los ingresos o beneficios deben definirse como flujos positivos de dinero y los egresos o desembolsos como flujos negativos.

$$VPN = \sum_{i=0}^n \frac{Valores_i}{(1 + tasa)^i}$$

$$VPN = VP_{beneficios} - VP_{egresos}$$

Donde:

***n*** : número de intervalos de tiempo sobre los cuales se analiza la inversión. Su valor puede estar definido por el tiempo de vida del equipo (vida útil).

***Valores*** : representan los flujos de efectivo.

***Tasa***: tasa de actualización establecida por el inversionista.

#### 4.17.3 Tasa Interna de Retorno (TIR)

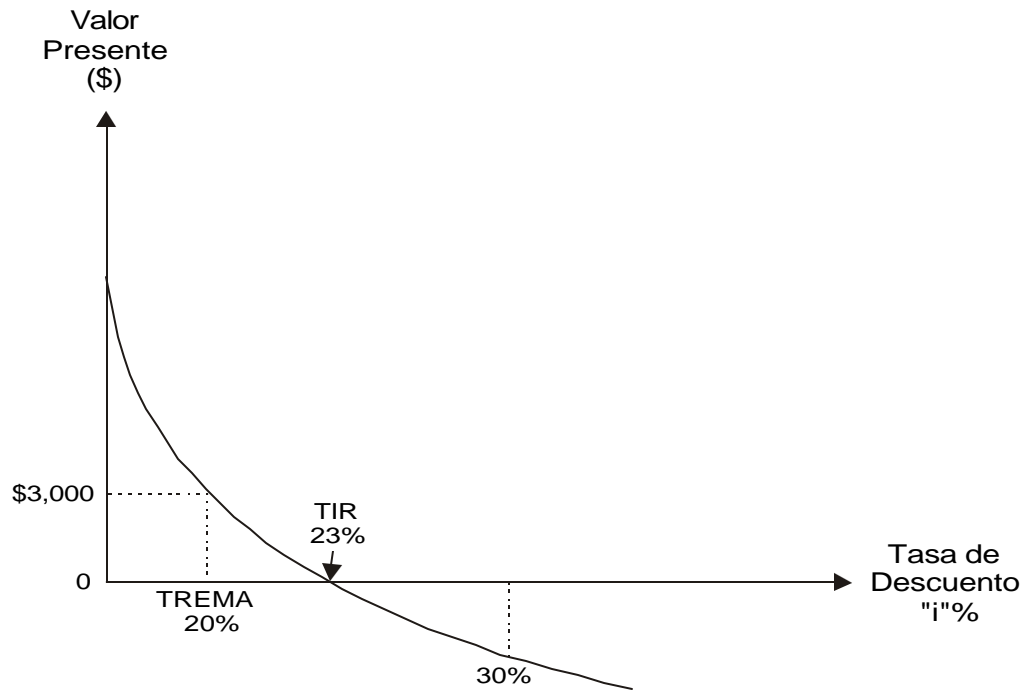
La tasa interna de retorno (TIR) es un índice de rentabilidad ampliamente aceptado. Se define como la tasa de interés “ $i$ ” que reduce a cero el valor presente del flujo de efectivo, es decir, de una serie de ingresos y egresos.

Por lo general, este cálculo se hace por un método de aproximaciones. Se suponen dos o tres tasas de interés, se calculan los valores presentes o flujos de efectivo anuales uniformes equivalentes y se encuentra la tasa de rendimiento por interpolación. A continuación se muestran estos pasos con mayor detalle:

1. La tasa de retorno se determina de manera iterativa. Se propone una tasa de interés y se determina el VPN del flujo de efectivo del proyecto. Si el resultado del valor presente es positivo,  $VPN(Tasa_1) > 0$ , entonces se proponen otras tasas de interés hasta obtener un VPN negativo, es decir,  $VPN(Tasa_2) < 0$ .
2. En caso de que el resultado del VPN sea negativo con la primera tasa de interés propuesta ( $VPN(Tasa_1) < 0$ ), entonces se procede de manera inversa.
3. Finalmente, la TIR se determina mediante interpolaciones entre los VPN resultantes para cada tasa de interés propuesta para un  $VPN = 0$ .



$$TIR = Tasa_1 \left\{ \frac{VPN_1}{VPN_1 + VPN_2} \right\} Tasa_1 + Tasa_2 \left\{ \frac{VPN_2}{VPN_1 + VPN_2} \right\}$$



**Figura 37: Determinación de la Tasa Interna de Retorno**

Para que la inversión sea rentable se debe tener una tasa de rendimiento o tasa interna de retorno (TIR) mayor que la tasa de descuento propuesta por el inversionista.

Por último, es evidente que la TIR no se puede calcular si se tiene un proyecto de inversión con un flujo de efectivo formado en su totalidad por costos, o bien, por ingresos.

## 5 CÁLCULOS Y ANÁLISIS DEL SISTEMA

### 5.1 Generalidades [21]

Sin duda alguna los flujos internos en oleoductos y ductos en general se encuentran en todas las partes de la industria. Desde el suministro de agua potable hasta el transporte de líquidos industriales, hoy por hoy los ingenieros han diseñado y construido incontables kilómetros de tuberías a gran escala. También abundan unidades de tuberías más pequeñas: en controles hidráulicos, en sistemas de calefacción y *aire acondicionado*, y en sistemas de flujos cardiovasculares y pulmonares, por nombrar algunos. Estos flujos pueden ser continuos o no continuos, uniformes o no uniformes. El fluido puede ser incompresible o compresible, y el material del que están hechas las tuberías puede ser elástico, inelástico, o tal vez viscoelástico, pero en términos generales es importante saber que tienen unas características especiales y únicas que hacen de su análisis un procedimiento extenso y complejo y más aún cuando son recorridos ramificados y con características variables, como es el caso específico del “*sistema de circulación de agua fría de los buques tipo Nodriza fluvial*”.

En términos generales las tuberías son relativamente simples, de modo que las variables pueden ser resueltas fácilmente con una calculadora, o para otros casos son lo suficientemente complicadas como para utilizar programas de computadora especializados que hacen más sencillo el procedimiento.

Los sistemas de tuberías están conformados por elementos y componentes. Básicamente, los elementos son tramos de tubos de diámetro constante y los componentes son válvulas, tees, codos, reductores o cualquier otro dispositivo o accesorio que provoque pérdida en el sistema. Además de los componentes y elementos mencionados también están las bombas que agregan energía al sistema y las turbinas que extraen energía.

Es importante realizar un análisis completo del circuito que incluya el estudio de las pérdidas para diferentes tipos de sistemas de tuberías, incluidas configuraciones en ramal o mixto, en serie y en paralelo, de esta forma la atención se dirige después a sistemas de redes más amplios y complejos en los que se presentan varios métodos de solución y ofrecen herramientas claves para resolver el sistema específico en estudio.

El análisis para tuberías más complejas tiene una metodología similar a la de tuberías simples. Con redes de tuberías relativamente simples, tales como tuberías en serie, en paralelo, se pueden desarrollar soluciones apropiadas para usarse con calculadoras, algoritmos, o programas de cómputo. Tales procedimientos son pertinentes ya que utilizan el ingenio de quien lo resuelve, y requieren un conocimiento de la naturaleza del flujo y las distribuciones de altura piezométrica para la configuración particular de la tubería.

El principio fundamental en el procedimiento adecuado es identificar todas las incógnitas y escribir un número equivalente de ecuaciones independientes a ser resueltas. Posteriormente, el sistema se simplifica eliminando tantas incógnitas como sea posible y reduciendo el problema a una serie de problemas de tuberías simples que sea posible de

resolver de manera más sencilla, es de esta forma como se hace necesario realizar este compendio bibliográfico que permita el estudio preciso del sistema, ya que como se ha mencionado en el contenido del trabajo este sistema específico es lo suficientemente complejo como para resolverlo de manera habitual, haciendo de este análisis un punto importante y crucial para llegar a la futura optimización del sistema.

## 5.2 Descripción Y Cálculos Del Sistema Real

El sistema de circulación de agua fría de la nodriza fluvial VI es un circuito cerrado (de agua recirculada) que se distribuye a lo largo de la embarcación, recorriendo 5 módulos o bloques, correspondientes al módulo 101, 102, 103, 500 y 501, iniciando en el cuarto de máquinas auxiliares de proa y haciendo el recorrido para terminar nuevamente en el mismo punto de partida. El sistema se organiza de la siguiente manera.

<b>MODULO 501</b>	
<b>Ubicación</b>	<b>Nº de Fan Coils</b>
Puente de gobierno	4
S.E.I.T (Sección de inteligencia del buque)	1
Cuarto de radio	1
Enfermería	1

Camarote comandante	1
Camarote de 2do comandante	1
Oficina	1
C3I (Compartimiento de control de arma automatizada)	1
Pasillo 1-24-O-L (Escaleras de acceso a la cubierta 2)	1
<b>TOTAL</b>	<b>12</b>

**Tabla 8: Distribución Del Sistema De A/A –Modulo 501**

<b>MODULO 500</b>	
<b>Ubicación</b>	<b>Nº de Fan Coils</b>
Comedor	2
<b>TOTAL</b>	<b>2</b>

**Tabla 9: Distribución Del Sistema De A/A –Modulo 500**

<b>MODULO 101</b>	
<b>Ubicación</b>	<b>Nº de Fan Coils</b>
Cuarto control de ingeniería	1
Camarote ECF 3 (ECF = Elemento de combate fluvial)	1
Camarote tripulación 3	1
<b>TOTAL</b>	<b>3</b>

**Tabla 10: Distribución Del Sistema De A/A –Modulo 101**

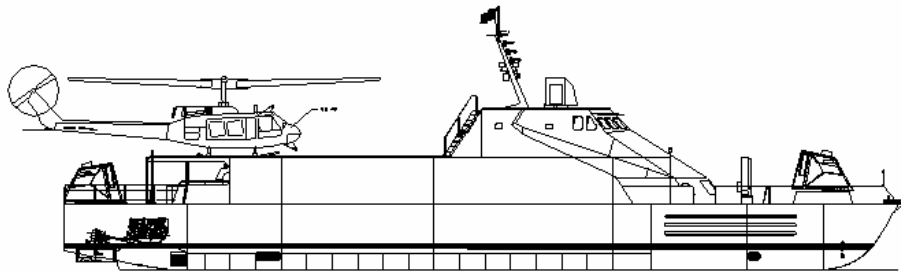
<b>MODULO 102</b>	
<b>Ubicación</b>	<b>Nº de Fan Coils</b>
Camarote tripulación 1	1
Camarote tripulación 2	1
Camarote ECF 1 (ECF = Elemento de combate fluvial)	1
Camarote ECF 2 (ECF = Elemento de combate fluvial)	1
<b>TOTAL</b>	<b>4</b>

**Tabla 11: Distribución Del Sistema De A/A –Modulo 102**

MODULO 103	
Ubicación	Equipo Para Sistema De A/A
Cuarto de máquinas auxiliares de proa	Chiller marino marca Carrier modelo 30 HWC 025, para refrigerante R-22, con capacidad nominal de 19.9 toneladas de refrigeración
Cuarto de máquinas auxiliares de proa	Bomba centrífuga IHM modelo 3x18 de 2Hp
<b>TOTAL</b>	<b>2</b>

**Tabla 12: Distribución Del Sistema De A/A –Modulo 103**

Para tener una idea más clara de la distribución de cada una de las cubiertas se tiene la Figura 38 con la vista lateral de la Nodriza VI, además se recomienda ir a la **Anexo A** que muestra la disposición general de la embarcación, para tener claro el recorrido del circuito hidráulico



**Figura 38: Vista Lateral De La Nodriza VI**

En cuanto a la unidad de enfriamiento (Chiller marino), la bomba y demás componentes que hacen parte del sistema de circulación de agua fría para A/A, y que se encuentran en el cuarto de maquinas auxiliares de proa, a continuación se muestra una imagen clara de la distribución de equipos, es precisamente aquí donde inicia el circuito que se pretende analizar.

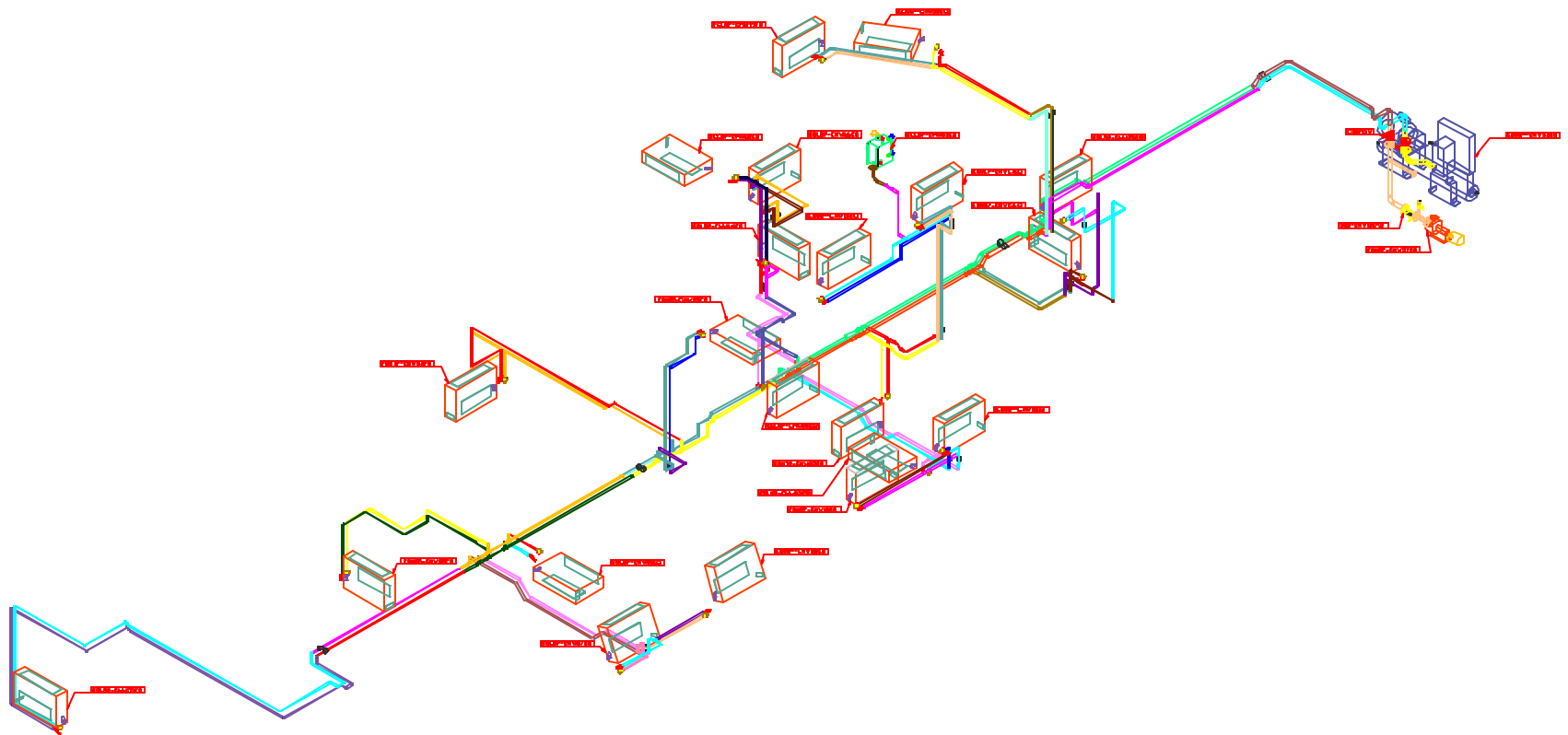


**Figura 39: Cuarto De Máquinas Auxiliares De Proa (Chiller Marino)**

Después de tener clara la distribución del sistema se procede a realizar un análisis del mismo dividiéndolo en trayectorias que corresponden a todas las ramificaciones que presenta el diseño, la nodriza presenta 21 trayectorias correspondientes a los 21 fan coils techo-pared de la marca multiaqua referencia CFFZA de 2,4 gpm y 3,6 gpm que se distribuyen a lo largo del circuito.



A continuación se observa el isométrico con la distribución de equipos en el sistema y una tabla indicando las referencias de los fan coils, además aparece la nomenclatura de los equipos según el diseño que se realizó en COTECMAR y algunas especificaciones de los mismos que ayudan a definir y entender mejor el comportamiento del sistema.



**Figura 40: Sistema De Circulación De Agua Fría Montado En La Nodriza VI (Ver también ANEXO B)**

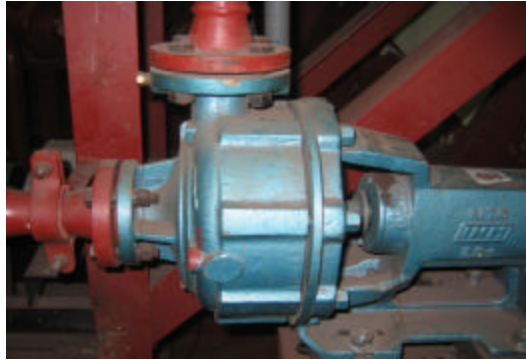
La siguiente tabla indica los valores de placa de los flujos para cada Fan coil.

<i>LOCALIZACIÓN</i>	<i>TRAYECTORIA</i>	<i>EQUIPO</i>	<i>FAN-COIL</i>	<i>GPM</i>
Modulo 501	Trayectoria 1 (1-1)	NV-CHW 18EQ	CFFZA – 06	3,6
Modulo 501	Trayectoria 2 (1-2)	NV-CHW 19EQ	CFFZA – 06	3,6
Modulo 501	Trayectoria 3 (2-1)	NV-CHW 13EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 501	Trayectoria 4 (2-2)	NV-CHW 20EQ	CFFZA – 06	3,6
Modulo 102	Trayectoria 5 (3-1)	NV-CHW 05EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 501	Trayectoria 6 (3-2)	NV-CHW 15EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 501	Trayectoria 7 (3-3)	NV-CHW 17EQ	CFFZA – 06	3,6
Modulo 102	Trayectoria 8 (4-1)	NV-CHW 06EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 501	Trayectoria 9 (4-2)	NV-CHW 14EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 501	Trayectoria 10 (4-3)	NV-CHW 16EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 501	Trayectoria 11 (4-4)	NV-CHW 12EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 102	Trayectoria 12 (5-1)	NV-CHW 03EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 501	Trayectoria 13 (5-2)	NV-CHW 11EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 501	Trayectoria 14 (5-3)	NV-CHW 10EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 102	Trayectoria 15 (6-1)	NV-CHW 04EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 501	Trayectoria 16 (7-1)	NV-CHW 09EQ	CFFZA – 06	3,6
Modulo 101	Trayectoria 17 (8-1)	NV-CHW 01EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 101	Trayectoria 18 (9-1)	NV-CHW 02EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 500	Trayectoria 19 (10-1)	NV-CHW 08EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 500	Trayectoria 20 (10-2)	NV-CHW 07EQ	CFFZA – 04	2,4
Modulo 101	Trayectoria 21 (11-1)	NV-CHW 51EQ	CFFZA – 04	2,4
<b>SISTEMA COMPLETO</b>			<b>TOTAL</b>	<b>56,4</b>

**Tabla 13: Trayectorias Del Sistema Para Su Análisis**

Finalmente antes de empezar el análisis matemático para el sistema es conveniente conocer según el fabricante las características de la bomba utilizada dentro del montaje; como se mencionó anteriormente es una bomba IHM modelo 3x18 de 2 Hp con eje libre, con diámetro de impulsor de 180 mm, las principales características de este modelo de bombas son: [22]

- ? Bombas tipo industrial para trabajo pesado y diseño extra fuerte
- ? Mayor vida útil
- ? Construcción en hierro
- ? Carcasa ubicable en varias posiciones
- ? Diseño "Back Pull Out" para fácil desarme con alto número de esparragos
- ? Fácil y rápida adquisición de repuestos
- ? Versión eléctrica monoblock a 3500 rpm, monoblock de 1750 rpm, eje libre y monoblock diesel.
- ? Potencias desde 2 hasta 100 Hp
- ? Bridas de succión y descarga norma ANSI 125 ó 250
- ? ***Bajo costo de operación y ahorro de energía***
- ? Rotor balanceado hidráulicamente



**Figura 41: Bomba Centrífuga De 1750 Rpm**

Es valido aclarar que durante el montaje se hicieron modificaciones y los flujos de algunos de los equipos (fan coils) que se consideraron durante el diseño, se cambiaron por otros que fueron los que finalmente se instalaron en el sistema, esto para efectos de cálculos no se tendrá en cuenta ya que se hará el análisis con los datos de diseño que se tuvieron en cuenta mientras se hizo toda la labor de ingeniería, con los datos de planos y catálogos de fabricantes, además se debe tener en cuenta que son cambios mínimos que no representan grandes variaciones en los cálculos.

El análisis se realiza haciendo la distribución de flujos según el comportamiento del sistema y se observa la variación de los mismos, donde se tiene una línea tanto para suministro como para retorno de todos los caudales que intervienen, de esta manera se puede determinar el porcentaje que se pierde en cada tramo y los valores de flujo desconocidos con las ecuaciones de nodo planteadas a partir de la distribución que se puede observar en el **ANEXO C** mostrando allí la división de los flujos del sistema.

De acuerdo al arreglo de tuberías del sistema, las ecuaciones de nodo y los valores de las fracciones de flujo que se conocen correspondiente a cada sección, se calcularán los valores restantes de  $Q$ , los valores de las velocidades  $V$ , los números de Reynolds  $Re$ , las fracciones del flujo total para cada tramo y los factores de fricción  $f$ , para de esta manera reemplazar en las ecuaciones correspondientes a las pérdidas de carga total y obtener los valores respectivos para cada trayectoria.

De las ecuaciones de nodo finalmente tenemos.

$$1) \left. \begin{array}{l} Q_1 ? Q_3 ? Q_2 \\ Q_2 ? Q_4 ? Q_5 \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} Q_1 ? Q_3 ? Q_4 ? Q_5 ? \\ \text{Ecuación 1} \end{array}$$

$$2) \left. \begin{array}{l} Q_3 ? Q_6 ? Q_9 \\ Q_6 ? Q_7 ? Q_8 \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} Q_3 ? Q_7 ? Q_8 ? Q_9 ? \\ \text{Ecuación 2} \end{array}$$

$$3) \left. \begin{array}{l} Q_9 ? Q_{10} ? Q_{15} \\ Q_{10} ? Q_{11} ? Q_{12} \\ Q_{12} ? Q_{13} ? Q_{14} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} Q_9 ? Q_{11} ? Q_{13} ? Q_{14} ? Q_{15} ? \\ \text{Ecuación 3} \end{array}$$

$$4) \left. \begin{array}{l} Q_{15} ? Q_{16} ? Q_{23} \\ Q_{16} ? Q_{17} ? Q_{18} \\ Q_{18} ? Q_{19} ? Q_{20} \\ Q_{20} ? Q_{21} ? Q_{22} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} Q_{15} ? Q_{17} ? Q_{19} ? Q_{21} ? Q_{22} ? Q_{23} ? \\ \text{Ecuación 4} \end{array}$$

$$5) \left. \begin{array}{l} Q_{23} ? Q_{24(a)} ? Q_{27} \\ Q_{24(a)} ? Q_{24(b)} ? Q_{24(c)} \\ Q_{24(c)} ? Q_{25} ? Q_{26} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} Q_{23} ? Q_{24(b)} ? Q_{25} ? Q_{26} ? Q_{27} ? \\ \text{Ecuación 5} \end{array}$$

$$6) \left. \begin{array}{l} Q_{27} ? Q_{28} ? Q_{29} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} Q_{27} ? Q_{28} ? Q_{29} ? \\ \text{Ecuación 6} \end{array}$$

$$7) \left. \begin{array}{l} Q_{29} ? Q_{30} ? Q_{31} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} Q_{29} ? Q_{30} ? Q_{31} ? \\ \text{Ecuación 7} \end{array}$$

$$8) \left. \begin{matrix} Q_{31} ? Q_{32} ? Q_{33} \end{matrix} \right\} \longrightarrow \begin{matrix} Q_{31} ? Q_{32} ? Q_{33} ? \\ \text{Ecuación 8} \end{matrix}$$

$$9) \left. \begin{matrix} Q_{33} ? Q_{34} ? Q_{35} \end{matrix} \right\} \longrightarrow \begin{matrix} Q_{33} ? Q_{34} ? Q_{35} ? \\ \text{Ecuación 9} \end{matrix}$$

$$10) \left. \begin{matrix} Q_{35} ? Q_{36} ? Q_{39} \\ Q_{36} ? Q_{37} ? Q_{38} \end{matrix} \right\} \longrightarrow \begin{matrix} Q_{35} ? Q_{37} ? Q_{38} ? Q_{39} ? \\ \text{Ecuación 10} \end{matrix}$$

NOTA:

$$Q_1 ? Q_T ? Q_4 ? Q_5 ? Q_7 ? Q_8 ? Q_{11} ? Q_{13} ? Q_{14} ? Q_{17} ? Q_{19} ? Q_{21} ? Q_{22} ? Q_{24(b)} ? \\ Q_{25} ? Q_{26} ? Q_{28} ? Q_{30} ? Q_{32} ? Q_{34} ? Q_{37} ? Q_{38} ? Q_{39}$$

Posteriormente con estas ecuaciones y con los flujos conocidos de placa de los fan coil y el de la bomba tendremos todos nuestros valores de  $Q$ .

A continuación se procede a obtener las ecuaciones por trayectorias para las pérdidas y así obtener la línea crítica que determinará la selección de la bomba ya que para la selección de



la bomba en un sistema de tuberías en el cual hay múltiples trayectorias del fluido, se sigue un procedimiento sencillo que consiste en estudiar cada tramo del sistema por separado, y con el tramo que presenta la mayor resistencia al flujo, consistente en la suma de las pérdidas totales y la elevación a vencer, se efectúa la selección de la bomba.

Para determinar estos valores se usará la ecuación para pérdidas por fricción en tuberías.

[21] tomada de Mecánica de fluidos. Potter Merle C. y Wiggert David C. Tercera Edición. Editorial Thomson.

$$H = \frac{8fLQ^2}{D^5 g^2} + \frac{8KQ^2}{D^4 g^2} \quad H = \frac{8}{g^2} f \frac{LQ^2}{D^5} + K \frac{Q^2}{D^4}$$

Resolviendo el valor constante tenemos:

$$H = 0,08271 \text{seg}^2/\text{m}^3 f \frac{LQ^2}{D^5} + K \frac{Q^2}{D^4}$$

En donde  $Q$  esta en  $\text{m}^3/\text{seg}$

$L$  en  $m$

$f$  es adimensional

$K$  en  $m$

$D$  en  $m$

De esta manera sustituyendo las unidades correspondientes se puede determinar el análisis dimensional de  $H$ , así:

$$H = \frac{K \cdot m^3 \cdot \text{seg}^2}{m^5} + \frac{K \cdot m^3 \cdot \text{seg}^2}{m^4} \cdot m$$


Para cada trayectoria se tiene la línea de suministro y retorno por lo que el recorrido que hace incluye una determinada variedad de accesorios, equipos y tubería como tal, de esta manera el valor de la pérdida total por trayectoria corresponde a la suma de las pérdidas por longitud y las pérdidas por accesorios que a su vez incluye las pérdidas por equipos varios como lo son los fan coils, el chiller, algunas válvulas entre otros.

Antes cabe mencionar que para resolver las ecuaciones de las pérdidas queda pendiente resolver los valores de **k** o **H** de los equipos varios que no se encuentran por tablas, estos accesorios son: las válvulas de ajuste de flujo, los filtros tipo “Y”, los fan coils y en el Chiller, que se toman de la siguiente manera:

El listado de valores para cada uno de los accesorios presentes en el sistema se encuentra en el **ANEXO D**.

- 1) Para las válvulas de ajuste de flujo de ¾” no se tiene el valor de **k** así que con el valor de **C<sub>v</sub>** (coeficiente de velocidad) y con el flujo de los fan coils se puede determinar directamente la caída de presión en unidades de longitud con esta formula:

$$? P(ft ? H_2O) ? \frac{(gpm)^2}{(C_v)^2} * 2,31 [23]$$

SYMBOL/SKETCH	DESCRIPTION	C <sub>v</sub> FACTOR	
		1/2	3/4
<p>B + G</p> 	<p><b>CIRCUIT SETTER:</b> Variable water flow balancing valve with manual adjustment knob, pointer, percent-open scale, memory stop and integral pressure read-out ports.</p> <p>Application — Used for close tolerance water flow balancing. Positive shut-off ball valve feature allows usage as combination balancing and shut-off valve.</p>	1.95	4.15

**Tabla 14: Datos Del Valor De Cv. Para Una Válvula De Ajuste De Flujo De 3/4"**

Para los fan coils de 2,4 gpm:

$$? P(ft ? H_2O) ? \frac{(2,4)^2}{(4,15)^2} * 2,31 ? 0,772570765 ft ? H_2O$$

Al hacer la conversión a metros:

$$? P ? 0,772570765 ft ? H_2O ? 0,2354796 m$$

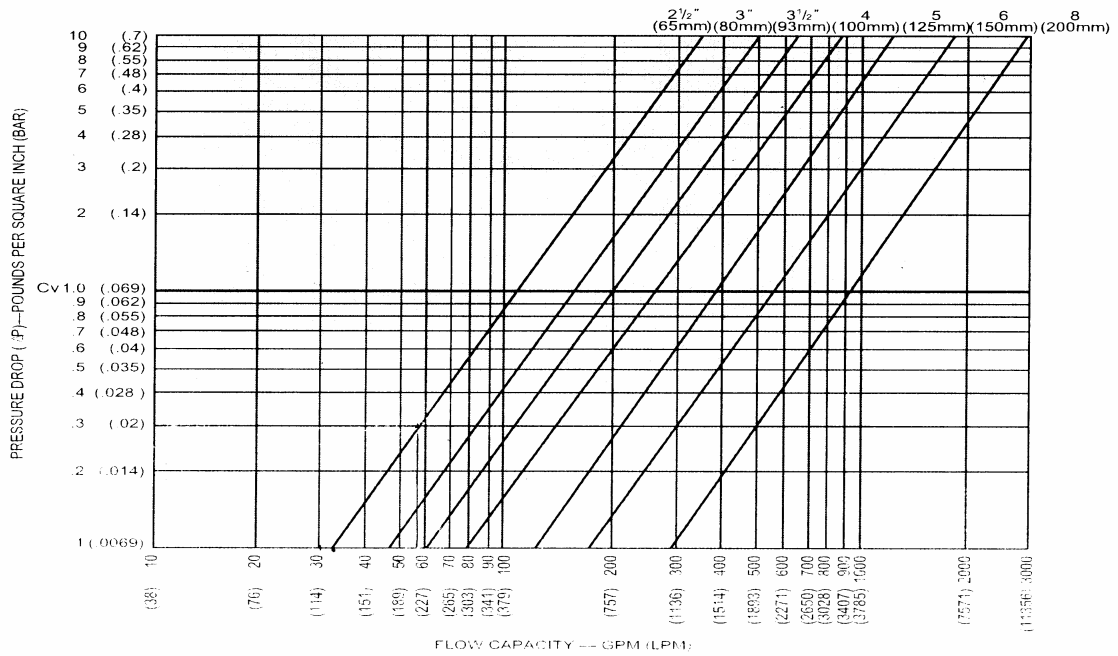
Para los fan coils de 3,6 gpm:

$$? P(ft ? H_2O) ? \frac{(3,6)^2}{(4,15)^2} * 2,31 ? 1,738284221 ft ? H_2O$$

Al hacer la conversión a metros:

$$? P ? 1,738284221 ft ? H_2O ? 0,529829 m ? H_2O$$

- 2) Para los filtros bridados en Y de 2" no se tiene el valor de *k* así que con el valor del flujo total que circula por la bomba de 56,4 gpm y el diámetro del filtro podemos determinar la caída de presión en la siguiente grafica.



**Figura 42: Capacities – Water Flow Vs. Presure Drop (Flanged End Y- Strainers)**

Entonces para un valor de 56,4 gpm corresponde un valor de caída de presión de aprox. 0,31 lb/pulg<sup>2</sup> (Psi) o 0,021bar, que en unidades de longitud serian:

$$0,217952 \text{ m} - \text{H}_2\text{O}$$

3) Por otro lado en catálogos establecen que el valor de la caída de presión en la unidad de enfriamiento, es decir en el Chiller es de **7,2 ft-H<sub>2</sub>O** y al convertirlos a las unidades correspondientes son **2,19456 m-H<sub>2</sub>O**.

Finalmente tenemos:

Componente	Caída de Presión (ft de H <sub>2</sub> O)	Caída de presión (m)
Chiller	7,2	2,19456
Filtro en Y	0,715065617	0,217952
Fan Coil 2,4 gpm	5	1,524
Fan Coil 3,6 gpm	17	5,1816
Válvula de Bola ¾" (3,6gpm)	KQ2/D4	0,012186089
Válvula de Bola ¾" (2,4 gpm)	KQ2/D4	0,027418701
Válvula de Ajuste de Flujo ¾" (3,6gpm)	0,77257	0,235479336
Válvula de Ajuste de Flujo ¾" (2,4gpm)	1,738284	0,529828963

**Tabla 15: Caída De Presión Para Los Equipos Y Accesorios Varios**

Después de hacer el análisis respectivo con los valores anteriores se determinan las ecuaciones de pérdidas de la forma  $H = RQ^2$  para los equipos y accesorios varios, (ver **ANEXO E: CD** con el con los respectivos cálculos realizados en el programa de Excel, más exactamente el punto sobre las pérdidas en los equipos y accesorios varios) de manera

que se tengan tabulados los datos para luego solo sustituir en las ecuaciones generales, de la siguiente manera:

**Perdida del Chiller;**  $H = 173326,8043 Q_1^2$

**Perdida en el Filtro;**  $H = 17213,8942 Q_1^2$

**Perdida en Válvula de Bola de 3/4" (3.6GPM);**  $H = 531518,1755 Q_n^2 + 2165,53353 Q_1^2$

**Perdida en Válvula de Ajuste de 3/4" (3.6GPM);**  $H = 10270862,97 Q_n^2 + 41845,9786 Q_1^2$

**Perdida en Fan Coil de 3.6 GPM;**  $H = 100446572,9 Q_n^2 + 409243,6198 Q_1^2$

**Perdida en Válvula de Bola de 3/4" (2,4GPM);**  $H = 531518,1755 Q_n^2 + 962,45935 Q_1^2$

**Perdida en Válvula de Ajuste de 3/4" (2,4GPM);**  $H = 10270854,11 Q_n^2 + 18598,1966 Q_1^2$

**Perdida en Fan Coil de 2,4 GPM;**  $H = 66471996,77 Q_n^2 + 120365,7705 Q_1^2$

Siendo:

$$Q_n = Q_n / Q_1 \cdot Q_1$$

Que es un porcentaje del flujo total ( $Q_T=Q$ ) que se determinará más adelante a partir de las ecuaciones de nodo como se mencionó anteriormente.

$$Q_n^2 = (Q_n / Q_1)^2 \cdot Q_1^2$$

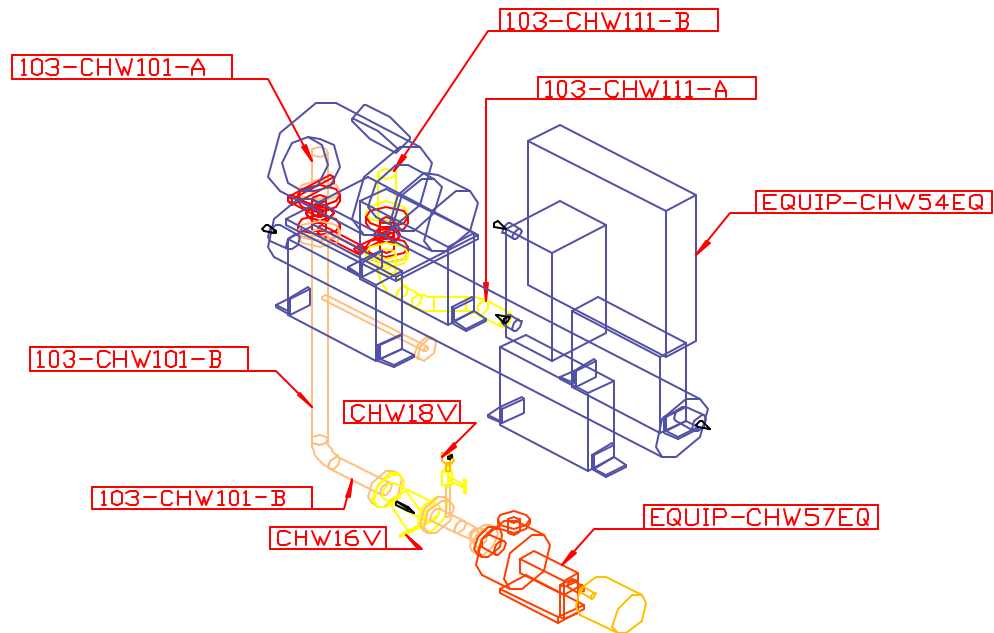
Cabe aclarar que en las ecuaciones de pérdida para cada trayectoria, los valores de las pérdidas por equipos varios estarán en función de  $Q=Q_1$ , y la constante **0,08271** ya irá

incluida en el valor representado al lado de cada Q; por tal razón ellas simplemente se sumaran a los otros valores que si dependen de la constante.

**Ecuaciones por trayectorias:**

Antes de iniciar los cálculos cabe aclarar que todas las trayectorias inician en el Chiller marino, es decir en el modulo 103 y hacen un recorrido que es “*común*” a los 21 tramos del sistema, esta parte del sistema se muestra a continuación.

- 1) Equipo marca Carrier y primer tramo de tubería en acero al carbono



**Figura 43: Primer Tramo Común De La Trayectoria General**

2) Primer tramo de tubería en cobre de 1-1/5" del modulo 103

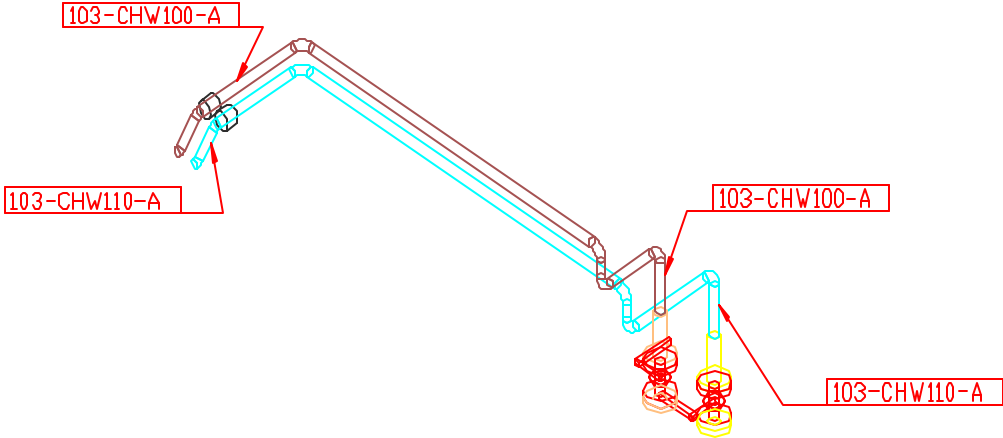


Figura 44: Segundo Tramo Común De La Trayectoria General

3) Tramo de tubería que inicia el modulo 102

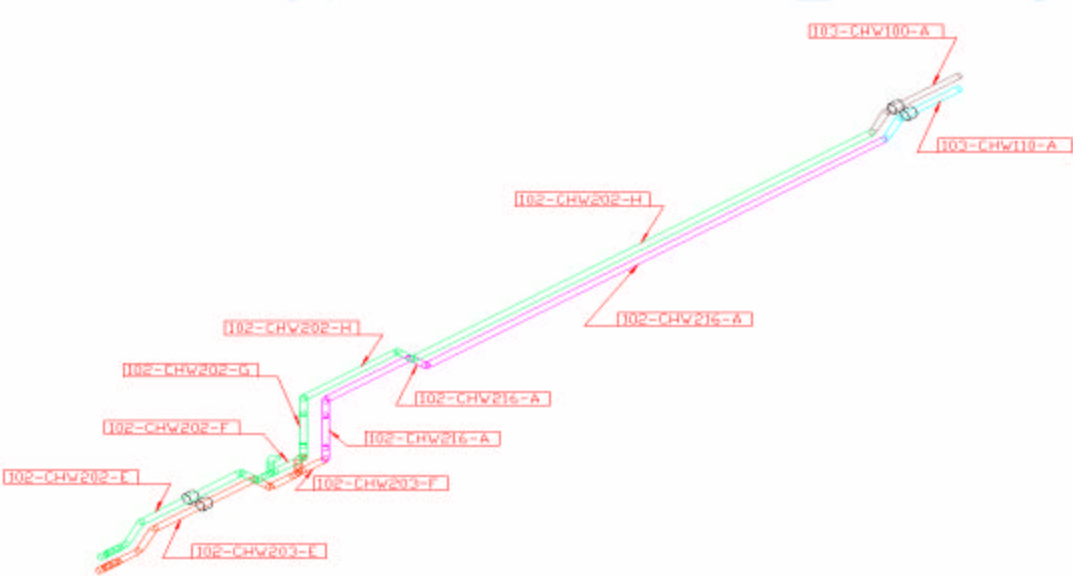


Figura 45: Tercer Tramo Común De La Trayectoria General



Es a partir de aquí donde se bifurcan en los 21 recorridos analizados por medio de las ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos y con ayuda de herramientas computacionales tales como “Excel” y otro software secundario propio para este tipo de aplicaciones, que permitieron el estudio de los 21 recorridos de manera puntual y precisa para determinar la trayectoria crítica del sistema, de esta manera Excel se convierte en una herramienta fundamental para la elaboración de un procedimiento secuencial para obtener los valores necesarios para los cálculos y finalmente elaborar la curva del sistema.

Para este caso específico, en el contenido del trabajo se observarán de manera puntual solo algunos cálculos de los obtenidos mediante el programa de computación y los datos restantes podrán observarse en el Anexo E (CD). De esta manera, inicialmente las ecuaciones tomarán la siguiente forma:

## TRAYECTORIA 1

Corresponde al recorrido 1-1, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

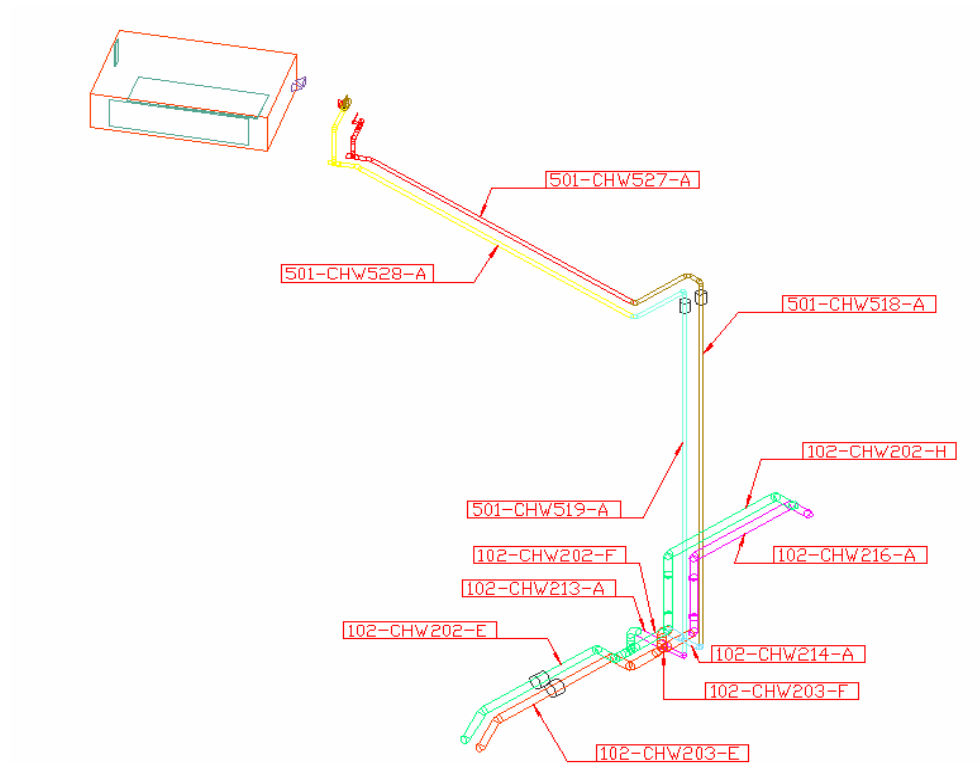


Figura 46: Trayectoria 1 (1-1)

?	$f_{2"AC}$	13404750	$,35 Q_1^2$	?	4429785	$,3 Q_1^2$	?	173326	$,8043 Q_1^2$	?	17213	$,8942 Q_1^2$	??	
?	$f_{1,5"}$	246106168	$,3 Q_1^2$	?	7336525	$,25 Q_2^2$	??	?	100446572	$,9 Q_4^2$	?	531518	$,1755 Q_4^2$	??
H ?	$f_{3/4"}$	4109450610	$Q_2^2$	?	51744713	$Q_2^2$	??	?	10270862	$,97 Q_4^2$	?	?	??	
?	$f_{3/4"}$	237957518	$,4 Q_4^2$	?	22475626	$Q_4^2$	?	?	?	?	?	?	??	
?				?			?	?			?		??	

## TRAYECTORIA 2

Corresponde al recorrido 1-2, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

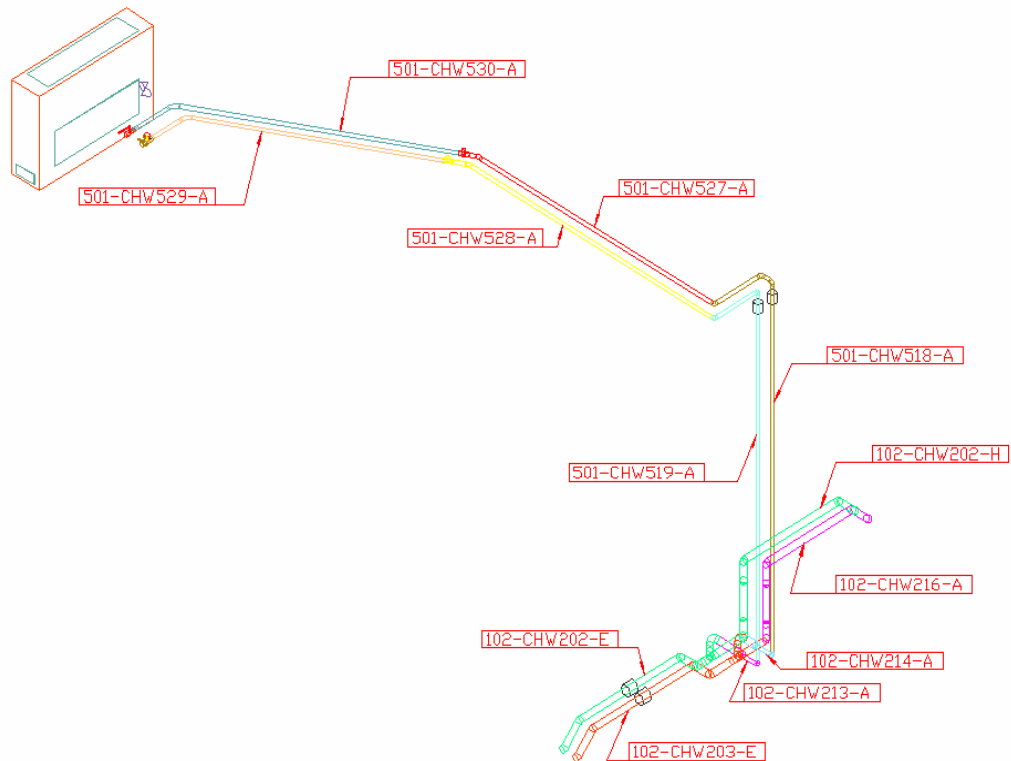


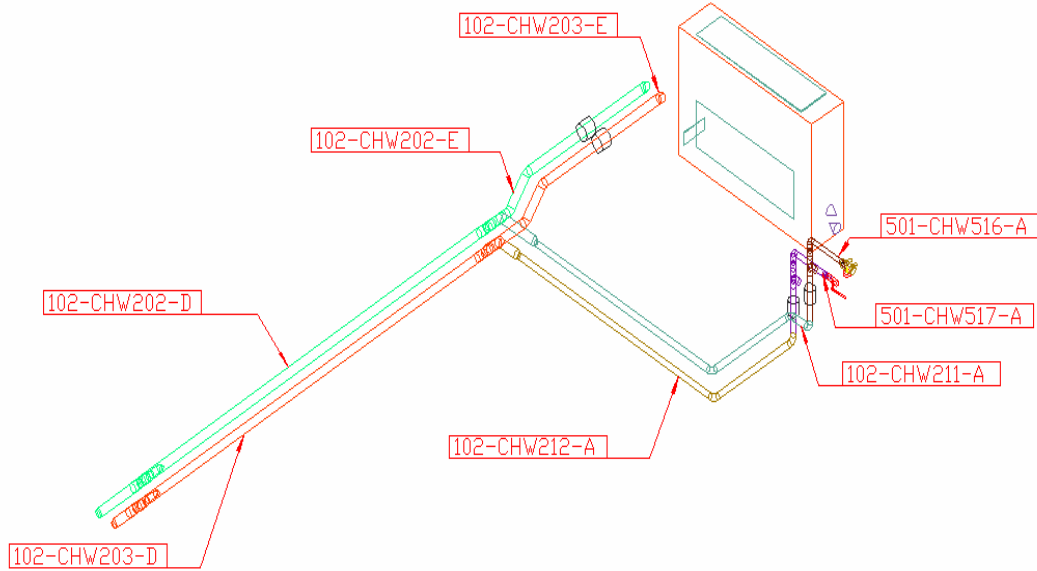
Figura 47: Trayectoria 2 (1-2)

?	$f_{2''AC}$	$13404750,35Q_1^2$	?	$4429785,3Q_1^2$	?	$173326,8043Q_1^2$	?	$17213,8942Q_1^2$	??	
?	$f_{1,5''}$	$246106168,3Q_1^2$	?	$f_{1,5''}$	$7336525,25Q_2^2$	??	$100446572,9Q_5^2$	?	$531518,1755Q_5^2$	??
H ?	$0,08271$	$f_{3/4''}$	$4109450610Q_2^2$	?	$44252585Q_2^2$	??	$10270862,97Q_5^2$	?		??
?	$f_{3/4''}$	$1,59E 09Q_5^2$	?	$3745684,5Q_5^2$	?					??



## TRAYECTORIA 4

Corresponde al recorrido 2-2, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:



**Figura 49: Trayectoria 4 (2-2)**

?	$f_{2,AC}$	$13404750,35 Q_1^2$	$4038455,1 Q_1^2$	?	?
?	$f_{1,5}$	$246106168,3 Q_1^2$	$38688026,18 Q_3^2$	?	?
?	$f_{1,5}$	$2035240 Q_3^2$	$7809849,46 Q_6^2$	?	$173326,8043 Q_1^2$
$H$	$f_{1,5}$	$2035240 Q_3^2$	$7809849,46 Q_6^2$	?	$17213,8942 Q_1^2$
$0,08271$	$f_{1,5}$	$2035240 Q_3^2$	$7809849,46 Q_6^2$	?	$100446572,9 Q_8^2$
?	$f_{1,5}$	$23655139,5 Q_6^2$	$10241384 Q_6^2$	?	$531518,1755 Q_8^2$
?	$f_{1,5}$	$23655139,5 Q_6^2$	$10241384 Q_6^2$	?	??
?	$f_{1,5}$	$3525939,93 Q_8^2$	$254698248 Q_8^2$	?	$10270862,97 Q_8^2$
?	$f_{1,5}$	$3525939,93 Q_8^2$	$254698248 Q_8^2$	?	??
?	$f_{1,5}$	$2334824 Q_8^2$		?	??
?	$f_{1,5}$	$2334824 Q_8^2$		?	??



## TRAYECTORIA 6

Corresponde al recorrido 3-2, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

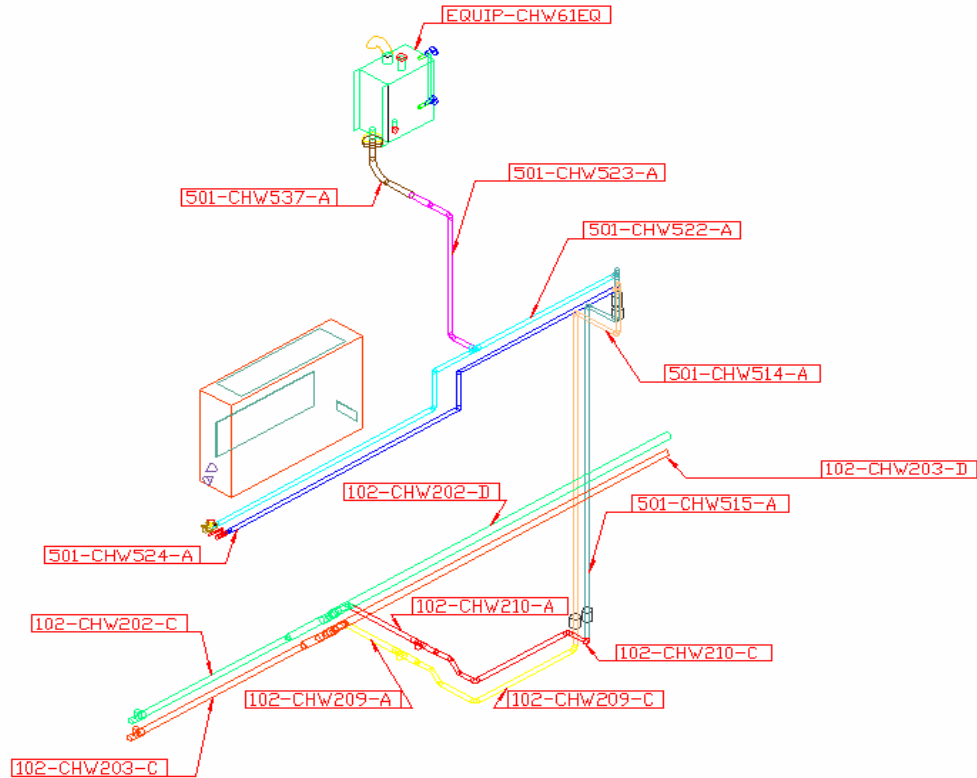


Figura 51: Trayectoria 6 (3-2)

?	$f_{AC}$	13404750	,35	$Q_1^2$	?	4038455	,1	$Q_1^2$	?	?
?	$f_{1,5''}$	246106168	,3	$Q_1^2$	?	$f_{1,5''}$	38688026	,18	$Q_3^2$	?
?	$f_{1,5''}$	1643909	,8	$Q_3^2$	?	$f_{1,5''}$	61345308	,73	$Q_9^2$	?
?	$f_{1,5''}$	782755	,43	$Q_9^2$	?	$f_{1,5''}$	2790121	,66	$Q_{10}^2$	?
H ?	0,08271	$f_{1,5''}$	100451386	,1	$Q_{10}^2$	?	3439342	,4	$Q_{10}^2$	?
?	$f_{1,5''}$	25160140	,01	$Q_{12}^2$	?	$f_{3/4''}$	3182907011		$Q_{12}^2$	?
?	$f_{1,5''}$	70795529		$Q_{12}^2$	?	$f_{3/4''}$	2567788819		$Q_{14}^2$	?
?	$f_{1,5''}$	23225826		$Q_{14}^2$	?					?





## TRAYECTORIA 8

Corresponde al recorrido 4-1, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

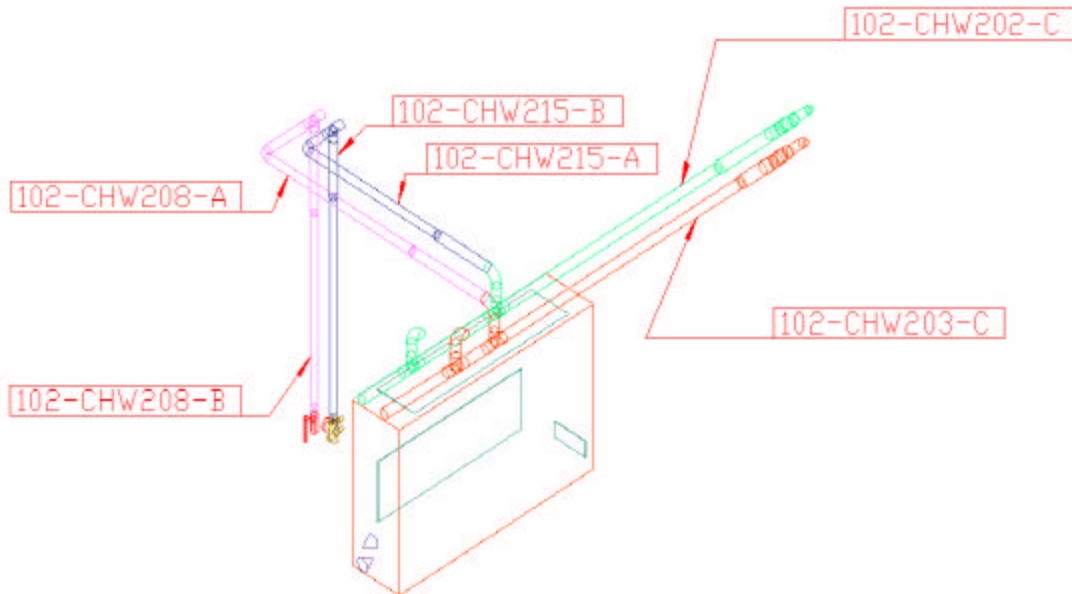
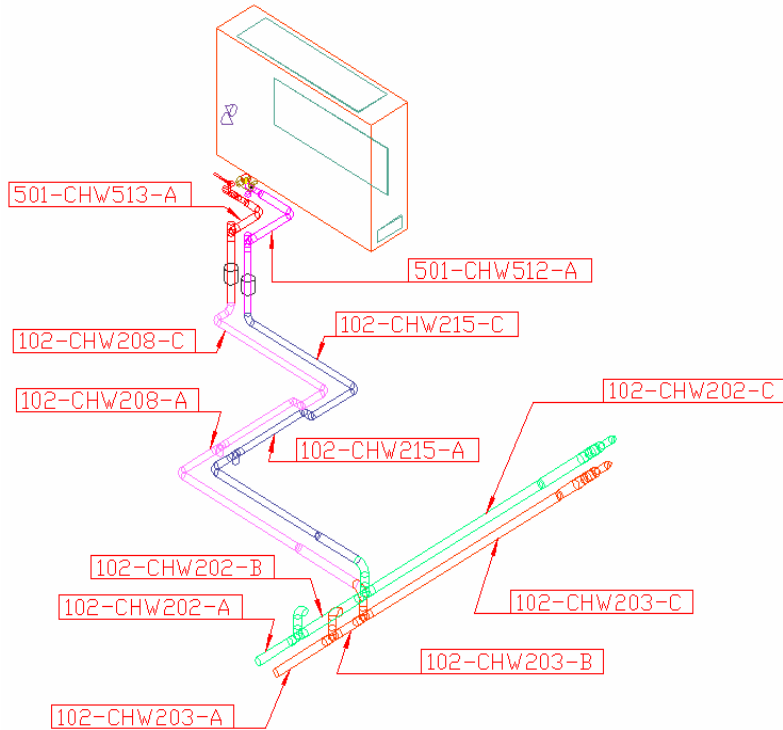


Figura 53: Trayectoria 8 (4-1)

?	$f_{2^{AC}}$	13404750,35	$Q_1^2$	?	4038455,10	$Q_1^2$	?	?
?	$f_{1,5}$	246106168,30	$Q_1^2$	?	38688026,18	$Q_3^2$	?	?
?	$f_{1,5}$	1643909,786	$Q_3^2$	?	61345308,73	$Q_9^2$	?	?
?	$f_{1,5}$	391425,1706	$Q_9^2$	?	5767081,816	$Q_{15}^2$	?	?
H ? 0,08271	$f_{1,25}$	69613120,78	$Q_{15}^2$	?	1468114,7	$Q_{15}^2$	?	?
?	$f_{1,25}$	27336942,40	$Q_{16}^2$	?	169689064,60	$Q_{16}^2$	?	?
?	$f_{1,25}$	8797519,60	$Q_{16}^2$	?	53536237,77	$Q_{17}^2$	?	?
?	$f_{3/4}$	6,39	$E$	?	08	$Q_{17}^2$	?	?
?		3291463,30	$Q_{17}^2$	?			?	?

## TRAYECTORIA 9

Corresponde al recorrido 4-2, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

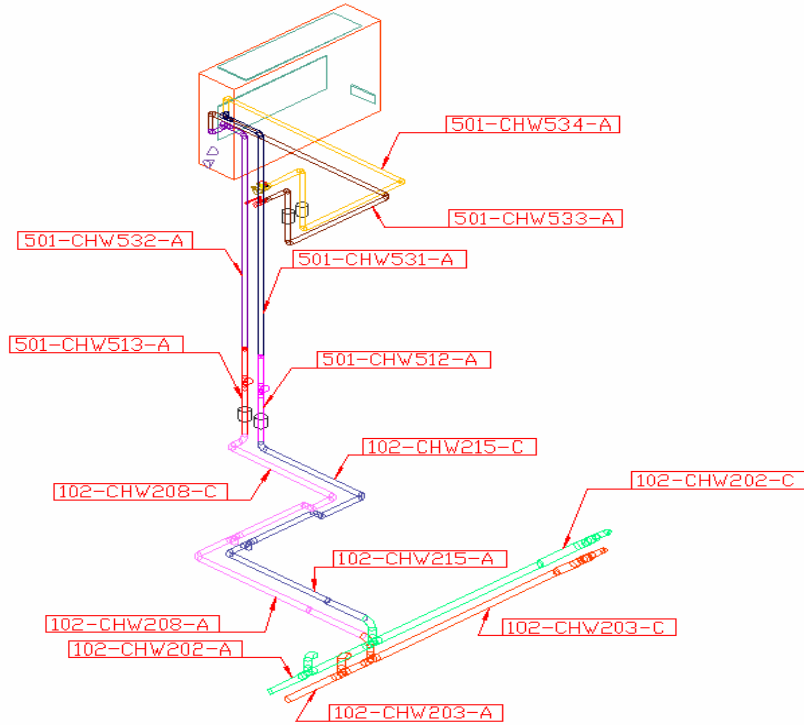


**Figura 54: Trayectoria 9 (4-2)**

?	$f_{2''AC}$	13404750,35	$Q_1^2$	?	4038455,1	$Q_1^2$	?	?
?	$f_{1,5''}$	246106168,3	$Q_3^2$	?	38688026,18	$Q_3^2$	?	?
?	$f_{1,5''}$	1643909,786	$Q_3^2$	?	61345308,73	$Q_9^2$	?	?
?	$f_{1,5''}$	391425,1706	$Q_9^2$	?	5767081,816	$Q_{15}^2$	?	?
?	$f_{1,25''}$	69613120,78	$Q_{15}^2$	?	1468114,7	$Q_{15}^2$	?	?
H	0,08271	$f_{1,25''}$	27336942,4	$Q_{16}^2$	$f_{1''}$	169689064,6	$Q_{16}^2$	?
?	$f_{1,25''}$	6603067,3	$Q_{16}^2$	?	338627108,4	$Q_{18}^2$	?	?
?	$f_{1''}$	16126365	$Q_{18}^2$	?	71224005,4	$Q_{19}^2$	?	?
?	$f_{3/4''}$	67760097,36	$Q_{19}^2$	?	6582420,9	$Q_{19}^2$	?	?

## TRAYECTORIA 10

Corresponde al recorrido 4-3, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

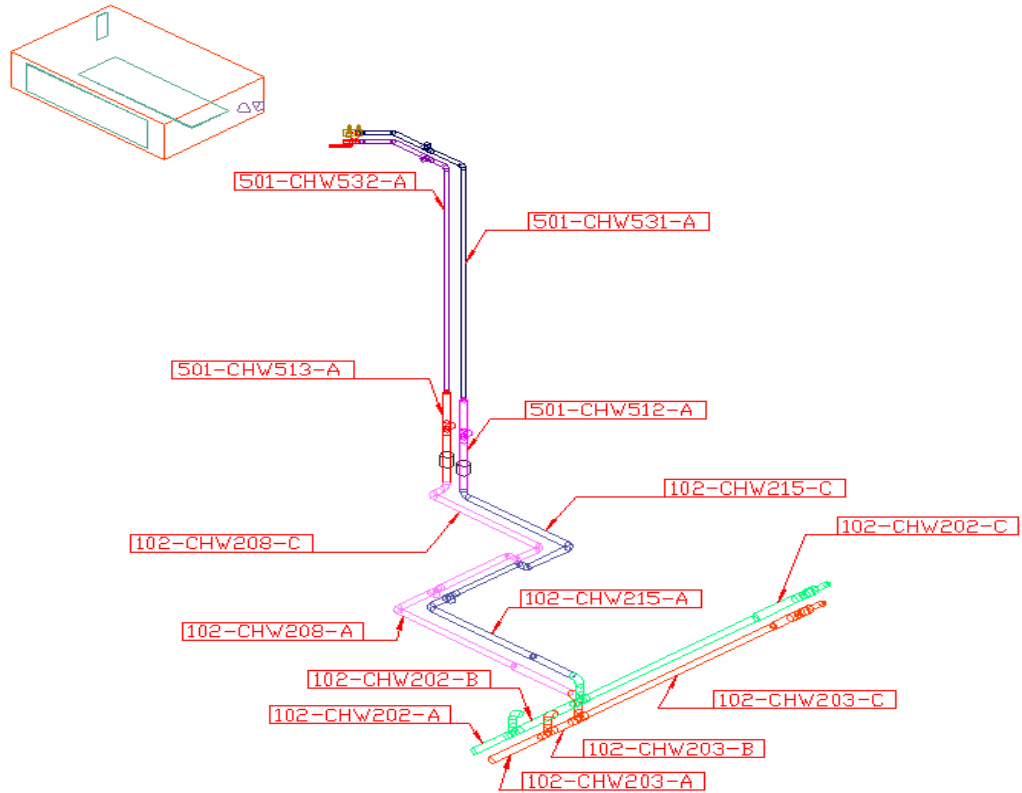


**Figura 55: Trayectoria 10 (4-3)**

?	$f_{2-AC}$	13404750	,35	$Q_1^2$	?	4038455	,1	$Q_1^2$	?	$f_{1,5''}$	246106168	,3	$Q_1^2$	?	?	?
?	$f_{1,5''}$	38688026	,18	$Q_3^2$	?	1643909	,786	$Q_3^2$	?	$f_{1,5''}$	61345308	,73	$Q_9^2$	?	?	?
?	$f_{1,5''}$	391425	,1706	$Q_6^2$	?	5767081	,816	$Q_{15}^2$	?	$f_{1,25''}$	69613120	,78	$Q_{15}^2$	?	?	?
H ?	$f_{1,25''}$	1468114	,7	$Q_{15}^2$	?	27336942	,4	$Q_{16}^2$	?	$f_{1''}$	169689064	,6	$Q_{16}^2$	?	?	?
?	$f_{1''}$	6603067	,3	$Q_{16}^2$	?	338627108	,4	$Q_{18}^2$	?	$f_{1''}$	13931913	$Q_{18}^2$	?	?	?	?
?	$f_{1''}$	45590930	,4	$Q_{20}^2$	?	1331685207	$Q_{20}^2$	?	$f_{3/4''}$	23572637	$Q_{20}^2$	?	?	?	?	?
?	$f_{3/4''}$	2062697081	$Q_{21}^2$	?	$f_{3/4''}$	1807971	$Q_{21}^2$	?	?	?	?	?	?	?	?	?

## TRAYECTORIA 11

Corresponde al recorrido 4-4, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:



**Figura 56: Trayectoria 11 (4-4)**

?	$f_{2''AC} \sqrt{13404750,35 Q_1^2} \sqrt{4038455,1 Q_1^2} \sqrt{f_{1,5''} \sqrt{246106168,3 Q_1^2}}$	?	?
?	$f_{1,5''} \sqrt{38688026,18 Q_3^2} \sqrt{1643909,786 Q_3^2} \sqrt{f_{1,5''} \sqrt{61345308,73 Q_9^2}}$	?	$\sqrt{173326,8043 Q_1^2} \sqrt{?}$
?	$\sqrt{391425,1706 Q_9^2} \sqrt{f_{1,5''} \sqrt{5767081,816 Q_{15}^2}} \sqrt{f_{1,25''} \sqrt{69613120,78 Q_{15}^2}}$	?	$\sqrt{17213,8942 Q_1^2} \sqrt{?}$
$H \sqrt{?} \sqrt{0,08271}$	$\sqrt{1468114,7 Q_{15}^2} \sqrt{f_{1,25''} \sqrt{27336942,4 Q_{16}^2}} \sqrt{f_{1''} \sqrt{69689064,6 Q_{16}^2}}$	?	$\sqrt{66471996,77 Q_{22}^2} \sqrt{?}$
?	$\sqrt{6603067,3 Q_{16}^2} \sqrt{f_{1''} \sqrt{338627108,4 Q_{18}^2}} \sqrt{13931913 Q_{18}^2}$	?	$\sqrt{531518,1755 Q_{22}^2} \sqrt{?}$
?	$\sqrt{f_{1''} \sqrt{45590930,4 Q_{20}^2}} \sqrt{f_{3/4''} \sqrt{1331685207 Q_{20}^2}} \sqrt{16080508 Q_{20}^2}$	?	$\sqrt{10270854,11 Q_{22}^2} \sqrt{?}$
?	$\sqrt{f_{3/4''} \sqrt{304521849,3 Q_{22}^2}} \sqrt{9739690,9 Q_{22}^2}$	?	$\sqrt{?}$

## TRAYECTORIA 12

Corresponde al recorrido 5-1, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

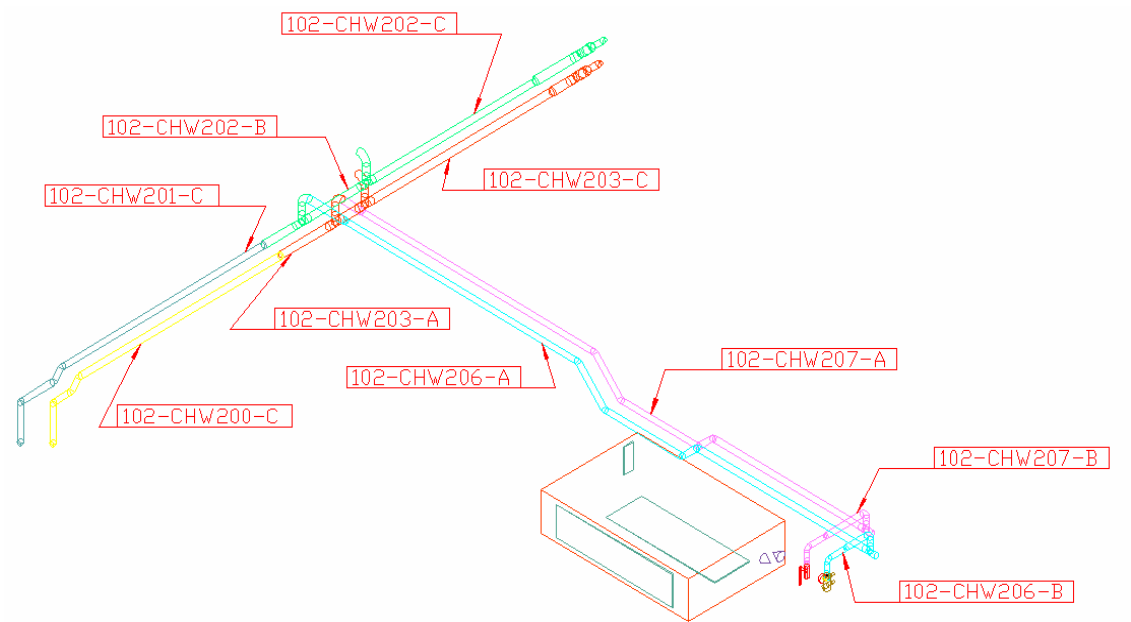
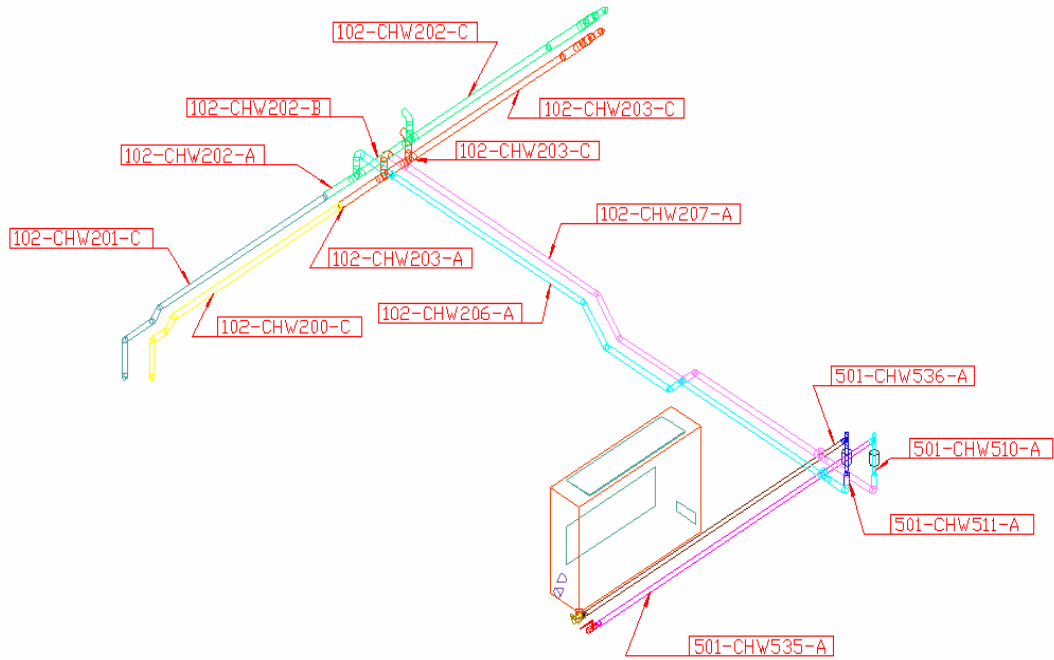


Figura 57: Trayectoria 12 (5-1)

?	$f_{2''AC}$	13404750	$35Q_1^2$	$4038455$	$1Q_1^2$	$f_{1,5''}$	246106168	$3Q_1^2$	?	?	?	?	
?	$f_{1,5''}$	38688026	$18Q_3^2$	1643909	$786Q_3^2$	$f_{1,5''}$	61345308	$73Q_9^2$	?	?	173326	$8043Q_1^2$	
?	$f_{1,5''}$	391425	$1706Q_9^2$	$f_{1,5''}$	5767081	$816Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	69613120	$78Q_{15}^2$	?	?	17213	$8942Q_1^2$
H ? 0,08271	$f_{1,25''}$	1468114	$7Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	17480765	$86Q_{23}^2$	2544799	$7Q_{23}^2$	?	?	66471996	$77Q_{24(b)}^2$	
?	$f_{1,25''}$	19960307	$1Q_{24(a)}^2$	$f_{1''}$	646684646	$8Q_{24(a)}^2$	12856945	$Q_{24(a)}^2$	?	?	531518	$1755Q_{24(b)}^2$	
?	$f_{1''}$	45590930	$4Q_{24(b)}^2$	$f_{3/4''}$	1331685207	$Q_{24(b)}^2$	17820234	$Q_{24(b)}^2$	?	?	10270854	$11Q_{24(b)}^2$	
?									?	?			

### TRAYECTORIA 13

Corresponde al recorrido 5-2, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:



**Figura 58: Trayectoria 13 (5-2)**

?	$f_{2^{AC}}$	13404750	,35	$Q_1^2$	?	4038455	,1	$Q_1^2$	?	$f_{1,5^{\circ}}$	246106168	,3	$Q_1^2$	?	?
?	$f_{1,5^{\circ}}$	38688026	,18	$Q_3^2$	?	1643909	,786	$Q_3^2$	?	$f_{1,5^{\circ}}$	61345308	,73	$Q_9^2$	?	?
?	$f_{1,5^{\circ}}$	391425	,1706	$Q_9^2$	?	$f_{1,5^{\circ}}$	5767081	,816	$Q_{15}^2$	?	$f_{1,25^{\circ}}$	69613120	,78	$Q_{15}^2$	?
$H$	$f_{1,25^{\circ}}$	1468114	,7	$Q_{15}^2$	?	$f_{1,25^{\circ}}$	17480765	,86	$Q_{23}^2$	?	$f_{1,25^{\circ}}$	2544799	,7	$Q_{23}^2$	?
?	$f_{1,25^{\circ}}$	19960307	,1	$Q_{24(a)}^2$	?	$f_{1^{\circ}}$	646684646	,8	$Q_{24(a)}^2$	?	$f_{1,25^{\circ}}$	10662492	$Q_{24(a)}^2$	?	?
?	$f_{1^{\circ}}$	70656483	,41	$Q_{24(c)}^2$	?	$f_{3/4^{\circ}}$	165015767	$Q_{24(c)}^2$	?	$f_{1,25^{\circ}}$	15625782	$Q_{24(c)}^2$	?	?	
?	$f_{3/4^{\circ}}$	1697191144	$Q_{25}^2$	?	$f_{3/4^{\circ}}$	11237813	$Q_{25}^2$	?	?	?	?	?	?	?	

## TRAYECTORIA 14

Corresponde al recorrido 5-3, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

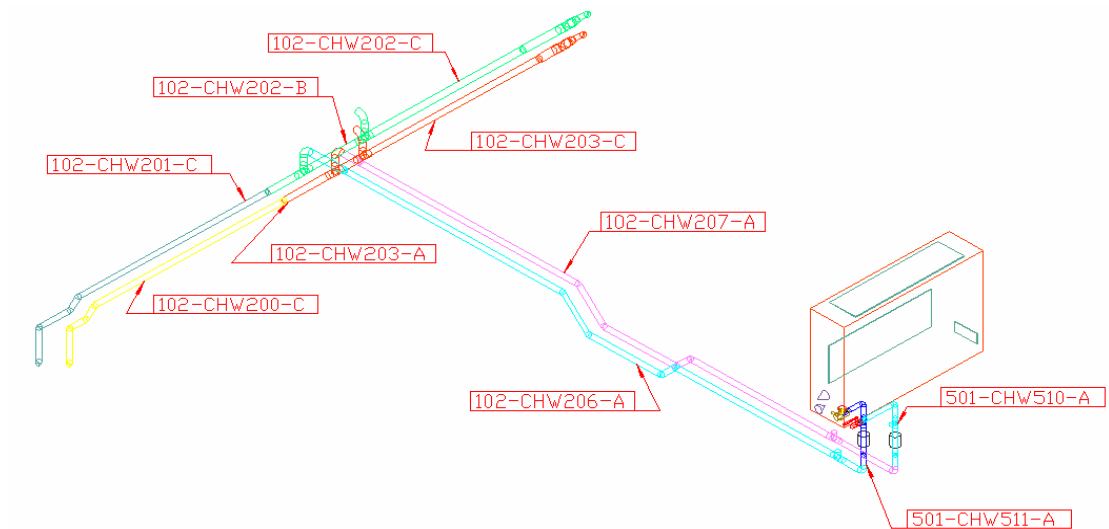


Figura 59: Trayectoria 14 (5-3)

?	$f_{2"AC}$	$13404750,35Q_1^2$	$40384551Q_1^2$	$f_{1,5"}$	$2461061683Q_1^2$	?	?
?	$f_{1,5"}$	$3868802618Q_3^2$	$643909786Q_3^2$	$f_{1,5"}$	$6134530873Q_9^2$	?	$1733268043Q_1^2$
?	$f_{1,5"}$	$3914251706Q_9^2$	$5767081816Q_{15}^2$	$f_{1,25"}$	$6961312078Q_{15}^2$	?	$172138942Q_1^2$
H	$f_{1,25"}$	$0,08271$	$14681147Q_{15}^2$	$f_{1,25"}$	$1748076586Q_{23}^2$	$2544799,7Q_{23}^2$	$6647199677Q_{26}^2$
?	$f_{1,25"}$	$19960307,1Q_{24(a)}^2$	$6466846468Q_{24(a)}^2$	$f_{1"}$	$10662492Q_{24(a)}^2$	$5315181755Q_{26}^2$	$1027085411Q_{26}^2$
?	$f_{1"}$	$7065648341Q_{24(c)}^2$	$165015767Q_{24(c)}^2$	$f_{3/4"}$	$81336532Q_{24(c)}^2$	?	?
?	$f_{3/4"}$	$2483208274Q_{26}^2$	$14983497Q_{26}^2$				

## TRAYECTORIA 15

Corresponde al recorrido 6-1, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

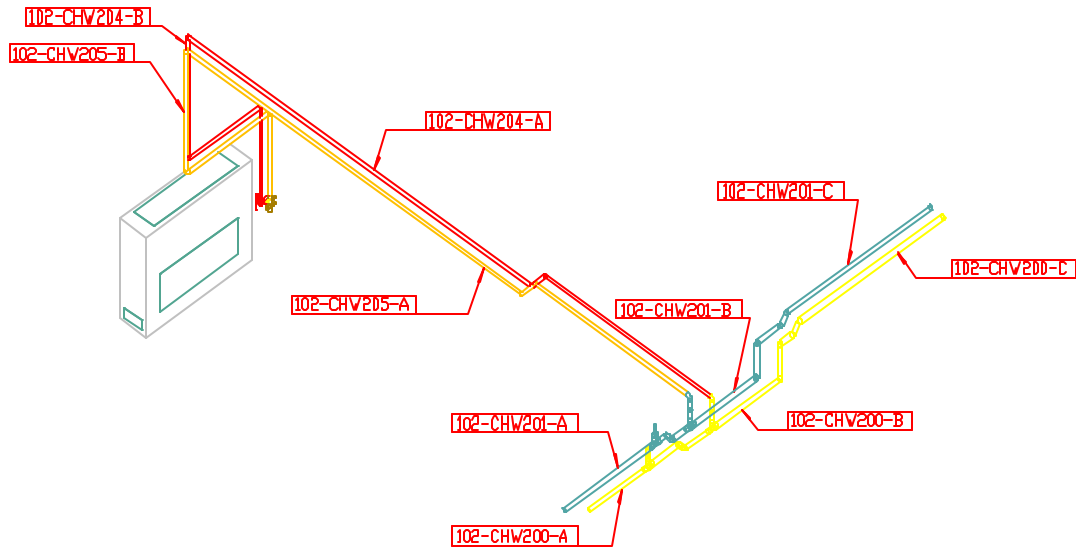


Figura 60: Trayectoria 15 (6-1)

?	$f_{2''AC}$	$13404750,35Q_1^2$	$4038455,1Q_1^2$	$f_{1,5''}$	$246106168,3Q_1^2$	?	?	?
?	$f_{1,5''}$	$38688026,18Q_3^2$	$1643909,786Q_3^2$	$f_{1,5''}$	$61345308,73Q_9^2$	?	$173326,8043Q_1^2$	??
?	$f_{1,5''}$	$391425,1706Q_9^2$	$5767081,816Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	$69613120,78Q_{15}^2$	?	$17213,8942Q_1^2$	??
$H$	$0,08271$	$1468114,7Q_{15}^2$	$17480765,86Q_{23}^2$	$f_{1,25''}$	$2544799,7Q_{23}^2$	?	$66471996,77Q_{28}^2$	??
?	$f_{1,25''}$	$18410593,83Q_{27}^2$	$45914890,84Q_{27}^2$	$f_{1''}$	$10736475Q_{27}^2$	?	$531518,1755Q_{28}^2$	??
?	$f_{1''}$	$19106575,5Q_{28}^2$	$53883387,44Q_{28}^2$	$f_{3/4''}$	$60230727Q_{28}^2$	?	$10270854,11Q_{28}^2$	??



## TRAYECTORIA 16

Corresponde al recorrido 7-1, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

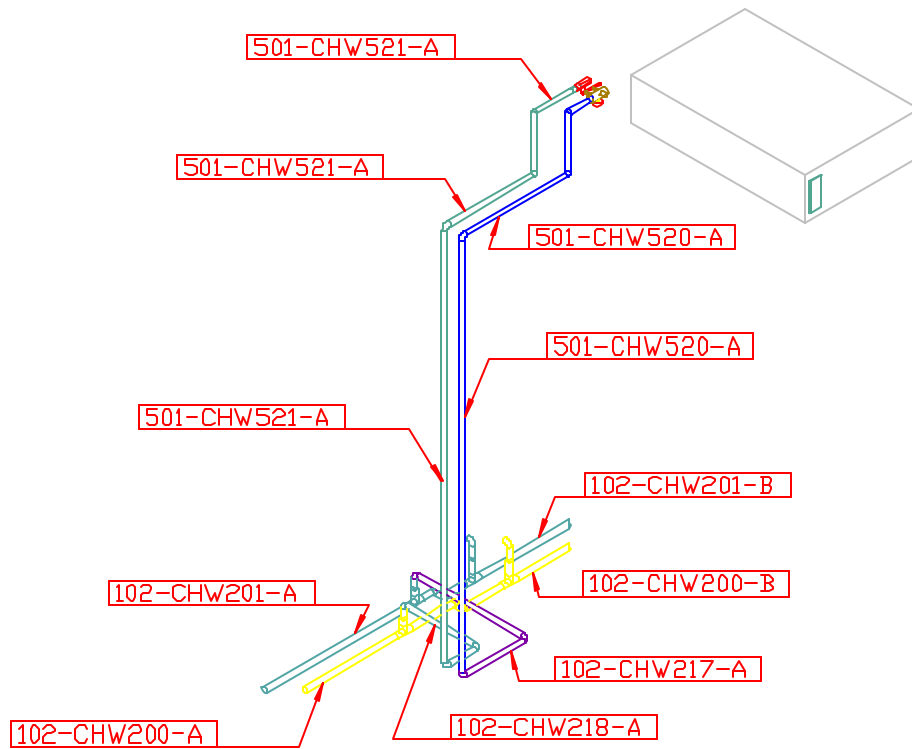


Figura 61: Trayectoria 16 (7-1)

?	$f_{2''AC}$	$1340475035Q_1^2$	$40384551Q_1^2$	$f_{1,5''}$	$2461061683Q_1^2$	?	?
?	$f_{1,5''}$	$3868802618Q_3^2$	$1643909786Q_3^2$	$f_{1,5''}$	$6134530873Q_3^2$	?	$1733268043Q_1^2$
?	$f_{1,5''}$	$3914251706Q_9^2$	$f_{1,5''}$	$5767081816Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	$6961312078Q_{15}^2$	$172138942Q_1^2$
$H$	$f_{1,25''}$	$14681147Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	$17480765386Q_{23}^2$	$f_{1,25''}$	$25447997Q_{23}^2$	$1004465729Q_{30}^2$
?	$f_{1,25''}$	$1841059383Q_{27}^2$	$f_{1,25''}$	$4591489084Q_{27}^2$	$f_{1,25''}$	$85420228Q_{27}^2$	$5315181755Q_{30}^2$
?	$f_{1,25''}$	$8860909459Q_{29}^2$	$f_{1,25''}$	$78989711Q_{29}^2$	$f_{1,25''}$	$12674657Q_{30}^2$	$1027086297Q_{30}^2$
?	$f_{3/4''}$	$321553947Q_{30}^2$	$f_{3/4''}$	$60230727Q_{30}^2$			



## TRAYECTORIA 18

Corresponde al recorrido 9-1, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

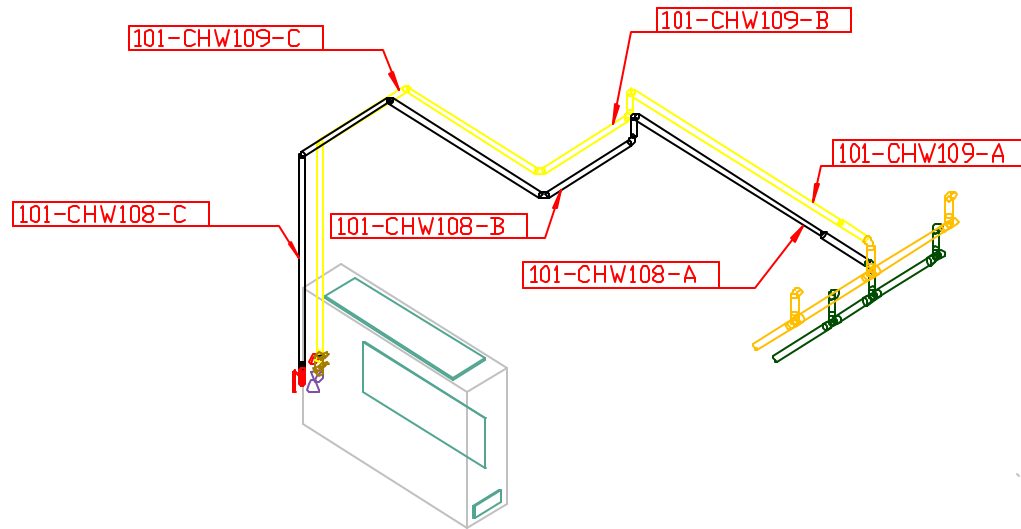


Figura 63: Trayectoria 18 (9-1)

?	$f_{2''AC}$	13404750	$Q_1^2$	4038455	$Q_1^2$	$f_{1,5''}$	246106168	$Q_1^2$	?	?
?	$f_{1,5''}$	38688026	$Q_3^2$	1643909	$Q_3^2$	$f_{1,5''}$	61345308	$Q_9^2$	?	?
?	?	391425	$Q_9^2$	$f_{1,5''}$	5767081	$Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	69613120	$Q_{15}^2$	$173326$
?	?	?	$Q_9^2$	$f_{1,5''}$	5767081	$Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	69613120	$Q_{15}^2$	$8043$
?	?	?	$Q_9^2$	$f_{1,25''}$	17480765	$Q_{23}^2$	2544799	$Q_{23}^2$	?	$17213$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	17480765	$Q_{23}^2$	2544799	$Q_{23}^2$	?	$8942$
H	?	0,08271	$Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	17480765	$Q_{23}^2$	2544799	$Q_{23}^2$	?	$17213$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	18410593	$Q_{27}^2$	$f_{1''}$	459148908	$Q_{27}^2$	$66471996$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{1,25''}$	18410593	$Q_{27}^2$	$f_{1''}$	459148908	$Q_{27}^2$	$77$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{1''}$	38609094	$Q_{29}^2$	$f_{1''}$	645556224	$Q_{31}^2$	$34$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{1''}$	38609094	$Q_{29}^2$	$f_{1''}$	645556224	$Q_{31}^2$	$1755$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{1''}$	2193971	$Q_{31}^2$	$f_{1''}$	81533987	$Q_{33}^2$	$11$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{1''}$	2193971	$Q_{31}^2$	$f_{1''}$	81533987	$Q_{33}^2$	$10270854$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{3/4''}$	65454198	$Q_{34}^2$	$f_{3/4''}$	3429099374	$Q_{34}^2$	$34$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{3/4''}$	65454198	$Q_{34}^2$	$f_{3/4''}$	3429099374	$Q_{34}^2$	$11$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{3/4''}$	65454198	$Q_{34}^2$	$f_{3/4''}$	3429099374	$Q_{34}^2$	$2283872$
?	?	?	$Q_{15}^2$	$f_{3/4''}$	65454198	$Q_{34}^2$	$f_{3/4''}$	3429099374	$Q_{34}^2$	$34$

## TRAYECTORIA 19

Corresponde al recorrido 10-1, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

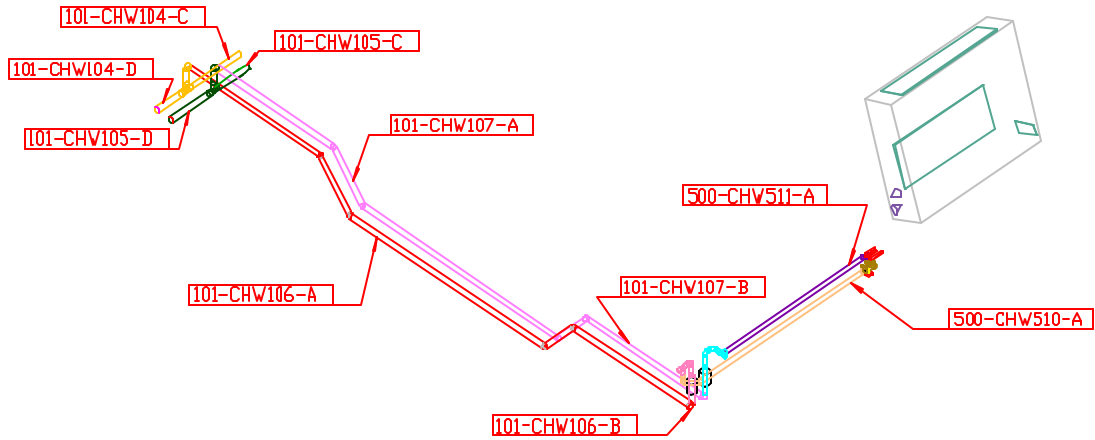


Figura 64: Trayectoria 19 (10-1)

?	$f_{2^{\circ}AC}$	13404750	,35	$Q_1^2$	?	4038455	,1	$Q_1^2$	?	$f_{1,5^{\circ}}$	246106168	,3	$Q_1^2$	?	?	?
?	$f_{1,5^{\circ}}$	38688026	,18	$Q_3^2$	?	1643909	,786	$Q_3^2$	?	$f_{1,5^{\circ}}$	61345308	,73	$Q_9^2$	?	?	?
?	?	391425	,1706	$Q_9^2$	?	$f_{1,5^{\circ}}$	5767081	,816	$Q_{15}^2$	?	$f_{1,25^{\circ}}$	69613120	,78	$Q_{15}^2$	?	?
?	?	1468114	,7	$Q_{15}^2$	?	$f_{1,25^{\circ}}$	17480765	,86	$Q_{23}^2$	?	?	2544799	,7	$Q_{23}^2$	?	?
?	?	$f_{1,25^{\circ}}$	18410593	,83	$Q_{27}^2$	?	$f_{1^{\circ}}$	459148908	,4	$Q_{27}^2$	?	8542022	,8	$Q_{27}^2$	?	?
H ?	0,08271	$f_{1^{\circ}}$	38609094	,59	$Q_{29}^2$	?	5704518	,8	$Q_{29}^2$	?	$f_{1^{\circ}}$	645556224		$Q_{31}^2$	?	?
?	?	?	2193971	,8	$Q_{31}^2$	?	$f_{1^{\circ}}$	81533987	,55	$Q_{33}^2$	?	2193971	,8	$Q_{33}^2$	?	?
?	?	?	$f_{1^{\circ}}$	67913460	,63	$Q_{35}^2$	?	4388424	,1	$Q_{35}^2$	?	$f_{1^{\circ}}$	824157275		$Q_{36}^2$	?
?	?	?	$f_{3/4^{\circ}}$	147477859		$Q_{36}^2$	?	44989005		$Q_{36}^2$	?	$f_{3/4^{\circ}}$	1826608374		$Q_{37}^2$	?
?	?	?	?	19853722		$Q_{37}^2$	?				?					?

## TRAYECTORIA 20

Corresponde al recorrido 10-2, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:

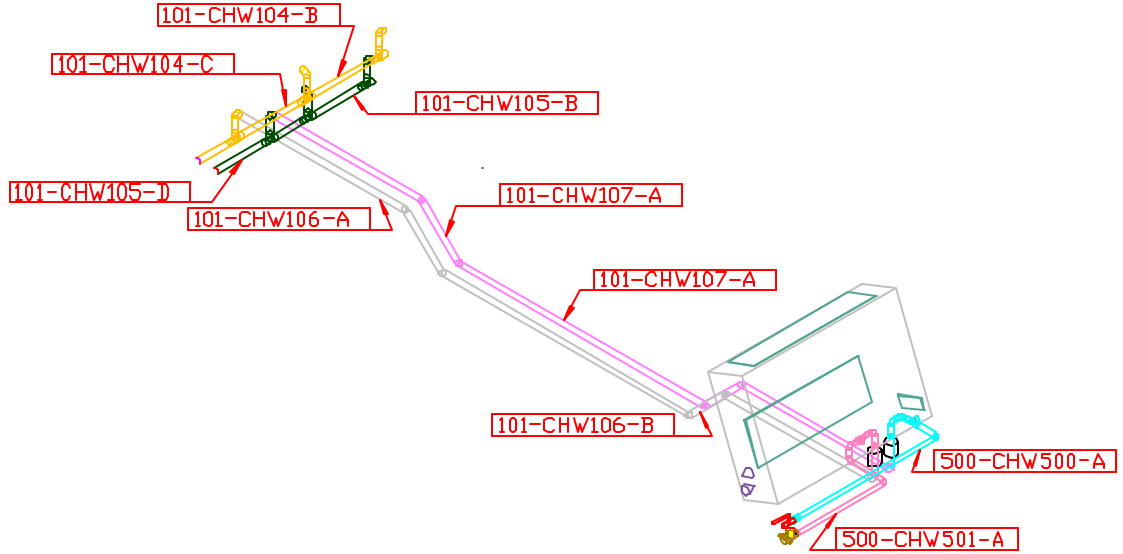
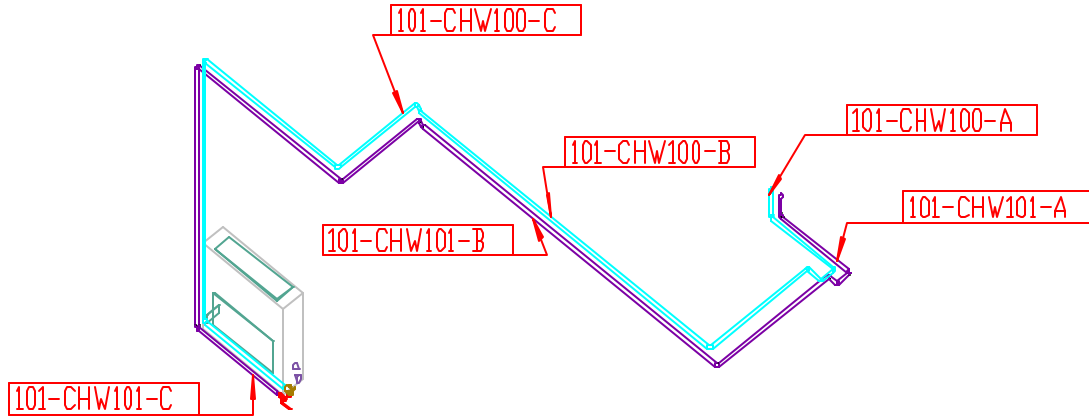


Figura 65: Trayectoria 20 (10-2)

?	$f_{2",AC} 13404750,35 Q_1^2$	$4038455,1 Q_1^2$	$f_{1,5"} 246106168,3 Q_1^2$	?	?
?	$f_{1,5"} 38688026,18 Q_3^2$	$1643909,786 Q_3^2$	$f_{1,5"} 61345308,73 Q_9^2$	?	?
?	$391425,1706 Q_9^2$	$f_{1,5"} 5767081,816 Q_{15}^2$	$f_{1,25"} 69613120,78 Q_{15}^2$	?	?
?	$1468114,7 Q_{15}^2$	$f_{1,25"} 17480765,86 Q_{23}^2$	$2544799,7 Q_{23}^2$	?	$173326,8043 Q_1^2$
?	$f_{1,25"} 18410593,83 Q_{27}^2$	$f_{1"} 459148908,4 Q_{27}^2$	$8542022,8 Q_{27}^2$	?	$17213,8942 Q_1^2$
H ? 0,08271	$f_{1"} 88609094,59 Q_{29}^2$	$5704518,8 Q_{29}^2$	$f_{1"} 645556224 Q_{31}^2$	?	$66471996,77 Q_{38}^2$
?	$2193971,8 Q_{31}^2$	$f_{1"} 81533987,55 Q_{33}^2$	$2193971,8 Q_{33}^2$	?	$531518,1755 Q_{38}^2$
?	$f_{1"} 67913460,63 Q_{35}^2$	$4388424,1 Q_{35}^2$	$f_{1"} 824157275 Q_{36}^2$	?	$10270854,11 Q_{38}^2$
?	$f_{3/4"} 147477859 Q_{36}^2$	$37496876 Q_{36}^2$	$f_{3/4"} 814715523,5 Q_{38}^2$	?	?
?	$26221310 Q_{38}^2$			?	?

## TRAYECTORIA 21

Corresponde al recorrido 11-1, para suministro y retorno sumando el recorrido común anteriormente descrito:



**Figura 66: Trayectoria 21 (11-1)**

?	$f_{2''AC}$	13404750	$35Q_1^2$	?	4038455	$1Q_1^2$	?	$f_{1,5''}$	246106168	$3Q_1^2$	?	?
?	$f_{1,5''}$	38688026	$18Q_3^2$	?	1643909	$786Q_3^2$	?	$f_{1,5''}$	61345308	$73Q_9^2$	?	?
?	$f_{1,5''}$	391425	$1706Q_9^2$	?	$f_{1,5''}$	5767081	$816Q_{15}^2$	?	$f_{1,25''}$	69613120	$78Q_{15}^2$	?
?	$f_{1,25''}$	1468114	$7Q_{15}^2$	?	$f_{1,25''}$	17480765	$86Q_{23}^2$	?	2544799	$7Q_{23}^2$	?	$173326$
?	$f_{1,25''}$	18410593	$83Q_{27}^2$	?	$f_{1''}$	459148908	$4Q_{27}^2$	?	8542022	$8Q_{27}^2$	?	$17213$
H	$f_{1,25''}$	0,08271	$18410593$	$83Q_{27}^2$	$f_{1''}$	459148908	$4Q_{27}^2$	$8542022$	$8Q_{27}^2$	$66471996$	$77Q_{39}^2$	$173326$
?	$f_{1''}$	88609094	$59Q_{29}^2$	?	5704518	$8Q_{29}^2$	?	$f_{1''}$	645556224	$Q_{31}^2$	?	$8942$
?	$f_{1''}$	2193971	$8Q_{31}^2$	?	$f_{1''}$	81533987	$55Q_{33}^2$	?	2193971	$8Q_{33}^2$	?	$8942$
?	$f_{1''}$	67913460	$63Q_{35}^2$	?	$f_{1''}$	2193971	$8Q_{35}^2$	?	$f_{1''}$	60724849	$2Q_{39}^2$	?
?	$f_{3/4''}$	1182318834	$8Q_{39}^2$	?	105984530	$Q_{39}^2$	?	?	?	?	?	?

Como se mencionó inicialmente conociendo los flujos de los 21 fan coils que finalizan cada trayectoria y el flujo total que debe tener la bomba para abastecer todo el sistema podemos decir que los valores teóricos de los flujos en GPM y convertidos a  $m^3/seg$  se obtienen de sustituir en las ecuaciones de nodo que se encuentran en páginas anteriores, por lo que obtenemos que:

$Q_1 ? 56,4 \text{ gpm} ? 0,003558287 \text{ m}^3/seg$	$Q_{21} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$
$Q_2 ? 7,2 \text{ gpm} ? 0,0004542494 \text{ m}^3/seg$	$Q_{22} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$
$Q_3 ? 49,2 \text{ gpm} ? 0,003104038 \text{ m}^3/seg$	$Q_{23} ? 25,2 \text{ gpm} ? 0,001589873 \text{ m}^3/seg$
$Q_4 ? 3,6 \text{ gpm} ? 0,0002271247 \text{ m}^3/seg$	$Q_{24(a)} ? 7,2 \text{ gpm} ? 0,0004542494 \text{ m}^3/seg$
$Q_5 ? 3,6 \text{ gpm} ? 0,0002271247 \text{ m}^3/seg$	$Q_{24(b)} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$
$Q_6 ? 6 \text{ gpm} ? 0,0003785412 \text{ m}^3/seg$	$Q_{24(c)} ? 4,8 \text{ gpm} ? 0,0003028329 \text{ m}^3/seg$
$Q_7 ? 3,6 \text{ gpm} ? 0,0002271247 \text{ m}^3/seg$	$Q_{25} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$
$Q_8 ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$	$Q_{26} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$
$Q_9 ? 43,2 \text{ gpm} ? 0,002725496 \text{ m}^3/seg$	$Q_{27} ? 18 \text{ gpm} ? 0,001135624 \text{ m}^3/seg$
$Q_{10} ? 8,4 \text{ gpm} ? 0,0005299576 \text{ m}^3/seg$	$Q_{28} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$
$Q_{11} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$	$Q_{29} ? 15,6 \text{ gpm} ? 0,0009842071 \text{ m}^3/seg$
$Q_{12} ? 6 \text{ gpm} ? 0,0003785412 \text{ m}^3/seg$	$Q_{30} ? 3,6 \text{ gpm} ? 0,0002271247 \text{ m}^3/seg$
$Q_{13} ? 3,6 \text{ gpm} ? 0,0002271247 \text{ m}^3/seg$	$Q_{31} ? 12 \text{ gpm} ? 0,0007570824 \text{ m}^3/seg$
$Q_{14} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$	$Q_{32} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$
$Q_{15} ? 34,8 \text{ gpm} ? 0,002195539 \text{ m}^3/seg$	$Q_{33} ? 9,6 \text{ gpm} ? 0,0006056659 \text{ m}^3/seg$
$Q_{16} ? 9,6 \text{ gpm} ? 0,0006056659 \text{ m}^3/seg$	$Q_{34} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$
$Q_{17} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$	$Q_{35} ? 7,2 \text{ gpm} ? 0,0004542494 \text{ m}^3/seg$
$Q_{18} ? 7,2 \text{ gpm} ? 0,0004542494 \text{ m}^3/seg$	$Q_{36} ? 4,8 \text{ gpm} ? 0,0003028329 \text{ m}^3/seg$
$Q_{19} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$	$Q_{37} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$
$Q_{20} ? 4,8 \text{ gpm} ? 0,0003028329 \text{ m}^3/seg$	$Q_{38} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$
	$Q_{39} ? 2,4 \text{ gpm} ? 0,0001514165 \text{ m}^3/seg$

El  $Q_{TOTAL}$  es equivalente de la suma de todos los flujos de los fan coils distribuidos en el sistema.

Con estos valores de flujo y con las áreas respectivas para cada diámetro de tubería podemos hallar las velocidades que se usaran para determinar los valores de  $Re$  junto con los valores de la rugosidad del material y la relación  $\frac{e}{d}$  para posteriormente calcular  $f$ .

Para cada velocidad se utiliza la ecuación básica de mecánica de fluidos:

$$Q = A \cdot V \quad V = Q / A$$

<i>Diámetro en pulgadas</i>	<i>Diámetro en metros</i>	<i>Área en metros<sup>2</sup></i>
¾	0,01905	0,000285022
1	0,0254	0,000506707
1,25	0,03175	0,001140091
1,5	0,0381	0,00079173
2	0,0508	0,002026829

**Tabla 16: Valores De Los Diámetros Usados Con Sus Áreas Respectivas**



<i>Material</i>	<i>Diámetro</i>	<i>Rugosidad</i>	<i>e / d</i>
<i>cobre</i>	¾"	6*10 <sup>-5</sup> pulg	0,00008
	1"	6*10 <sup>-5</sup> pulg	0,00006
	1,25"	6*10 <sup>-5</sup> pulg	0,000048
	1,5"	6*10 <sup>-5</sup> pulg	0,00004
<i>Acero al carbono</i>	2"	0,0018 pulg	0,0009

**Tabla 17: Valores De Rugosidad Y Relaciones *e/d* Para Cobre Y Acero**

<i>Constantes</i>	<i>Valor</i>
<i>Viscosidad ?</i>	1,519 * 10 <sup>-3</sup> kg/m.seg
<i>Densidad ?</i>	1000 kg/m <sup>3</sup>

**Tabla 18: Valores Viscosidad y Densidad Para El Agua**

El valor de la viscosidad y la densidad del agua fueron tomados de Mecánica de fluidos. Potter Merle C. y Wiggert David C. Tercera Edición. Editorial Thomson. [21] Tabla de las propiedades del agua en sistema internacional para una temperatura de 5 °C.

Para hallar el **Re** se usara la ecuación:  $Re = \frac{VD}{\nu}$

Donde:

$$\rho = 658327,8473 \text{ seg}/m^2$$

$V$  ? Velocidad en m/seg

$D$  ? Diametro interior en m

Entonces

$$Re = 658327,8473 \rho V D$$

Los datos obtenidos para las velocidades y los números Reynolds son:

**Para  $Q_1$  con un área de 2”:**

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_{2''}} = \frac{0,003558287 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,002026829 \text{ m}^2} = 1,755593096 \text{ m/seg}$$

$$Re = 658327,8473 \text{ seg}/m^2 \cdot 1,755593096 \text{ m/seg} \cdot 0,0508 \text{ m} = 58712,39584$$

**Para  $Q_2$  con un área de 1,5”:**

$$V_2 = \frac{Q_2}{A_{1,5''}} = \frac{0,0004542494 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,001140091 \text{ m}^2} = 0,398432581 \text{ m/seg}$$

$$Re = 658327,8473 \text{ seg}/m^2 \cdot 0,398432581 \text{ m/seg} \cdot 0,0381 \text{ m} = 9993,601933$$

**Para  $Q_2$  con un área de 3/4”:**

$$V_2 = \frac{Q_2}{A_{3/4''}} = \frac{0,0004542494 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 1,593734519 \text{ m/seg}$$

$$Re = 658327,8473 \text{ seg}/m^2 \cdot 1,593734519 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 19987,25648$$

**Para Q<sub>4</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_4 = \frac{Q_4}{A_{3/4}} = 0,0002271247 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,000285022 \text{ m}^2 = 0,796867259 \text{ m/seg}$$
$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,796867259 \text{ m/seg} = 0,01905 \text{ m} = 9993,628231$$

**Para Q<sub>3</sub> con un área de 1,5”:**

$$V_3 = \frac{Q_3}{A_{1,5}} = 0,003104038 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,001140091 \text{ m}^2 = 2,722623019 \text{ m/seg}$$
$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 2,722623019 \text{ m/seg} = 0,0381 \text{ m} = 68289,62279$$

**Para Q<sub>1</sub> con un área de 1,5”:**

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_{1,5}} = 0,003558287 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,001140091 \text{ m}^2 = 3,121055249 \text{ m/seg}$$
$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 3,121055249 \text{ m/seg} = 0,0381 \text{ m} = 78283,21592$$

**Para Q<sub>5</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_5 = \frac{Q_5}{A_{3/4}} = 0,0002271247 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,000285022 \text{ m}^2 = 0,796867259 \text{ m/seg}$$
$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,796867259 \text{ m/seg} = 0,01905 \text{ m} = 9993,628231$$

**Para Q<sub>6</sub> con un área de 1,5”:**

$$V_6 = \frac{Q_6}{A_{1,5}} = 0,0003785412 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,001140091 \text{ m}^2 = 0,33202718 \text{ m/seg}$$
$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,33202718 \text{ m/seg} = 0,0381 \text{ m} = 8328,002342$$

**Para Q<sub>6</sub> con un área de 1”:**

$$V_6 = \frac{Q_6}{A_1} = 0,0003785412 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,000506707 \text{ m}^2 = 0,747061319 \text{ m/seg}$$
$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,747061319 \text{ m/seg} = 0,0254 \text{ m} = 12492,00626$$

**Para Q<sub>7</sub> con un área de 1”:**

$$V_7 = \frac{Q_7}{A_{1''}} = \frac{0,0002271247 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,448236752 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,448236752 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 7495,203094$$

**Para Q<sub>7</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_7 = \frac{Q_7}{A_{3/4''}} = \frac{0,0002271247 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,796867259 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,796867259 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 9993,628231$$

**Para Q<sub>8</sub> con un área de 1”:**

$$V_8 = \frac{Q_8}{A_{1''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,298824567 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,298824567 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 4996,80316$$

**Para Q<sub>8</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_8 = \frac{Q_8}{A_{3/4''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>9</sub> con un área de 1,5”:**

$$V_9 = \frac{Q_9}{A_{1,5''}} = \frac{0,002725496 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,001140091 \text{ m}^2} = 2,390595137 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 2,390595137 \text{ m/seg} \cdot 0,0381 \text{ m} = 59961,60284$$

**Para Q<sub>10</sub> con un área de 1,5”:**

$$V_{10} = \frac{Q_{10}}{A_{1,5''}} = \frac{0,0005299576 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,001140091 \text{ m}^2} = 0,464837982 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,464837982 \text{ m/seg} \cdot 0,0381 \text{ m} = 11659,20152$$

**Para Q<sub>10</sub> con un área de 1”:**

$$V_{10} = \frac{Q_{10}}{A_1} = \frac{0,0005299576 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 1,045885689 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 1,045885689 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 17488,80612$$

**Para Q<sub>11</sub> con un área de 1”:**

$$V_{11} = \frac{Q_{11}}{A_1} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,298824567 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,298824567 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 4996,80316$$

**Para Q<sub>11</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{11} = \frac{Q_{11}}{A_{3/4}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>12</sub> con un área de 1”:**

$$V_{12} = \frac{Q_{12}}{A_1} = \frac{0,0003785412 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,747061319 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,747061319 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 12492,00626$$

**Para Q<sub>12</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{12} = \frac{Q_{12}}{A_{3/4}} = \frac{0,0003785412 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 1,328112216 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 1,328112216 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 16656,04853$$

**Para Q<sub>14</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{14} = \frac{Q_{14}}{A_{3/4}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>13</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{13} = \frac{Q_{13}}{A_{3/4''}} = \frac{0,0002271247 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,796867259 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,796867259 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 9993,628231$$

**Para Q<sub>15</sub> con un área de 1,5”:**

$$V_{15} = \frac{Q_{15}}{A_{1,5''}} = \frac{0,002195539 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,001140091 \text{ m}^2} = 1,925757681 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 1,925757681 \text{ m/seg} \cdot 0,0381 \text{ m} = 48302,41451$$

**Para Q<sub>15</sub> con un área de 1,25”:**

$$V_{15} = \frac{Q_{15}}{A_{1,25''}} = \frac{0,002195539 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,00079173 \text{ m}^2} = 2,773090574 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 2,773090574 \text{ m/seg} \cdot 0,03175 \text{ m} = 57962,88724$$

**Para Q<sub>16</sub> con un área de 1,25”:**

$$V_{16} = \frac{Q_{16}}{A_{1,25''}} = \frac{0,0006056659 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,00079173 \text{ m}^2} = 0,764990463 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,764990463 \text{ m/seg} \cdot 0,03175 \text{ m} = 19987,20937$$

**Para Q<sub>17</sub> con un área de 1”:**

$$V_{17} = \frac{Q_{17}}{A_{1''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,298824567 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,298824567 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 4996,80316$$

**Para Q<sub>17</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{17} = \frac{Q_{17}}{A_{3/4''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>18</sub> con un área de 1”:**

$$V_{18} = \frac{Q_{18}}{A_1} = \frac{0,0004542494 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,896473504 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,896473504 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 14990,40619$$

**Para Q<sub>19</sub> con un área de 1”:**

$$V_{19} = \frac{Q_{19}}{A_1} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,298824567 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,298824567 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 4996,803161$$

**Para Q<sub>19</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{19} = \frac{Q_{19}}{A_{3/4}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>20</sub> con un área de 1”:**

$$V_{20} = \frac{Q_{20}}{A_1} = \frac{0,0003028329 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,597648937 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,597648937 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 9993,603028$$

**Para Q<sub>20</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{20} = \frac{Q_{20}}{A_{3/4}} = \frac{0,0003028329 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 1,062489562 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 1,062489562 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 13324,83618$$

**Para Q<sub>21</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{21} = \frac{Q_{21}}{A_{3/4}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>22</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{22} = \frac{Q_{22}}{A_{3/4''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} = 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>23</sub> con un área de 1,25”:**

$$V_{23} = \frac{Q_{23}}{A_{1,25''}} = \frac{0,001589873 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,00079173 \text{ m}^2} = 2,008099984 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 2,008099984 \text{ m/seg} = 0,03175 \text{ m} = 41973,12343$$

**Para Q<sub>24(a)</sub> con un área de 1,25”:**

$$V_{24(a)} = \frac{Q_{24(a)}}{A_{1,25''}} = \frac{0,0004542494 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,00079173 \text{ m}^2} = 0,573742816 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,573742816 \text{ m/seg} = 0,03175 \text{ m} = 11992,32022$$

**Para Q<sub>24(a)</sub> con un área de 1”:**

$$V_{24(a)} = \frac{Q_{24(a)}}{A_{1''}} = \frac{0,0004542494 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,896473504 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,896473504 \text{ m/seg} = 0,0254 \text{ m} = 14990,40619$$

**Para Q<sub>24(b)</sub> con un área de 1”:**

$$V_{24(b)} = \frac{Q_{24(b)}}{A_{1''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,298824567 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,298824567 \text{ m/seg} = 0,0254 \text{ m} = 4996,803161$$

**Para Q<sub>24(b)</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{24(b)} = \frac{Q_{24(b)}}{A_{3/4''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} = 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$



**Para  $Q_{24(c)}$  con un área de 1”:**

$$V_{24(c)} = \frac{Q_{24(c)}}{A_{1''}} = \frac{0,0003028329 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,597648937 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,597648937 \text{ m/seg} = 0,0254 \text{ m} = 9993,603028$$

**Para  $Q_{25}$  con un área de 3/4”:**

$$V_{25} = \frac{Q_{25}}{A_{3/4''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} = 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para  $Q_{24(c)}$  con un área de 3/4”:**

$$V_{24(c)} = \frac{Q_{24(c)}}{A_{3/4''}} = \frac{0,0003028329 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 1,062489562 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 1,062489562 \text{ m/seg} = 0,01905 \text{ m} = 13324,83618$$

**Para  $Q_{26}$  con un área de 3/4”:**

$$V_{26} = \frac{Q_{26}}{A_{3/4''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} = 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para  $Q_{27}$  con un área de 1,5”:**

$$V_{27} = \frac{Q_{27}}{A_{1,5''}} = \frac{0,001135624 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,001140091 \text{ m}^2} = 0,996081891 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,996081891 \text{ m/seg} = 0,0381 \text{ m} = 24984,01583$$

**Para  $Q_{27}$  con un área de 1,25”:**

$$V_{27} = \frac{Q_{27}}{A_{1,25''}} = \frac{0,001135624 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,00079173 \text{ m}^2} = 1,434357672 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 1,434357672 \text{ m/seg} = 0,03175 \text{ m} = 29980,81375$$

**Para Q<sub>27</sub> con un área de 1”:**

$$V_{27} = \frac{Q_{27}}{A_{1''}} = 0,001135624 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,000506707 \text{ m}^2 = 2,241184748 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 2,241184748 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 37476,03199$$

**Para Q<sub>28</sub> con un área de 1”:**

$$V_{28} = \frac{Q_{28}}{A_{1''}} = 0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,000506707 \text{ m}^2 = 0,298824567 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,298824567 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 4996,803161$$

**Para Q<sub>28</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{28} = \frac{Q_{28}}{A_{3/4''}} = 0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,000285022 \text{ m}^2 = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>29</sub> con un área de 1”:**

$$V_{28} = \frac{Q_{28}}{A_{1''}} = 0,0009842071 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,000506707 \text{ m}^2 = 1,942359391 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 1,942359391 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 32479,21562$$

**Para Q<sub>30</sub> con un área de 1”:**

$$V_{30} = \frac{Q_{30}}{A_{1''}} = 0,0002271247 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,000506707 \text{ m}^2 = 0,448236752 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,448236752 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 7495,203094$$

**Para Q<sub>30</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{30} = \frac{Q_{30}}{A_{3/4''}} = 0,0002271247 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,000285022 \text{ m}^2 = 0,796867259 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,79686725 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 9993,628231$$

**Para Q<sub>31</sub> con un área de 1”:**

$$V_{31} = \frac{Q_{31}}{A_1} = \frac{0,0007570824 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 1,494122639 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 1,494122639 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 24984,01253$$

**Para Q<sub>32</sub> con un área de 1”:**

$$V_{32} = \frac{Q_{32}}{A_1} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,298824567 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,298824567 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 4996,803161$$

**Para Q<sub>32</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{32} = \frac{Q_{32}}{A_{3/4}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>33</sub> con un área de 1”:**

$$V_{33} = \frac{Q_{33}}{A_1} = \frac{0,0006056659 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 1,195298072 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 1,195298072 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 19987,20937$$

**Para Q<sub>34</sub> con un área de 1”:**

$$V_{34} = \frac{Q_{34}}{A_1} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,298824567 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,298824567 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 4996,803161$$

**Para Q<sub>34</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{34} = \frac{Q_{34}}{A_{3/4}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>35</sub> con un área de 1”:**

$$V_{35} = \frac{Q_{35}}{A_{1''}} = \frac{0,0004542494 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,896473504 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,896473504 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 14990,40619$$

**Para Q<sub>36</sub> con un área de 1”:**

$$V_{36} = \frac{Q_{36}}{A_{1''}} = \frac{0,0003028329 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,597648937 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,597648937 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 13324,83618$$

**Para Q<sub>37</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{37} = \frac{Q_{37}}{A_{3/4''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>38</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{38} = \frac{Q_{38}}{A_{3/4''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

**Para Q<sub>39</sub> con un área de 1”:**

$$V_{39} = \frac{Q_{39}}{A_{1''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000506707 \text{ m}^2} = 0,298824567 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,298824567 \text{ m/seg} \cdot 0,0254 \text{ m} = 4996,803166$$

**Para Q<sub>39</sub> con un área de 3/4”:**

$$V_{39} = \frac{Q_{39}}{A_{3/4''}} = \frac{0,0001514165 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,000285022 \text{ m}^2} = 0,531244956 \text{ m/seg}$$

$$\text{Re} = 658327,8473 \text{ seg/m}^2 \cdot 0,531244956 \text{ m/seg} \cdot 0,01905 \text{ m} = 6662,420284$$

Analizando los valores que dieron de Reynolds podemos usar la formula de Swamee-Jain para determinar el  $f$ .

$$f = 1,325 \frac{\ln \left( 0,27 \frac{e}{D} + 5,74 \frac{1}{Re^{0,9}} \right)^2}{Re}$$

Que es aplicable para los siguientes rangos:

$$0,01 > e/D > 10^{-8}$$

$$10^8 > Re > 5000$$

**Nota:** para el único valor de Reynolds menor de 5000 se utiliza el diagrama de moody. [24]

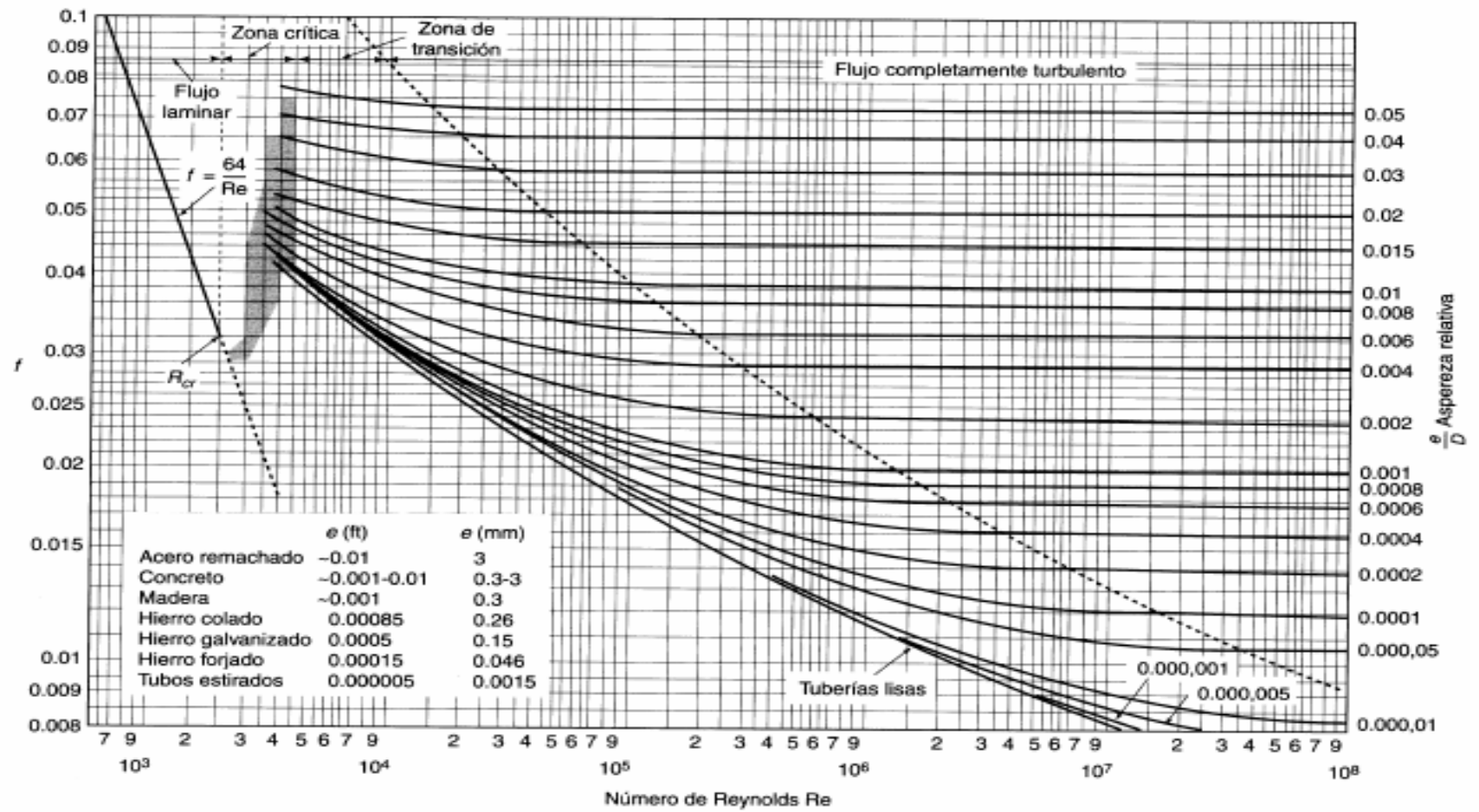


Figura 67: Diagrama De Moody [24]

Sustituyendo todos los valores en la ecuación para cada velocidad y para cada diámetro, obtenemos:

Para acero al carbono:

$$f_{2'' \text{ con } V_1} ? f ? 0,023361159$$

Para cobre:

$$f_{1,5'' \text{ con } V_2} ? f ? 0,031037197 \quad f_{3/4'' \text{ con } V_2} ? f ? 0,026008637$$

$$f_{3/4'' \text{ con } V_4} ? f ? 0,031107628 \quad f_{1,5'' \text{ con } V_3} ? f ? 0,019564236$$

$$f_{1,5'' \text{ con } V_1} ? f ? 0,019016695 \quad f_{3/4'' \text{ con } V_5} ? f ? 0,031107628$$

$$f_{1,5'' \text{ con } V_6} ? f ? 0,032645348 \quad f_{1'' \text{ con } V_6} ? f ? 0,029267364$$

$$f_{1'' \text{ con } V_7} ? f ? 0,033663916 \quad f_{3/4'' \text{ con } V_7} ? f ? 0,031107628$$

$$f_{1'' \text{ con } V_8} ? f ? 0,037 \quad f_{3/4'' \text{ con } V_8} ? f ? 0,034850326$$

$$f_{1,5'' \text{ con } V_9} ? f ? 0,020110621 \quad f_{1,5'' \text{ con } V_{10}} ? f ? 0,029769826$$

$$f_{1'' \text{ con } V_{10}} ? f ? 0,026837126 \quad f_{1'' \text{ con } V_{11}} ? f ? 0,037$$

$$f_{3/4'' \text{ con } V_{11}} ? f ? 0,034850326 \quad f_{1'' \text{ con } V_{12}} ? f ? 0,029267364$$

$$f_{3/4'' \text{ con } V_{12}} ? f ? 0,027214852 \quad f_{3/4'' \text{ con } V_{14}} ? f ? 0,034850326$$

$$f_{3/4'' \text{ con } V_{13}} ? f ? 0,031107628 \quad f_{1,25'' \text{ con } V_{15}} ? f ? 0,020292359$$

$$f_{1,5'' \text{ con } V_{15}} ? f ? 0,021076564 \quad f_{1,25'' \text{ con } V_{16}} ? f ? 0,027426131$$

$$f_{1'' \text{ con } V_{16}} ? f ? 0,025959033 \quad f_{1'' \text{ con } V_{17}} ? f ? 0,037$$

$f_{3/4''} \text{ con } V_{17} ? f ? 0,034850326$	$f_{1''} \text{ con } V_{18} ? f ? 0,027909958$
$f_{1''} \text{ con } V_{19} ? f ? 0,037$	$f_{3/4''} \text{ con } V_{19} ? f ? 0,034850326$
$f_{1''} \text{ con } V_{20} ? f ? 0,031107628$	$f_{3/4''} \text{ con } V_{20} ? f ? 0,028751027$
$f_{3/4''} \text{ con } V_{21} ? f ? 0,034850326$	$f_{3/4''} \text{ con } V_{22} ? f ? 0,034850326$
$f_{1,25''} \text{ con } V_{23} ? f ? 0,021774618$	$f_{1,25''} \text{ con } V_{24(a)} ? f ? 0,029562195$
$f_{1''} \text{ con } V_{24(a)} ? f ? 0,027909958$	$f_{1''} \text{ con } V_{24(b)} ? f ? 0,037$
$f_{3/4''} \text{ con } V_{24(b)} ? f ? 0,034850326$	$f_{1''} \text{ con } V_{24(c)} ? f ? 0,031107628$
$f_{3/4''} \text{ con } V_{25} ? f ? 0,034850326$	$f_{3/4''} \text{ con } V_{24(c)} ? f ? 0,028815853$
$f_{3/4''} \text{ con } V_{26} ? f ? 0,034850326$	$f_{1,5''} \text{ con } V_{27} ? f ? 0,024533455$
$f_{1,25''} \text{ con } V_{27} ? f ? 0,02351689$	$f_{1''} \text{ con } V_{27} ? f ? 0,022379042$
$f_{1''} \text{ con } V_{28} ? f ? 0,037$	$f_{3/4''} \text{ con } V_{28} ? f ? 0,034850326$
$f_{1''} \text{ con } V_{29} ? f ? 0,023121087$	$f_{1''} \text{ con } V_{30} ? f ? 0,033663916$
$f_{3/4''} \text{ con } V_{30} ? f ? 0,031107628$	$f_{1''} \text{ con } V_{31} ? f ? 0,024589403$
$f_{1''} \text{ con } V_{32} ? f ? 0,037$	$f_{3/4''} \text{ con } V_{32} ? f ? 0,034850326$
$f_{1''} \text{ con } V_{33} ? f ? 0,025968658$	$f_{1''} \text{ con } V_{34} ? f ? 0,037$
$f_{3/4''} \text{ con } V_{34} ? f ? 0,034850326$	$f_{1''} \text{ con } V_{35} ? f ? 0,027909958$
$f_{1''} \text{ con } V_{36} ? f ? 0,031107628$	$f_{3/4''} \text{ con } V_{36} ? f ? 0,028815853$
$f_{3/4''} \text{ con } V_{37} ? f ? 0,034850326$	$f_{3/4''} \text{ con } V_{38} ? f ? 0,034850326$
$f_{1''} \text{ con } V_{39} ? f ? 0,037$	$f_{3/4''} \text{ con } V_{39} ? f ? 0,034850326$



Sabiendo que la pérdida por fricción está expresada en función de las siguientes variables: longitud de la tubería, velocidad media de flujo (la que se puede expresar también en términos del caudal), diámetro de la tubería y depende también de un factor o coeficiente de fricción  $f$ , que se acaba de determinar, es posible sustituir los valores necesarios para resolver las ecuaciones planteadas para cada trayectoria y determinar H.

Inicialmente se obtienen las ecuaciones de la forma  $H=R*Q^2$  para cada trayectoria después de sustituir los valores de  $f$  y los valores respectivos para cada fracción de flujo en función de  $Q_1$  de forma que  $Q_n = Q_n / Q_1$  y  $Q_n^2 = (Q_n / Q_1)^2$  que se observan en la siguiente tabla tenemos que:

Qn (Flujo)	Valor GPM	Qn/Q1	(Qn/Q1) <sup>2</sup>	%Q1
1	56,4	1	1	100
2	7,2	0,12765957	0,01629697	12,7659574
3	49,2	0,87234043	0,76097782	87,2340426
4	3,6	0,06382979	0,00407424	6,38297872
5	3,6	0,06382979	0,00407424	6,38297872
6	6	0,10638298	0,01131734	10,6382979
7	3,6	0,06382979	0,00407424	6,38297872
8	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
9	43,2	0,76595745	0,58669081	76,5957447

10	8,4	0,14893617	0,02218198	14,893617
11	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
12	6	0,10638298	0,01131734	10,6382979
13	3,6	0,06382979	0,00407424	6,38297872
14	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
15	34,8	0,61702128	0,38071526	61,7021277
16	9,6	0,17021277	0,02897239	17,0212766
17	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
18	7,2	0,12765957	0,01629697	12,7659574
19	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
20	4,8	0,08510638	0,0072431	8,5106383
21	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
22	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
23	25,5	0,44680851	0,19963785	44,6808511
24(a)	7,2	0,12765957	0,01629697	12,7659574
24(b)	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
24(c)	4,8	0,08510638	0,0072431	8,5106383
25	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
26	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
27	18	0,31914894	0,10185604	31,9148639
28	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915

29	15,6	0,27659574	0,07650521	27,6595745
30	3,6	0,06382979	0,00407424	6,38297872
31	12	0,21276596	0,04526935	21,2765957
32	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
33	9,6	0,17021277	0,02897239	17,0212766
34	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
35	7,2	0,12765957	0,01629697	12,7659574
36	4,8	0,08510638	0,0072431	8,5106383
37	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
38	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915
39	2,4	0,04255319	0,00181077	4,25531915

**Tabla 19: Fracciones De Flujo Para Cada Uno De Los Caudales Del Sistema**

Sustituyendo os valores se obtienen las ecuaciones de carga para cada trayectoria en función de  $Q_1$  así:

TRAYECTORIA	ECUACIÓN DE PÉRDIDA
(1) Trayectoria 1-1	$H = 1646354,72Q_1^2$
(2) Trayectoria 1-2	$H = 1644140,14Q_1^2$
(3) Trayectoria 2-1	$H = 1294180,66Q_1^2$

(4) Trayectoria 2-2	$H ? 1587027,33Q_1^2$
(5) Trayectoria 3-1	$H ? 1345514,17Q_1^2$
(6) Trayectoria 3-2	$H ? 1501585,73Q_1^2$
(7) Trayectoria 3-3	$H ? 1803025,73Q_1^2$
(8) Trayectoria 4-1	$H ? 1438431,47Q_1^2$
(9) Trayectoria 4-2	$H ? 1465236,33Q_1^2$
(10) Trayectoria 4-3	$H ? 1518463,05Q_1^2$
(11) Trayectoria 4-4	$H ? 1502054,46Q_1^2$
(12) Trayectoria 5-1	$H ? 1495532,05Q_1^2$
(13) Trayectoria 5-2	$H ? 1512660,42Q_1^2$
(14) Trayectoria 5-3	$H ? 1501182,26Q_1^2$
(15) Trayectoria 6-1	$H ? 1666857,18Q_1^2$
(16) Trayectoria 7-1	$H ? 2041477,46Q_1^2$
(17) Trayectoria 8-1	$H ? 1738377,13Q_1^2$
(18) Trayectoria 9-1	$H ? 1769411,65Q_1^2$
(19) Trayectoria 10-1	$H ? 1799516,65Q_1^2$
(20) Trayectoria 10-2	$H ? 1795027,42Q_1^2$
(21) Trayectoria 11-1	$H ? 1821441,61Q_1^2$

**Tabla 20: Ecuaciones De Las Pérdidas De Carga Total Por Trayectorias**

A partir de estas ecuaciones se procede a sustituir todos los valores correspondientes para así obtener los valores de H y determinar la trayectoria de mayor pérdida., que es por ende la que permitirá obtener el punto de operación para el sistema con la bomba ya establecida.

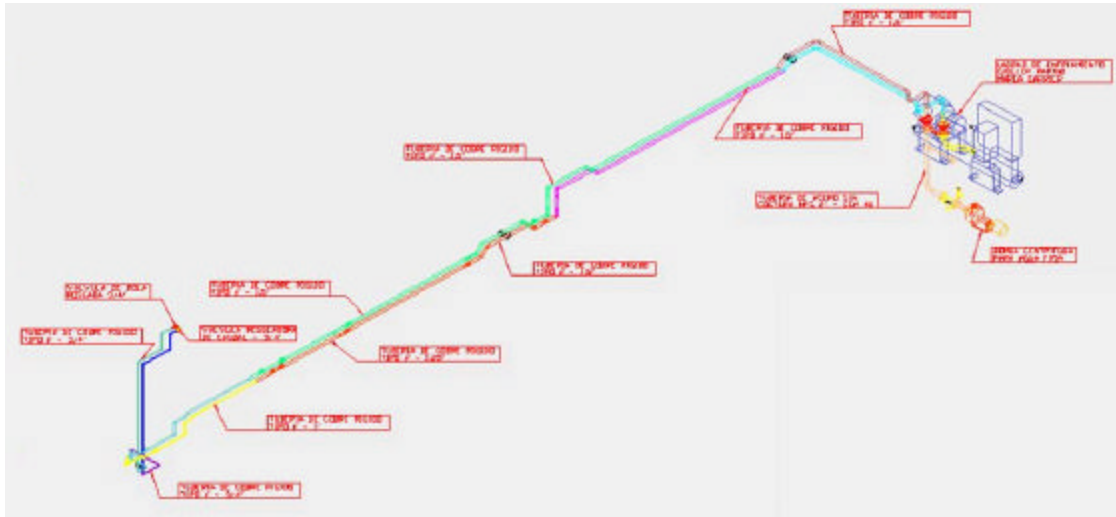
Así resolviendo las ecuaciones de las pérdidas de carga total por trayectorias en metros tenemos:

<b>Trayectoria</b>	<b>Flujo del Fan coil</b>	<b>Perdidas en (m)</b>
Trayectoria 1-1	3,6	20,84516707
Trayectoria 1-2	3,6	20,81712741
Trayectoria 2-1	2,4	16,88420143
Trayectoria 2-2	3,6	20,1351522
Trayectoria 3-1	2,4	17,03610237
Trayectoria 3-2	2,4	19,01218799
Trayectoria 3-3	3,6	22,82884245
Trayectoria 4-1	2,4	18,20872079
Trayectoria 4-2	2,4	18,55195347
Trayectoria 4-3	2,4	19,22587862
Trayectoria 4-4	2,4	18,95439629
Trayectoria 5-1	2,4	18,93140915
Trayectoria 5-2	2,4	19,15240913
Trayectoria 5-3	2,4	19,00707945

Trayectoria 6-1	2,4	21,10475704
<b>Trayectoria 7-1</b>	<b>3,6</b>	<b>25,84797679</b>
Trayectoria 8-1	2,4	22,01030024
Trayectoria 9-1	2,4	22,16776164
Trayectoria 10-1	2,4	22,78441256
Trayectoria 10-2	2,4	22,72757254
Trayectoria 11-1	2,4	23,06201339

**Tabla 21: Valores De H (Pérdidas En Metros) Por Trayectorias**

Como se muestra en la tabla según los datos obtenidos mediante los cálculos y la sustitución de valores en Excel, es posible determinar que la trayectoria con mayor pérdida es la **trayectoria 16(7-1)** correspondiente al tramo que va desde el modulo 103 en el unidad marina (ubicada en el cuarto de maquinas auxiliares de proa) hasta el fan coil ubicado en el pasillo 1-24-O-L del modulo 501 (escaleras de acceso a la cubierta 2) en el equipo NV-CHW09EQ de referencia CFFZA – 06 de 3,6gpm. Ver **ANEXO F**



**Figura 68: Recorrido Con Mayores Pérdidas – Trayectoria 16**

Después de haber obtenido el tramo crítico para el análisis del sistema se puede decir que para la trayectoria 16 se tienen los datos necesarios para trazar la curva del sistema, en la elaboración de esta se requiere plotear los valores de  $Q$  con los de  $H$  de manera tal que se pueda contraponer con la curva de la bomba y determinar el punto de operación.

Por tanto, de los resultados obtenidos anteriormente tenemos la ecuación de pérdida de carga total de la forma  $H=R*Q^2$  para el sistema que sería igual a:

$H = 2041477,846Q^2$ ; Tal como aparece en la Tabla de Ecuaciones De Las Pérdidas De Carga Total Por Trayectorias.

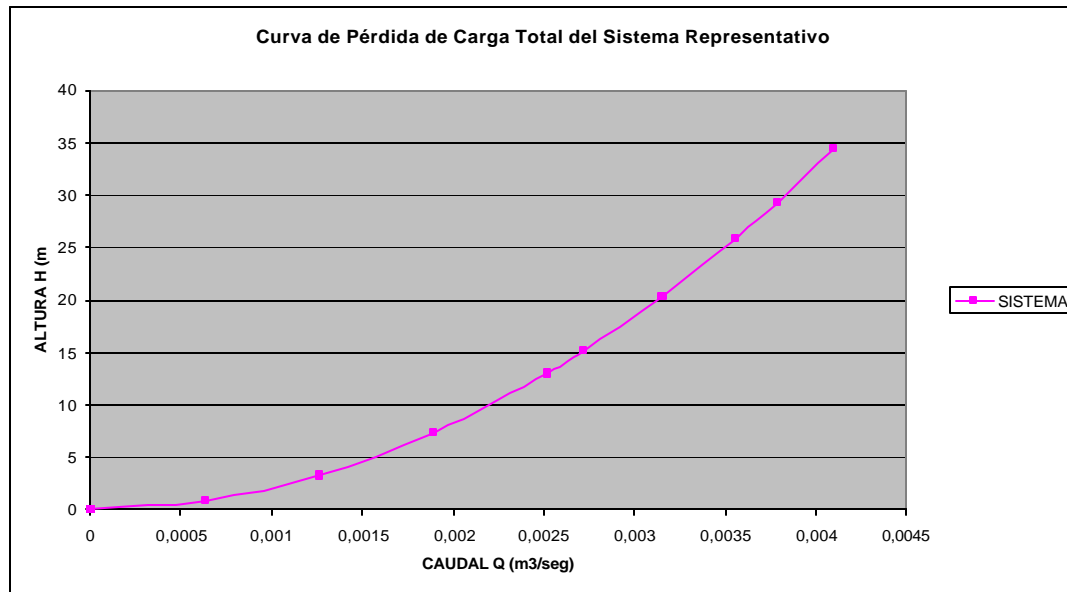
Sustituyendo los valores de porcentajes del flujo total en la ecuación anterior obtenemos los puntos para graficar la curva del sistema como aparece en la siguiente tabla

Fracción De Q1	Q (gpm)	Rx	Q (m3/seg)	Q <sup>2</sup>	H(Q)
0	0	2041477,56	0	0	0
0,177304965	10	2041477,56	0,000630902	3,9804E-07	0,812584192
0,354609929	20	2041477,56	0,001261804	1,5921E-06	3,250336767
0,531914894	30	2041477,56	0,001892706	3,5823E-06	7,313257727
0,709219858	40	2041477,56	0,002523608	6,3686E-06	13,00134707
0,863	43,15	2041477,56	0,002722342	7,4111E-06	15,1296879
0,886524823	50	2041477,56	0,00315451	9,9509E-06	20,3146048
1	56,4	2041477,56	0,003558287	1,2661E-05	25,84797811
1,063829787	60	2041477,56	0,003785412	1,4329E-05	29,25303091
1,15248227	65	2041477,56	0,004100863	1,6817E-05	34,33168211

**Tabla 22: Valores De Q Y H Para Graficar La Curva Del Sistema**

De esta manera es posible graficar la siguiente curva:





**Figura 69: Curva Del Sistema Específico “Nodriza Fluvial VI”**

Después de graficar la curva del sistema se hace necesario contraponerla con la curva de la bomba proporcionada por el fabricante, para de esta forma determinar el punto de operación.

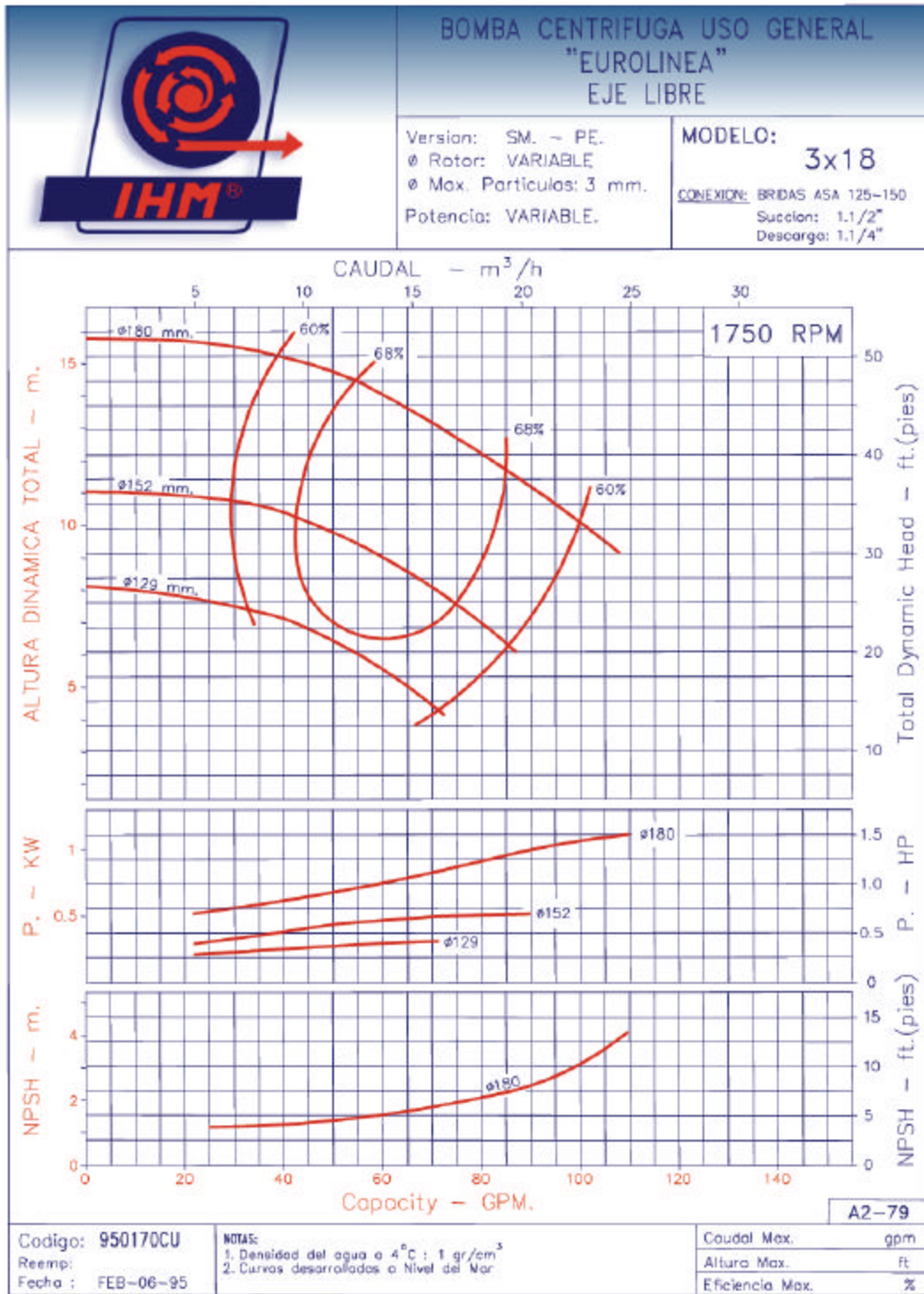
Los puntos para graficar la curva de la bomba IHM modelo 3x18 son:

<i>Q (GPM)</i>	<i>Q (m³/seg)</i>	<i>H (m)</i>
0	0	15,8
20	0.001261804	15,7
40	0.002523608	15,25
50	0.00315451	14,75
60	0.003785412	14

80	0.005047216	12,2
85	0.005362667	11,75
100	0.00630902	10
107,5	0.006782175	9,15

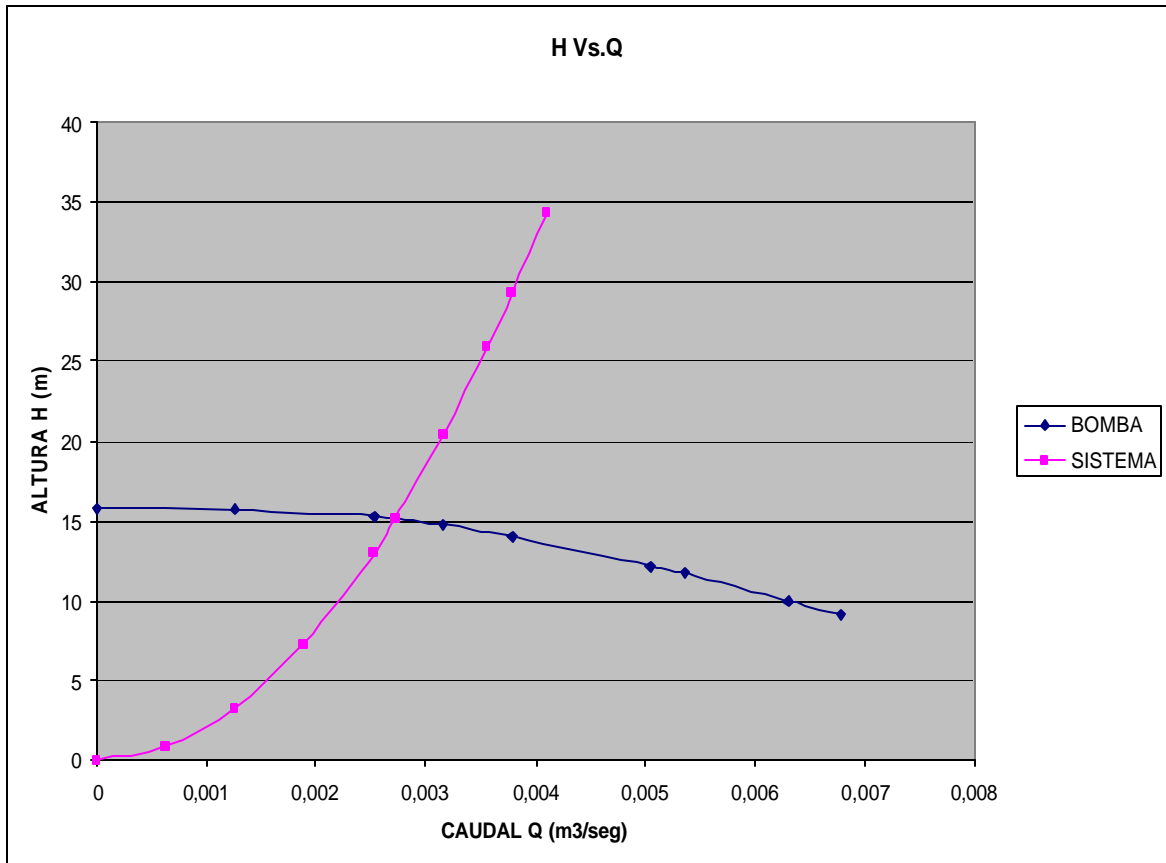
**Tabla 23: Valores De Q Y H Para Graficar La Curva Característica De La Bomba**

Estos puntos son tomados en base a la siguiente curva:



**Figura 70: Curva De La Bomba Proporcionada Por El Fabricante**

De graficar estos puntos y superponer las dos curvas se obtiene la siguiente relación de  $H$  vs.  $Q$



**Figura 71: Curva Bomba - Sistema Que Muestra El Punto De Operación**

Al analizar la curva se determina el punto de operación al que trabaja el sistema, para este caso específico el punto corresponde a:

$$\text{Caudal} = Q = 43,15 \text{ gpm}$$

$$\text{Pérdida} = H = 15,13 \text{ m}$$

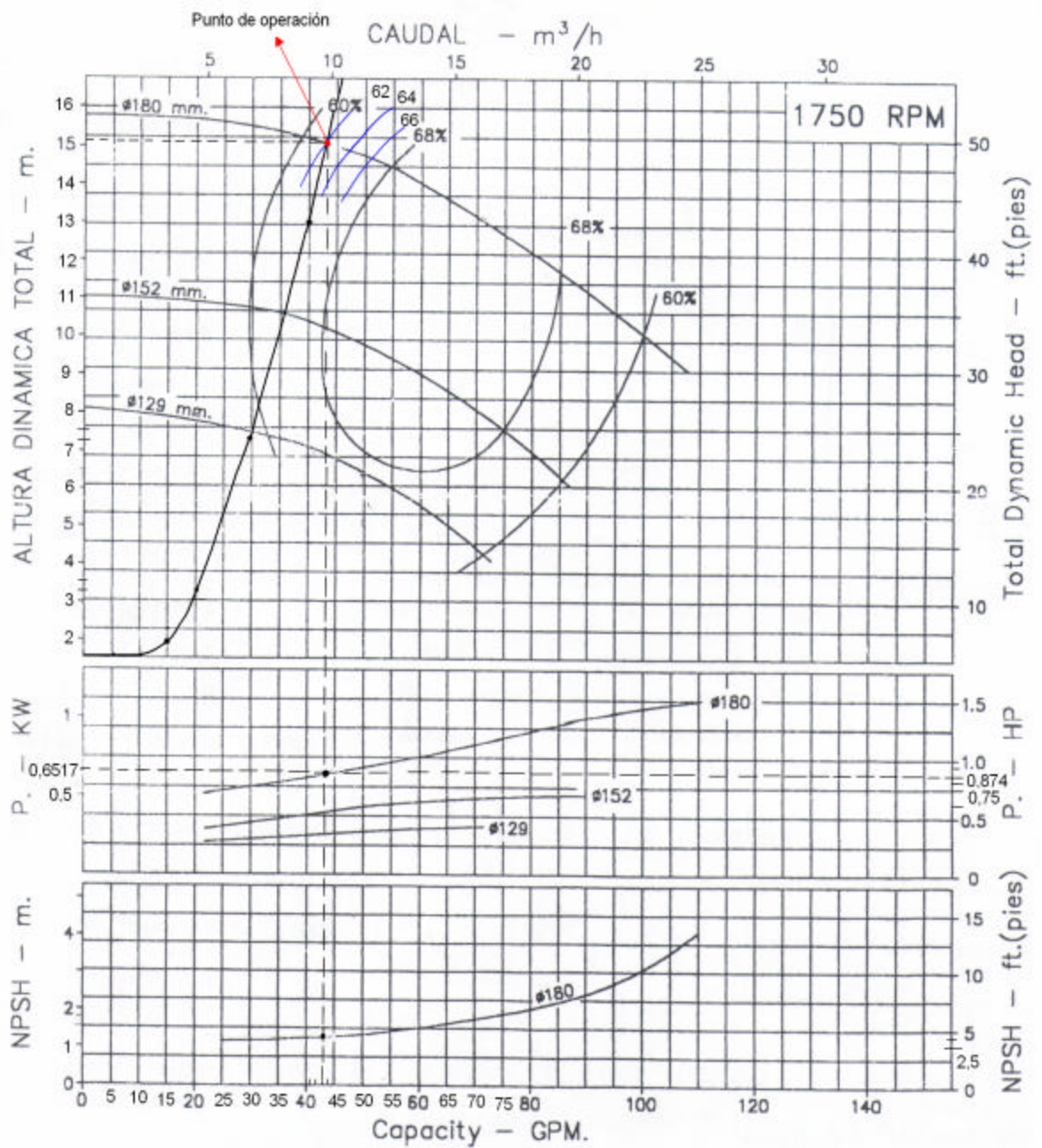
Partiendo de este valor podemos obtener de la curva característica proporcionada por el fabricante los otros parámetros que definen el comportamiento del sistema y a su vez verificar los valores de Q y H respectivamente:

$$? \text{ Eficiencia} = 62\%$$

$$? \text{ NPSH} = 1,33 \text{ m}$$

$$? \text{ Potencia} = 0,874 \text{ Hp}$$

Como se muestra en la figura:



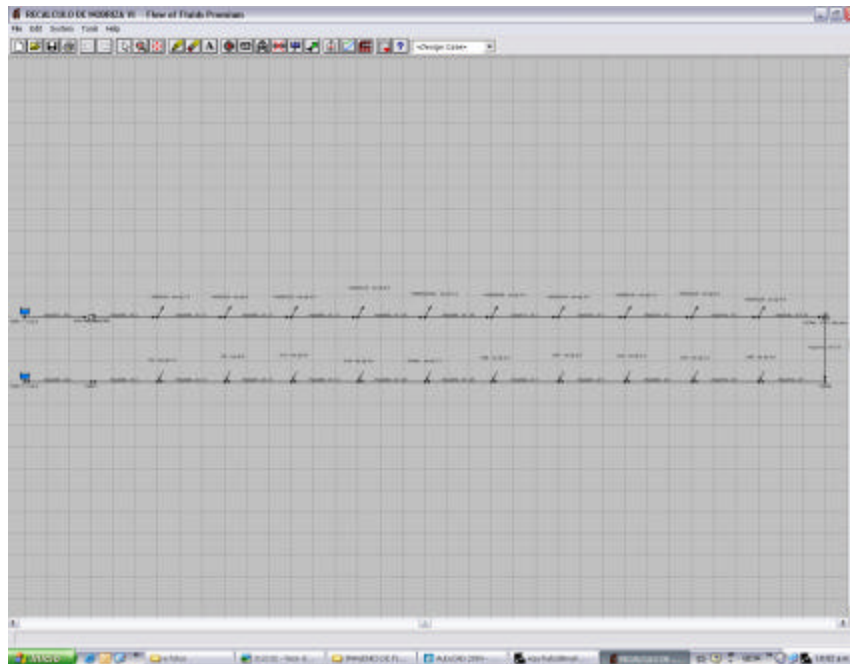
**Figura 72: Punto De Operación Cruzado Con Las Curvas De Eficiencias Según Curva Del Fabricante**

### 5.3 Análisis Del Sistema Mediante El Software Flow & Fluids

El sistema montado en la Nodriza VI se puede simular en el software para ver de que manera se debe comportar el sistema y para verificar si hay similitud con los datos obtenidos durante el cálculo manual.

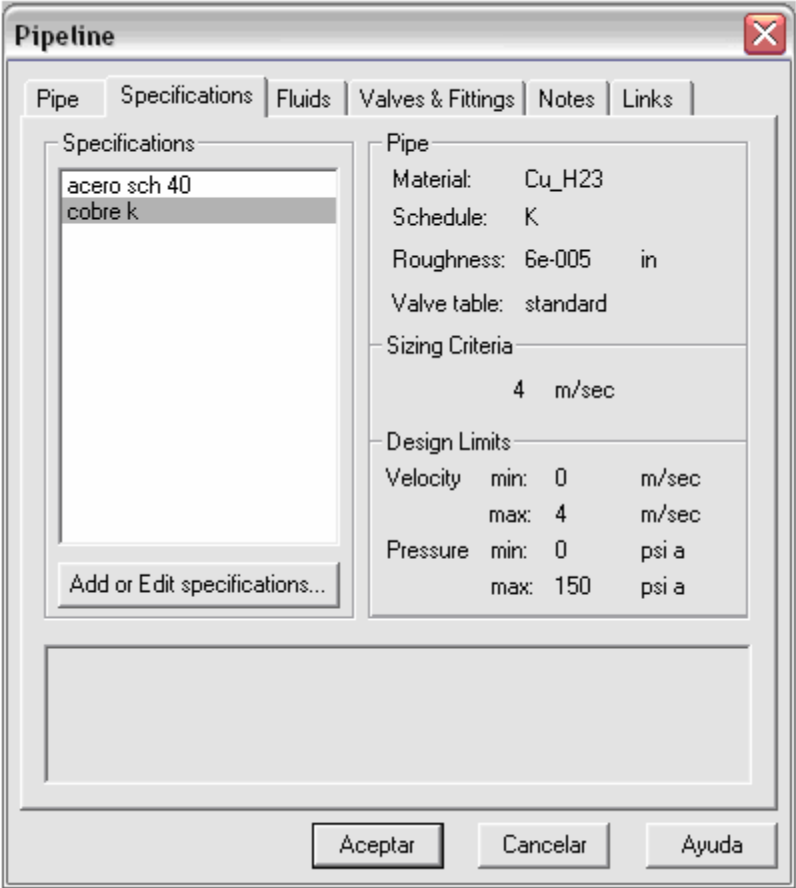
El entorno del Flow & Fluids es lo suficientemente flexible para registrar hasta 25 tuberías que permiten simular el sistema de la manera más sencilla incluyendo datos correspondientes a accesorios, temperaturas, materiales, tanques, fluidos, bombas y otros datos que permiten obtener de la manera mas real características del montaje deseado, además de que muestra curvas y deja seleccionar las unidades en que se quiere trabajar.

A continuación se muestra la forma del entorno que presenta Flow & Fluids.



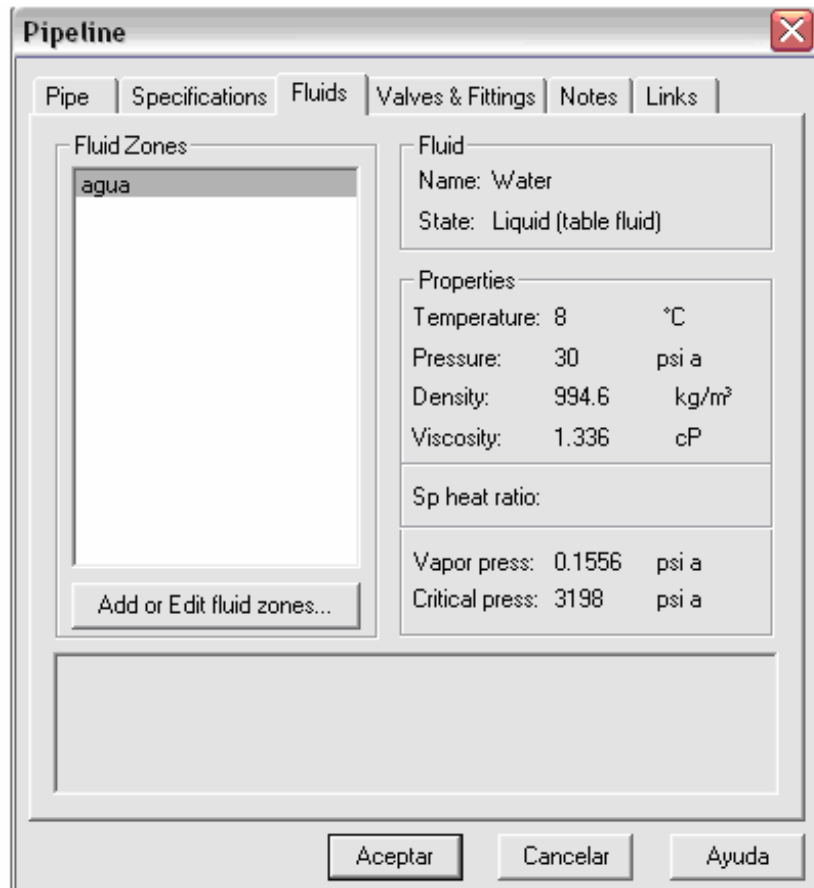
**Figura 73: Entorno De Flow & Fluids**

Para diseñar el sistema en cuestión es vital ingresar unos datos básicos como lo son las unidades de trabajo, después es necesario ingresar información sobre los materiales que se utilizan en el sistema, en este caso se especifican dos materiales que son los usados en la nodriza VI acero SCH 40 y cobre rígido tipo K, el paso siguiente a esto es determinar el fluido y las características del mismo, como lo son temperatura, viscosidad, presión entre otros que el software se encarga de preguntar.



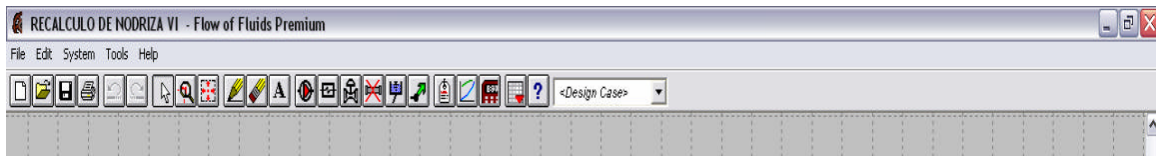
**Figura 74: Especificaciones Para Los Materiales Utilizados En El Sistema**





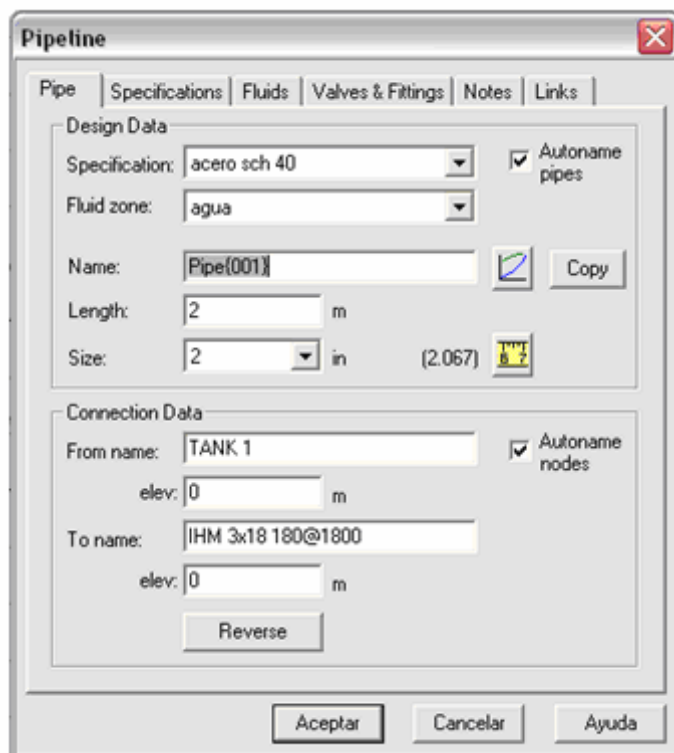
**Figura 75: Especificaciones Del Fluido De Trabajo (Agua)**

Posteriormente al registro de datos generales se procede a ingresar las tuberías y accesorios correspondientes para construir el diseño, esto se realiza utilizando las opciones que tiene el software en la barra de herramientas.



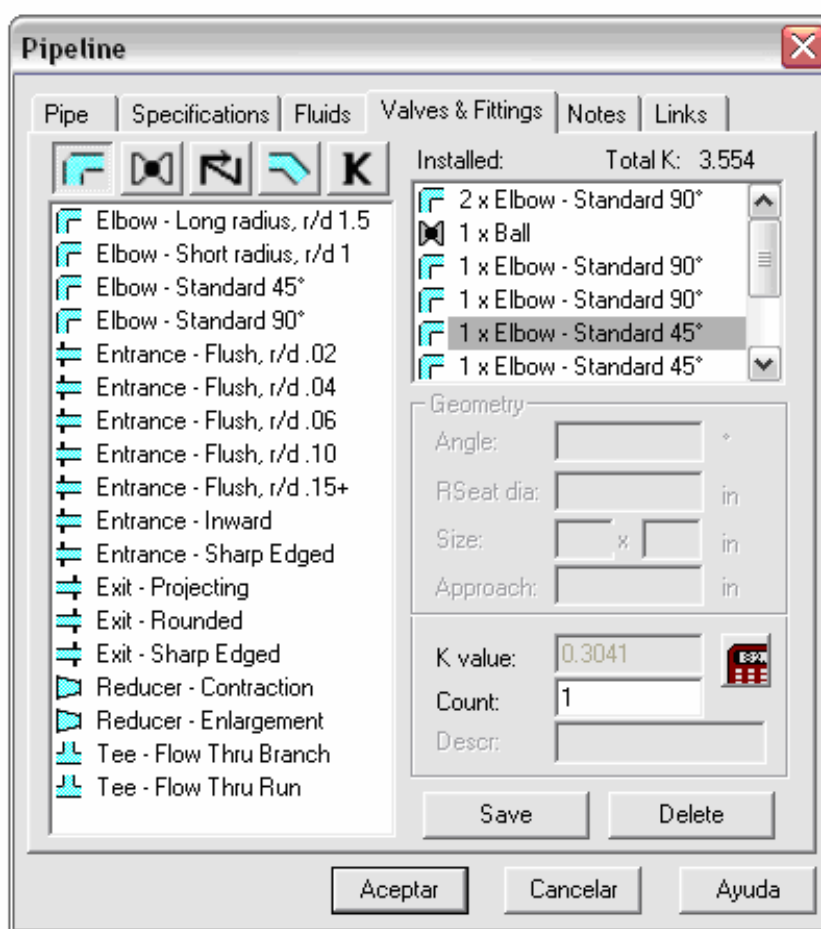
**Figura 76: Vista De La Barra De Herramientas De Flow & Fluids**

- 1) Se selecciona inicialmente un tanque a elevación cero y presión cero, esto debido a que como se sabe el sistema es un circuito cerrado en el que las pérdidas por altura pueden considerarse cero y despreciarse, de esta manera se inicia el recorrido del sistema.
- 2) Para continuar el sistema se requiere dibujar la tubería que une el tanque con la bomba, esto se realiza con la opción de tubería que permite describirla mediante sus características como lo son longitud, material (antes registrado), diámetro, confirmar el fluido y por ultimo ingresar el tipo y número de accesorios que presenta el tramo. Esto se registra en una ventana como se observa a continuación.



**Figura 77: Ventana Para El Ingreso De Datos Para Las Líneas De Tubería**

- 3) El paso siguiente es registrar los datos referentes a accesorios, con sus respectivas características, lo que ayudará a obtener más veracidad a la hora de simular el sistema, puesto que ingresando estos valores se obtendrán los valores de  $K$  o coeficientes de pérdida para cada accesorio. Esto se realiza en una ventana igual a la que se observa en la parte inferior.



**Figura 78: Ventana Para El Ingreso De Válvulas Y Accesorios Del Sistema**

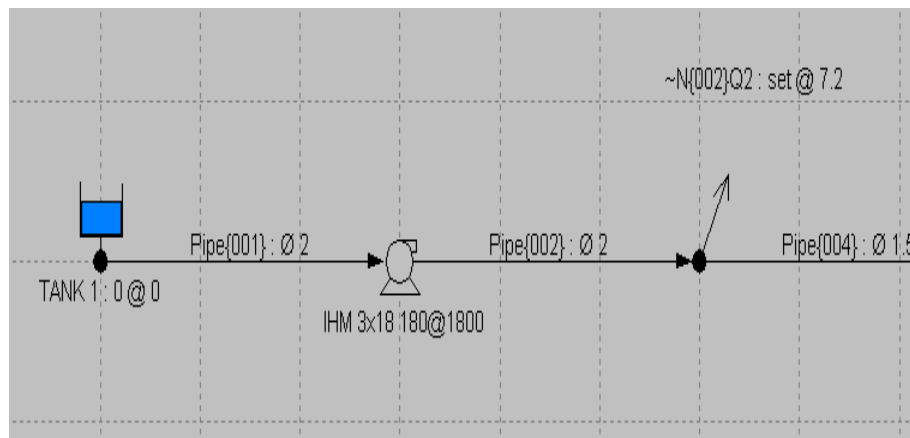
4) Después de realizar estos tres primeros pasos se prosigue a colocar la bomba del sistema con sus respectivas características, en este caso las de la bomba IHM modelo 3x18 de diámetro 180 mm y 1800 RPM.

En este paso se registran los valores correspondientes a Q y H para saber el comportamiento de la curva de esta bomba, así:

Flow Rate (m³/hr)	Head (m)
0	15.8
5	15.25
10	14.8
15	13.8
25	9.2

**Figura 79: Ventana En Donde Se Registran Los Datos Característicos De La Bomba**

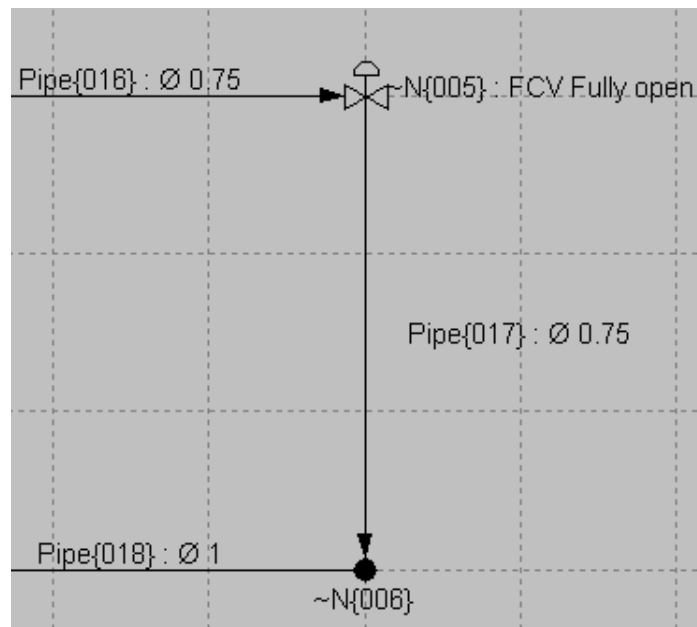
- 5) Luego se incluye la otra parte de la tubería correspondiente al tramo que va antes de llegar a la primera bifurcación del sistema, es decir donde el flujo sufre el primer cambio, esto se realiza siguiendo los mismos pasos indicados en el punto dos.
- 6) A continuación se debe colocar una salida de flujo que correspondiente al caudal que se va por esa primera bifurcación, en esta parte del diseño se debe ingresar el dato calculado mediante ecuaciones de nodos y obtenido durante la primera parte del análisis.



**Figura 80: Forma En Que Se Visualizan Las Bifurcaciones Del Sistema**

- 7) A partir del punto 6 el montaje del sistema en el software se vuelve repetitivo, es decir que se deben realizar los pasos 5 y 6 una y otra vez hasta incluir todos los tramos del sistema correspondientes a la línea de salida o suministro.

- 8) Al finalizar esta línea debe colocarse una válvula reguladora de caudal en estado “completamente abierta” para de esta manera iniciar la parte del circuito hidráulico correspondiente a la línea de entrada o retorno.



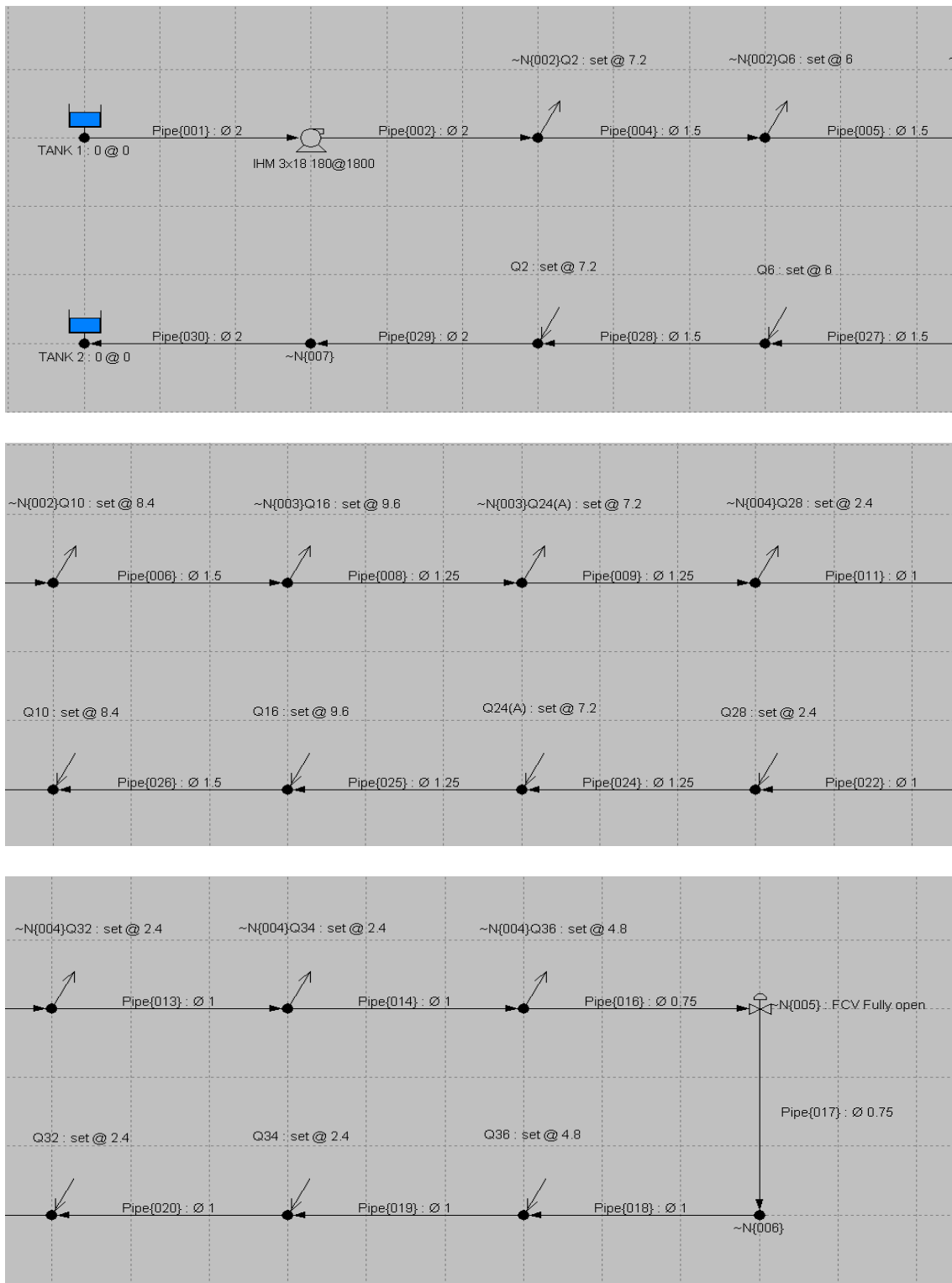
**Figura 81: Válvula Reguladora De Caudal En Estado Completamente Abierta**

- 9) La construcción de la línea de entrada o retorno se realiza de la misma forma que se realiza la de salida o suministro solo con la diferencia de que las demandas de caudal que se colocan en el paso 6 no se colocan saliendo del sistema sino entrando.
- 10) Por ultimo en la parte donde esta la bomba en la línea de salida se coloca un nodo que se comuniquen finalmente con un tanque que se encuentre en las mismas condiciones del tanque que se colocó en el inicio, indicando de alguna manera que

el circuito es cerrado, esto se realiza de esta manera ya que el software no permite registrar sistemas cerrados.

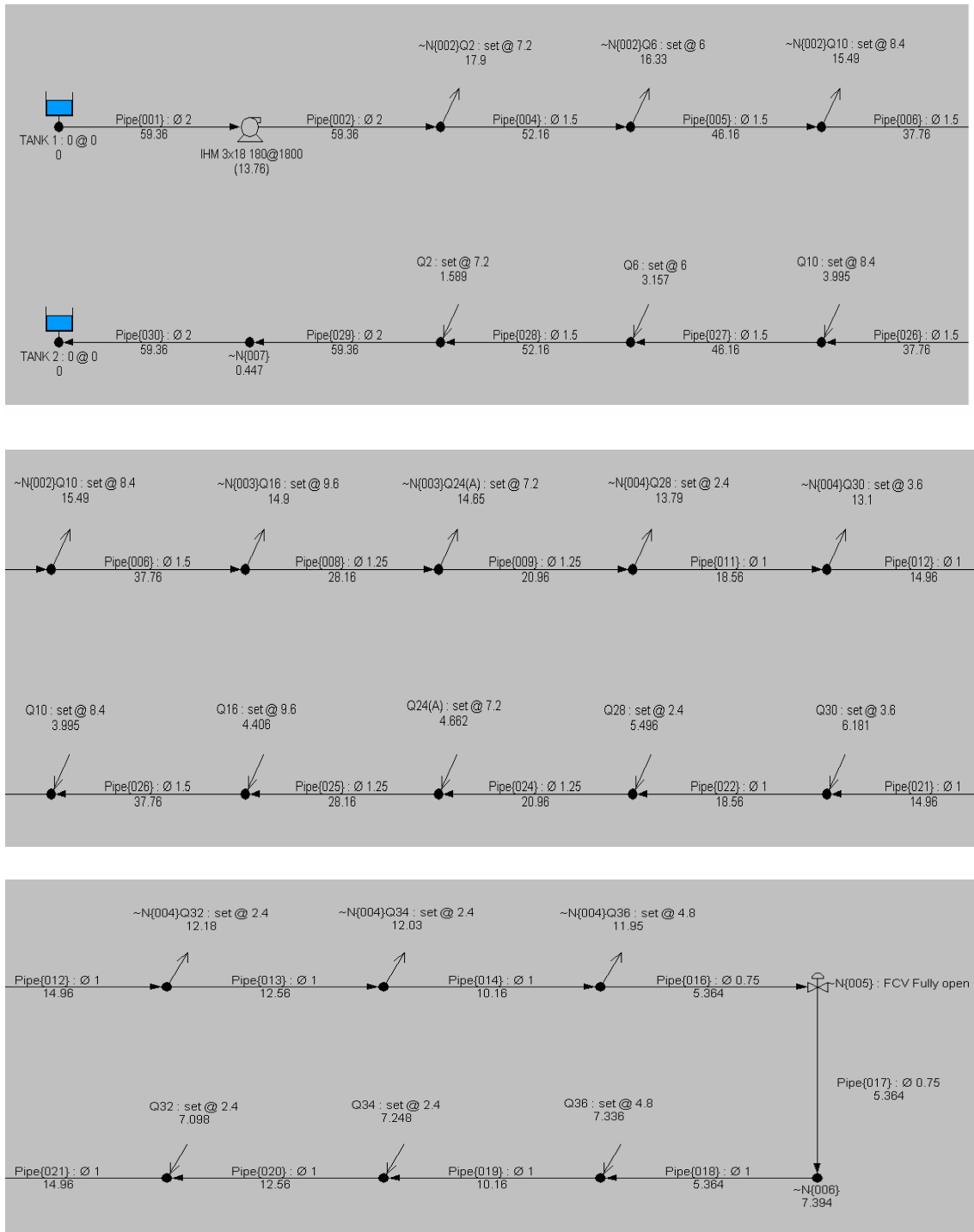
Cabe aclarar que por cuestiones de calculo y para manejar un porcentaje de seguridad con el diseño se excedieron en el número de accesorios y algunos metros de tubería para uno que otro ramal, que a la final se verán reflejadas en el sistema real como pérdidas que se producen por años de uso, o por alteraciones en el funcionamiento del sistema que no están exentos de suceder.

Después de realizar todos estos pasos e ingresar los datos reales del sistema se obtiene el sistema montado y listo para simularlo y obtener los resultados correspondientes tal como se muestra en las siguientes figuras:



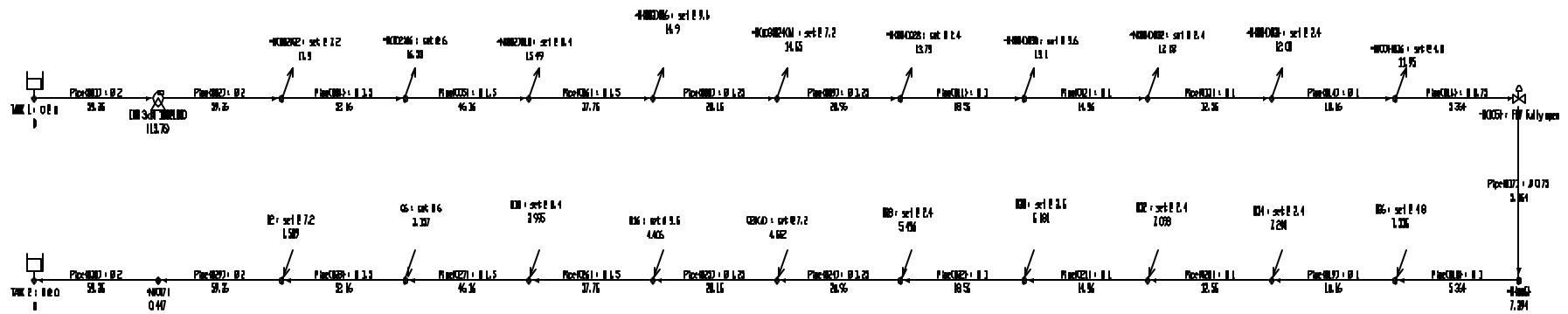
**Figura 82: Vista Del Sistema Completo Listo Para Correrse Y Obtener Los Datos**





**Figura 83: Sistema Corriendo Y Arrojaando Los Valores De Caudal Que Se Requieren**

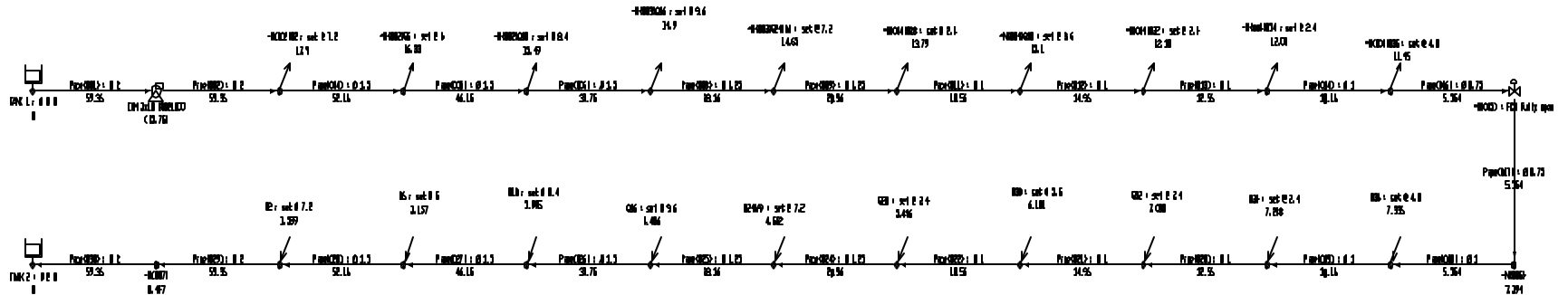
Modelo del sistema Nodriza VI:



System:	RECALCULO DE NODRIZA VI	Flow of Fluids Premium 7.1	10/11/06 12:02 pm
Lineup:	<Design Case>	Pipes:	US gpm
Company:	COTEDMAR	Nodes:	psi ft
Project:	nodriza VI	Pumps:	n
by:		Components:	psi
		Controls:	psi
		Levels:	n

Figura 84: Modelo Completo Nodriza VI Con Todas Las Especificaciones Reales Del Sistema Para Simular

Imagen del modelo corriendo:



System	RECALCULO DE NODRIZA VI	Flow of Fluids Premium 7.1	10/11/06 12:04 pm
Lineup:	<Design Case>	Pipes:	US gpm
Company:	DETECHAR	Nodes:	psi a
Project:	nodriza VI	Pumps:	m
by:		Components:	psi
		Controls:	psi
		Level:	m

Figura 85: Modelo De La Nodriza VI Completo Y Corriendo, Arrojan Los Datos De Caudal Respectivos

El software registra los resultados de la simulación de manera tal que se puedan almacenar en hojas de cálculos o tablas, estos son los datos arrojados por el programa con respecto al recalcu de la Nodriza VI, almacenados en las tablas correspondientes:

<b>Flow of Fluids Premium</b>				
ver 7.1		10/11/200611:34		
<b>System:</b>	<b>RECALCULO DE NODRIZA VI</b>			
<b>Lineup:</b>	<Design Case>			
<b>Compañía:</b>	COTECMAR			
<b>Project:</b>	nodriza VI			
<b>by:</b>	K. León			
<b>Footer:</b>				
<b>UNITS:</b>				
<b>Flow Rate:</b>	US gpm			
<b>Pressure:</b>	psi a	Atm:	14.7	psi a
<b>Temperature:</b>	°C			
<b>Viscosity:</b>	cP			
<b>Density:</b>	kg/m <sup>3</sup>			
<b>Grade:</b>	m			
<b>Length:</b>	m			
<b>Size:</b>	in			

<b>CALCULATION:</b>
<b>Iteration: 6</b>
<b>Deviation percent: 0.001401</b>

**Tabla 24: Registro De Datos Y Unidades Básicas Para Trabajar En El Software**

Pipe List	Specification	Fluid Zone	Size	Length	K	Status	Flow	Velocity	dP
Pipe{001}	acero sch 40	agua	2	2	1.085		59.36	1.731	0.422
Pipe{002}	acero sch 40	agua	2	4	3.554		59.36	1.731	1.142
Pipe{004}	cobre k	agua	1.5	1.5	1.732		52.16	2.964	1.568
Pipe{005}	cobre k	agua	1.5	2.5	0.4124		46.16	2.623	0.838
Pipe{006}	cobre k	agua	1.5	2	0.706		37.76	2.145	0.588
Pipe{008}	cobre k	agua	1.25	0.4	0.4308		28.16	2.264	0.255
Pipe{009}	cobre k	agua	1.25	2.8	2.252		20.96	1.685	0.859
Pipe{011}	cobre k	agua	1	0.65	1.187		18.56	2.337	0.685
Pipe{012}	cobre k	agua	1	3.5	0.4566		14.96	1.883	0.918
Pipe{013}	cobre k	agua	1	0.4	0.4566		12.56	1.581	0.149
Pipe{014}	cobre k	agua	1	0.3	0.4566		10.16	1.279	0.088
Pipe{016}	cobre k	agua	0.75	10	8.212		5.364	1.204	2.351
Pipe{017}	cobre k	agua	0.75	9.5	7.499		5.364	1.204	2.202
Pipe{018}	cobre k	agua	1	0.4	1.293		5.364	0.675	0.058
Pipe{019}	cobre k	agua	1	0.3	0.4566		10.16	1.279	0.088
Pipe{020}	cobre k	agua	1	0.4	0.4566		12.56	1.581	0.149

Pipe List	Specification	Fluid Zone	Size	Length	K	Status	Flow	Velocity	dP
Pipe{021}	cobre k	agua	1	3.5	0.4566		14.96	1.883	0.918
Pipe{022}	cobre k	agua	1	0.65	1.187		18.56	2.337	0.685
Pipe{024}	cobre k	agua	1.25	2.8	2.129		20.96	1.685	0.834
Pipe{025}	cobre k	agua	1.25	0.4	0.4308		28.16	2.264	0.255
Pipe{026}	cobre k	agua	1.5	2	0.1723		37.76	2.145	0.411
Pipe{027}	cobre k	agua	1.5	2.5	0.4124		46.16	2.623	0.838
Pipe{028}	cobre k	agua	1.5	1.5	1.732		52.16	2.964	1.568
Pipe{029}	acero sch 40	agua	2	4	3.554		59.36	1.731	1.142
Pipe{030}	acero sch 40	agua	2	2	1.199		59.36	1.731	0.447

**Tabla 25: Registro De Datos Y Especificaciones Que Describen Las Tuberías Del Sistema**

Pipe List	HL	Tagged	From	To	Inside Dia	Pipe HL	Minor HL
Pipe{001}	0.298	N	TANK 1	IHM 3x18 180@1800	2.067	0.132	0.166
Pipe{002}	0.808	N	IHM 3x18 180@1800	~N{002}Q2	2.067	0.266	0.542
Pipe{004}	1.109	N	~N{002}Q2	~N{002}Q6	1.481	0.335	0.774
Pipe{005}	0.593	N	~N{002}Q6	~N{002}Q10	1.481	0.449	0.144
Pipe{006}	0.416	N	~N{002}Q10	~N{003}Q16	1.481	0.251	0.165
Pipe{008}	0.181	N	~N{003}Q16	~N{003}Q24(A)	1.245	0.069	0.112
Pipe{009}	0.608	N	~N{003}Q24(A)	~N{004}Q28	1.245	0.282	0.326
Pipe{011}	0.484	N	~N{004}Q28	~N{004}Q30	0.995	0.154	0.330
Pipe{012}	0.649	N	~N{004}Q30	~N{004}Q32	0.995	0.567	0.082
Pipe{013}	0.106	N	~N{004}Q32	~N{004}Q34	0.995	0.048	0.058
Pipe{014}	0.063	N	~N{004}Q34	~N{004}Q36	0.995	0.025	0.038
Pipe{016}	1.663	N	~N{004}Q36	~N{005}	0.745	1.057	0.606
Pipe{017}	1.557	N	~N{005}	~N{006}	0.745	1.004	0.553
Pipe{018}	0.041	N	~N{006}	Q36	0.995	0.011	0.030
Pipe{019}	0.063	N	Q36	Q34	0.995	0.025	0.038



Pipe List	HL	Tagged	From	To	Inside Dia	Pipe HL	Minor HL
Pipe{020}	0.106	N	Q34	Q32	0.995	0.048	0.058
Pipe{021}	0.649	N	Q32	Q30	0.995	0.567	0.082
Pipe{022}	0.484	N	Q30	Q28	0.995	0.154	0.330
Pipe{024}	0.590	N	Q28	Q24(A)	1.245	0.282	0.308
Pipe{025}	0.181	N	Q24(A)	Q16	1.245	0.069	0.112
Pipe{026}	0.291	N	Q16	Q10	1.481	0.251	0.040
Pipe{027}	0.593	N	Q10	Q6	1.481	0.449	0.144
Pipe{028}	1.109	N	Q6	Q2	1.481	0.335	0.774
Pipe{029}	0.808	N	Q2	~N{007}	2.067	0.266	0.542
Pipe{030}	0.316	N	~N{007}	TANK 2	2.067	0.133	0.183

**Tabla 26: Datos Y Especificaciones De Las Tuberías Del Sistema Con Respecto A Las HL**

Pipe List	Re	ffp
Pipe{001}	67672	0.02285
Pipe{002}	67672	0.02285
Pipe{004}	82993	0.01879
Pipe{005}	73447	0.01927
Pipe{006}	60082	0.0201
Pipe{008}	53303	0.02066
Pipe{009}	39676	0.02205
Pipe{011}	43961	0.0216
Pipe{012}	35436	0.02267
Pipe{013}	29752	0.0236
Pipe{014}	24069	0.02481
Pipe{016}	16964	0.02709
Pipe{017}	16964	0.02709
Pipe{018}	12702	0.02914
Pipe{019}	24069	0.02481
Pipe{020}	29752	0.0236
Pipe{021}	35436	0.02267
Pipe{022}	43961	0.0216
Pipe{024}	39676	0.02205
Pipe{025}	53303	0.02066
Pipe{026}	60082	0.0201
Pipe{027}	73447	0.01927
Pipe{028}	82993	0.01879
Pipe{029}	67672	0.02285
Pipe{030}	67672	0.02285

**Tabla 27: Valores De Reynolds Para Las Diferentes Tuberías Del Sistema**

<b>Valves/Fittings</b>	
<b>Pipe{001}</b>	
1 x Reducer - Enlargement (1.5 x 2 - 0)	0.4203
2 x Elbow - Standard 45°	0.3041
1 x Ball	0.05702
<b>Pipe{002}</b>	
2 x Elbow - Standard 90°	0.5702
1 x Ball	0.05702
2 x Elbow - Standard 90°	1.1404
1 x Elbow - Standard 45°	0.3041
1 x Elbow - Standard 45°	0.3041
1 x Elbow - Standard 45°	0.3041
1 x Elbow - Standard 45°	0.3041
<b>Pipe{004}</b>	
4 x Elbow - Standard 45°	0.3299
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4124
<b>Pipe{005}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4124
<b>Pipe{006}</b>	
1 x Reducer - Contraction (1.5 x 1.25 - 0)	0.2937
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4124
<b>Pipe{008}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4308

<b>Pipe{009}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4308
4 x Elbow - Standard 45°	0.3447
1 x Reducer - Contraction (1.25 x 1 - 0)	0.4428
<b>Pipe{011}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4566
2 x Elbow - Standard 45°	0.3653
<b>Pipe{012}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4566
<b>Pipe{013}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4566
<b>Pipe{014}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4566
<b>Pipe{016}</b>	
8 x Elbow - Standard 90°	0.74
4 x Elbow - Standard 45°	0.3947
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4933
1 x Reducer - Contraction (1 x 0.75 - 0)	0.2197
<b>Pipe{017}</b>	
4 x Elbow - Standard 45°	0.3947
8 x Elbow - Standard 90°	0.74
<b>Pipe{018}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4566
1 x Reducer - Enlargement (3.4 x 1 - 0)	0.8361

<b>Pipe{019}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4566
<b>Pipe{020}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4566
<b>Pipe{021}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4566
<b>Pipe{022}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4566
2 x Elbow - Standard 45°	0.3653
<b>Pipe{024}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4308
1 x Reducer - Enlargement (1 x 1.25 - 0)	0.32
4 x Elbow - Standard 45°	0.3447
<b>Pipe{025}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4308
<b>Pipe{026}</b>	
1 x Reducer - Enlargement (1.25 x 1.5 - 0)	0.1723
<b>Pipe{027}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4124
<b>Pipe{028}</b>	
1 x Tee - Flow Thru Run	0.4124
4 x Elbow - Standard 45°	0.3299
<b>Pipe{029}</b>	
4 x Elbow - Standard 45°	0.3041

2 x Elbow - Standard 90°	0.5702
1 x Ball	0.05702
2 x Elbow - Standard 90°	0.5702
<b>Pipe{030}</b>	
1 x Reducer - Contraction (2 x 1.5 - 0)	0.5343
2 x Elbow - Standard 45°	0.3041
1 x Ball	0.05702

**Tabla 28: Valores Respectivos De K Para Cada Tipo De Accesorio**

Node List	Status	Pressure	Grade	Elev
~N{006}		7.394	-5.168	0
~N{007}		0.447	-10.08	0

Control List	Type	Set Value	Status	Flow	dP	HL	Inlet Pressure	Outlet Pressure	Elev
~N{005}	FCV	Fully open		5.364	0	0	9.595	9.595	0

Tank List	Surface Pressure	Level	Status	Flow	Pressure	Grade	Elev
TANK 1	0	0		59.36	0	-10.4	0
TANK 2	0	0		59.36	0	-10.4	0

**Tabla 29: Datos Arrojadados Para Los Tanques, Válvulas Y Algunos Nodos Del Sistema**

Demand List	Set Value	Flow	Pressure	Grade	Elev
~N{002}Q10	Flow Out	8.4	15.49	0.558	0
~N{002}Q2	Flow Out	7.2	17.9	2.26	0
~N{002}Q6	Flow Out	6	16.33	1.151	0
~N{003}Q16	Flow Out	9.6	14.9	0.142	0
~N{003}Q24(A)	Flow Out	7.2	14.65	-0.038	0
~N{004}Q28	Flow Out	2.4	13.79	-0.646	0
~N{004}Q30	Flow Out	3.6	13.1	-1.131	0
~N{004}Q32	Flow Out	2.4	12.18	-1.78	0
~N{004}Q34	Flow Out	2.4	12.03	-1.885	0
~N{004}Q36	Flow Out	4.8	11.95	-1.948	0
Q10	Flow In	8.4	3.995	-7.571	0
Q16	Flow In	9.6	4.406	-7.28	0
Q2	Flow In	7.2	1.589	-9.273	0
Q24(A)	Flow In	7.2	4.662	-7.1	0
Q28	Flow In	2.4	5.496	-6.51	0
Q30	Flow In	3.6	6.181	-6.026	0
Q32	Flow In	2.4	7.098	-5.376	0
Q34	Flow In	2.4	7.248	-5.271	0
Q36	Flow In	4.8	7.336	-5.208	0
Q6	Flow In	6	3.157	-8.164	0

**Tabla 30: Valores Registrados Para Las Demandas Del Sistema Indicando Sentido Del Flujo, Presiones, Flujo Y Elevación**



Pump List	Operation	Flow	Status	TDH	dP	NPSHa	Suction Pressure	Discharge Pressure	Suction Elev	Discharge Elev
IHM 3x18 180@1800	Curve	59.36		(13.76)	(19.46)	-0.408	-0.422	19.04	0	0

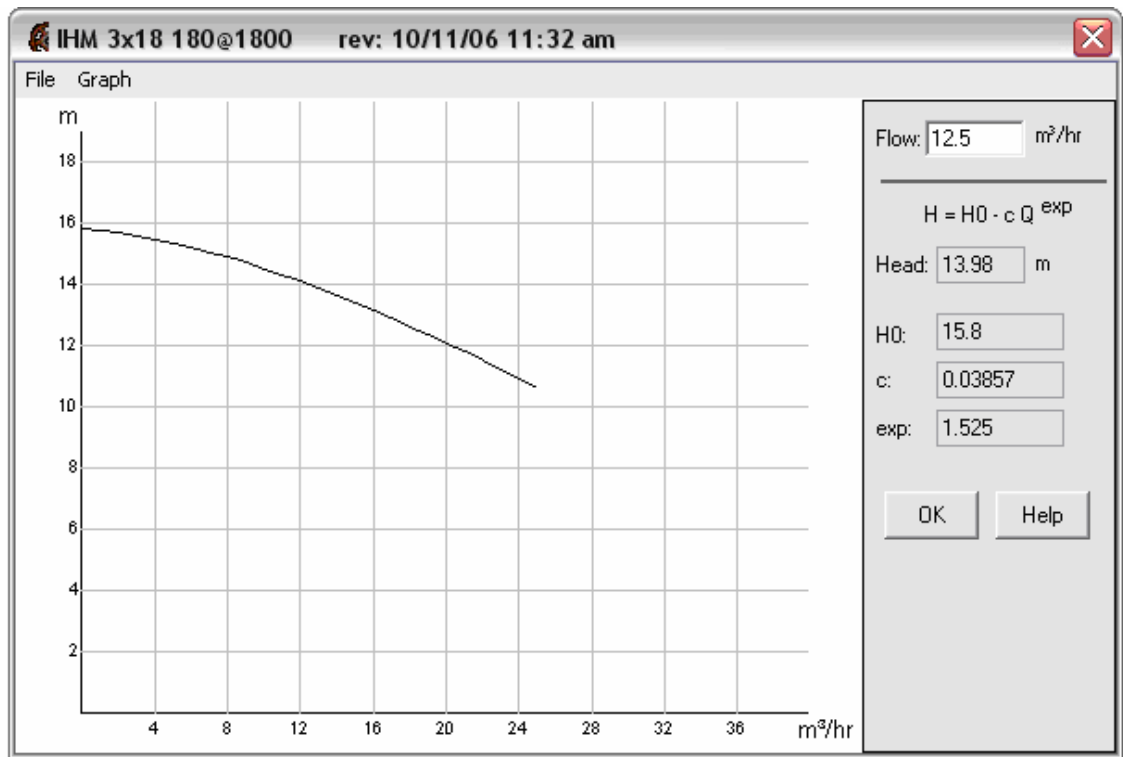
**Tabla 31: Datos Característicos De La Bomba IHM Modelo 3x18 Utilizada En El Sistema**

Pipe Specification	Material	Schedule	Roughness	Sizing	Vel Limits	Press Limits	Valve Table
cobre k	Cu_H23	K	6,00E-05	4 m/sec	0 to 4 m/sec	0 to 150 psi a	standard
acero sch 40	Steel	40	0.0018	4 m/sec	0 to 4 m/sec	0 to 150 psi a	standard

**Tabla 32: Especificaciones Y Características De Los Materiales Utilizados En Las Tuberías**

Fluid Zone	Fluid	Temperature	Pressure	Density	Viscosity	k	Pv	Pc
agua	Water	8	30	994.6	1.336	---	0.1556	3198

**Tabla 33: Especificaciones Y Características Del Fluido Del Sistema**



**Figura 86: Curva De La Bomba Según Datos Característicos Ingresados Al Software**

#### **5.4 Análisis De Las Pérdidas Totales Del Sistema Por Equipos**

Es importante dentro del estudio realizado determinar en donde se encuentran las mayores oportunidades de ahorro para el sistema, de esta manera se hace necesario establecer cual es el porcentaje de pérdidas debido a:

- ? **Longitud**
- ? **Accesorios**

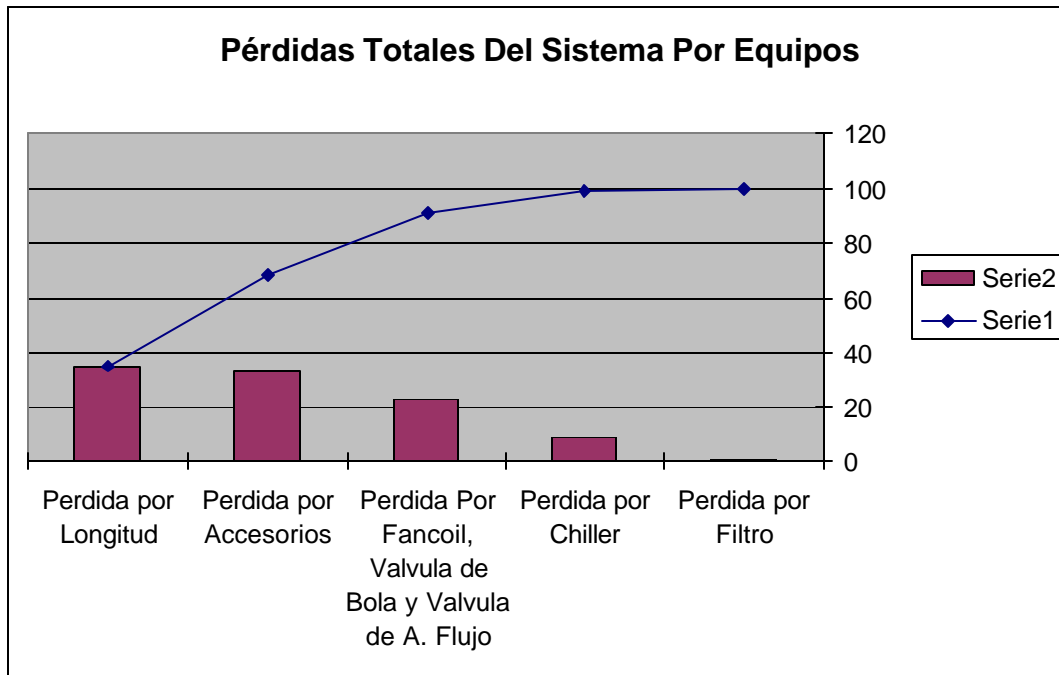
- ? **Fan coils (que incluye a su vez las válvulas de bola y válvulas de ajuste de flujo)**
- ? **Chiller**
- ? **Filtro**

Ya que son estos los puntos críticos de pérdida para el sistema, el análisis se hace de la siguiente manera:

<b>CAUSA</b>	<b>H(PÉRDIDA) en m</b>	<b>%</b>	<b>% ACUMULADO</b>
<b>Pérdidas por Longitud</b>	9	34,84738666	34,8473867
<b>Pérdidas por Accesorios</b>	8,68927273	33,61683904	68,4642257
<b>Pérdidas por Fan Coil, Válvula de Bola y Válvula de Ajuste de Flujo</b>	5,7388476	22,20230876	90,6665345
<b>Pérdida por Chiller</b>	2,19456	8,490258342	99,1567928
<b>Pérdida por Filtro</b>	0,217952	0,843207197	<b>100</b>
<b>TOTAL</b>	<b>26</b>	<b>100</b>	

**Tabla 34: Pérdidas Totales Del Sistema Por Equipos**

Después de tener todos los datos respectivos acerca de los porcentajes para los distintos equipos, se procede a elaborar el “Diagrama De Pareto De Pérdidas Del Sistema” que se observa en al Figura 87.



**Figura 87: Diagrama De Pareto De Pérdidas Del Sistema**

De donde se puede concluir mediante una lectura del gráfico cuales deben ser las causas del problema que pueden ser atacadas mediante un plan de mejora, ya que el 68,46% de las pérdidas totales del sistema son ocasionadas por las *pérdidas de longitud y accesorios* mientras que otro 22,20% corresponde a *pérdidas por fan coils* (con sus válvulas de bola y ajuste de flujo), indicando así que estos son los puntos claves a los que las medidas de

ahorro deben apuntar, para de esta manera garantizar resultados claros y con cambios positivos en el consumo de energía.

A partir de este hecho cabe recomendar la posibilidad de valorar la modificación del sistema de tuberías reduciendo pérdidas, esto incluye:

- ? *Cambio del material (rugosidad)*
- ? *Trazado de tubería*
- ? *Reducción de accesorios*

Por el lado de las pérdidas por fan coils se recomienda estudiar las ventajas del cambio de los mismos, por otros equipos que generen menores pérdidas dentro del sistema supliendo las necesidades térmicas de la embarcación y el confort de la tripulación.

## **5.5 Análisis De Consumo Dentro Del Sistema**

### **5.5.1 Consumo Del Equipo (Conjunto Bomba-Motor)**

Hoy por hoy todo procedimiento de análisis energético tiene validez dentro de su contexto, y la idea es que todo estudio de una u otra forma se vea reflejado en un ahorro posterior, finalmente es este el objetivo del estudio realizado para la Nodriza VI.

Conociendo las características del generador instalado en la embarcación podemos conocer cuanto consume la bomba de esa energía total suministrada al buque.

Haciendo un análisis energético en el sistema tenemos:

Un generador marca Caterpillar *C4.4 de 1800 rpm* y *76 eKw*, con un dato de desempeño al 100% de la capacidad de *5,81 gal/h*, y con una eficiencia del *94%*, de esta manera podemos determinar el consumo del equipo.

Haciendo el cálculo para el dato de potencia consumida o requerida para el conjunto motor-acoplamiento-bomba con los valores de eficiencia y potencia en la flecha obtenidos de la curva característica de la bomba proporcionada por el fabricante y la eficiencia del motor establecido por catalogo para el punto de operación, tenemos:

$$Potencia\ hidr\acute{a}ulica = \frac{Q * H * \rho * g}{1000W/kW}$$

Siendo  $Q$  = Flujo en el punto de operación en  $m^3/seg$ .

$H$  = Carga en el punto de operación en m.

$\rho$  = Densidad del agua ( $1000\text{ Kg}/m^3$ )

$g$  = Constante gravitacional ( $9,81m/seg^2$ )

Para el punto de operación del sistema tenemos:

$$Q = 43,15\text{gpm} = 0,002722342\text{ m}^3/\text{seg}$$

$$H = 15,13\text{ m}$$

De esta manera la potencia hidráulica sería:

$$Potencia\ hidráulica\ ? \frac{0,002722342\ m^3/seg * 15,13m * 1000\ Kg/m^3 * 9,81\ m/seg^2}{1000\ W/kW}$$

$$Potencia\ hidráulica\ ?\ 0,40406\ kW$$

Ahora, para el punto de operación del sistema, con la curva característica de la bomba se obtiene un dato de eficiencia del 62%, por tanto la potencia en la flecha será:

$$Potencia\ en\ la\ flecha\ (kW)\ ? \frac{Potencia\ hidráulica\ (kW)}{?_{BOMBA}}$$

Reemplazando por los valores correspondientes obtenemos:

$$Potencia\ en\ la\ flecha\ (kW)\ ?\ 0,40406/0,62\ ?\ 0,6517kW$$

Para calcular la potencia consumida tenemos que:

$$Potencia\ requerida\ (kW)\ ? \frac{Potencia\ hidráulica\ (kW)}{?_{MOTOR} * ?_{BOMBA} * ?_{ACOPLAMIENTO}}$$

Siendo ? el rendimiento total del bloque = ?<sub>MOTOR</sub> \* ?<sub>BOMBA</sub> \* ?<sub>ACOPLAMIENTO</sub>

$$\eta_{MOTOR} = 0,92$$

$$\eta_{BOMBA} = 0,62$$

$$\eta_{ACOPLAMIENTO} = 1 \text{ asumido para una transmisión directa Motor y Bomba}$$

Tenemos así que:

$$Potencia\ requerida(kW) = \frac{0,40406}{0,92 * 0,62 * 1} = 0,709kW$$

$$Potencia\ requerida(Hp) = 0,950785Hp$$

Teniendo en cuenta las características del generador descritas anteriormente se tiene para este valor de potencia que:

$$\text{para } 76 \text{ kW} = 5,81 \text{ gal/h}$$

$$\text{para } 0,709 \text{ kW} = x \text{ gal/h}$$

Por lo tanto para una potencia de 0,709 kW que demanda o requiere el conjunto bomba-motor se consumen:

$$0,05420 \text{ galones/hora}$$

Este consumo en pesos \$ tomando precios del ACPM del mes de enero del año 2007 para la ciudad de Cartagena correspondiente a \$ Diesel marino = \$ 4678,57 / gal

Muestran que: [25]

$$$/hora = 0,05420 \text{ gal/h} * \$4678,57 / \text{gal}$$

$$$/hora = 253,5840 \$/hora$$



Finalmente suponiendo que el sistema trabaja alrededor de 24 horas al día los 365 días del año el dato de consumo que se obtiene es de:

*474,792 galones/año*

Lo que corresponde a:

**2.221.395,84\$/año**

Por lo tanto para el sistema se obtiene que el consumo del conjunto bomba motor esta asociado a:

**Potencia:** 0,709 kW.

**Combustible:** 474,792 galones/año

**Pesos:** 2.221.395,84 \$/año

### **5.5.2 Consumo Estimado Para El Sistema Con Un Incremento De Eficiencia**

Vale la pena realizar un análisis comparativo del consumo de la bomba actual y de los ahorros que se podrían obtener con la selección de una nueva bomba que cumpla con las condiciones de operación de la bomba actual, es decir, gasto, carga, velocidad, etc. y que su eficiencia sea superior a la de la bomba actual, como punto de partida para un posterior estudio que determine la viabilidad de esta medida.

Es muy importante la selección de la bomba, pues en ese momento se buscará que sus características sean las adecuadas para que trabaje en los puntos cercanos a su máxima eficiencia.

Para este análisis se pretende que la nueva bomba trabaje con el gasto actual correspondiente a 43,15 gpm, que entregue la misma carga de 15,13 m y como ejemplo de evaluación que opere con una eficiencia estimada de 68%.

A partir de estas nuevas condiciones de operación se realizará el cálculo del consumo estimado, asumiendo las mismas características para el generador y siguiendo el mismo procedimiento que se desarrolló para el sistema actual, de esta manera se obtiene el siguiente análisis:

$$Potencia\ hidr\acute{a}ulica = \frac{Q * H * \rho * g}{1000W/kW}$$

Siendo  $Q$  = Flujo en el punto de operación en  $m^3/seg$ .

$H$  = Carga en el punto de operación en m.

$\rho$  = Densidad del agua ( $1000\text{ Kg}/m^3$ )

$g$  = Constante gravitacional ( $9,81m/seg^2$ )

Para el punto de operación del sistema tenemos:

$Q = 43,15\text{ gpm} = 0,002722342m^3/seg$

$H = 15,13\text{ m}$

De esta manera la potencia hidráulica sería:

$$Potencia\ hidráulica\ ? \frac{0,002722342\ m^3/seg * 15,13m * 1000\ Kg/m^3 * 9,81\ m/seg^2}{1000\ W/kW}$$

$$Potencia\ hidráulica\ ?\ 0,40406\ kW$$

Ahora, con la eficiencia estimada para la bomba del 68%, la potencia en la flecha será:

$$Potencia\ en\ la\ flecha\ (kW)\ ? \frac{Potencia\ hidráulica\ (kW)}{?_{BOMBA}}$$

Reemplazando por los valores correspondientes obtenemos:

$$Potencia\ en\ la\ flecha\ (kW)\ ?\ 0,40406/0,68\ ?\ 0,5942\ kW$$

Para calcular la potencia consumida tenemos que:

$$Potencia\ requerida\ (kW)\ ? \frac{Potencia\ hidráulica\ (kW)}{?_{MOTOR} * ?_{BOMBA} * ?_{ACOPLAMIENTO}}$$

Siendo ? el rendimiento total del bloque = ?<sub>MOTOR</sub> \* ?<sub>BOMBA</sub> \* ?<sub>ACOPLAMIENTO</sub>

$$\eta_{MOTOR} = 0,92$$

$$\eta_{BOMBA} = 0,68$$

$$\eta_{ACOPLAMIENTO} = 1 \text{ asumido para una transmisión directa Motor y Bomba}$$

Tenemos así que:

$$Potencia\ requerida(kW) = \frac{0,40406}{0,92 * 0,68 * 1} = 0,646kW$$

$$Potencia\ requerida(Hp) = 0,8663003 Hp$$

Teniendo en cuenta las características del generador descritas anteriormente se tiene para este valor de potencia que:

$$\text{para } 76 kW = 5,81 \text{ gal/h}$$

$$\text{para } 0,646 kW = x \text{ gal/h}$$

Por lo tanto para una potencia de 0,646 kW que demanda o requiere el conjunto bomba-motor se consumen:

$$0,049385 \text{ galones/hora}$$

Este consumo en pesos \$ tomando precios del ACPM del mes de enero del año 2007 para la ciudad de Cartagena correspondiente a \$ Diesel marino = \$ 4678,57 / gal

Muestran que: [25]

$$$/hora = 0,049385 \text{ gal/h} * \$4678,57 / \text{gal}$$

$$$/hora = 231,05 \$/hora$$

Finalmente suponiendo que el sistema trabaja alrededor de 24 horas al día, los 365 días del año, el dato de consumo que se obtiene es de:

432,613 galones/año

Lo que corresponde aun costo en pesos al año de:

2.024.010,203\$/año

Por lo tanto para el sistema se obtiene que el consumo del conjunto bomba motor esta asociado a:

**Potencia:** 0,646 kW.

**Combustible:** 432,613 galones/año

**Pesos:** 2.024.010,203 \$/año

Finalmente es posible determinar el ahorro por consumo en kW, en combustible y en pesos por año realizando la diferencia entre el consumo actual y el consumo estimado de la siguiente manera:

? Para consumo en kW se tiene:

*AhorroPorConsumo(kW) ? ConsumoActual(kW) ? ConsumoEstimado(kW)*

*AhorroPorConsumo(kW) ? 0,709(kW) ? 0,646(kW) ? 0,063(kW)*

? Para consumo en combustible se tiene:

*AhorroPorConsumo(g / año) ? ConsumoActual(g / año) ? ConsumoEstimado(g / año)*

*AhorroPorConsumo(g / año) ? 474,792(g / año) ? 432,613(g / año) ? 42,179(g / año)*

? Para consumo en pesos \$, se tiene:

*AhorroPorConsumo(\$ / año) ? ConsumoActual(\$ / año) ? ConsumoEstimado(\$ / año)*

*AhorroPorConsumo(\$ / año) ? 2.221.395,84(\$ / año) ? 2.024.010,203(\$ / año)*

*AhorroPorConsumo(\$ / año) ? 197385,637(\$ / año)*

Este análisis nos permite ilustrar que el estudio de esta medida queda abierto para obtener ahorros por consumo más significativos con la selección de bombas que tengan mayor eficiencia de la mostrada en el ejemplo anterior.

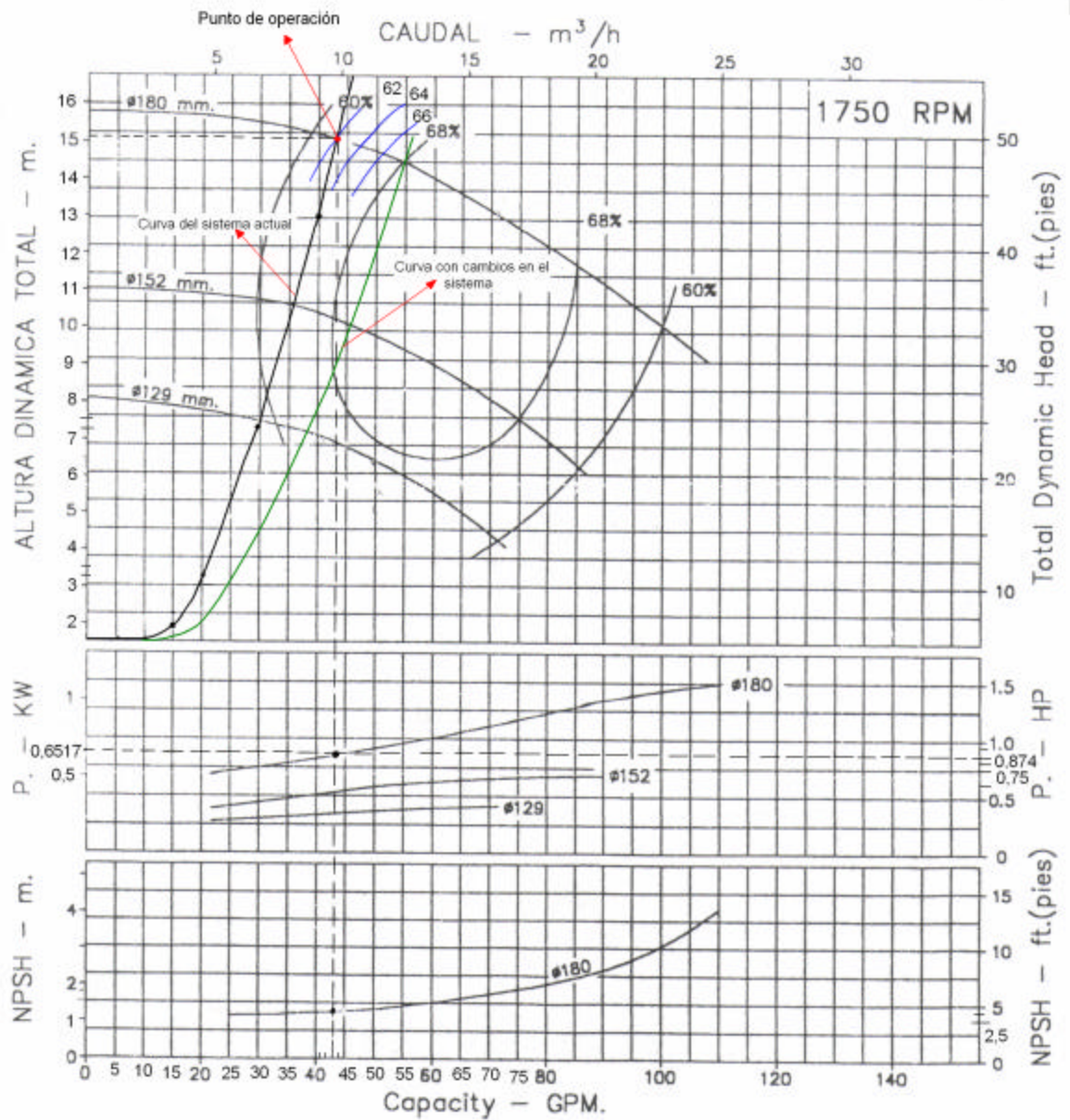
Finalmente analizando los resultados de manera global se hace evidente la importancia de implementar en el diseño de los buques y la construcción de los mismos medidas de ahorro que correspondan al buen uso de la energía que tienen a disposición para abastecer cada

uno de sus sistemas, ya que de ahorros puntuales en equipos críticos se puede llegar a una mejor administración de los recursos de manera global.

## **5.6 Estimación De Un Nuevo Trazado De Tuberías En Función De La Constante R**

Después de realizar y analizar los cálculos respectivos para el sistema de circulación de agua fría, se hace necesario estudiar de manera puntual la posibilidad de implementar mejoras en el trazado de tuberías incluyendo aspectos como, longitud, accesorios y fan coils para disminuir sustancialmente las pérdidas y de esta manera incrementar el rendimiento aprovechando al máximo la bomba con que se cuenta, en conjunto con un estudio térmico que permita verificar que se estén supliendo las necesidades de confort de la embarcación.

Después de realizar el análisis respectivo sobre el punto de operación obtenido anteriormente se puede establecer que una opción viable para disminuir las pérdidas es lograr llevar el sistema a otra condición de operación en donde se incremente la eficiencia y se logre un consumo optimo aprovechando la capacidad de la bomba de manera tal que se llegue a un valor de eficiencia estimada de aproximadamente 68%. Por lo tanto se tiene una nueva ecuación de pérdida de carga total, una curva y un punto de operación como se observa en la siguiente figura.



**Figura 88: Curva Del Sistema Actual Contra Curva Del Sistema Estimado**

Por lo tanto para el punto estimado sobre la curva “bomba-sistema” con una eficiencia del 68% se obtienen los siguientes parámetros de operación:



$$Q=55 \text{ gpm}= 0,003469961 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$H= 14,5 \text{ m}$$

Con estos dos valores se puede determinar el valor de  $R$  que corresponde a la constante de la ecuación de pérdidas de la forma  $H=RQ^2$  que abarca tramos rectos, accesorios y fan coils, de esta manera las ecuaciones para el sistema actual y el sistema con cambios quedan de la siguiente forma:

$$H_{\text{sistema actual}} = 2041477,46Q^2$$

$$H_{\text{sistema con cambios}} = RQ^2$$

Para el sistema con cambios el valor de  $R$  según la ecuación, se determinaría de la siguiente manera:

$$R = \frac{H_{\text{deseado}}}{Q_{\text{deseado}}^2} = \frac{14,5m}{(0,003469961 \text{ m}^3/\text{seg})^2} = 1204255,989 \text{ seg}^2/\text{m}^5$$

De donde la ecuación de pérdida de carga del sistema con cambios sería:

$$H_{\text{sistema con cambios}} = 1204255,989Q^2$$

Por lo tanto la diferencia de la constante del sistema actual y el sistema con cambios permite cuantificar el valor de  $R$  a disminuir en los puntos que generan mayores pérdidas, así:

$$R_{\text{Sistema actual}} \geq R_{\text{Sistema con cambios}} \geq R_{a \text{ disminuir}}$$

$$R_{a \text{ disminuir}} \geq 2041477,46 \geq 1204255,989 \geq 837221,47 \text{ seg}^2/\text{m}^5$$

Este valor nos sirve como un punto de partida para realizar posteriores variaciones en el diseño del trazado para el sistema ya que teniendo este valor como meta nos permitirá cuantificar cada una de las mejoras que se hagan para llegar al sistema ideal.

A partir de estos datos es posible determinar el porcentaje de disminución para el valor de  $R_{ADisminuir}$  analizando cada constante  $R$  para longitud, accesorios y equipos varios en el sistema actual:

$$\% R_{ADisminuir} \geq \frac{R_{ADisminuir}}{R_{\text{SistemaActual}}} * 100$$

Por tanto:

$$\% R_{ADisminuir} \geq \frac{837221,47 \text{ seg}^2/\text{m}^5}{2041477,46 \text{ seg}^2/\text{m}^5} * 100$$

$$\% R_{ADisminuir} \geq 41\%$$

Basados en este dato y en los valores obtenidos para los porcentajes de pérdidas según los diferentes equipos, se está en condiciones de jugar con estas variables de manera tal que se consigan los cambios esperados en el sistema y se obtengan las condiciones de operación deseada.

## 6 POSIBLES MEDIDAS PARA OPTIMIZAR EL SISTEMA

### 6.1 Principales Vías De Ahorro Para La Evaluación De Un Sistema De Este Tipo

Después de realizar los cálculos respectivos del sistema de circulación de agua fría montado en la Nodriza VI, se hace clave empezar a generar medidas de ahorro que permitan optimizar energéticamente el sistema, de esta manera se hace necesario establecer pautas claras sobre los aspectos más relevantes en sistemas de este tipo, lo que hace necesario remitirse a la bibliografía y analizar las medidas de ahorro más comunes en sistemas de bombeo para determinar cuales son las opciones más viables para el caso específico “*Nodriza Fluvial VI*”. Los siguientes puntos son los principales:

- *Sustitución de la bomba actual por una que trabaje con mayor eficiencia suministrando el mismo gasto.*
- *Sustitución del motor actual que impulsa a la bomba por uno de mayor eficiencia.*
- *Recorte del impulsor de la bomba.*
- *Variación de la velocidad de la bomba.*
- *Cambio de horario de operación de la bomba.*

### **6.1.1 Selección De Bombas**

A la hora de seleccionar las bombas que van conformar un sistema es fundamental tener presente que debido a que se tienen varias bombas entre las que elegir. La idea es hacer lo posible para seleccionar una bomba que opere con un rendimiento relativamente alto para las condiciones de funcionamiento dadas. Los fabricantes suministran información sobre el comportamiento de las bombas y es fundamental para el ingeniero conocerla y estudiar las posibilidades que hay en el mercado para diseñar un sistema completo con las mejores características y con base al uso eficiente de los recursos energéticos.

La tarea del ingeniero es seleccionar la bomba o las bombas que mejor se ajustan a las características del sistema. Los parámetros que se deben tener en cuenta incluyen la velocidad específica  $N_s$ , el tamaño  $D$  del impulsor y la velocidad de operación  $n$ . Otras posibilidades son el uso de bombas multietapas, bombas en serie, bombas en paralelo, etc. Incluso bajo ciertas condiciones, limitar el flujo en el sistema puede producir ahorros de energía considerables.

### **6.1.2 Ahorros Energéticos En Sistemas De Agua**

Desde un punto de vista energético, el ingeniero debería diseñar la distribución de tuberías por las pérdidas de carga mínimas de forma que el sistema de la bomba utilice la menor cantidad de energía. Por supuesto, los ahorros en costes energéticos deben ser mayores que los costes de construcción diferenciales de los tamaños mayores de tubos necesarios para asegurar la mínima pérdida de presión. [26]

Tradicionalmente los sistemas de refrigeración utilizaban gran cantidad de agua para su funcionamiento. Actualmente, los nuevos sistemas son fabricados con tecnología que permite reutilizar el agua y al ser circuitos cerrados evitan pérdidas por evaporación, fugas, etc. que se producían en los tradicionales sistemas abiertos. La reducción en el consumo de agua se estima en un 80%. Es posible:

- *Modernizar los sistemas de climatización, de manera que sean de circuito cerrado.*
- *Ajustar con precisión la temperatura deseada más adecuada, ya que cada grado centígrado supone importantes ahorros de agua y, por supuesto, de energía.*

Son dos recomendaciones especiales que se hacen a la hora de proponer y ejecutar acciones de ahorro en estos sistemas.

Además para hacer máximo el rendimiento de transferencia térmica de los equipos y para minimizar la corrosión y el ensuciamiento del sistema de distribución y de sus componentes, el ingeniero propondría el más efectivo sistema de agua que el presupuesto del proyecto permita.

### **6.1.3 Bombas Con Control De Velocidad**

Probablemente ningún sistema necesita siempre exactamente el mismo caudal y la misma presión, sea agua caliente que circula en un sistema de calefacción, agua del grifo, agua fría

para el sistema de refrigeración o eliminación de aguas residuales, las necesidades varían según la hora y época del año.

Por eso hoy en día se han desarrollado bombas que ajustan automáticamente el caudal a las condiciones predominantes del sistema. La regulación electrónica de la velocidad de la bomba garantiza que esté siempre funcionando según las condiciones de operación establecidas. Esto reduce significativamente el consumo de energía y garantiza unas condiciones de funcionamiento mejores de otros componentes, por ejemplo de válvulas dinámicas entre otros.

Los sistemas de bombeo con variadores de frecuencia y controladores digitales suelen ser más eficientes energéticamente en el caso de instalaciones de gran ocupación. Aunque representan una considerable inversión inicial, su adquisición debe tomar en cuenta su impacto en el ahorro y consumo de energía, así como también en los costos de funcionamiento y mantenimiento en su ciclo de vida.

### ? *¿Qué Es La Velocidad Variable?*

Como su nombre lo indica, es un sistema en el cual el motor eléctrico de la bomba varía su velocidad o revoluciones por minuto a través de un control electrónico en busca de acabar con una forma ineficiente de operación.

El sistema electromecánico de una bomba había sido muy difícil de controlar de manera práctica y económica, pero hoy gracias a los avances en la electrónica de potencia y al uso de microprocesadores, se han creado sistemas que controlan la velocidad de la bomba más específicamente a través de circuitos electrónicos con microcontroladores, un variador de frecuencia y un sensor de presión del agua, y la programación necesaria para mantener la presión de salida constante sin importar el número de llaves o servicios que se utilicen.

Sin importar la complejidad técnica que hay detrás de este concepto es clave saber que el sistema se regula sólo y que garantiza agua de calidad con un flujo de agua a presión constante siempre ya sea para bañarse, lavar, filtrar agua para potabilizarla y hasta disfrutar de comodidades como la refrigeración entre otros, que muchas veces no adquirimos porque sabemos que una baja presión no permite su funcionamiento.

#### **6.1.4 Selección De Válvulas**

Con el uso de válvulas de paso completo, es decir aquellas que no oponen resistencia al paso del flujo, podemos optimizar la operación de las bombas en la descarga de las mismas. Este tipo de instalaciones presentan ahorros considerables en el consumo de energía y pueden sustituir al uso tradicional de instalación de válvulas check-compuerta-mariposa.

La selección adecuada de válvulas provoca menores esfuerzos de operación al equipo de bombeo, como tal no debemos descuidar la importancia que tiene dicha selección. [12]



### **6.1.5 Reducción De Costos Reales [27]**

En el montaje de un sistema no se debe considerar únicamente el precio de compra de la bomba, este no es el mejor enfoque para determinar los costos totales del equipo. La partida más relevante de los costos de la bomba es su consumo de energía durante el funcionamiento.

De los costos totales, el precio de compra es típicamente de aproximadamente el 5-8% y el mantenimiento del 2-5% mientras el 90% restante corresponde al consumo de energía y es aquí donde se deben enfocar las mejoras energéticas del sistema. [27]

Es clave tener en cuenta que todos los nuevos productos y sistemas deben ahorrar energía comparados con los productos y montajes anteriores y en relación con lo que es típico dentro del mercado. Por supuesto, esto es económicamente ventajoso, de hecho, es muchas veces más rentable sustituir una bomba vieja por una nueva, incluso si la vieja no está defectuosa.

### **6.1.6 Soluciones Integrales De Ahorro [28]**

El crecimiento del sector industrial junto a las nuevas exigencias impuestas por el mundo globalizado, ha exigido a la industria en general llegar a niveles de eficiencia y modernización tan altos que puedan competir con las industrias más grandes del mundo.

Las industrias deben contar con equipos y sistemas más confiables, más eficientes y más seguros, y al mismo tiempo cuidando el medio ambiente.

Por lo tanto, la industria ha sido más selectiva con sus proveedores y con las nuevas tecnologías que implementan, buscando constantemente quienes puedan cumplir todos los requisitos. Por lo que hoy por hoy se requieren de empresas que ofrezcan la respuesta a todas las soluciones de bombeo y transmisión de potencia con productos de alta confiabilidad, larga duración y alta eficiencia que suplan las necesidades de los múltiples sistemas que se requieren en la industria en general y que acompañados de la implementación de medidas de ahorro de energía conformen sistemas de la mejor calidad y con el más óptimo funcionamiento. [29]

#### **6.1.7 Diseño Para Instalaciones Energéticamente Eficientes**

#### **6.1.8 Ahorros Posibles En Un Sistema De Aire Acondicionado**

Las bases mecánicas comprenden el conjunto de instalaciones, obras, equipos y/o ductería que se incorpora a la instalación para el traslado de fluidos, etc., para mantener por medios mecánicos las condiciones ambientales y la renovación del aire (aire acondicionado y ventilación forzada) y otros requerimientos dinámicos del montaje (motores). El uso adecuado de estas instalaciones debe tomar en cuenta los horarios de uso, las características de las actividades y el número de usuarios.

Se debe adaptar el diseño, la ubicación y la selección de los equipos a las necesidades de uso de la instalación bajo una óptica de funcionalidad y eficiencia energética. Esto es importante pues en muchos casos las nuevas construcciones se diseñan suponiendo un nivel

de ocupación notablemente superior o inferior al uso real, lo que demarca condiciones distintas a las establecidas durante el diseño, lo que a futuro se reflejará en un funcionamiento poco óptimo.

La automatización permite establecer programas de funcionamiento de acuerdo a las necesidades de uso y evita los picos de demanda, lo cual ocurre cuando varios equipos arrancan al mismo tiempo. También controla el uso durante los períodos de baja demanda (horas nocturnas, fines de semana y días de descanso).

Existen modelos de sistemas basados en sistemas eficientes energéticamente, tales como los de velocidad variable mencionados anteriormente y controles mediante tiristores (scr) que son dispositivos semiconductores de potencia., u otras tecnologías adecuadas a los requerimientos de uso. La inversión inicial puede ser bastante significativa para estas tecnologías pero puede ser justificada con el impacto que genera durante su ciclo de vida con los ahorros que produce.

Las nuevas tecnologías no sólo reducen los picos de demanda eléctrica y los costos económicos anuales de electricidad, sino que influyen en la reducción del tamaño del sistema de aire acondicionado y en la disminución en la emisión de gases al ambiente, este último uno de los puntos más importantes en la actualidad en cuanto a ahorro de energía y a cuidados con el medio ambiente se refiere.

Los requerimientos de cargas de enfriamiento determinan la potencia del equipo, y tamaño de ventiladores, *bombas*, ductos y del resto de las instalaciones, por lo cual se disminuyen

los costos iniciales de inversión, además de disminuir los costos por uso y mantenimiento del sistema de aire acondicionado.

Es aconsejable realizar un estudio técnico y económico de las diferentes ofertas del mercado en sistemas de aire acondicionados, que incluya: costo inicial, costo de uso y mantenimiento, potencia, consumo eléctrico, impacto ambiental, etiquetado de eficiencia, garantías, uso de fluidos contaminantes, etc.

Otros aspectos a considerar acerca de la instalación para lograr su óptimo rendimiento son: condiciones generales de la acometida eléctrica, ubicación del sistema de aire acondicionado y protección de la radiación solar directa.

Existe un rango de temperatura que es adecuado como temperatura de diseño y funcionamiento para el sistema de acondicionamiento activo. Por debajo de las temperaturas de las franjas de confort de uso internacional se requiere más potencia del sistema de aire acondicionado. Es importante resaltar que por cada grado °C por debajo de estas temperaturas, el sistema de aire acondicionado consume aproximadamente 3% más de energía.

Para sistemas de acondicionamiento central, según el tamaño y uso de la instalación, son recomendables sistemas que permitan una atención individual a cada ambiente o grupos de ambientes, de acuerdo a sus exigencias particulares; estos sistemas deben posibilitar un uso más racional de acuerdo a las tareas, horarios de uso y cantidad de personas de los diferentes espacios.

Es recomendable sectorizar la instalación en función de las actividades y horarios de ocupación de los espacios, para así reducir los flujos de aire acondicionado en ambientes de baja ocupación como por ejemplo, pasillos de circulación, hall de ascensores, accesos, depósitos, etc.

Es importante disponer de equipos de aire acondicionado independientes en los espacios de usos eventuales, de esta manera se racionaliza el consumo de energía en áreas desocupadas y el sistema central trabaja más eficientemente al verse aliviado de estas cargas térmicas de usos temporales.

Se debe aprovechar la luz natural, proteger la construcción de la radiación solar, e incorporar instalaciones, equipos y accesorios energéticamente eficientes, los cuales producen menos calor, para reducir así las exigencias al sistema de aire acondicionado. Por cada kW ahorrado en el sistema de iluminación se reduce la capacidad del sistema de aire acondicionado en aproximadamente 0,28 toneladas de refrigeración.

La calidad en el diseño y en la construcción es un factor clave para la racionalidad energética. Durante la construcción se deben disponer las instalaciones y equipos del sistema de aire acondicionado de acuerdo con las indicaciones del proyecto: potencia de los equipos, tamaño y trayectoria de la ductería, tamaño y ubicación de las rejillas, etiquetado de eficiencia energética de los equipos y otras especificaciones. Deben evitarse infiltraciones a través de los ductos de suministro del aire, así como a través de las ventanas y los marcos que conforman los cerramientos de la instalación.

Un método económico para renovar el aire es la utilización de ventiladores para estimular el movimiento del aire en ambientes acondicionados en forma natural. Un ventilador de techo puede contribuir de manera determinante a mejorar el confort térmico de los espacios. Los ventiladores presentan bajo consumo de energía, son económicos y no producen emisiones de gases al ambiente.

En la combinación de un buen diseño que incluya protecciones solares y aberturas, los ventiladores pueden contribuir con el adecuado refrescamiento de las instalaciones y espacios acondicionados en forma pasiva en países de clima tropicales. Son artefactos que por su bajo consumo o potencia no requieren una instalación especial. Sin embargo, como norma de seguridad, deben poseer un enchufe con conexión a tierra. Al usar alargador de corriente es importante recordar que también debe poseer conexión a tierra.

#### **6.1.9 Recomendaciones Importantes Para Ahorro En Equipos De A/A**

- ? Seleccione los equipos según las necesidades de uso real de la construcción
- ? Instale sistemas automáticos que controlen el funcionamiento de los equipos de acuerdo a los requerimientos de servicio
- ? Proponga unidades basados en sistemas eficientes energéticamente
- ? Reduzca la demanda de energía eléctrica y los costos de instalación y funcionamiento del sistema de aire acondicionado utilizando tecnologías de ventanas y cristales

- ? Evalúe la eficiencia energética de los diferentes sistemas de acondicionamiento activo existentes en el mercado
- ? Establezca las temperaturas internas de confort recomendadas para recintos con sistemas de aire acondicionado
- ? Disminuya las cargas térmicas en los ambientes para racionalizar el uso de aire acondicionado
- ? Verifique la calidad de ejecución del sistema de aire acondicionado para garantizar su eficiencia
- ? Verifique que el proyecto de ventilación forzada se ajuste a las necesidades reales de ocupación de la instalación
- ? Utilice ventiladores para estimular el movimiento del aire

## 7 CONCLUSIONES

Cada vez se vuelve más imperativo voltear la mirada hacia nuestros consumos energéticos, ya que un mal aprovechamiento de ellos nos llevará a utilizar más recursos monetarios y a enviar menos bióxido de carbono a la atmósfera.

Debido a que uno de los sistemas que más consume energía eléctrica en la embarcación es el sistema de aire acondicionado, realizar un estudio detallado y profesional de la eficiencia de éste, nos puede llevar a grandes ahorros, sin duda alguna se puede pensar en cada parte del sistema, y encontrar opciones en los fan coils, las bombas, el chiller marino (unidad enfriadora), y en el sistema de distribución como tal.

Finalmente debemos analizar nuestras opciones de inversión, no solo por el factor monetario sino por los resultados y ahorros que se van a obtener en el tiempo, además que el beneficio para con el medio ambiente será evidente, al cuidar más cada uno de los recursos que nos proporciona y que hoy por hoy se están haciendo cada vez más escasos.

Como tal al finalizar este trabajo se puede concluir que:

- ? La trayectoria 16 (7-1) es el recorrido crítico del sistema de circulación de agua fría para la Nodriza VI ya que fue determinante el hecho de que la necesidad térmica estuviera asociada a un fan coil de 3,6 gpm, generando un alto porcentaje de pérdidas.



? La ecuación del sistema representativo corresponde a:  $H = 2041477,46Q^2$  a partir de la cual se construyó la curva del sistema.

? El punto de operación está definido por lo siguientes parámetros:

***Eficiencia = 62%***

***Pérdida de carga total = 15,13 m***

***Gasto = 43,15 gpm***

***Potencia = 0,6517 kW***

***Carga neta de succión positiva (NPSH) = 1,33 m***

? El 68% de las pérdidas de energía se concentran en pérdidas por longitud y accesorios.

? El 22% de las pérdidas de energía se concentran en los fan coils del sistema de acondicionamiento de aire de la embarcación.

? Los resultados del cálculo de la potencia demandada por la bomba IHM modelo 3x18 es de 1 HP y los datos de placa son de 2 HP, lo que nos indica que la bomba puede estar sobredimensionada, lo cual es necesario validar en estudios posteriores.

? El ahorro estimado por el hecho de llevar la bomba de un rendimiento del 62% solo hasta un 68% es de:

***kW: 0,063 kW***

***Combustible: 42,179 galones/año***

***Pesos: \$197385,637***

? Por estimación se tiene que un nuevo trazado de la tubería del sistema de circulación de agua fría con una curva que reduzca el valor de ***R*** (que abarca tramos rectos, accesorios y fan coils) ( $H=RQ^2$ ) aproximadamente en un 40% logra un aumento del rendimiento actual de la bomba hasta un 68%.

? Los aspectos claves a estudiar en un futuro se centran en posibles cambios en los fan coils para disminuir pérdidas, reevaluar el trazado del sistema de tuberías, incluyendo el ruteado con sus respectivos accesorios y un posible cambio del material y por ultimo un cambio de la bomba por una de mejor rendimiento y disminución del consumo de energía que permitan finalmente llegar a una optimización del sistema de circulación de agua fría.

## 8 RECOMENDACIONES

A partir de la evaluación realizada surge la necesidad de plantear algunas recomendaciones importantes a tener en cuenta para la optimización del sistema de circulación de agua fría a futuro, esto se planteará teniendo en cuenta las medidas más comunes y viables para equipos de bombeo y redes de tuberías además de los resultados obtenidos en el desarrollo de la presente tesis:

- ? Estudiar la posibilidad de implementar cambios en el trazado del sistema de tuberías, incluyendo aspectos como, longitud, accesorios y fan coils para disminuir las pérdidas y así incrementar el rendimiento aprovechando la bomba que se tiene, en conjunto con un estudio térmico que permita mantener las condiciones para suplir las necesidades de confort de la embarcación.
- ? Sustituir la bomba actual por una bomba de menor consumo que suministre el mismo gasto con una mayor eficiencia.
- ? En cuanto a la sustitución del motor actual no se recomienda implementar ninguna medida ahorro al respecto ya que el motor actual es de alta eficiencia lo que conlleva a profundizar en otros aspectos de mayor relevancia con los cuales se consigan mejoras más significativas para la optimización del sistema.

- ? Estudiar la viabilidad de realizar un cambio en el material del trazado de tuberías de manera tal que se disminuyan las pérdidas debidas a la rugosidad, partiendo del hecho de que es este uno de los punto donde se concentran un alto porcentaje de pérdidas para el sistema.
  
- ? Estudiar posibles variaciones en los diámetros de las tuberías del sistema de manera tal que se reduzcan las pérdidas.
  
- ? Realizar una evaluación de la parte térmica del sistema que permita determinar la demanda de frío horaria para cada compartimiento de la embarcación de manera tal que las medidas de ahorro propuestas no generen variaciones en las necesidades de confort relacionando así el análisis hidráulico y térmico del buque.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

[1] <http://www.unal.edu.co>

[2] Escalona Moreno. Iván, Documento titulado “Ahorro de energía”.  
<http://www.monografias.com/trabajos12/ahorener/ahorener.shtml>

[3] [www.monografias.com](http://www.monografias.com), documento titulado: Kaizen Conservación y Ahorro de Energía

[4] [http://es.encarta.msn.com/encyclopedia\\_961520662\\_3/ahorro\\_de\\_energia.html#s13](http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_961520662_3/ahorro_de_energia.html#s13)

[5] Campos Juan Carlos, Documento titulado, Modelos de Gestión Energética, Módulo de Gestión Energética; Minor de Uso Racional de la Energía Universidad Tecnológica de Bolívar Cartagena Colombia 2006

[6] Materiales del Diplomado en Gestión total eficiente de la energía. Universidad Autónoma de Baja California, México 2001, Instructores Dr. Aníbal Borroto Nordelo y Dr. Percy Viego Felipe; Centro de estudios de energía y medio ambiente universidad Cienfuegos Cuba

[7] LUGO R, SIERRA A, DE ARMAS M. Documento: Evaluación energética de los sistemas de conversión y consumo de energía de un buque tipo Nodriza de segunda generación. Agosto 19 de 2005.

[8] [www.caloryfrio.com](http://www.caloryfrio.com)

[9] <http://www.caloryfrio.com/dossiers/climatizacion-eficiencia.html>

[10] SÁNCHEZ JUAN C. Y RIVADENEIRA JUAN SEBASTIÁN. Tesis De Grado: Optimización Del Banco De Pruebas Para El Estudio De Bombas Centrífugas En Serie Y Paralelo. Cartagena de Indias D.T. Y C. 2003.

[11] <http://www.diee.unican.es/pdf/010%20Dist%20Agua.pdf>

[12] Curso Básico de Eficiencia en Sistemas de Bombeo, Documento Pdf, descargado de: <http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Sistemas%20de%20bombeo%20y%20motores/>

[13] Documento Pdf. del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, Bombas Centrífugas y Volumétricas. Pedro Fernández Díez, <http://www.termica.webhop.info/>

[14] Evaluación Energética de Bombas Centrífugas Horizontales Metodología (FIDE). Consultarías y Servicios en Tecnologías Eficientes S.A. de CV.

[15] [CURSO%20BASICO%20DE%20EFICIENCIA%20EN%20SISTEMAS%20DE%20BOMBEO.pdf](#)

[16] CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY. Handbook of Air Conditioning System Desing, Marcombo Boixareu Editores – Barcelona - Mexico

[17] <http://www.fim.utp.ac.pa/Revista/vol2/mcoronado.html>

[18] [http://www.eere.energy.gov/femp/operations\\_maintenance/technologies/chillers/types.cfm](http://www.eere.energy.gov/femp/operations_maintenance/technologies/chillers/types.cfm)

[19] <http://www.refrinorte.com/10357/12710.html>

[20] <http://www.esprocal.com/Finisterre/Consultas/Calefaccion/emisores.htm>

[21] Potter Merle C. y Wiggert David C. Mecánica de Fluidos; Tercera Edición. Editorial Thomson

[22] <http://www.igihm.com/>

[23] Carrier, Product data 42 Series, Fan – Coil, Air Conditioners entre 50/60 Hz y 150 a 2000 cfm.

[24] L.F. Moody Trans, ASME, Vol 66; 1944.

[25] [www.minminas.gov.co](http://www.minminas.gov.co)

[26] [www.ecologistasenaccion.org](http://www.ecologistasenaccion.org)

[27] <http://www.grundfos.com>

[28] <http://www.bomohsa.com/aplicaciones/industrial/industrial.htm>

[29] NILS R. GRIMM, P. E. Gerente de sección, Cía. Nc. Sverdrup, Práctica de la conservación de la energía Capitulo 51. New York.



## **10 ANEXOS**

**ANEXO A:** Plano Esquemático Del Sistema De Aire Acondicionado Del Buque Nodriza  
Fluvial VI

**ANEXO B: Modelo Tridimensional Del Sistema De Circulación De Agua Fría Montado**

En La Nodriz Fluvial VI

**ANEXO C: Modelo Tridimensional Del Sistema Mostrando Los Sentidos De Los  
Caudales Para Cada Nodo**

**ANEXO D:** Listado De Los Valores De K Respectivos Para Cada Uno De Los Accesorios  
Presentes En El Sistema

**ANEXO D-1: Valores De K Para Tee's Rectas de 108° y 90° En Toda La Variedad De  
Diámetros**

<b>Accesorios</b>	<b>Diámetro</b>	<b>K</b>
Tee run	3/4"	0,4933
Tee run	1 "	0,4566
Tee run	1,25"	0,4308
Tee run	1,5"	0,4124
Tee run (acero)	2"	0,3801
Tee side out let	3/4"	1,48
Tee side out let	1 "	1,37
Tee side out let	1,25"	1,293
Tee side out let	1,5"	1,237
Tee side out let	2"	1,14

**ANEXO D-2:** Valores De K Para Codos de 45° y 90° En Toda La Variedad De Diámetros

<b>Accesorios</b>	<b>Diametro</b>	<b>K</b>
Codo de 45	3/4"	0,3947
Codo de 45	1"	0,3653
Codo de 45	1,25"	0,3447
Codo de 45	1,5"	0,3299
Codo de 45	2"	0,3041
Codo de 90	3/4"	0,74
Codo de 90	1"	0,6849
Codo de 90	1,25"	0,6463
Codo de 90	1,5"	0,6186
Codo de 90	2"	0,5702

**ANEXO D-3: Valores De K Para Reductores Concéntricos De Expansión En Toda La Variedad De Diámetros**

<b>Accesorios</b>	<b>Diámetro</b>	<b>K</b>
Reductor Concéntrico. (exp)	3/4"x1"	0,1931
Reductor Concéntrico. (exp)	3/4"x1,25"	0,4121
Reductor Concéntrico. (exp)	3/4"x1,5"	0,5579
Reductor Concéntrico. (exp)	3/4"x2"	0,7317
Reductor Concéntrico. (exp)	1"x1,25"	0,1305
Reductor Concéntrico. (exp)	1"x1,5"	0,301
Reductor Concéntrico. (exp)	1"x2"	0,5506
Reductor Concéntrico. (exp)	1,25"x1,5"	0,0863
Reductor Concéntrico. (exp)	1,25"x2"	0,3553
Reductor Concéntrico. (exp)	1,5"x2"	0,1836

**ANEXO D-4:** Valores De K Para Reductores Concéntricos De Contracción En Toda La  
Variedad De Diámetros

<b>Accesorios</b>	<b>Diámetro</b>	<b>K</b>
Reductor Concéntrico. (cont)	2"x1,5"	0,2142
Reductor Concéntrico. (cont)	2"x1,25"	0,2981
Reductor Concéntrico. (cont)	2"x1"	0,371
Reductor Concéntrico. (cont)	2"x3/4"	0,4277
Reductor Concéntrico. (cont)	1,5"x1,25"	0,1767
Reductor Concéntrico. (cont)	1,5"x1"	0,2743
Reductor Concéntrico. (cont)	1,5"x3/4"	0,3735
Reductor Concéntrico. (cont)	1,25"x1"	0,1806
Reductor Concéntrico. (cont)	1,25"x3/4"	0,321
Reductor Concéntrico. (cont)	1"x3/4"	0,2197



**ANEXO D-5:** Valores De K Para Otros Accesorios En Toda La Variedad De Diámetros

<b>Accesorios</b>	<b>Diametro</b>	<b>K</b>
Válvula de bola	3/4"	
Válvula reg. de caudal	3/4"	
Válvula de bola	2"	0,05702
Fan Coil de 2,4 gpm	/	
Fan Coil de 3,6 gpm	/	
Chiller	/	
Filtro en "Y"	2"	
Adaptadores	/	
Unión Simple	/	

**ANEXO E:** Ver CD Incluido Con Los Respectivos Cálculos Realizados En El Programa  
De Excel

**ANEXO F: Modelo Tridimensional De La Trayectoria Con Mayores Pérdidas En El  
Sistema**