



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

*Diagnóstico y propuestas de mejora del funcionamiento de
una torre de enfriamiento y de su red de
distribución de agua en una refinería*

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO
P R E S E N T A :

Carlos Alberto Ibarra Aguilar



MÉXICO, D. F.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente	Prof. Humberto Rangel Davalos
Vocal	Prof. Alfonso Durán Moreno
Secretario	Prof. Alejandro Zanelli Trejo
1er. Suplente	Prof. Fulvio Mendoza Rosas
2º. Suplente	Prof. Andoni Garritz Cruz

Torre de Ingeniería, tercer piso ala sur. Ciudad Universitaria.
Facultad de Química, UNAM

Asesor del tema:

Dr. Alfonso Durán Moreno

Sustentante:

Carlos Alberto Ibarra Aguilar

Agradecimientos

*A mi familia que son el pilar de mi formación.
A mis padres Carmen y Santos, por su
inmenso cariño, por cuidarme, apoyarme y
aconsejarme.
A mis hermanos Santos y Ricardo, por
compartir grandes y lindos momentos en
familia.
A mi hermana Diana que es mi adoración.*

Agradecimientos

*A mi novia cecy por enseñarme, guiarme, cuidarme y apoyarme de una manera única. Por todos los momentos que hemos vivido juntos que me han hecho crecer, por ser mi motivo para seguir adelante siendo mejor cada día, eres mi ángel.
Te amo cecy.*

**TK* -CC-*

Agradecimientos

A mi Universidad que junto a los amigos dejan en mi, vivencias inolvidables.

A la Facultad de Química por ser mi segunda casa por 5 años.

Al Dr. Alfonso Durán que me apoyó en la realización de este trabajo, además de brindarme la oportunidad de colaborar en la realización de proyectos permitiéndome adquirir una experiencia laboral importante.

A todos los colaboradores del grupo de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Química que me han aportado conocimientos para el desarrollo profesional y personal.

Al Ing. Alejandro Zanelli que me orientó en la realización de este trabajo.

Carlos Ibarra



ÍNDICE

Capítulo 1.	Introducción.....	1
1.1	Problemática	2
1.2	Justificación	3
1.3	Objetivo general.....	4
1.4	Objetivos particulares.....	4
Capítulo 2.	Fundamentos Teóricos.....	5
2.1	Torres de enfriamiento.....	5
2.2	Torres de enfriamiento típicas de refinería.....	6
2.2.1	Torres de tiro inducido a contracorriente.	6
2.2.2	Torres de tiro inducido a flujo cruzado.....	7
2.3	Componentes principales de una torre de enfriamiento.....	8
2.4	Balance de materia en una torre de enfriamiento	8
2.4.1	Variables de operación.....	8
2.4.2	Relación de variables de operación.....	10
2.5	Fundamentos Térmicos	13
2.5.1	Cálculo de disipación de calor.....	14
2.5.2	Determinación de la eficiencia térmica	15
2.5.3	Capacidad de enfriamiento.....	15
2.6	Fundamentos para una evaluación hidráulica.....	15
2.6.1	Sistema de Bombeo	16
2.6.2	Red hidráulica (EPANET).....	18
2.7	Fundamentos Económicos.....	21
2.7.1	Proceso de toma de decisiones económicas.	21
2.7.2	Métodos de análisis.....	22
Capítulo 3.	Metodología.....	26
3.1	Caso de estudio	26
3.1.1	Descripción de la torre de enfriamiento de estudio.....	26
3.1.2	Situación y operación actual.....	26
3.1.3	Red de enfriamiento	30



3.2	<i>Inspección Física</i>	37
3.3	<i>Evaluación térmica</i>	39
3.4	<i>Estudio hidráulico</i>	40
3.4.1	<i>Sistema de bombeo</i>	40
3.4.2	<i>Red de distribución</i>	41
3.5	<i>Evaluación económica</i>	46
Capítulo 4.	<i>Resultados y Discusión</i>	48
4.1	<i>Análisis físico y térmico de la torre de enfriamiento</i>	48
4.1.1	<i>Balance de materia</i>	48
4.1.2	<i>Inspección Física</i>	49
4.1.3	<i>Evaluación térmica</i>	54
4.2	<i>Estudio hidráulico de la red de distribución</i>	59
4.2.1	<i>Sistema de Bombeo</i>	59
4.2.2	<i>Simulación de la red de hidráulica de distribución</i>	64
4.3	<i>Propuestas de mejora</i>	69
4.4	<i>Evaluación económica</i>	75
Capítulo 5.	<i>Conclusiones</i>	82
Capítulo 6.	<i>Bibliografía</i>	86
Anexo 1.	<i>Curva de operación de las bombas de la torre de enfriamiento</i>	88
Anexo 2.	<i>Metodologías</i>	89
Anexo 3.	<i>Simulación Térmica</i>	90
Anexo 4.	<i>Memoria de cálculo para las bombas</i>	91
Anexo 5.	<i>Simulación hidráulica</i>	97



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	<i>Ecuaciones de las variables de una torre de enfriamiento.</i>	13
Tabla 2.2.	<i>Componentes de una red hidráulica.....</i>	19
Tabla 3.1.	<i>Características principales de diseño.....</i>	26
Tabla 3.2.	<i>Flujos en disparo a plantas.</i>	27
Tabla 3.3.	<i>Temperaturas promedio de la torre.....</i>	28
Tabla 3.4.	<i>Flujos y temperaturas de agua fría y caliente por celda.</i>	28
Tabla 3.5.	<i>Relación de disparos con plantas y equipos usuarios.....</i>	33
Tabla 3.6.	<i>Procedimiento para medir temperaturas.</i>	39
Tabla 3.7.	<i>Sistema de unidades utilizado en la simulación.</i>	41
Tabla 3.8.	<i>Costos variables de producción.</i>	46
Tabla 3.9.	<i>Consideraciones porcentuales de parámetros económicos....</i>	46
Tabla 3.10.	<i>Costo de las fuentes de ahorro.</i>	46
Tabla 4.1.	<i>Balance de materia de la torre de enfriamiento.....</i>	48
Tabla 4.2.	<i>Inspección física de ventiladores y conos Venturi.....</i>	51
Tabla 4.3.	<i>Inspección de las válvulas de retorno.</i>	51
Tabla 4.4.	<i>Inspección de las tinas de agua caliente.....</i>	52
Tabla 4.5.	<i>Eficiencia por celda de la torre.....</i>	57
Tabla 4.6.	<i>Estado actual de las bombas.</i>	59
Tabla 4.7.	<i>Datos del sistema de bombeo.....</i>	59
Tabla 4.8.	<i>Datos obtenidos de las curvas de las bombas.</i>	60
Tabla 4.9.	<i>Resultados de Bombas.</i>	62
Tabla 4.10.	<i>Resultados de la simulación del caso actual.....</i>	68
Tabla 4.11.	<i>Resultados obtenidos de la simulación para el caso 1.....</i>	69
Tabla 4.12.	<i>Resultados obtenidos de la simulación para el caso 2.....</i>	70
Tabla 4.13.	<i>Resultados obtenidos de la simulación para el caso 3.....</i>	71
Tabla 4.14.	<i>Presiones de suministro para los casos estudiados.....</i>	72
Tabla 4.15.	<i>Comparativo flujos de casos estudiados.</i>	74
Tabla 4.16.	<i>Costos para el primer escenario.....</i>	75
Tabla 4.17.	<i>Ahorros para el escenario 1.</i>	76



Tabla 4.18.	Calculo de VPN, TIR y PRI para el escenario 1.	76
Tabla 4.19.	Costo de químicos para el segundo escenario.....	77
Tabla 4.20.	Costos para el escenario 2.....	77
Tabla 4.21.	Ahorros para el escenario 2.	77
Tabla 4.22.	Calculo de VPN, TIR y PRI para el escenario 2.	78
Tabla 4.23.	Costos variables de producción del escenario 3.	78
Tabla 4.24.	Costos del escenario 3.....	79
Tabla 4.25.	Calculo de VPN, TIR y PRI para el escenario 3.	79
Tabla 4.26.	Comparación económica.....	80
Tabla 4.27.	Matriz técnico económica.....	81



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	<i>Torre de tiro inducido en contracorriente (HENSLEY, 1998).....</i>	<i>7</i>
Figura 2.2.	<i>Torre de flujo cruzado, doble flujo (HENSLEY, 1998).</i>	<i>7</i>
Figura 2.3.	<i>Componentes de una torre de enfriamiento.</i>	<i>8</i>
Figura 2.4.	<i>Sistema de una torre de enfriamiento.</i>	<i>11</i>
Figura 3.1.	<i>Distribución de agua de enfriamiento a plantas usuarias.</i>	<i>27</i>
Figura 3.2.	<i>Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.</i>	<i>34</i>
Figura 3.3.	<i>Opciones hidráulicas de EPANET.....</i>	<i>42</i>
Figura 3.4.	<i>Datos suministrados para cada sección de tubería.....</i>	<i>43</i>
Figura 3.5.	<i>Datos especificados para cada nudo de la red.....</i>	<i>44</i>
Figura 3.6.	<i>Curva de bomba especificada en EPANET.....</i>	<i>45</i>
Figura 4.1.	<i>Resultado capacidad de enfriamiento (CTI Toolkit, Ver. 3.0b). ..</i>	<i>55</i>
Figura 4.2.	<i>Eficiencia por celda de la torre de enfriamiento.....</i>	<i>58</i>
Figura 4.3.	<i>Resultados de los parámetros del sistema de bombeo.....</i>	<i>63</i>
Figura 4.4.	<i>Diagrama general de la simulación de la red de distribución. .</i>	<i>64</i>
Figura 4.5.	<i>Esquema del sistema de bombeo en el simulador.....</i>	<i>65</i>
Figura 4.6.	<i>Esquema del punto de entrega a la planta U-200.</i>	<i>65</i>
Figura 4.7.	<i>Esquema de la primera sección de la planta FCC.</i>	<i>66</i>
Figura 4.8.	<i>Esquema de la segunda sección de la planta FCC.....</i>	<i>66</i>
Figura 4.9.	<i>Esquema de la red (primaria 5 y preparadora de carga 2).....</i>	<i>67</i>
Figura 4.10.	<i>Esquema de la última sección (preparadora de carga 3).</i>	<i>67</i>
Figura 4.11.	<i>Comparación en presión de los casos estudiados.</i>	<i>73</i>
Figura 4.12.	<i>Comparación en flujo de los casos estudiados.</i>	<i>74</i>



Capítulo 1. Introducción

En México, las refinerías cuentan con torres de enfriamiento y redes de distribución de agua con periodos de funcionamiento para muchos casos mayores a 20 años, debido a esto y a las condiciones operativas, las torres se encuentran deterioradas y operando a condiciones alejadas de su diseño.

En este trabajo se analizará un caso de estudio real de una torre de enfriamiento de 6 celdas con un flujo de 10,000 GPM por celda.

Para realizar un estudio integral del funcionamiento de una torre se deben evaluar principalmente aspectos físicos estructurales, térmicos e hidráulicos. A continuación se describe brevemente en que consiste cada aspecto.

- ✓ Inspección visual al equipo: evaluación del estado de los siguientes componentes de una torre de enfriamiento: estructura general, persianas, empaque, eliminadores de arrastre, sistemas de distribución, válvulas de retorno, tinas de agua caliente y la instrumentación en los cabezales de suministro y retorno.

- ✓ Evaluación térmica: determinación de la cantidad de calor que disipa la torre, la eficiencia y la capacidad de enfriamiento por medio de las temperaturas de bulbo húmedo, temperatura de agua caliente y fría.

- ✓ Estudio hidráulico: análisis del comportamiento del sistema de bombeo y la simulación de la red de distribución de agua de enfriamiento.

Con base en los aspectos anteriores se plantearán propuestas hidráulicas de mejora de distribución de agua de enfriamiento.



1.1 Problemática

Las torres de enfriamiento típicas de refinería presentan problemas de operación que en mayor medida se reflejan en una baja eficiencia térmica, aunado a esto, sus redes de distribución de agua generalmente no cumplen con el requerimiento de proceso en parámetros de presión y flujo debido a un conjunto de situaciones que se describen a continuación:

- ✓ Tiempo de operación extenso
- ✓ La mayor parte de estos equipos y accesorios tiene un periodo de vida útil que ya han sido sobrepasados.
- ✓ Mantenimiento inadecuado
- ✓ Filosofía de operación incorrecta

La operatividad de la torre de enfriamiento está sujeta al requerimiento de las plantas usuarias, sin embargo es importante recordar que la manera en la cual se opere cualquier equipo es directamente proporcional a la eficiencia de éste, es decir, si se cumplen con los parámetros de operación recomendados por el fabricante teóricamente el equipo se desempeñará adecuadamente.



1.2 Justificación

Con la finalidad de plantear alternativas para una mejor operación de la torre y su red de distribución de agua es importante determinar los aspectos principales que impactan en el incumplimiento de flujo y presión en los puntos de entrega a plantas usuarias, así como los aspectos que no permiten una mejor eficiencia térmica.

En el aspecto personal el interés por desarrollar en particular este trabajo de tesis, se debió a la oportunidad de adquirir experiencia en el desarrollo de ingeniería de proyectos en la industria. Otro aspecto importante es explorar el área de oportunidad que existe en las industrias químicas para optimizar el uso de agua. Los beneficios que se pueden conseguir se dirigen en dos aspectos principalmente:

- En el ambiental se lograría una mejor administración del uso del agua.
- En el económico se alcanzaría un menor costo de operación al reducir el consumo de agua, esto cada vez toma más importancia debido a la escasez del agua que implica un costo cada vez mas alto por el uso de este liquido.



1.3 Objetivo general

Realizar un diagnóstico del funcionamiento térmico de una torre de enfriamiento y un estudio hidráulico de su red de distribución de agua proponiendo metodologías, utilizando simuladores y planteando propuestas que mejoren el funcionamiento de la torre y que con ello se asegure una correcta distribución de agua de enfriamiento a plantas usuarias.

1.4 Objetivos particulares

- ✓ Localizar partes deterioradas de la torre de enfriamiento que afecten la operación y desempeño de la misma.
- ✓ Evaluar térmicamente la torre de enfriamiento.
- ✓ Simular el funcionamiento hidráulico actual de la red de distribución de agua de una torre de enfriamiento típica de refinería.
- ✓ Determinar los puntos de incumplimiento de flujo y presión de la red de distribución de agua enfriamiento.
- ✓ Plantear propuestas para optimizar el funcionamiento de la torre y su red de distribución de agua de enfriamiento.
- ✓ Realizar un análisis económico de las distintas propuestas.
- ✓ Determinar hidráulicamente y económicamente la mejor opción.



Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

2.1 Torres de enfriamiento

De acuerdo con el *Cooling Technology Institute (CTI, 2008)* se define a una torre de enfriamiento como un equipo de disipación de calor, que remueve el calor a la atmósfera a través del enfriamiento de una corriente de agua.

El tipo de disipación de calor en una torre de enfriamiento es denominado “evaporativo” en el que se permite evaporar una porción pequeña del agua que será enfriada en una corriente móvil de aire para proporcionar enfriamiento significativo al resto de esa corriente de agua. El calor de la corriente de agua transferida a la corriente de aire aumenta su temperatura y su humedad relativa al 100 %, descargando este aire a la atmósfera.

Las torres de enfriamiento son generalmente utilizadas para proporcionar temperaturas al agua significativamente más bajas que las alcanzables con dispositivos “enfriados por aire” y dispositivos de extracción de calor “secos”, de tal modo que se alcanza más rentabilidad y una operación de energía eficiente de sistemas que necesitan enfriamiento.

La tendencia actual son torres de enfriamiento construidas de fibra de vidrio debido al poco mantenimiento, la resistencia a la corrosión, además de combinar una baja inversión y costos de operación (*SPX, 2008*).

Las torres de enfriamiento construidas de madera tienen un periodo de vida útil de entre 15 a 20 años al igual que las torres de fibra de vidrio, mientras que las construidas de concreto son relativamente más duraderas y más caras (*DELENIKOS, 2006*).



2.2 Torres de enfriamiento típicas de refinería

Debido al importante requerimiento de flujo de agua de enfriamiento, las torres de enfriamiento utilizadas en refinería son de las más grandes que se pueden encontrar en la industria, una característica principal es el flujo de recirculación de 10 000 GPM por celda, otra característica importante es que son generalmente torres de tiro mecánico inducido. Se denominan de tiro mecánico porque utilizan uno o múltiples ventiladores para proporcionar un flujo de un volumen conocido de aire que pasa a través de la torre, e inducido porque el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire. (HENSLEY, 1998)

2.2.1 Torres de tiro inducido a contracorriente.

El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del relleno de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto (Katzel, 2000).

En este tipo de torres el aire puede entrar en una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire. La elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. En la Figura 2.1 se presenta un diagrama de una torre a contracorriente.

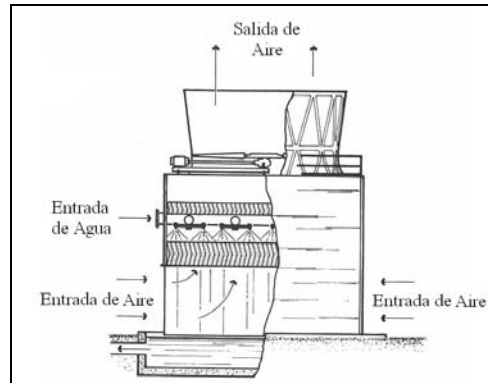


Figura 2.1. Torre de tiro inducido en contracorriente (HENSLEY, 1998).

2.2.2 Torres de tiro inducido a flujo cruzado

En las torres de flujo cruzado, el aire circula en dirección perpendicular respecto al agua que desciende (Figura 2.2). Estas torres tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la de relleno. (HENSLEY, 1998)

El mantenimiento de estas torres es menos complicado que en el caso de las torres a contracorriente, debido a la facilidad con la que se pueden inspeccionar los distintos componentes internos de la torre. La principal desventaja de estas torres es que no son recomendables para aquellos casos en los que se requiera un gran salto térmico y un valor de acercamiento pequeño, puesto que ello significará mayor superficie transversal y mayor potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo a contracorriente.

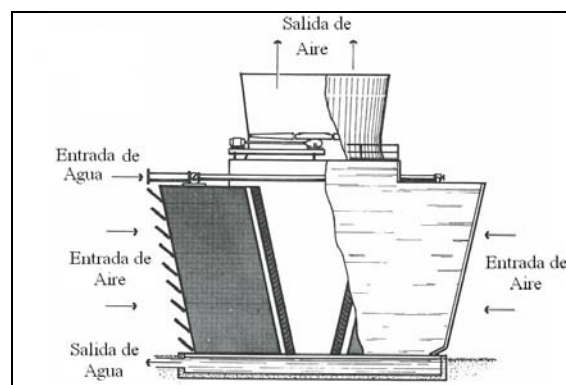


Figura 2.2. Torre de flujo cruzado, doble flujo (HENSLEY, 1998).



2.3 Componentes principales de una torre de enfriamiento

Para realizar un diagnóstico es necesario conocer los componentes de una torre de enfriamiento, los cuales se dividen en tres grupos: estructurales, mecánicos y eléctricos.

Los componentes principales se muestran en el diagrama de la Figura 2.3 (CRUZ, 2007).

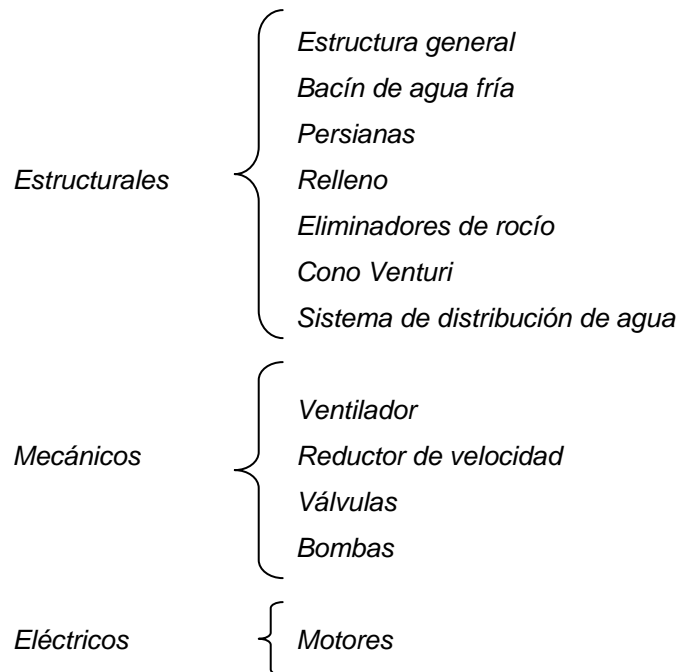


Figura 2.3. Componentes de una torre de enfriamiento.

2.4 Balance de materia en una torre de enfriamiento

2.4.1 Variables de operación

Para realizar un balance de materia en una torre de enfriamiento es conveniente definir los términos y variables más importantes:



Agua de Repuesto (*Make-up water*)

Agua adicionada a las torres de enfriamiento para reemplazar las pérdidas por arrastre, purga y evaporación. La cantidad de agua de repuesto adicionada afecta directamente la calidad de agua en el sistema.

Arrastre (*Drift*)

Pérdidas de agua en forma de vapor que corresponde aproximadamente entre un 0.05 % a 0.2% del flujo de recirculación.

Purga (*Blowdown*)

Término para el agua que es extraída de la recirculación del agua de enfriamiento para reducir contaminantes en el agua de la torre. Con la purga y la adición de agua de repuesto el nivel de los sólidos disueltos puede mantenerse para reducir la acumulación mineral y otros contaminantes en la torre.

Evaporación (*Evaporation*)

Mecanismo de enfriamiento principal de una torre, el calor perdido por evaporación (aproximadamente 1,000 BTU por libra de agua) baja la temperatura del agua restante.

La cantidad de evaporación es aproximadamente de 1.2 % de la cantidad de flujo de recirculación de agua que pasa a través de la torre por cada disminución de 10° F de la temperatura del agua alcanzada por la torre (*NCDENR, 2008*).



Ciclos de concentración

La relación entre la calidad de agua de recirculación y la calidad de agua de repuesto se puede expresar como un “relación de concentración” o “ciclo de concentración”(C).

El mayor ahorro de agua ocurre cuando se incrementan los ciclos de concentración y las purgas disminuyen (HUCHLER, 2000).

$$\text{Ciclos de concentración} = \frac{\text{concentración en recirculación}}{\text{concentración en repuesto}}$$

2.4.2 Relación de variables de operación

La Figura 2.4 esquematiza el arrastre (D) y la cantidad de agua que continuamente se evapora (E). El agua de repuesto M, debe ser adicionada continuamente para remplazar las pérdidas por evaporación y arrastre. A medida que estos fenómenos continúan, las sales en el agua de repuesto incrementan la concentración en el agua de recirculación (Mc COY, 1983).

Cuando un valor máximo de concentración es alcanzado, se abre la línea de purga (B), para descargar al drenaje continuamente.

Así, para cualquier periodo de tiempo:

$$M = E + B + D \quad (1)$$

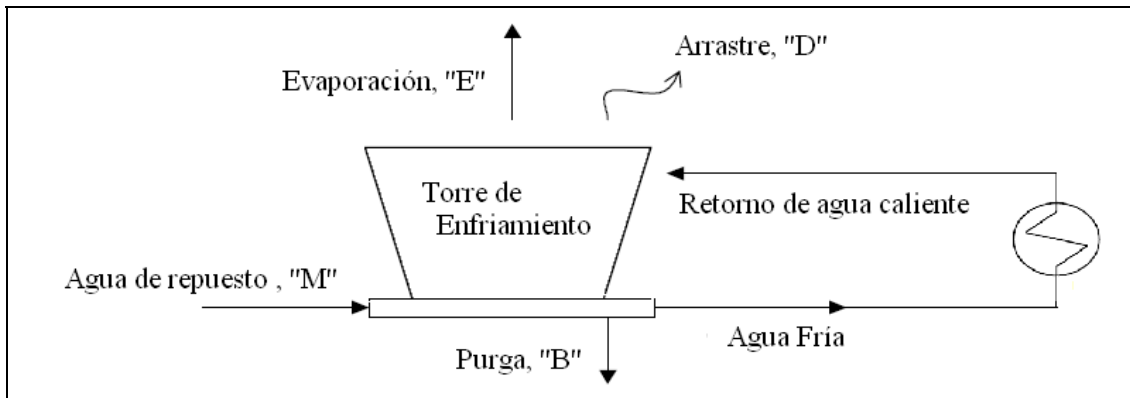


Figura 2.4. Sistema de una torre de enfriamiento.

Cuando el sistema alcanza un equilibrio en un valor preseleccionado de sólidos totales $(TS)_r$, con B ajustada para mantener esa concentración, entonces el peso de sólidos de entrada en el repuesto es igual al peso de los sólidos removidos en B y D.

Entonces:

$$M (TS)_m = (D + B) (TS)_r \quad (2)$$

También:

$$C = \frac{(TS)_r}{(TS)_m} \quad (3)$$

por lo tanto

$$M = (D + B) C \quad (4)$$

$$C = M / (D + B) = (E + B + D) / (B + D) \quad (5)$$

Reordenando

$$CD + CB = E + B + D \quad (6)$$

$$CB - B = E - CD + D \quad (7)$$

$$(C - 1)B = E - (C - 1)D \quad (8)$$

o

$$B = [E - D(C - 1)] / (C - 1) \quad (9)$$



Se llegó a una expresión de las pérdidas que está en base a purgas, arrastre y ciclos de concentración. Desafortunadamente esta ecuación no es muy útil tomando en cuenta la poca certeza y confiabilidad que existe en valores de evaporación y arrastre ya que éstos son en muchos casos muy difíciles de medir.

Generalmente las torres de enfriamiento son diseñadas para que (E+D) sea el 3% del flujo de recirculación cuando el intervalo de enfriamiento sea de 30° F. De esta premisa E, es regularmente una simple estimación de 1 % del flujo de recirculación por cada 10° F de intervalo de enfriamiento.

Si R es el flujo de recirculación en galones por minuto y ΔT en ° F, la ecuación para estimar E es:

$$E = R \bullet \Delta T / 1000 \quad (10)$$

Para propósitos prácticos D puede ser incluida en B, la pérdida de agua por el viento (arrastre) contiene la misma concentración de sales que B, de acuerdo a esto, se puede escribir.

$$M = E + B = \left(\frac{R \times \Delta T}{1000} \right) + B \quad (11)$$

Si D es equivalente a cero en la ecuación (9), entonces:

$$B = \frac{E}{(C-1)} \quad (12)$$

Donde:

$$M = (R \times \Delta T / 1000) + E / (C - 1) \quad (13)$$

$$M = (R \times \Delta T / 1000) C / (C - 1) \quad (14)$$



En la Tabla 2.1 se resumen las ecuaciones del análisis anterior.

Tabla 2.1. Ecuaciones de las variables de una torre de enfriamiento.

Evaporación (E)	Repuesto (M)	Purga (B)	Ciclos de Concentración (C)
$R \times \Delta T / 1000$	$(R \times \Delta T / 1000)C / (C - 1)$	$\frac{E}{(C - 1)}$	$\frac{TS_r}{TS_m}$

2.5 Fundamentos Térmicos

En la etapa de evaluación térmica de una torre de enfriamiento es necesario conocer definiciones de los parámetros elementales que se utilizan para realizar los cálculos, a continuación se presenta un listado de definiciones:

1. Temperatura de agua caliente

Temperatura del agua de recirculación al entrar a la torre de enfriamiento.

2. Temperatura de agua fría

Temperatura del agua de recirculación al salir de la torre.

3. Temperatura de bulbo húmedo

La temperatura de bulbo de una mezcla de aire-agua proporciona una medida de la humedad de la mezcla; entre menos sea la humedad mayor será la diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo con respecto al seco. Teóricamente, una torre de enfriamiento enfría el agua a la temperatura de bulbo húmedo (temperatura mínima a la cual el agua puede enfriarse).

4. Intervalo

Es la diferencia entre la temperatura del agua caliente y del agua fría.

5. Aproximación

Es la diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura del bulbo húmedo



Para determinar las condiciones actuales de operación y la distribución de la energía en la torre de enfriamiento, es necesario cuantificar lo siguiente:

- ◆ La cantidad de energía que se disipa.
- ◆ Determinación de la eficiencia térmica.
- ◆ La capacidad de enfriamiento actual de operación de la torre con el simulador CTI.

2.5.1 Cálculo de disipación de calor

La disipación de calor es la cantidad de energía requerida para llevar a cabo el fenómeno de enfriamiento de agua (McCOY, 1983).

El cálculo de la disipación de calor se determina por la siguiente ecuación:

$$Q_D = R \cdot (TAC - TAF) \cdot C_p \cdot 8.35 \quad (15)$$

Donde:

Q = Calor disipado (BTU/min).

R = Flujo de Recirculación.

TAC = Temperatura de agua caliente.

TAF = Temperatura de agua fría.

8.35 = Factor de conversión lb/GPM.



2.5.2 Determinación de la eficiencia térmica

Esta eficiencia es determinada mediante la relación entre la disipación de calor experimental y disipación de calor de diseño, el cual es calculado a partir de la ecuación (16) (CONAE, 2005).

$$E_T = \frac{Q_{D_PRUEBA}}{Q_{D_DISEÑO}} * 100 \quad (16)$$

Donde:

Q_{D_PRUEBA} = Disipación de Calor de Prueba.

$Q_{D_DISEÑO}$ = Disipación de Calor de Diseño.

2.5.3 Capacidad de enfriamiento

Se define “la cantidad o flujo de agua de recirculación que la torre puede manejar a las condiciones de diseño” (CONAE, 2005).

2.6 Fundamentos para una evaluación hidráulica

Un estudio hidráulico de la red de distribución de agua de una torre de enfriamiento se puede dividir en dos partes para un estudio más completo, en la primera parte se analiza el sistema de bombeo y en la segunda parte se estudia la red de hidráulica.



2.6.1 Sistema de Bombeo

Las características hidráulicas de una bomba incluyen tres factores básicos:

1. Capacidad (expresada en unidades de volumen por unidad de tiempo, como GPM).
2. Carga total (expresada en pies).
3. Velocidad a la cual funciona la bomba (RPM).

Esta caracterización se representa en forma de curvas, donde la curva de carga contra capacidad se traza a velocidad constante y es llamada curva característica. La curva también indica el caballaje al freno requerido y la eficiencia correspondiente de la bomba. La capacidad a la cual la bomba trabaja con más eficiencia se llama **punto de máxima eficiencia** (KENNETH, 1997).

Es necesaria una definición clara del concepto de carga que suele confundirse con el término de presión. La presión se define específicamente como la fuerza por unidad de superficie, ésta se puede expresar en términos de altura de una columna de líquido que ejerza tal presión sobre la superficie horizontal del líquido en la base de la columna. Esta presión es independiente de la sección transversal de la columna de líquido, y así, puede expresarse como una altura y se mide en metros o pies. Propiamente, es una altura de carga debida a la presión, aunque generalmente se utiliza el término **carga** (WARRING, 1977).

La relación fundamental entre la presión (P) y la carga (H) está expresada en la igualdad siguiente:

$$P = w * H \quad (17)$$



donde:

w= peso específico del líquido.

En el caso del agua las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$P \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 0.1 * H \text{ (metros)} \quad (18)$$

$$H \text{ (metros)} = 10 * P \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (19)$$

La **carga total** del sistema es la suma de la carga estática más la carga debida a fricción. Esta carga debe ser menor a la carga del sistema de bombeo.

La **carga estática** se define como la diferencia entre el nivel donde se encuentra el líquido y el nivel más alto al cual llega el líquido. Esta carga no toma en cuenta los recorridos horizontales sino sólo la altura vertical, medida respecto al eje de la bomba.

La **carga por fricción** es la necesaria para contrarrestar las pérdidas por roce, ocasionadas por el flujo del líquido en la tubería, válvulas, accesorios y otros componentes. Estas pérdidas aumentan conforme la tubería se deteriora con el tiempo.

Adicionalmente es necesario conocer los siguientes términos:

La **potencia de accionamiento (P_{am})** es la cantidad de energía eléctrica que consume el motor de la bomba y la transfiere a través de la flecha al impulsor de la misma.

La **potencia en la flecha (BHP)** es la energía por unidad de tiempo que se transfiera del motor a la flecha de la bomba.



La **potencia hidráulica (WHP)** es la energía por unidad de tiempo que se transfiere directamente al agua, esta energía se transforma en impulso proporcionando la fuerza suficiente, para vencer las pérdidas por fricción en las tuberías y abastecer a las plantas.

2.6.2 Red hidráulica (EPANET)

EPANET es un software desarrollado por la Agencia del Medio Ambiente de EUA (U.S. *Environmental Protection Agency -EPA*), se utiliza para analizar el comportamiento hidráulico. Este programa ofrece principalmente las siguientes ventajas:

- ✓ No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse.
- ✓ Las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning.
- ✓ Incluye pérdidas menores en codos, accesorios, etc.
- ✓ Admite bombas de velocidad fija o variable.
- ✓ Permite considerar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal.
- ✓ Permite considerar diferentes tipos de demanda en los nudos.

Una red puede estar constituida por tuberías, nudos (uniones de tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses. En la Tabla 2.2 se muestran los componentes de un sistema de distribución de agua.



Tabla 2.2. Componentes de una red hidráulica.

Componente	Descripción	Datos requeridos para la simulación	Resultado obtenido
Embalse	Nudos que representan una fuente externa de alimentación, de capacidad ilimitada, o bien un sumidero de caudal.	<ul style="list-style-type: none"> ⤴ No se requieren datos 	No existen resultados derivados del cálculo
Depósitos	Nudos con cierta capacidad de almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> ⤴ No se requieren datos 	No existen resultados derivados del cálculo
Nudos de Caudal	Puntos de la red donde confluyen las tuberías o bien sus extremos, y a través de ellos el agua entra o sale de la misma (también pueden ser sólo puntos de paso)	<ul style="list-style-type: none"> ⤴ Cota respecto a un nivel de referencia (usualmente el nivel del mar) ⤴ Demanda de agua (flujo que abandona la red) 	Presión
Tubería	Líneas que transportan el agua de un nudo a otro	<ul style="list-style-type: none"> ⤴ Nudos inicial y final ⤴ Diámetro ⤴ Longitud ⤴ Estado (abierta, cerrada, o con válvula de retención). 	Flujo
Bombas	Líneas que comunican energía al fluido	<ul style="list-style-type: none"> ⤴ Nudos de aspiración e impulsión ⤴ Curva característica 	<ul style="list-style-type: none"> ⤴ Flujo trasegado ⤴ Incremento de carga comunicada al fluido.
Válvulas	Líneas que limitan la presión o el caudal en un punto determinado de la red	<ul style="list-style-type: none"> ⤴ Los nudos aguas arriba y aguas abajo ⤴ Diámetro ⤴ Consigna 	Flujo de paso Pérdida de carga



El método que emplea EPANET para resolver simultáneamente las ecuaciones de continuidad en los nudos y las ecuaciones de comportamiento hidráulico de las tuberías, para un instante dado, se conoce como método del gradiente.

Pérdidas por fricción

La pérdida de carga en una tubería debida a la fricción por el paso del agua, puede calcularse utilizando tres fórmulas de pérdidas diferentes:

1. Hazen-Williams
2. Darcy-Weisbach
3. Chezy-Manning

La fórmula de Hazen-Williams es la más utilizada en EUA Sin embargo, no puede utilizarse para líquidos distintos del agua, y fue desarrollada originalmente sólo para flujo turbulento. Desde el punto de vista académico, la fórmula de Darcy-Weisbach es la más correcta, y es aplicable a todo tipo de líquidos y regímenes. Finalmente, la fórmula de Chezy-Manning es utilizada usualmente para canales y tuberías de gran diámetro, donde la turbulencia está muy desarrollada. En el presente trabajo se trabajó con la formula de Darcy- Weisbach.



2.7 Fundamentos Económicos

La evaluación económica de un proyecto es una etapa muy importante, en la cual generalmente se deben tomar decisiones críticas para el proyecto, debido a que involucran cuestiones como: ¿cuánto dinero se invierte en el proyecto?, ¿en cuanto tiempo se recupera el dinero que se invierte? y ¿qué ganancia se obtiene por invertir en este proyecto?.

2.7.1 Proceso de toma de decisiones económicas.

De manera general para la toma de decisión de la inversión correcta, es necesario determinar todos los costos e inversiones, flujos de efectivo esperados del proyecto y seleccionar adecuadamente la tasa de rendimiento que se desea ganar.

Cuando no hay ingresos originados por una inversión, los beneficios se asocian a los posibles ahorros de costos entre la alternativa de seguir con la situación existente (sin proyecto) y la situación con proyecto (SAPAG, 1997).

Generalmente como tasa de rendimiento se utiliza la denominada TREMA (tasa de recuperación mínima atractiva).

La TREMA se puede estimar como:

$$\text{TREMA} = \text{inflación} + \text{riesgo}$$

donde:



Inflación. Se considera para que el dinero del inversionista no pierda poder adquisitivo. En este trabajo se utiliza 7%, tasa estimada conforme a los instrumentos de inversión gubernamentales.

Riesgo. Se denomina así esta tasa debido al riesgo que corre el dinero en la inversión. Se considera para este caso una inversión de bajo riesgo porque se garantizan los beneficios para el inversionista, por lo que de acuerdo a la bibliografía consultada corresponde a un 5 % (BACA, 2003).

Con base en lo anterior la TREMA que se utiliza para el análisis económico es del 12 %.

Para la toma de decisiones es primordial seguir estas recomendaciones en proyectos de inversión:

- Buscar la mayor ganancia.
- Si el rendimiento esperado en una inversión, es menor que el que se obtendría al invertir en cualquiera de los instrumentos de inversión gubernamentales, según el plazo de su inversión, entonces sería mejor invertir con el gobierno, pues esta es una inversión de riesgo cero.

2.7.2 Métodos de análisis

Para la toma de decisiones se utilizan diferentes métodos de análisis, los que se incluyen en este trabajo son:

VPN

El Valor Presente simplemente significa traer del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente. Para calcularlo, solo se trasladan los flujos de los años futuros al tiempo presente y se le resta la inversión inicial, que ya está en



tiempo presente. Los flujos se descuentan a una tasa correspondiente a la TREMA (BACA,2003).

La ecuación que se utiliza para evaluar el valor presente neto es la siguiente:

$$VPN = S_0 + \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} \quad (20)$$

donde:

VPN = Valor presente neto.

S_0 = Inversión inicial.

S_t = Flujo de efectivo neto del periodo t.

n = Número de períodos de vida del proyecto.

i = Tasa de recuperación mínima atractiva.

Se espera que el resultado de este análisis sea un valor del VPN positivo, esto significa que habrá ganancia más allá de haber recuperado el dinero invertido. Por el contrario, si el VPN es negativo, las ganancias no serían suficientes para recuperar el dinero invertido.

La desventaja que presenta este método de análisis es que considera que los flujos de efectivo se reinvierten totalmente.

TIR

La tasa interna de retorno (TIR) está definida como la tasa de interés que reduce a cero el valor presente, es decir, la tasa de rendimiento de una propuesta de inversión, es aquella tasa de interés i^* que satisface la siguiente ecuación:

$$\sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+i^*)^t} = 0 \quad (21)$$



La evaluación de los proyectos de inversión cuando se hace con base en la TIR, toman como referencia la TREMA. Si la TIR es mayor que la TREMA, el proyecto se debe aceptar pues estima un rendimiento mayor al mínimo requerido. Por el contrario, si la TIR es menor que la TREMA, el proyecto se debe rechazar pues estima un rendimiento menor al mínimo requerido.

Al igual que el VPN tiene la desventaja de considerar los flujos de efectivo se reinvierten totalmente.

PRI

El periodo de recuperación (PRI) es el número de años que tomará el proyecto para recuperar la inversión inicial.

Para calcular el PRI se utiliza un método de interpolación entre los valores de VPN negativo y el VPN positivo.

La desventaja que presenta este método es que sólo considera los flujos de efectivo hasta el periodo de recuperación.

A continuación se hace una descripción de cada uno de los conceptos utilizados en la etapa económica para determinar la alternativa más rentable.

Costo variable de producción. Se denominan de esta manera porque dependen del volumen de producción, este concepto engloba el costo de materia prima, de químicos y de servicios auxiliares.

Costo de materia prima. Costo asociado al aumento de flujo del sistema hidráulico lo que representa un incremento en el agua de repuesto en la torre de enfriamiento.



Costo de químicos. Este costo se compone del consumo de cloro, ácido sulfúrico y otros químicos necesarios para inhibir el crecimiento biológico y estabilizar el pH del agua de enfriamiento.

Costo de servicios auxiliares. Considera el consumo de energía eléctrica.

Costos de operación. Son los relacionados con el costo del mantenimiento (material y mano de obra).

Gasto fijo. Son los desembolsos que no se recuperan, se denominan fijos debido que no depende de la producción. En este sector se involucran factores como seguros por los equipos, así como impuestos generados por el financiamiento del proyecto.

Depreciación. Se debe a la pérdida del valor de los activos tangibles (equipo, vehículos, edificaciones y maquinaria), debido a la edad, uso y obsolescencia durante su vida útil. Aunque un activo puede estar en excelente condición de trabajo, el hecho de que valga menos a través del tiempo se considera en los estudios de evaluación económica (LELAND,1999).



Capítulo 3. Metodología

3.1 Caso de estudio

3.1.1 Descripción de la torre de enfriamiento de estudio.

La torre de enfriamiento en estudio en el presente trabajo es de tiro inducido de tipo de flujo cruzado, consta de 6 celdas de una capacidad de 10,000 GPM por cada celda. La estructura principal de la torre está construida de madera. Las características principales de diseño de la torre se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características principales de diseño.

Torre	Capacidad de Diseño (GPM)	Características
CT-00	60000	Marca: Marley Tipo: Doble Flujo Cruzado Material: Madera Número de celdas: 6 T(°C) ^a AC/AF/BH: 44.2/32.2/27.8 Pérdida (%) por Arrastre: 0.003 Motores Número/Potencia: 6/125 HP Ventiladores Núm/Tipo/Diámetro: 6/Flujo cruzado/9.1m Reductores Núm/Relación Vel.: 8/13:1

^a AC: Agua caliente; AF: Agua Fría; BH: Bulbo Húmedo

3.1.2 Situación y operación actual

La torre de enfriamiento opera de la siguiente manera:

- ❖ Flujo de suministro: 48,384 GPM
- ❖ Flujo de retorno: 46,844 GPM
- ❖ Temperatura de agua fría: 30.40 °C
- ❖ Temperatura de agua caliente: 39.58 °C



- ❖ Temperatura de bulbo seco: 26.75 °C
- ❖ Temperatura de bulbo húmedo: 24.30 °C
- ❖ Intervalo de temperatura: 9.20 °C
- ❖ Ventiladores: 5 operando, 1 disponible (celda D)

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados de la medición de flujo en los disparos a plantas usuarias y la Figura 3.1 presenta el porcentaje de distribución por planta usuaria.

Tabla 3.2. Flujos en disparo a plantas.

Punto	Flujo (GPM)
U-200	1,321
FCC-F8	4,655
FCC-F7	4,669
FCC-G8	7,129
FCC-FE1A	7,980
FCC-FE2A	8,143
P5-CS1	1,202
P2-CS2	1,480
P2-EA	6,480
P5-EA100	1,807
Prepa3	3,519
Total	48,385

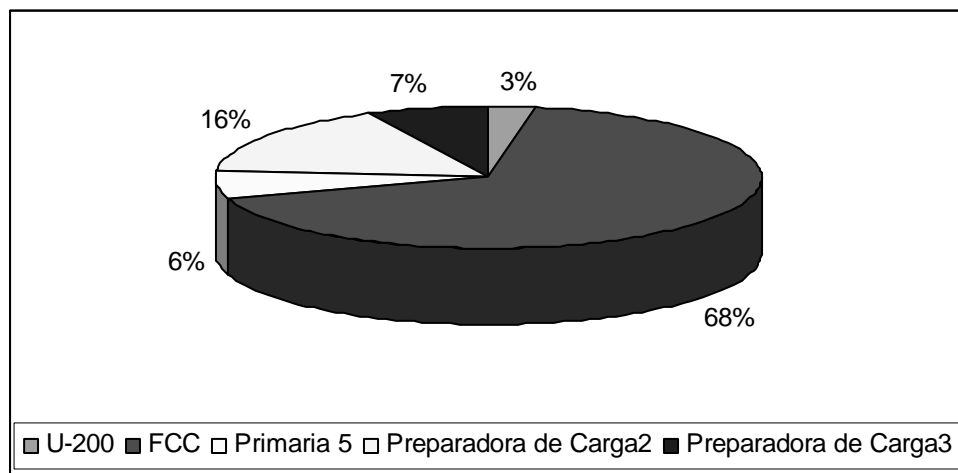


Figura 3.1. Distribución de agua de enfriamiento a plantas usuarias.

En la figura anterior se puede observar que la torre de enfriamiento brinda servicio principalmente a la planta F.C.C. con un 68 % del flujo de agua.



3.1.2.1 Temperaturas de la torre de enfriamiento

Se tomaron lecturas de las temperaturas de entrada y salida del agua en la torre de enfriamiento, así como valores de temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco en el sitio, la Tabla 3.3 muestra los valores promedio de estas mediciones.

Tabla 3.3. Temperaturas promedio de la torre.

Día	Temperatura agua fría (°C)	Temperatura agua caliente (°C)	Temperatura bulbo seco (°C)	Temperatura bulbo húmedo (°C)	Intervalo (°C)
Día 1	30.83	39.83	26.67	24.25	9.00
Día 2	30.42	39.17	25.83	23.83	8.75
Día 3	30.33	39.92	26.23	24.25	9.58
Día 4	30.00	39.42	28.25	25.00	9.42
Promedio	30.40	39.58	26.75	24.33	9.19

A partir de los valores medidos se determinó que el intervalo promedio de temperatura con el que actualmente opera la torre es aproximadamente de 9° C.

De manera complementaria se tomaron flujos en los cabezales de retorno y las temperaturas de agua fría y caliente de cada celda, los resultados se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Flujos y temperaturas de agua fría y caliente por celda.

Celda	Flujo GPM	Temperatura agua fría (°C)	Temperatura agua caliente (°C)
A	1,0412	31.2	39.3
B	7,033	28.6	39.4
C	6,645	28.2	39.2
D	9,720	34.6	39.0
E	7,659	28.8	39.1
F	5,376	28.4	38.9



3.1.2.2 Sistema de bombeo

El sistema de bombeo de este caso de estudio cuenta con cinco bombas tipo vertical de una etapa, conectadas en un arreglo en paralelo (BA-00A, BA-00B, BA-00C, BA-00D, BA-00E). Actualmente se tienen operando tres bombas con capacidad nominal de 20000 GPM y 175 ft de carga dinámica y una eficiencia de 85 %, reportado por el proveedor del equipo, en la curva característica. Cabe mencionar que las bombas BA-00B, BA-00D, BA-00E, (bombas en actualmente en operación) son accionadas con motores eléctricos con una capacidad de 1000 HP nominal y un factor de servicio de 1.5, la bomba BA-00A, tiene un accionamiento a través de una turbina de vapor.

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la curva de característica de estas bombas.

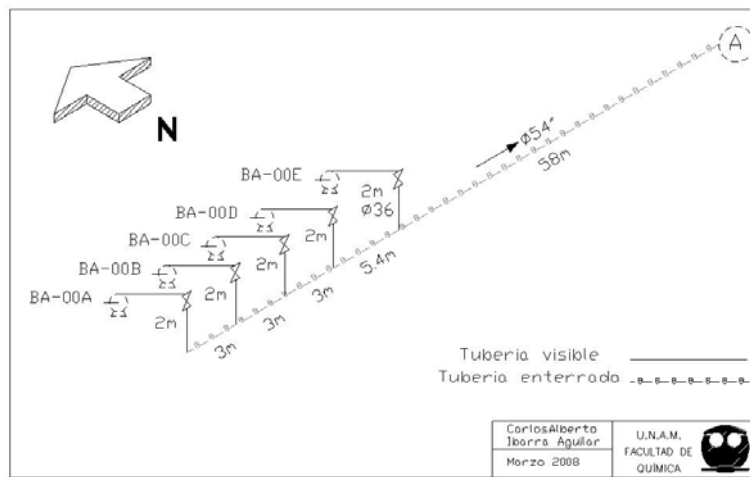


3.1.3 Red de enfriamiento

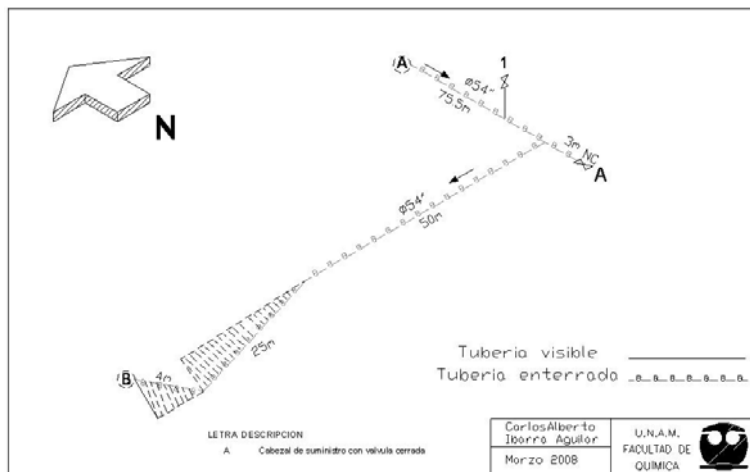
La red de distribución está constituido por un cabezal de distribución de 54 pulgadas de diámetro, la mayor parte de la red está enterrada, presenta disparos a las plantas F.C.C., Primaria 5, Isomerización y las Preparadoras de carga 2 y 3.

Para un mejor entendimiento del estado de la red de distribución, fue dividida en 6 partes:

a) Sistema de bombeo

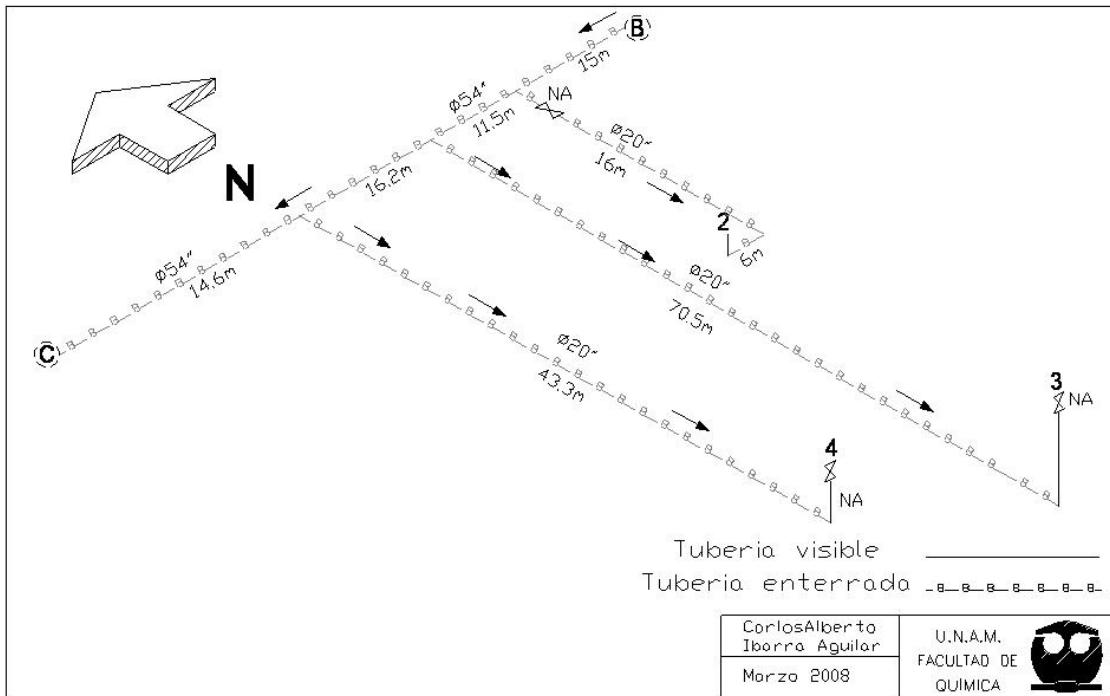


b) Suministro a planta de isomerización

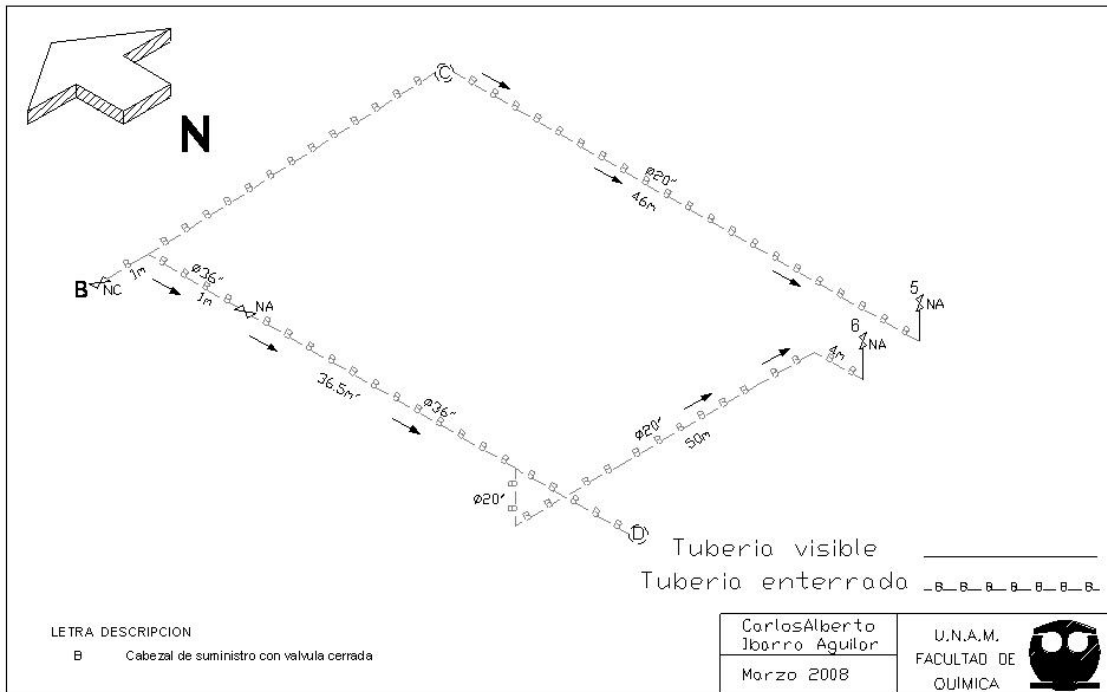




c) Primera sección de suministros a la planta F.C.C

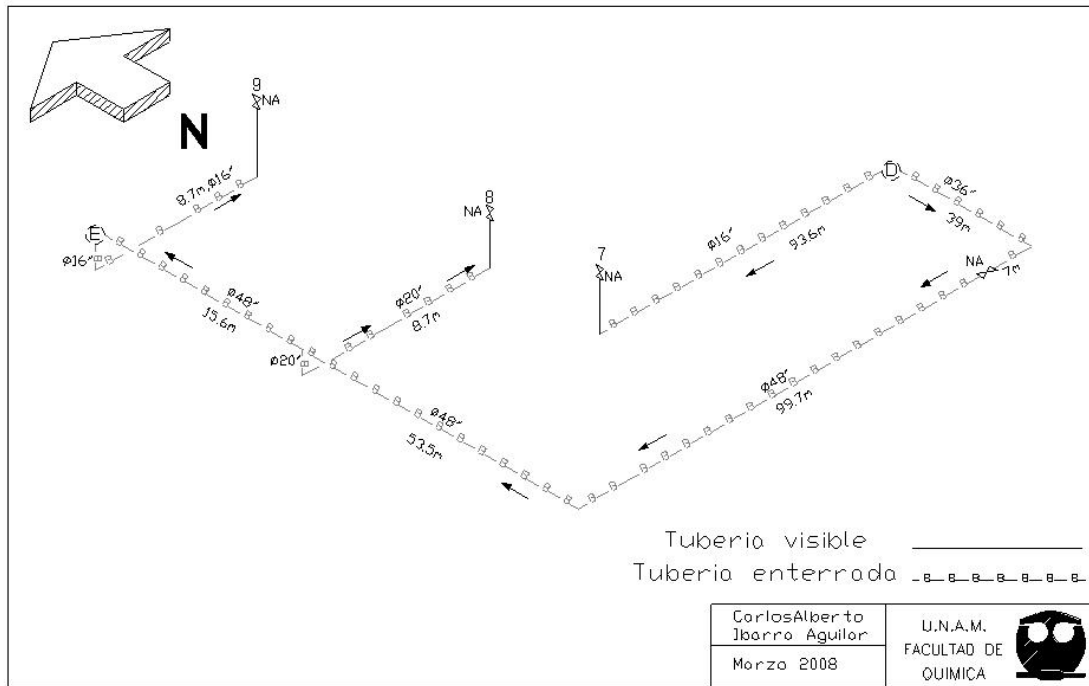


d) Segunda sección de suministros a la planta F.C.C

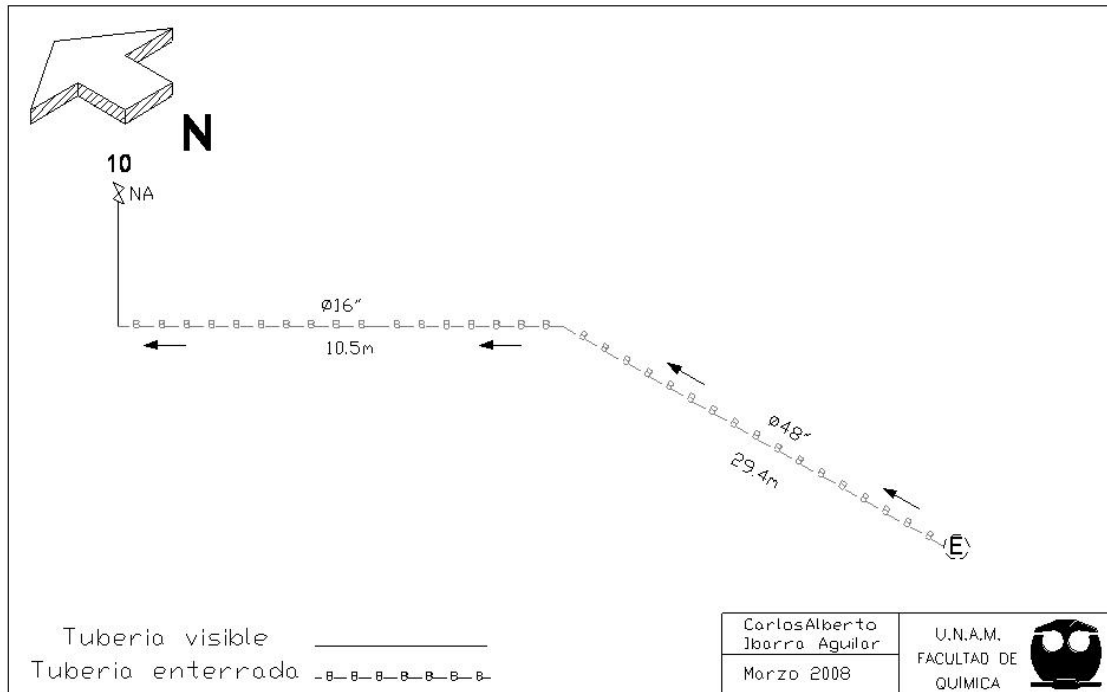




e) Suministros a planta preparadora de carga 2 y primaria 5



f) Suministro a planta preparadora de carga 3





En la Tabla 3.5 se describe a que plantas usuarias corresponden los disparos.

Tabla 3.5. Relación de disparos con plantas y equipos usuarios.

Disparo	Planta	Equipos	ID de simulación
1	Isomerización	-	U-200
2	FCC	F8	FCC-F8
3	FCC	F7	FCC-F7
4	FCC	G8	FCC-G8
5	FCC	FE1A	FCC-FE1A
6	FCC	FE2A	FCC-FE2A
7	Primaria 5	CS1	P5-CS1
8	Preparadora de carga 2	CS2	P2-CS2
	Preparadora de carga 2	EA	P2-EA
9	Primaria 5	EA100	P5-EA100
10	Preparadora de carga 3	-	Prepa3



Para realizar un diagnóstico del funcionamiento de una torre de enfriamiento en una refinería y de su red de distribución de agua se implementó un programa de actividades, el cual se presenta en la Figura 3.2.

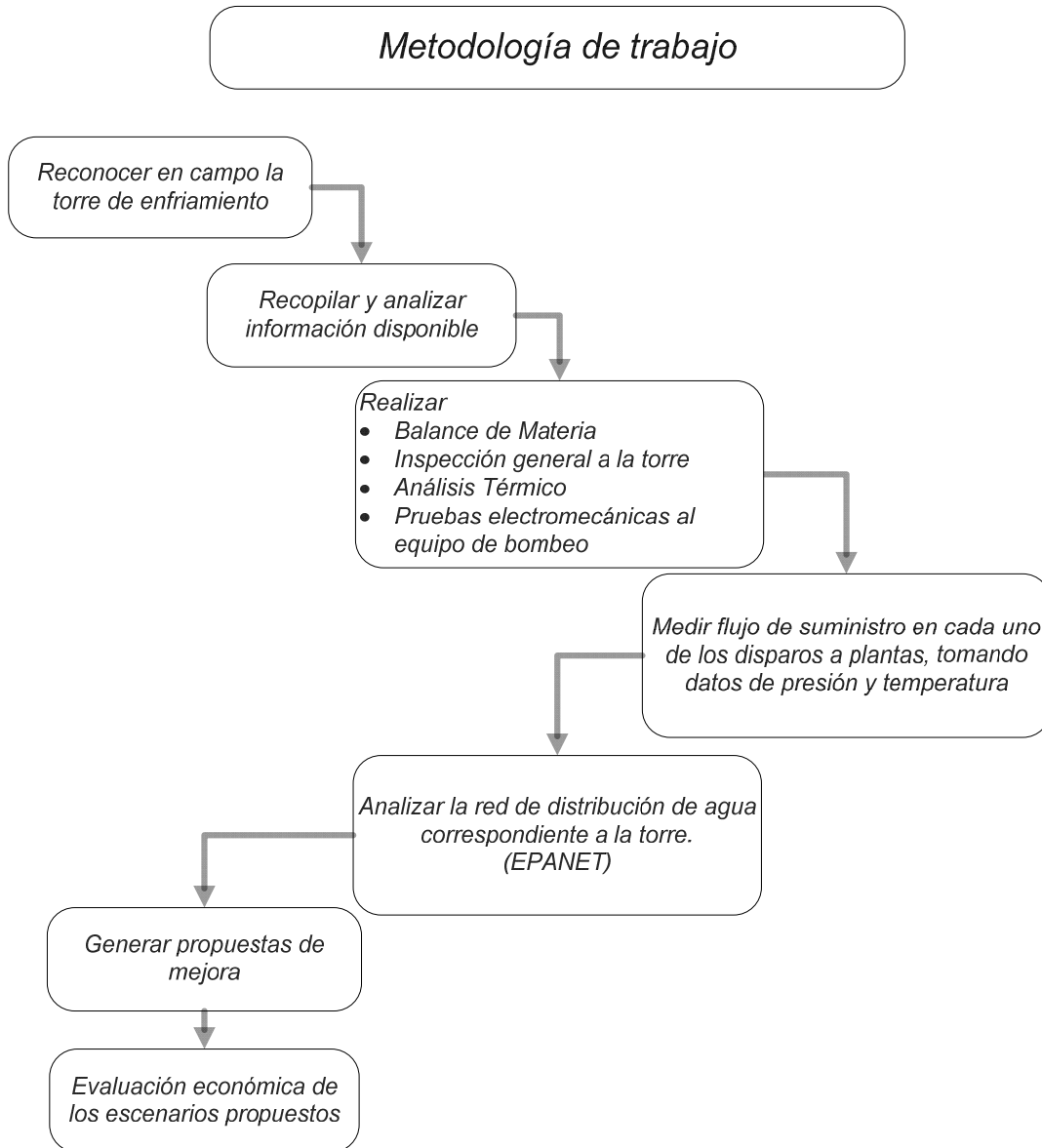


Figura 3.2. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.



En seguida se describe brevemente cada punto de la metodología.

Reconocimiento de la torre de enfriamiento en campo.

Visitar y reconocer en campo la torre de enfriamiento, así como los circuitos de suministro de agua de enfriamiento a las plantas usuarias, identificando los puntos de suministro.

Recopilar y analizar información disponible.

La recopilación de información de la torre de enfriamiento, consiste en la búsqueda de documentos en la biblioteca de la Refinería y la solicitud de información a personal de la Refinería como por ejemplo la hoja de datos de diseño de la torre, curva de operación de las bombas del sistema de bombeo, trayectoria de la red de distribución de agua, entre algunos otros documentos.

Realizar una inspección general a la torre y un análisis térmico.

Consiste en efectuar una inspección visual al equipo, evaluando el estado de los siguientes componentes de una torre de enfriamiento: estructura general, persianas, empaque, eliminadores de arrastre, sistemas de distribución, válvulas de retorno, tinas de agua caliente y la instrumentación en los cabezales de suministro y retorno. Mientras en un análisis térmico por medio de las temperaturas de bulbo húmedo, temperatura de agua caliente y fría, determinar la cantidad de calor que disipa la torre y la eficiencia de la misma.



Medición de flujos.

Actividad mediante la cual se conoce la cantidad de agua de enfriamiento suministrada a cada planta usuaria, así como el flujo de descarga de cada bomba.

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se describe la metodología para realizar la medición.

Analizar la red de distribución de agua correspondiente a la torre (EPANET).

Mediante un software especializado en cálculo hidráulico (*EPANET*), analizar la red de suministro de agua de enfriamiento, determinando los puntos críticos de caída de presión en cada una de las plantas.

Generar propuestas de mejora.

Generar posibles escenarios de cambios hidráulicos o mejoras en el sistema de distribución de agua de enfriamiento, de acuerdo al análisis de las actividades anteriores.

Evaluación económica de los escenarios propuestos.

Con base en el análisis de propuestas técnicas de mejora del sistema de distribución de agua de enfriamiento, se presenta una estimación de costos de las propuestas técnicas.

A continuación se describen los procedimientos principales que se llevaron a cabo para realizar el diagnóstico de la torre de enfriamiento y su red de distribución.



3.2 Inspección Física

Se realiza una inspección visual considerando los siguientes aspectos en cada parte de la torre.

Estructura general

La estructura incluye: diagonales, trabes, vigas y soportes. En el caso de torres de madera buscar muestras de deterioro, incluyendo grietas, fracturas, pudrimiento en todos los elementos de madera. Buscar fugas de aire, cuanto más cerca estén las fugas de la parte superior de la torre más perjudicial es el efecto (*WILLA, 2005*).

Persianas

Revisar que las persianas estén debidamente colocadas en los soportes, buscar cualquier daño en las persianas como: putrefacción en madera. Observar si hay crecimiento biológico excesivo. Revisar los soportes de las persianas.

Empaque

Revisar la caída de agua si es tipo lluvia o en chorros, buscar piezas pandeadas, rotas o piezas que tengan diferente tamaño con respecto a las demás, buscar también piezas caídas o mal colocadas.

El empaque más utilizado y antiguo (diseñado hace 70 años) es el de tipo salpiqueo son fáciles de limpiar y generalmente son de PVC (*BURGER,2000*).



Eliminadores

Revisar que el eliminador esté correctamente instalado y que no tenga muestras de incrustación.

Ventiladores

Observar que no tenga aspas rotas o fracturadas, buscar señas de corrosión o incrustación.

Conos Venturi

Revisar las condiciones generales del material, particularmente en las partes de acero y soldaduras del cono, revisar las condiciones de los ensamblajes y tornillería que sujeta al cono con la torre. Buscar cualquier fuga de aire entre las piezas que conforman el cono.

Sistema de distribución

En las tinajas de agua caliente observar el daño en las partes de madera, buscar fugas entre las tinajas colindantes, mientras en las boquillas de distribución comprobar que no se encuentren tapados y que no muestren desgaste en la parte interna, en caso de requerirse desmontar la boquilla para buscar obstáculos en su interior. Comprobar que las boquillas estén correctamente ensambladas al bacín de agua caliente para evitar que el agua pase en chorros.

Si el 5 al 10 % de las boquillas están tapadas puede causar un aumento en el nivel de agua (WILLA, 2005).



Instrumentación en los cabezales de suministro y retorno

Localizar la instrumentación de cabezales y accesibilidad para tomar las lecturas, observar el estado en que se encuentra la instrumentación.

3.3 Evaluación térmica

Para llevar a cabo una evaluación térmica como primer paso se tomaron las temperaturas de la manera descrita en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Procedimiento para medir temperaturas.

Temperatura	Instrumento de medición	Lugar de medición
Agua caliente	Termómetro de cristal con mercurio	Tina de agua caliente
Agua fría	Termómetro de cristal con mercurio	Bacín de agua fría
Bulbo seco	Termómetro de cristal con mercurio	Se tomó la lectura a una distancia aproximadamente de 1.20 m de la celda.
Bulbo Húmedo	Psicrómetro	Se tomó la lectura a una distancia aproximadamente de 1.20 m de la celda.

Además de las temperaturas anteriormente mencionadas es necesario medir los flujos de suministro y retorno de agua de enfriamiento, así como los flujos en los cabezales de retorno para realizar un análisis de calor disipado por celda.

Con esta información se realizó el cálculo de la disipación de calor y la eficiencia térmica.

Para calcular la capacidad de enfriamiento se utilizó el simulador **CTI Toolkit, Ver. 3.0b** del *Cooling Technology Institute*, el cual requiere datos de diseño y prueba.



El procedimiento que se llevo a cabo es el siguiente:

- ◆ Se seleccionó el apéndice precargado del simulador para torres de enfriamiento de una capacidad aproximada de 60,000GPM.
- ◆ Se alimentó al simulador los datos de diseño de la torre de enfriamiento a la cual se calcula su capacidad.
- ◆ Se alimentó al simulador los resultados de la prueba realizada a la torre como la temperatura de agua caliente y fría, temperatura de bulbo húmedo y seco.

De manera complementaria se calculó el calor disipado por cada celda utilizando la ecuación 15. Se compararon los resultados entre celdas para analizar su desempeño.

3.4 Estudio hidráulico

3.4.1 Sistema de bombeo

Para analizar el sistema de bombeo se realizaron las siguientes actividades.

Se tomó lecturas de presión de los manómetros colocados en las descargas de bombas.

Se realizó la medición de las RPM de la bomba, para ello se utilizó un tacómetro mecánico acoplado en el perímetro de la flecha.

Se midió la corriente y voltaje. Las lecturas se tomaron de los displays conectados a los buses en la sub-estación debido a condiciones operativas, ya que los motores de las bombas no pudieron ser acondicionados para medir de forma directa la corriente y el voltaje.



Se midió el flujo de descarga de cada bomba.

Con el valor de flujo y con el apoyo de la curva de la bomba se obtienen características básicas como carga total y eficiencia de operación actual.

Se calcularon los términos potencia de accionamiento (P_{am}), potencia hidráulica (WHP) y potencia en la flecha (BHP).

Por ultimo se realizó un análisis entre los datos obtenidos.

3.4.2 Red de distribución

La simulación hidráulica de la red de distribución de agua de enfriamiento se realizó con base en la siguiente información:

- Diagramas isométricos de la red de distribución de agua de agua de enfriamiento.
- Presión en los puntos de suministro.
- Flujo volumétrico (GPM) en cada punto de suministro de las plantas usuarias del servicio de enfriamiento.
- Flujo volumétrico de descarga de cada bomba (GPM).

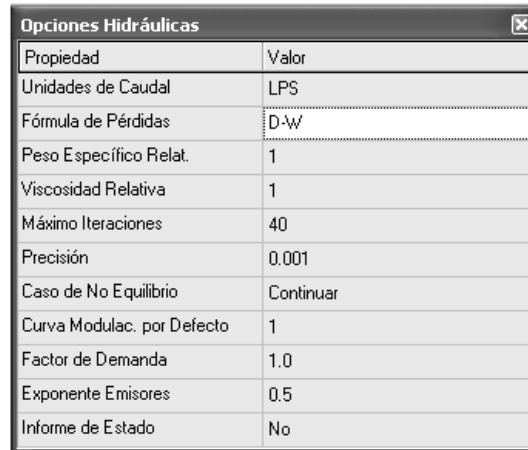
Se definió el sistema de unidades que se van a suministrar al programa. Para realizar este trabajo se utilizaron las unidades incluidas en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Sistema de unidades utilizado en la simulación.

Magnitud	Unidades
Flujo	Litros por segundo (LPS)
Presión	Metros de columna de agua (m)
Longitud	Metros (m)
Diámetro	Milímetros (mm)
Potencia	Kilowatts (kW)



Adicionalmente, se estableció la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo de caída de presión en tuberías, dentro de las opciones hidráulicas del programa EPANET, que se muestra en la Figura 3.3.



Propiedad	Valor
Unidades de Caudal	LPS
Fórmula de Pérdidas	D-W
Peso Específico Relat.	1
Viscosidad Relativa	1
Máximo Iteraciones	40
Precisión	0.001
Caso de No Equilibrio	Continuar
Curva Modulac. por Defecto	1
Factor de Demanda	1.0
Exponente Emisores	0.5
Informe de Estado	No

Figura 3.3. Opciones hidráulicas de EPANET.

Para las secciones de tubería, se suministraron datos al programa EPANET:

Longitud: Suma total de las longitudes horizontales y verticales que recorre cada sección de tubería hasta los puntos en los que se une, divide, cambia de diámetro o entrega flujo a los bancos de intercambiadores de calor.

Diámetro: Este dato corresponde al diámetro interno nominal de cada sección de tubería (mm).

Estado: Como opción predeterminada, todas las secciones de tubo tienen esta opción en abierto, si se precisa puede cambiarse a cerrado para representar una modificación operativa en la que no circule agua por una sección de la red.

Coefficiente de pérdidas: Este dato representa las pérdidas adicionales causadas por la presencia de accesorios como válvulas, codos y tes.



EPANET, asigna a cada tubería un número de identificación (ID), así como el nudo donde inicia y el nudo donde finaliza cada sección (Figura 3.4).

Propiedad	Valor
*ID Tubería	11
*Nudo Inicial	13
*Nudo Final	14
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	3
*Diámetro	1371.6
*Rugosidad	0.1
Coef. Pérdidas Menores	0
Estado Inicial	Abierta
Coef. Reacción en el Medio	
Coef. Reacción en la Pared	
Caudal	1111.98
Velocidad	0.75
Pérdida Unitaria	0.28
Factor Fricción	0.013
Velocidad de Reacción	0.00
Calidad	0.00
Estado	Abierta

Figura 3.4. Datos suministrados para cada sección de tubería.

En la figura anterior, también se muestran en la sección inferior, los datos que el programa calcula para cada sección de tubería.

Para cada nudo de la red, se suministraron como dato al programa EPANET:

Coordenadas: Posición en el diagrama de simulación (Asignado automáticamente por el programa)

ID: Nombre de cada nudo: En aquellos puntos en los que el nudo corresponde a la entrada o salida de un intercambiador, el ID es el nombre del intercambiador.

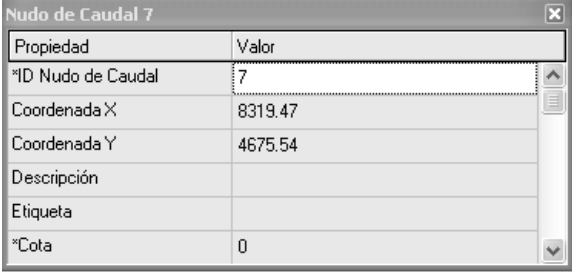
Elevación: Altura de cada nudo respecto al nivel del piso.

Demanda base: Este dato especifica el flujo (LPS) que se entrega a cada equipo de intercambio de calor. Aquellos nudos que sirven sólo de unión o bifurcación de la red, tienen especificada su demanda base igual a cero porque en dichos puntos



no se entrega o recolecta agua de enfriamiento. Para los puntos de descarga de intercambiador, el flujo de retorno se especificó de forma negativa indicando que se trata de agua que es recolectada por la red, en lugar de ser entregada como se describió previamente.

Los parámetros de cada nudo se especifican en EPANET como se muestra en la Figura 3.5.



Propiedad	Valor
*ID Nudo de Caudal	7
Coordenada X	8319.47
Coordenada Y	4675.54
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	0

Figura 3.5. Datos especificados para cada nudo de la red.

Simulación del sistema de bombeo

Se especificaron al programa seis puntos de las curvas de operación de las bombas y el programa en forma automática determina la ecuación que representa la curva de comportamiento de la bomba. Empleando esta fórmula, el programa puede interpolar puntos de comportamiento cabeza-gasto en el intervalo de los puntos suministrados como dato. Sin embargo, a pesar de contar con la ecuación de la curva, el programa no extrapola datos con dicha ecuación, sino que marca una advertencia de que los datos que se le están solicitando están fuera del intervalo válido para dicha curva, en este sentido se tomó la precaución de ingresar datos que cubrieran el intervalo de operación para el caso actual y para las propuestas presentadas posteriormente. La representación de esta curva en la interfase gráfica de EPANET se muestra en la Figura 3.6.

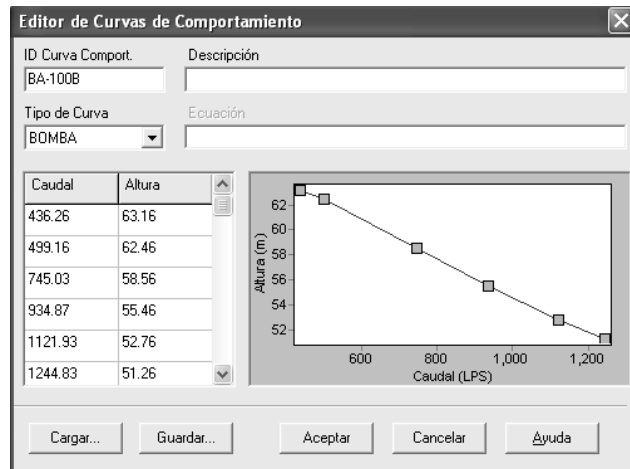


Figura 3.6. Curva de bomba especificada en EPANET.

Al finalizar la red de distribución de agua de enfriamiento y su sistema de bombeo se procedió de la siguiente manera:

En cada punto de entrega de agua de enfriamiento representado en *EPANET* por un nodo, se determinó la demanda base igual al flujo que resultó de las mediciones obtenidas en campo.

En cuanto a la parte de la descarga de bombas se utilizaron “válvulas limitadoras de caudal” y “válvulas sostenedoras de carga” para determinar las condiciones operativas del sistema de bombeo y de la red de distribución.

Del simulador resultan las cargas en los puntos de entrega a planta, con ellos se analiza la red para encontrar puntos desfavorables que puedan ser objeto de mejora. Por último se plantean distintas propuestas de mejora.



3.5 Evaluación económica

Para realizar la evaluación económica se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Se calcula la inversión inicial, la cual en el Caso 1 es: el equipo de re-bombeo nuevo, en el Caso 2 es: la rehabilitación de la bomba y equipo de re-bombeo nuevo y en el Caso 3 es: inversión de 3 bombas nuevas.
- Se calcula el costo variable de producción de acuerdo a los costos obtenidos en la refinería, estos se describen en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Costos variables de producción.

Parámetro		Costo
Agua	Repuesto	\$0.0014 UDS/GAL
Químicos	Cloro	\$0.798 USD/kg
	H ₂ SO ₄	\$0.096 USD/kg
	Tratamiento integral	\$458 USD/kg

- Se estimaron los parámetros necesarios para utilizar los métodos de análisis tomando como referencia los porcentajes de la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Consideraciones porcentuales de parámetros económicos

Parámetro	Porcentaje con respecto a la inversión inicial
Costos de operación	1
Gastos fijos	3
Depreciación	5
Capital de trabajo	4

- Se calculan los ahorros de acuerdo a los precios descritos en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Costo de las fuentes de ahorro.

Parámetro	Costo
Energía eléctrica	\$0.032 USD/kWH
Renta de agua de enfriamiento	\$0.0000688 UDS/GAL



- Con estimados de los costos y los ahorros, se calculan los flujos de efectivo para un periodo de 20 años utilizando Excel, en el año 5,10 y 15 se reinvierte la inversión inicial debido a que se considera que 5 años es el periodo en el que la rehabilitación de una bomba presenta un funcionamiento aceptable.
- Considerando una TREMA del 12 % se calcula el VPN.
- El TIR se calcula utilizando Excel, el cual requiere los flujos de efectivo durante el periodo del proyecto.

Por ultimo se utiliza el método de interpolación para calcular el PRI, tomando los valores de referencia del VPN negativo y el inmediato VPN positivo.



Capítulo 4. Resultados y Discusión

4.1 Análisis físico y térmico de la torre de enfriamiento

Para el diagnóstico de la torre de enfriamiento como primer paso se realizó un balance de materia para un conocimiento general de las condiciones de operación de la torre de enfriamiento

4.1.1 Balance de materia

Con las ecuaciones descritas en la sección 2.4.2 se obtiene el balance de materia, los resultados se muestran en la Tabla 4.1 para la operación actual.

Tabla 4.1. Balance de materia de la torre de enfriamiento.

CONCEPTO	PARAMETRO	VALOR	UNIDADES	VALOR	UNIDADES
Temperatura caliente	TAC	103.24	°F	39.57	° C
Temperatura fría	TAF	86.72	°F	30.40	° C
Temperatura bulbo seco	TBS	80.15	°F	26.75	° C
Temperatura bulbo húmedo	TBH	75.79	°F	24.32	° C
Recirculación	R _p	48,384	GPM	3.0525	m ³ /s
Ciclos de concentración	C	3	-	3	-
Evaporación	$E = 0.001 * R_p * (TAC - TAF)$	799	GPM	0.0504	m ³ /s
Arrastre	$D = 0.003 * R_p$	145	GPM	0.0091	m ³ /s
Purga	$B = (E/C - 1) - D$	254	GPM	0.0160	m ³ /s
Repuesto	$M = E + D + B$	1,199	GPM	0.0756	m ³ /s

Como se indica en la tabla anterior el consumo de agua de repuesto es de 1199 GPM, representa un 2.5 % del flujo de recirculación.



4.1.2 Inspección Física

El estado de la torre de enfriamiento se encontró como se describe a continuación:

Estructura general

La estructura principal de la torre de enfriamiento es de madera, las paredes están construidas de láminas de asbesto, Ésta ultima del lado oriente presenta una ligera fuga, debido a la cual aparece una coloración verde sobre la lámina indicativo de presencia de algas. La escalera lado Este, también es de madera y no presenta daños visibles.

El techo de la torre presenta zonas con fisura en la madera y mal acoplamiento existe un notable hundimiento entre conos venturi de celda C y D. En resumen el techo está en condiciones tolerables.

Las puertas de acceso se encuentran en mal estado, caídas, oxidadas, lo que provoca que haya fugas de aire. La puerta de lado poniente, está completamente desoldada.

En lo que se refiere a la estructura interna, visualmente no se aprecian problemas mayores, los pasillos internos son de madera y no tiene barandales, estos pasillos son muy resbalosos debido a la excesiva incrustación y algunas zonas presentan acumulación de lodo.

En general la estructura exterior e interior no muestra señales de daños importantes que afecten la operación de la torre.



Persianas

Las persianas presentan pequeñas rupturas, grados de desgaste avanzados, mal acomodo, persianas faltantes y persianas substituidas.

Cada celda, por lado tiene un total de 90 persianas, en una evaluación global del estado de las persianas el 3.3 % están dañadas.

Las persianas no presentan un daño significativo debido a que los daños son mínimos, por lo que se describe su estado actual como aceptable.

Empaque

Es de PVC de alta eficiencia, se encontró en buenas condiciones aparentes, no presenta mal acomodo. Sin embargo se hallaron pequeños pedazos de bolsas de plástico en los empaques de las celdas A y E que disminuye el área de contacto aire – agua.

Eliminadores de arrastre

Los eliminadores de niebla de todas las celdas presentan incrustaciones notables, no existen rupturas visibles, existe una malformación en un eliminador su estado general es aceptable.

Ventiladores y Conos Venturi

La inspección física de los ventiladores, se llevó a cabo conforme a las condiciones constructivas y operativas lo permitieron, debido a que no existe acceso, ni mirilla al interior, no se verificó ni el estado de los ventiladores ni de los variadores de velocidad. Las observaciones se registraron en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2. Inspección física de ventiladores y conos Venturi.**

Celda	Ventilador Observaciones	Cono Venturi Observaciones
A	Operando, niveles de ruido y vibración normales	Tornillos de sujeción de chimenea dañados, corroídos o falta de ellos
B	Operando, niveles de ruido y vibración normales	Tornillos de sujeción de chimenea completamente corroídos
C	Operando, vibración excesiva	Tornillos de sujeción de chimenea completamente oxidados
D	Disponible	Tornillos de sujeción de chimenea completamente oxidados
E	Operando, niveles de ruido y vibración normales	Tornillos de sujeción de chimenea completamente oxidados
F	Operando, niveles de ruido y vibración normales	Tornillos de sujeción de chimenea completamente oxidados

*Sistema de distribución.**Válvulas de retorno*

Las válvulas en general se encontraron en buen estado, con diferentes porcentajes de apertura por celda, el resultado se describe en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Inspección de las válvulas de retorno.

Celda	Porcentaje de apertura de Válvula	Condición de la válvula	Flujo GPM
A	100	Operable	10,412
B	90	Operable	7,033
C	70	Operable	6,645
D	48	Operable	9,720
E	60	Operable	7,659
F	25	Sellada en esa apertura	5,376



Tina de agua caliente

En la Tabla 4.4 se indica la condición de las tinas de agua caliente de las celdas de la torre.

Tabla 4.4. Inspección de las tinas de agua caliente.

Celda	Lado	Apertura del disco de descarga (%)	Profundidad del líquido (pulgadas)	Caja de distribución	Observaciones
A	Norte	20	13	Completa y desalineada	No presenta sedimentación
	Sur	35	4	Completa y alineada	No presenta sedimentación
B	Norte	35	4	Completa y alineada	Incrustación en orificios de distribución
	Sur	30	4	Completa y alineada	Incrustación en orificios de distribución
C	Norte	20	3	Completa y alineada	No presenta sedimentación ni incrustaciones
	Sur	40	5	Completa y alineada	No presenta sedimentación ni incrustaciones
D	Norte	40	11	Desprendida	Presenta sedimentación e incrustaciones, también se observa desbordamiento a celdas laterales
	Sur	30	13	No es la adecuada	Presenta sedimentación y incrustaciones
E	Norte	30	13	Completa y alineada	Presenta sedimentación
	Sur	30	13	Daños	Presenta sedimentación e incrustaciones
F	Norte	25	4	Completa	Presenta boquillas obstruidas por sedimentación
	Sur	25	1	Completa	Presenta boquillas obstruidas por sedimentación



Línea de repuesto

La línea de agua de repuesto presenta excesiva oxidación y las válvulas presentan las mismas condiciones, difíciles de operar.

Instrumentación en los cabezales de suministro y retorno

Los cabezales de suministro y de retorno están en el subsuelo, son tuberías de 54" de diámetro en promedio, con variaciones de 48 y 36 ", los registros físicos donde se localizan la instrumentación, para la medición de flujo están en su mayoría inundados, lo que provoca que los transductores estén oxidados o completamente destruidos, quedando inoperables y sin registro del flujo a través del cabezal.

En resumen la torre de enfriamiento se encuentra en buenas condiciones requiriendo un mantenimiento preventivo general y mantenimiento correctivo en algunas de sus válvulas, sin embargo es necesario tener la torre de enfriamiento en las mejores condiciones posibles.

Es necesaria la rehabilitación del sistema de distribución de las tinas de agua caliente pues presentan una distribución altamente turbulenta, lo que produce desbordamientos a las celdas laterales y dificulta la succión a la torre, disminuyendo el área de transferencia.



4.1.3 Evaluación térmica

Como ya se había mencionado en el capítulo 2 la evaluación térmica incluye el cálculo de disipación de calor, la determinación de la eficiencia térmica y la capacidad de enfriamiento.

Cálculo de disipación de calor

Para la condición de diseño.

Datos

$$R_D = 60000 \text{ GPM}$$

$$T_{AC} = 111.6 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{AF} = 90 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$C_p = 1$$

$$Q_D = R_D \cdot (T_{AC} - T_{AF}) \cdot C_p \cdot 8.35$$

$$Q_D = 10821600 \frac{\text{BTU}}{\text{min}}$$

Para la situación de prueba.

Datos

$$R_p = 48384 \text{ GPM}$$

$$T_{AC} = 103.24 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{AF} = 86.72 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$C_p = 1$$

$$Q_p = R_p \cdot (T_{AC} - T_{AF}) \cdot C_p \cdot 8.35$$

$$Q_p = 6674185.72 \frac{\text{BTU}}{\text{min}}$$



Determinación de la eficiencia Térmica

$$E_T = \frac{Q_P}{Q_D}$$

$$E_T = 61.7 \%$$

Determinación de la capacidad de enfriamiento.

Con el simulador **CTI Toolkit, Ver. 3.0b** del *Cooling Technology Institute*, se determinó una capacidad de enfriamiento del 65.67 %, en la Figura 4.1 se muestra este resultado.

The screenshot shows the 'Cooling Technology Institute' software interface. The 'Test Results' section is active, displaying a comparison between 'Design' and 'Test' data. The 'Tower Type' is set to 'Induced'. The 'Tower Capability' is shown as 65.67%.

	Design	Test	Units
Water Flow Rate:	3785.4	3052.6	l/s
Hot Water Temp.:	44.2	39.58	°C
Cold Water Temp.:	32.2	30.4	°C
Wet Bulb Temp.:	27.8	24.33	°C
Dry Bulb Temp.:	40	26.75	°C
Fan Driver Power:	74.57	75.57	kW
Barometric Press.:	101.325	101.325	kPa
Liquid to Gas Ratio:	2	1.5433	

Adj. Flow: 3072.2 l/s Pred. Flow: 4678 l/s Tower Capability: 65.67 %
Cold Water Temp. Deviation: 2.66 °C

Figura 4.1. Resultado capacidad de enfriamiento (CTI Toolkit, Ver. 3.0b).



El porcentaje resultante multiplicado por el flujo de diseño, representa la cantidad de agua que se está enfriando al intervalo de diseño de la torre.

$$\text{Porcentaje CTI} = 65.67$$

$$R_D = 60000 \text{ GPM}$$

$$Q_C = \frac{\text{Porcentaje CTI}}{100} \cdot R_D$$

$$Q_C = 39402 \text{ GPM}$$

La capacidad de enfriamiento es aceptable primordialmente porque cumple con la demanda térmica requerida, no obstante muestra que la torre es susceptible de optimizar su operación. Debido al tiempo de operación que tiene la torre sería conveniente que la capacidad estuviera aproximadamente en 80%.

El informe completo de la simulación se encuentra en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** del presente trabajo.

El CTI (Cooling Technology Institute) recomienda una variación de +/- 20 % para el intervalo de temperatura. La torre de enfriamiento estudiada en el presente trabajo tiene un intervalo de temperatura 24 % menor con respecto al de diseño (9.2 ° C), lo cual indica que el proceso de transferencia de calor no es el más adecuado.

Eficiencia térmica actual de las celdas

La eficiencia actual de cada una de las celdas de la torre de enfriamiento se puede determinar con los datos de flujo y temperaturas promedio obtenidos en los 4 días de mediciones en la torre. Por lo que se calcula la energía que se disipa por celda y se compara con el calor disipado de diseño. En la Tabla 4.5 se muestran las eficiencias obtenidas para las seis celdas con los datos de flujo y temperaturas medidos en campo, así como el calor que se disipa actualmente, comparándolo con el que marca el diseño por celda.

**Tabla 4.5. Eficiencia por celda de la torre.**

Celda TAG	Agua Fría Temp. (°C)	Agua Caliente Temp. (°C)	Flujo (GPM)	Calor Disipado Actual (BTU/min)	Calor Disipado de Diseño (BTU/min)	Eficiencia (%)
A	31.2	39.3	1,0412	1,267,588	1,803,600	70%
B	28.6	39.4	7,033	1,141,625	1,803,600	63%
C	28.2	39.2	6,645	1,098,618	1,803,600	61%
D	34.6	39.0	9,720	642,803	1,803,600	36%
E	28.8	39.1	7,659	1,185,682	1,803,600	66%
F	28.4	38.9	5,376	848,413	1,803,600	47%

Como se observa en la tabla anterior la celda D tiene una eficiencia del 36%, un intervalo de 4.4°C, el menor en toda la torre, y un flujo de 9,720 GPM. Cabe destacar que este comportamiento se debe a que el ventilador de esta celda se encontraba apagado en el momento de las mediciones de las temperaturas. Otra celda con una eficiencia baja es la F, la cual es de 47 % con un intervalo de 10.5 °C y un flujo de 5,376 GPM, es importante mencionar que la apertura de la válvula de descarga de esta celda está en el orden del 25 %, lo cual explica su baja eficiencia. La celda con la mayor eficiencia es la A con 70%, flujo de 10412 GPM y un intervalo de 8.1°C.

En la Figura 4.2 se compara el comportamiento actual de las celdas con respecto a su comportamiento de diseño, como se puede observar el caso de diseño se encuentra por arriba del actual de todas las celdas, siendo la celda D la más distante y la celda A la mas cercana, la variación en el comportamiento térmico de las celdas, se debe en gran medida a una inadecuada filosofía de operación, la cual restringe a diferentes porcentajes de apertura las válvulas en los cabezales de descarga, además de que las condiciones de las cajas de salpicadura producen alta turbulencia en la distribución de agua en la tina caliente trayendo como consecuencia baja área de transferencia.

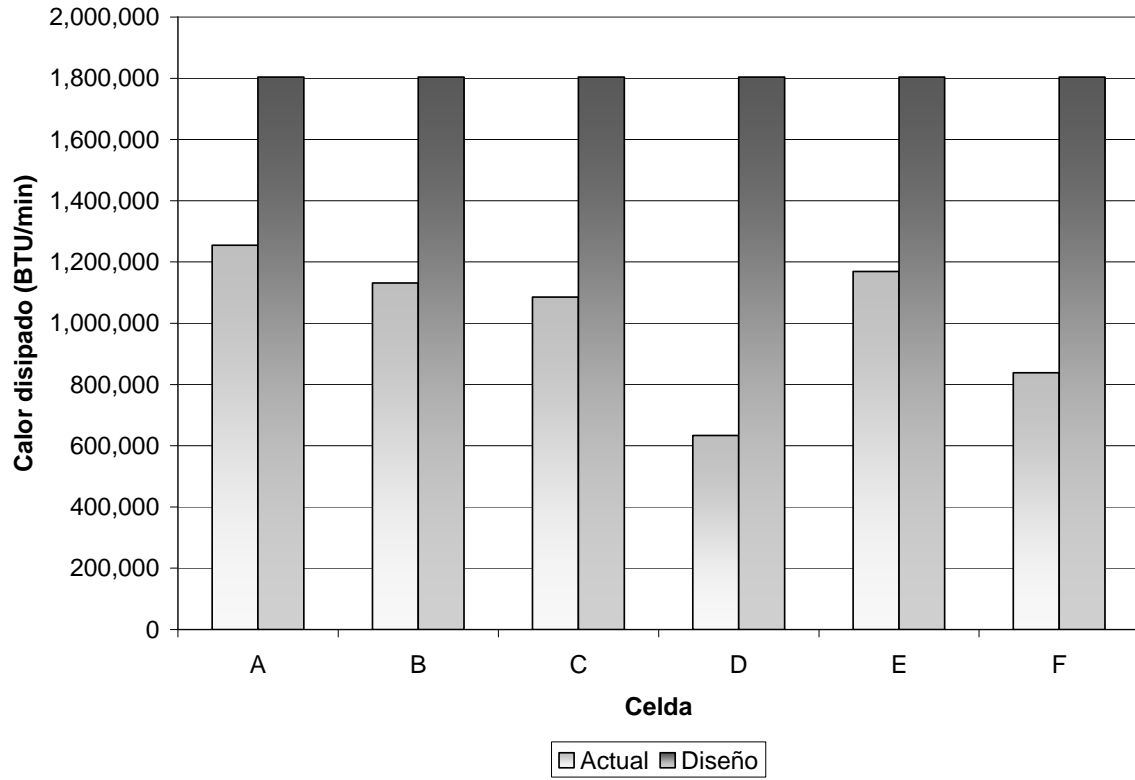


Figura 4.2. Eficiencia por celda de la torre de enfriamiento.



4.2 Estudio hidráulico de la red de distribución.

4.2.1 Sistema de Bombeo

En la Tabla 4.6 se presentan los resultados de las mediciones de flujo, así como las lecturas de presión tomadas en las descarga de bombas.

Tabla 4.6. Estado actual de las bombas.

Bomba	Estado	Estado de las Válvulas	Flujo GPM	Presión kg/cm ²
BA-00A	Fuera de operación	Sin bonete, sin volante	-	-
BA-00B	Operando	Válvula trabada, no se puede cerrar	18,699	4.4
BA-00C	Desmontada	Válvula cerrada	-	-
BA-00D	Operando	Bonete fracturado y desprendido del cuerpo de válvula	17,763	4.4
BA-00E	Operando	Operable, con vástago asistido	11,922	4.6

En la Tabla 4.7 se muestran las RPM, el voltaje y la corriente de cada una de las bombas del sistema.

Tabla 4.7. Datos del sistema de bombeo.

Equipo	RPM	Diámetro Flecha (cm)	Voltaje (V)	Corriente (A)
BA-00-B	7,000	16	4160	113
BA-00-D	6,700	16	4160	125
BA-00-E	11,400	30	4160	126

Se trazaron las líneas de operación de las bombas sobre las curvas características de cada una de ellas. Con la asistencia de la curva se determinaron las cargas totales, los BHP's y las eficiencias de cada una de las bombas.



En la Tabla 4.8 se observan los valores obtenidos de la curva.

Tabla 4.8. Datos obtenidos de las curvas de las bombas.

Bomba	Flujo (GPM)	Presión (kg/cm ²)	Carga Total (ft)	Eficiencia	BHP (Hp)	NPSH _R
BA-00B	18,699	4.4	185	83 %	1100	28
BA-00C	17,763	4.4	185	83 %	1100	28
BA-00E	11,922	4.6	200	70 %	900	28

La carga estática es la mayor altura registrada dentro de la red de distribución de agua, la cual se encontró en la planta F.C.C siendo ésta de 24 m (79 ft).

Se desarrolló una memoria de cálculo utilizando el programa Mathcad para obtener los parámetros característicos de una bomba, esta memoria se presenta a continuación:

- a) Calculó potencia de accionamiento motriz (P_{am})

$$P_{am} = \frac{\sqrt{3} * V_0 * I * F.P}{1000} \quad [kW]$$

donde :

V_0 = Voltaje

I = Amperaje

F.P = Factor de potencia = 0.9

- b) Obtención de las revoluciones en la flecha de acoplamiento

Se realizó un ajuste en la lectura de RPM debido a que se toma de forma axial, para ello se debe conocer el diámetro de la flecha.

$$N = \frac{N_L * 25}{D_F * 10} \quad [RPM]$$

donde:



N_L = Medición de RPM

D_F = Diámetro de la flecha

c) Cálculo de la carga dinámica

$$H_D = \frac{P_D - P_S}{\rho * g} \quad [m]$$

donde:

P_D .- Presión de descarga

P_S .- Presión de succión

$\rho = 1000$ [kg/m³]

$g = 9.81$ [m/s²]

d) Cálculo WHP

$$WHP = \frac{Q_L * \rho * g * H_D}{1000} \quad [kW]$$

donde:

Q_L = Flujo [m³/s]

H_D = Carga dinámica [m]

e) Cálculo BHP

$$BHP = \frac{Q_1 * H_D * DR}{3960 * \eta_{bomba}}$$

donde:

Q_1 =Flujo [GPM]

H_D =Carga dinámica [ft]

DR =Gravedad relativa

η_{bomba} = Eficiencia de la bomba



En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el informe completo de la memoria de cálculo.

En la Tabla 4.9 se presentan los resultados de los parámetros característicos las bombas.

Tabla 4.9. Resultados de Bombas.

EQUIPO	P_{am} (HP)	RPM	Carga Dinámica (Ft)	BHP (HP)	WHB (HP)
BA-00-B	983	1,094	144	821	683
BA-00-D	1087	1,047	144	780	648
BA-00-E	1096	9,50	151	649	455

Las bombas B y D, están trabajando con valores aproximados a los valores nominales, presentando una disminución en el valor de flujo y eficiencia. En el caso de la bomba E, se tiene un valor de carga dinámica mayor que las dos anteriores (en 7 ft), sin embargo es la que registra el flujo más bajo (en promedio 5,000 GPM menos) y una eficiencia menor de la nominal, requiriendo más consumo de energía, comparado con las otras bombas, este aumento en el consumo de energético, se puede derivar de una obstrucción en la succión, por lo que la cantidad de flujo a impulsar será menor, otra posible causa es la existencia de incrustación y/o desgaste del impulsor.

Para que las bombas cubran los requerimientos de carga se tendría una disminución en los valores de caudal respectivos, las bombas B y D, trabajan cerca del punto de operación óptimo (zona preferida, 17,600 a 24,200 GPM, según curva de operación), sin embargo, no cubren los valores de carga requeridos, si tuvieran una disminución en el flujo, las áreas no recibirían el enfriamiento necesario, teniendo un aumento en la temperatura de los fluidos de proceso.

En la Figura 4.3 se observa que la potencia que se transmite al agua en el caso de los equipos E (motor-bomba) es la menor con un 42 % de eficiencia total en comparación con los equipos B y D que presentan un 69 % y 60 % respectivamente.

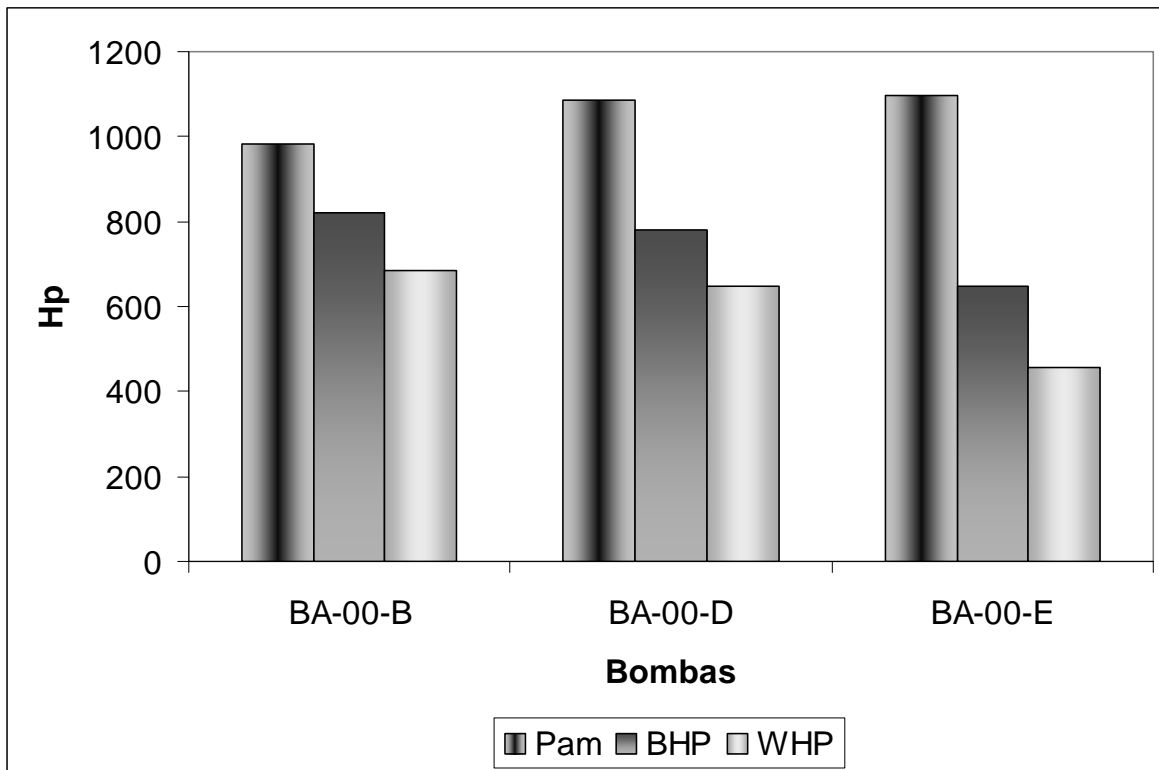


Figura 4.3. Resultados de los parámetros del sistema de bombeo.

Con base en el análisis anterior se propone la rehabilitación de la bomba E, siendo ésta la que presenta un mayor consumo de energía eléctrica, menor flujo y menor eficiencia. Con la rehabilitación se alcanzaría una mejor eficiencia y ahorro de energía eléctrica.



4.2.2 Simulación de la red de hidráulica de distribución

El arreglo final de la red de distribución de agua de enfriamiento de la torre se muestra en la Figura 4.4.

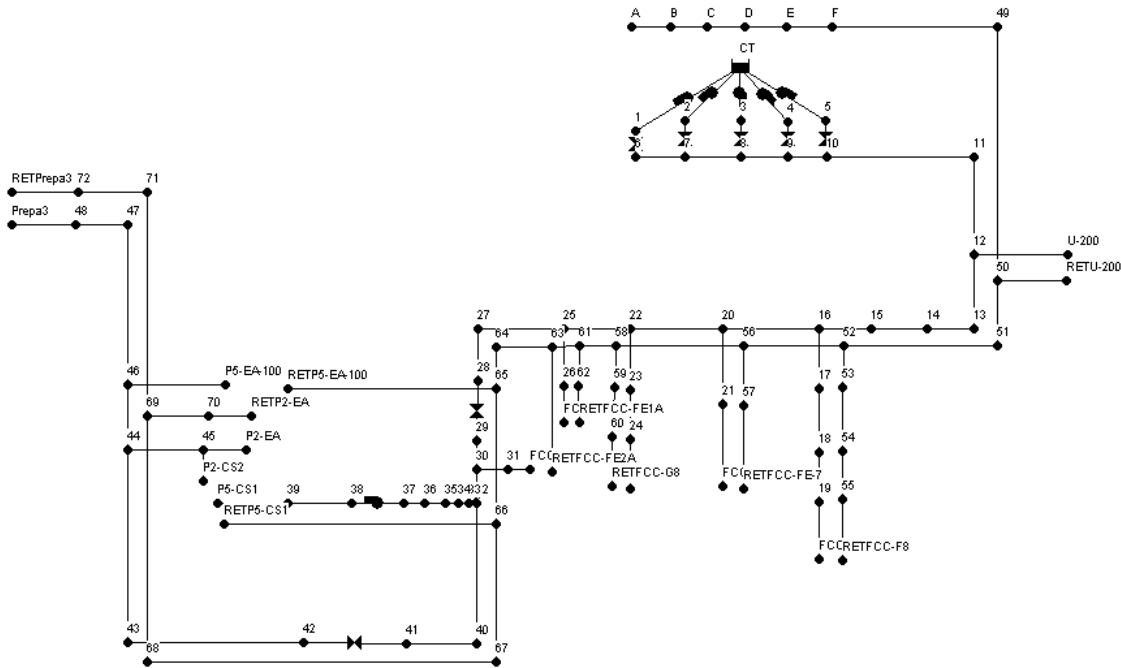


Figura 4.4. Diagrama general de la simulación de la red de distribución.

En la figura anterior se observan dos redes hidráulicas, una correspondiente a la distribución de agua de enfriamiento, denominada también línea de suministro de agua de enfriamiento, compuesta de los nodos 1 al 48, mientras la otra corresponde a la línea de retorno de agua de enfriamiento, formada del nodo 49 al 72. En el presente trabajo sólo se estudio la red de suministro de agua de enfriamiento.



El embalse CT representa la torre de enfriamiento, los nodos del 1 al 10 simbolizan el sistema de bombeo, la Figura 4.5 muestra la sección del diagrama de simulación que representa este sistema de bombas.

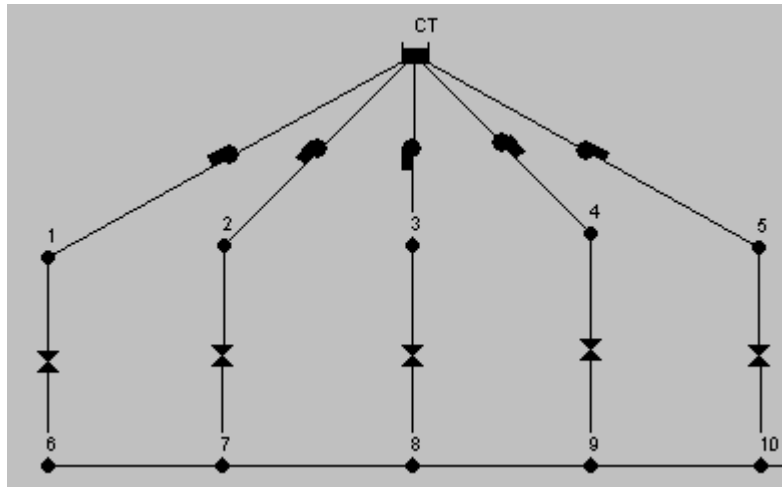


Figura 4.5. Esquema del sistema de bombeo en el simulador

La siguiente sección (Figura 4.6) está delimitada por los nodos del 11 al 15. Del nodo 12 se desprende el disparo al nodo U-200, punto de entrega a los intercambiadores de la planta de isomerización.

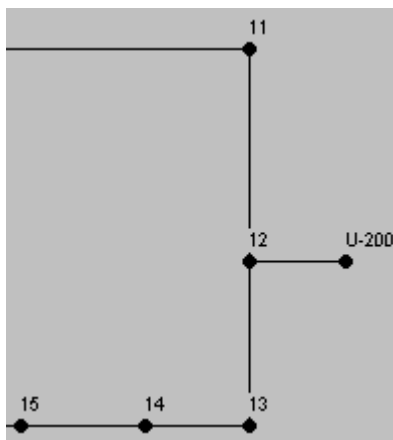


Figura 4.6. Esquema del punto de entrega a la planta U-200.



Del nodo 16 al 24 esquematizan la primera sección de la planta F.C.C., de la cual los nodos 16-19 representan el primer disparo, del nodo 20 se desprende el segundo disparo y el último disparo de esta sección se desprende del nodo 22. En la Figura 4.7 se observa esta sección.

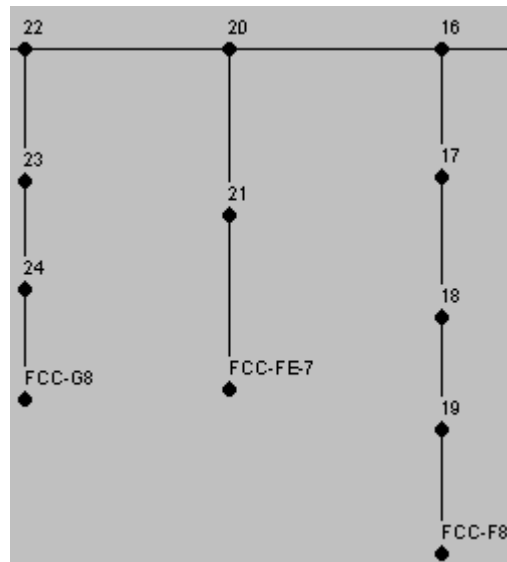


Figura 4.7. Esquema de la primera sección de la planta FCC.

La segunda sección (Figura 4.8) de la planta F.C.C. se conforma del nodo 25 al 31, el tramo del nodo 25, 26 representa un primer disparo, siendo un segundo disparo la línea del nodo 30-31.

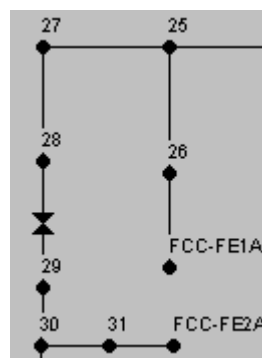


Figura 4.8. Esquema de la segunda sección de la planta FCC.



Los nodos 32 al 46 describen la continuación de la red, en esta sección se presentan 3 disparos correspondientes a las plantas primaria 5 y preparadora de carga 2, uno se origina en el nodo 32, en este trayecto se presenta un equipo de re bombeo; el segundo disparo se da en el nodo 44. El último disparo se presenta en el nodo 46. Lo anterior se ilustra en la Figura 4.9.

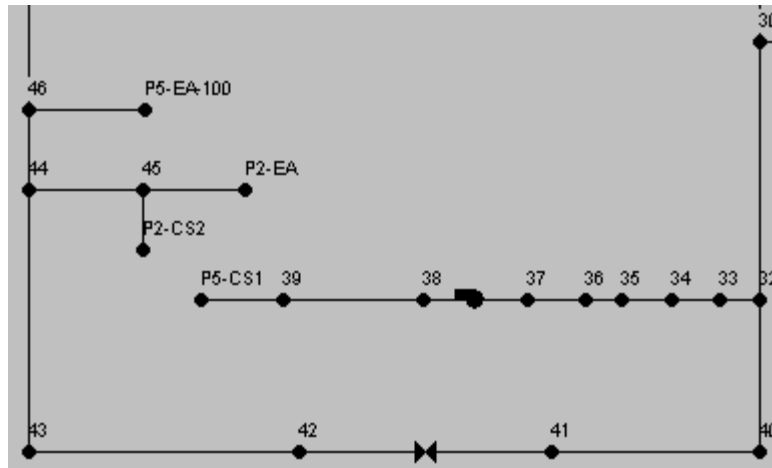


Figura 4.9. Esquema de la red (primaria 5 y preparadora de carga 2).

El trayecto donde se presenta el equipo de re-bombeo es un punto importante en la red, ya que la existencia del equipo implica posibles problemas de distribución.

La Figura 4.10 muestra la ultima sección de la red está compuesta por los nodos 47 y 48.

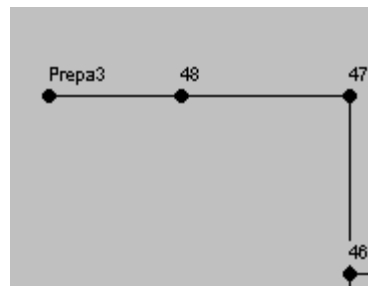


Figura 4.10. Esquema de la última sección (preparadora de carga 3).



Los resultados del software EPANET para la red de distribución se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Resultados de la simulación del caso actual.

Punto	Flujo (LPS)	Carga (m)	Flujo (GPM)	Presión (kg)
U-200	83	32	1,321	3.2
FCC-F8	294	14	4,655	1.4
FCC-F7	295	14	4,669	1.4
FCC-G8	450	25	7,129	2.5
FCC-FE1A	503	31	7,980	3.1
FCC-FE2A	514	24	8,143	2.4
P5-CS1	76	13	1,202	1.3
P2-CS2	93	15	1,480	1.5
P2-EA	410	26	6,496	2.6
P5-EA100	114	28	1,807	2.8
Prepa3	222	25	3,519	2.5

En la tabla anterior se observa que la menor presión se presenta en el punto P5-CS1, además es un punto de incumplimiento, debido a que se requiere una presión de 3 kg/cm².

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un informe completo de los resultados de las simulaciones.



4.3 Propuestas de mejora

Una vez que se simuló y validó el caso de operación actual, se alimentaron al simulador datos de flujo y presión de descarga de bombas para representar diferentes propuestas.

Caso 1 .En este primer caso se retoma la operación actual, cambiando el equipo de re-bombear que se encuentra en el punto P5-CS1. En la Tabla 4.11 se muestran los resultados de la simulación.

Tabla 4.11. Resultados obtenidos de la simulación para el caso 1.

Punto	Flujo (LPS)	Carga (m)	Flujo (GPM)	Presión (kg)
U-200	83	32	1,321	3.2
FCC-F8	294	14	4,655	1.4
FCC-F7	295	14	4,669	1.4
FCC-G8	450	25	7,129	2.5
FCC-FE1A	503	31	7,980	3.1
FCC-FE2A	514	24	8,143	2.4
P5-CS1	76	30	1,202	3.0
P2-CS2	93	15	1,480	1.5
P2-EA	410	26	6,496	2.6
P5-EA100	114	28	1,807	2.8
Prepa3	222	25	3,519	2.5



Caso 2: Para este caso se consideró la situación actual de operación, con la incorporación de una bomba de semejantes características a las bombas B y D en la posición “C” del banco de bombas de la torre, dejando fuera de operación la bomba “E”, por ser la de menor desempeño de las que operan actualmente, con fines de simulación se tomaron los parámetros de operación que marca el punto de mejor eficiencia de la bomba, información obtenida de la curva, puesto que su desempeño real sólo puede ser determinado con el equipo en operación. Además se reemplazó el equipo de re-bombeo en operación por nuevos de las mismas características. La Tabla 4.12 presenta los resultados de la simulación.

Tabla 4.12. Resultados obtenidos de la simulación para el caso 2.

Punto	Flujo (LPS)	Carga (m)	Flujo (GPM)	Presión (kg)
U-200	96	35	1,515	3.5
FCC-F8	337	18	5,338	1.8
FCC-F7	338	18	5,354	1.8
FCC-G8	516	27	8,174	2.7
FCC-FE1A	577	34	9,150	3.4
FCC-FE2A	589	26	9,337	2.6
P5-CS1	87	30	1,378	3.0
P2-CS2	107	18	1,697	1.8
P2-EA	469	29	7,430	2.9
P5-EA100	131	31	2,072	3.1
Prepa3	255	28	4,035	2.8

Caso 3: Este caso consideró la operación de 3 bombas nuevas en paralelo. El flujo total se consideró de 59000 GPM, al tener como tope de flujo la capacidad de diseño de la torre (60,000 GPM) y una presión de descarga de 7.2 kg/cm^2 , esta presión es la necesaria para prescindir del equipo de re-bombeo. En la Tabla 4.13 se observan los resultados de la simulación.

**Tabla 4.13. Resultados obtenidos de la simulación para el caso 3.**

Punto	Flujo (LPS)	Carga (m)	Flujo (GPM)	Presión (kg)
U-200	103	57	1,629	5.7
FCC-F8	362	39	5,741	3.9
FCC-F7	363	39	5,758	3.9
FCC-G8	555	47	8,792	4.7
FCC-FE1A	621	55	9,842	5.5
FCC-FE2A	634	47	10,043	4.7
P5-CS1	94	30	1,482	3.0
P2-CS2	115	39	1,825	3.9
P2-EA	504	50	7,992	5.0
P5-EA100	141	52	2,229	5.2
Prepa3	274	49	4,340	4.9

Análisis de los casos

CASO ACTUAL

La red de distribución de agua de enfriamiento se encuentra en condiciones hidráulicamente balanceadas, ya que las modificaciones estructurales consideradas y simuladas en este trabajo, identifican que cuando se rearregla la red a condiciones hidráulicamente más favorables para las plantas Preparadora de Carga No. 2 y Preparadora de Carga No. 3, las mejoras en presión y/o flujo implican un desbalance de los mismos a los puntos de suministro de la planta FCC.

CASO 1

Con el cambio del equipo de re-bombeo por una nuevo de las mismas características sólo se cubre el punto de incumplimiento de la red de distribución.

CASO 2

Adicionalmente de cumplir con la presión necesaria en el punto P5-CS1 con la sustitución del equipo de re-bombeo, la incorporación de la bomba rehabilitada



proporciona un incremento en flujo de 7096 GPM respecto al caso actual, situación que permite mejorar el enfriamiento a los equipos de intercambio de calor, retirando una mayor cantidad de calor proporcional al flujo de agua de enfriamiento suministrado a cada punto.

CASO 3

En la operación de forma simultánea de 3 bombas nuevas, el flujo de suministro se incrementaría aproximadamente hasta el flujo de diseño de la torre (60,000 GPM), cumpliendo con los requerimientos de presión y flujo en las plantas usuarias, sin embargo el consumo eléctrico se incrementa.

Análisis Comparativo

Análisis de Presión.

Las presiones de suministro mostradas en la Tabla 4.14 identifican que la presión en los puntos de entrega es mayor en todos los casos cuando se operan tres bombas nuevas.

Si se incorpora sólo la bomba rehabilitada, el sistema de bombeo es capaz de responder de forma aceptable a las condiciones hidráulicas requeridas.

Tabla 4.14. Presiones de suministro para los casos estudiados.

Punto	Actual (kg/cm ²)	Caso 1 (kg/cm ²)	Caso 2 (kg/cm ²)	Caso 3 (kg/cm ²)
U-200	3.2	3.2	3.5	5.7
FCC-F8	1.4	1.4	1.8	3.9
FCC-F7	1.4	1.4	1.8	3.9
FCC-G8	2.5	2.5	2.7	4.7
FCC-FE1A	3.1	3.1	3.4	5.5
FCC-FE2A	2.4	2.4	2.6	4.7
P5-CS1	1.3	3.0	3.0	3.0
P2-CS2	1.5	1.5	1.8	3.9
P2-EA	2.6	2.6	2.9	5.0
P5-EA100	2.8	2.8	3.1	5.2
P3	2.5	2.5	2.8	4.9



Como se puede apreciar en la Figura 4.11, los cambios en el sistema de bombeo considerados en los casos de estudio permiten suministrar el agua de enfriamiento con la presión requerida (3 kg/cm^2) en el punto P5-CS1. Sin embargo por prescindir del equipo de re-bombeo en el caso 3 se sobre presiona el sistema presentando en diferentes puntos una presión arriba de los 5 kg/cm^2 , como en el punto U-200 con 5.7 kg/cm^2 donde se observa la mayor presión.

Las tuberías actualmente tienen un tiempo de operación extenso, la sobre presión puede ocasionar que se presenten fugas en la red, que no pueden ser perceptibles al encontrarse la red enterrada, por lo que este escenario puede resultar contraproducente.

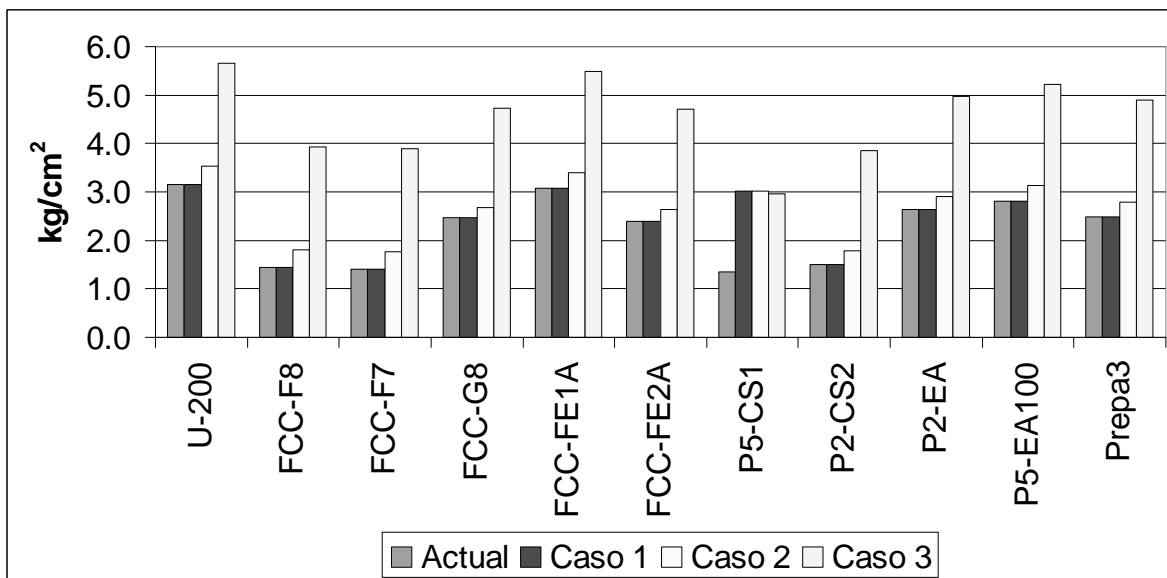


Figura 4.11. Comparación en presión de los casos estudiados.



Análisis de Flujo.

Los flujos de suministro de enfriamiento se observan en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Comparativo flujos de casos estudiados.

Punto	Actual	Caso 1	Caso 2	Caso 3
U-200	1,321	1,321	1,515	1,629
FCC-F8	4,655	4,655	5,338	5,741
FCC-F7	4,669	4,669	5,354	5,758
FCC-G8	7,129	7,129	8,174	8,792
FCC-FE1A	7,980	7,980	9,150	9,842
FCC-FE2A	8,143	8,143	9,337	10,043
P5-CS1	1,202	1,202	1,378	1,482
P2-CS2	1,480	1,480	1,697	1,825
P2-EA	6,496	6,496	7,430	7,992
P5-EA100	1,807	1,807	2,072	2,229
P3	3,519	3,519	4,035	4,340

Como se puede apreciar en la Tabla 4.15 y en la Figura 4.12, los flujos que se manejan con 3 bombas nuevas son mayores, pero al mismo tiempo implican mayor consumo de energía.

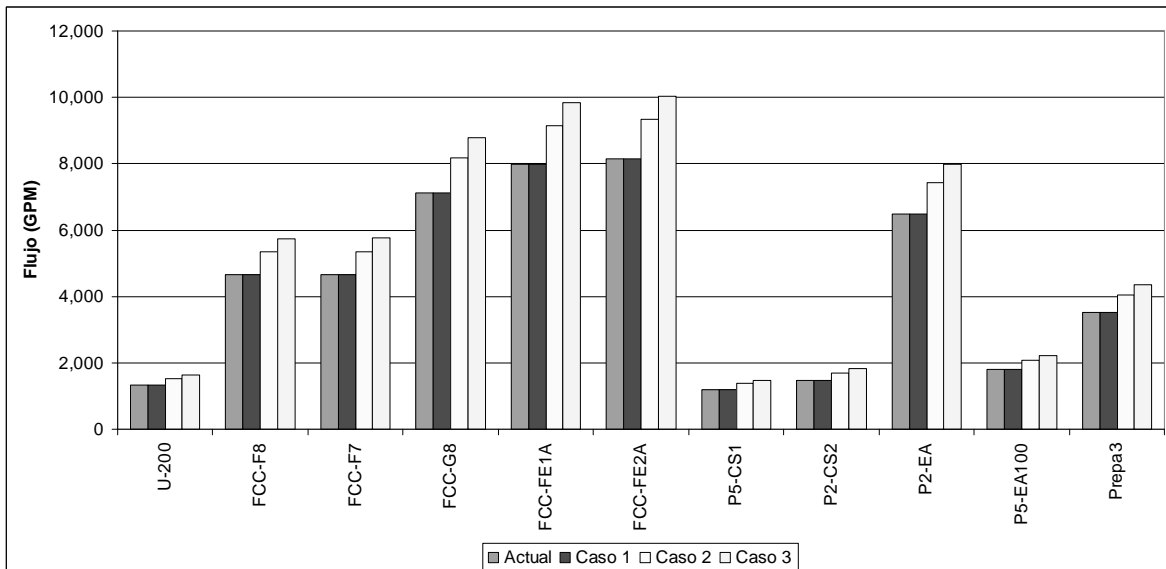


Figura 4.12. Comparación en flujo de los casos estudiados.



4.4 Evaluación económica

Con base en el análisis de propuestas técnicas de mejora del sistema de distribución de agua de enfriamiento suministrada por la torre de enfriamiento, en el presente trabajo se presenta una estimación de costos de las propuestas técnicas más viables.

Caso 1

Para el primer caso la inversión inicial considera el reemplazo del equipo de bombeo de las mismas características, el monto de la inversión es \$16,830 USD.

En esta alternativa no se presenta un incremento en el consumo de agua de repuesto por lo que no se tienen costo de ni de consumo de químicos.

Los costos operación, gastos fijos y costo de capital considerados para este caso se observan en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Costos para el primer escenario.

Concepto	Valor
Costos variables de producción	\$0
Operación	\$168
Gastos fijos	\$505
Costo total	\$673
Depreciación	\$842
Costo total de producción	\$1,515
Capital de trabajo	\$673

Los ingresos estimados para este caso se presentan en la Tabla 4.17.



Tabla 4.17. Ahorros para el escenario 1.

Energía eléctrica	
\$0.032	USD/KWH
16.4	KWH
143,664	KWH/AÑO
\$4,597	Ahorro

Los índices económicos para el escenario 1 se observan en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Calculo de VPN, TIR y PRI para el escenario 1.

Año	Flujo de efectivo	VP	VP Acumulado
0	-\$16,830	-\$16,830	-\$16,830
1	\$2,409	\$2,151	-\$14,679
2	\$2,409	\$1,921	-\$12,758
3	\$2,409	\$1,715	-\$11,043
4	\$2,409	\$1,531	-\$9,512
5	\$2,409	\$1,367	-\$8,145
6	\$2,409	\$1,221	-\$6,924
7	\$2,409	\$1,090	-\$5,835
8	\$2,409	\$973	-\$4,861
9	\$2,409	\$869	-\$3,993
10	\$2,409	\$776	-\$3,217
11	\$2,409	\$693	-\$2,524
12	\$2,409	\$618	-\$1,906
13	\$2,409	\$552	-\$1,354
14	\$2,409	\$493	-\$861
15	\$2,409	\$440	-\$421
16	\$2,409	\$393	-\$27
17	\$2,409	\$351	\$323
18	\$2,409	\$313	\$637
19	\$2,409	\$280	\$916
20	\$2,409	\$250	\$1,166
VPN		\$1,166	
TIR		13%	
PRI		16 año 1 meses	

Caso 2

La inversión principal a diferencia del primer caso adicionalmente considera la rehabilitación de una bomba de 20,000 GPM, con una inversión de \$348,775 USD.



El aumento de agua de repuesto para este escenario es de 156 GPM, resultando un costo anual de \$114,791 USD.

En la Tabla 4.19 se muestran la cantidad de químicos que se adicionan y el costo que implica el tratamiento.

Tabla 4.19. Costo de químicos para el segundo escenario.

Descripción	kg/Día	kg/Año	USD/kg	USD/AÑO
Cloro	5.1	1,853	\$0.798	\$1,479
H ₂ SO ₄	3.0	1,108	\$0.096	\$106
Tratamiento químico integral anual				\$458
			Total	\$2,043

Los costos de operación, gastos fijos y costo de capital estimados para el Caso 2 se observan en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20. Costos para el escenario 2.

Concepto	Valor
Costos variables de producción	\$116,834
Operación	\$3,488
Gastos fijos	\$10,463
Costo Total	\$13,951
Depreciación	\$17,439
Costo Total De Producción	\$31,390
Capital de trabajo	\$13,951

Los ingresos estimados para este caso se presentan en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21. Ahorros para el escenario 2.

Energía eléctrica		Agua de enfriamiento de una fuente externa	
\$0.032	USD/KWH	\$0.0000688	USD/Gal
84	KWH	7,079	GPM
735,840	KWH/AÑO	3,720,722,400	GAL/Año
\$23,547	Ahorro	\$255,800	Ahorro

El ahorro total para este escenario es de \$279,347 USD.



Los índices económicos para el escenario 2 se observan en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22. Calculo de VPN, TIR y PRI para el escenario 2.

Año	Flujo de efectivo	VP	VP Acumulado
0	-\$348,775	-\$348,775	-\$348,775
1	\$234,006	\$208,934	-\$139,841
2	\$234,006	\$186,548	\$46,707
3	\$234,006	\$166,561	\$213,268
4	\$234,006	\$148,715	\$361,983
5	-\$97,939	-\$55,573	\$306,409
6	\$234,006	\$118,555	\$424,964
7	\$234,006	\$105,852	\$530,816
8	\$234,006	\$94,511	\$625,327
9	\$234,006	\$84,385	\$709,712
10	-\$97,939	-\$31,534	\$678,178
11	\$234,006	\$67,271	\$745,450
12	\$234,006	\$60,063	\$805,513
13	\$234,006	\$53,628	\$859,141
14	\$234,006	\$47,882	\$907,023
15	-\$97,939	-\$17,893	\$889,130
16	\$234,006	\$38,171	\$927,302
17	\$234,006	\$34,082	\$961,383
18	\$234,006	\$30,430	\$991,813
19	\$234,006	\$27,170	\$1,018,983
20	\$234,006	\$24,259	\$1,043,242
VPN	\$1,043,242		
TIR	61%		
PRI	1 años 9 meses		

Caso 3

En este último caso se considera la instalación de 3 bombas nuevas de 20,000 GPM con una inversión inicial de \$1,327,779 USD.

A diferencia de los casos anteriores el costo variable de producción se incrementa debido a los servicios auxiliares originados por el incremento de consumo de energía eléctrica. En la Tabla 4.23 se muestra el desglose de los costos variables.

Tabla 4.23. Costos variables de producción del escenario 3.

Concepto	Valor
Materia Prima	\$182,488
Químicos	\$3,014
Servicios Auxiliares	\$639,130
Costos variables de producción	\$824,632



Los costos de operación, gastos fijos y costo de capital para este caso se observan en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24. Costos del escenario 3.

Concepto	Valor
Costos variables de producción	\$824,632
Operación	\$13,278
Gastos fijos	\$39,833
Costo Total	\$877,743
Depreciación	\$66,389
Costo Total De Producción	\$944,132
Capital de trabajo	\$53,111

Ingresos o ahorros

En este caso a diferencia de los dos anteriores no se presenta un ahorro de energía eléctrica, por el contrario se requiere más energía para poder accionar la bombas nuevas, monto considerado en servicios auxiliares.

De acuerdo a las premisas citadas anteriormente, no se paga el proyecto, en este caso los gastos son mayores que los ingresos.

El valor presente neto es negativo con un valor de -\$5,729,368 USD. Los resultados de los índices se presentan en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25. Calculo de VPN, TIR y PRI para el escenario 3.

Año	Flujo de efectivo	VP	VP Acumulado
0	-\$1,327,779	-\$1,327,779	-\$1,327,779
1	-\$589,279	-\$526,142	-\$1,853,921
2	-\$589,279	-\$469,770	-\$2,323,691
3	-\$589,279	-\$419,437	-\$2,743,129
4	-\$589,279	-\$374,498	-\$3,117,626
5	-\$589,279	-\$334,373	-\$3,451,999
6	-\$589,279	-\$298,547	-\$3,750,546
7	-\$589,279	-\$266,560	-\$4,017,106
8	-\$589,279	-\$238,000	-\$4,255,106
9	-\$589,279	-\$212,500	-\$4,467,606
10	-\$589,279	-\$189,732	-\$4,657,339



Año	Flujo de efectivo	VP	VP Acumulado
11	-\$589,279	-\$169,404	-\$4,826,742
12	-\$589,279	-\$151,253	-\$4,977,996
13	-\$589,279	-\$135,048	-\$5,113,043
14	-\$589,279	-\$120,578	-\$5,233,622
15	-\$589,279	-\$107,659	-\$5,341,281
16	-\$589,279	-\$96,124	-\$5,437,405
17	-\$589,279	-\$85,825	-\$5,523,230
18	-\$589,279	-\$76,630	-\$5,599,860
19	-\$589,279	-\$68,419	-\$5,668,279
20	-\$589,279	-\$61,089	-\$5,729,368
	VPN	-5,729,368	
	TIR	No aplica	
	PRI	Nunca	

En la tabla anterior se observa un VPN negativo, invariablemente la TIR y el PRI no aplican, debido a que la inversión inicial no se alcanza a recuperar a lo largo del proyecto.

En la Tabla 4.26 se muestra un comparativo del análisis económico para los diferentes casos propuestos, en la cual se determina que económicamente el caso 3 no es viable.

Tabla 4.26. Comparación económica

CASO	Inversión USD	VPN USD	TIR	PRI
1	\$16,830	\$1,166	13%	16 año 1 meses
2	\$348,775	\$1,043,242	61%	1 años 9 meses
3	\$1,327,779	Negativo \$5,729,368	No aplica	No se recupera nunca

El Caso 2 al presentar mayor el VPN y la TIR, aunado a un menor PRI económicamente es la mejor alternativa.



En resumen los resultados técnico- económicos se muestran en la Tabla 4.27

Tabla 4.27. Matriz técnico económica

CASO	Obras a realizar	Presión en el punto P5-CS1 (kg)	VPN USD	TIR	PRI
1	Únicamente remplazo del equipo de re bombeo	3.0	\$1,166	13%	16 año 1 meses
2	Rehabilitación de la Bomba BA-00-E y sustitución del equipo de re bombeo.	3.0	\$1,043,242	61%	1 años 9 meses
3	Cambio del sistema de bombeo por tres bombas nuevas	3.0	Negativo \$5,729,368	No aplica	No se recupera nunca

Técnicamente los tres casos planteados cubren el principal problema de la red de agua de enfriamiento, en el primer caso la mejora de distribución sólo se presenta en el punto con problemática, mientras que en el caso 2 existe una mejora en la distribución , además de un aumento de agua de enfriamiento, lo que representa una mejor filosofía de operación. Por ultimo en el caso 3 se prescinde del equipo de re-bombeo, significa que el sistema se sobre presiona.

Finalmente la elección de la mejor opción técnico-económica radica primordialmente en cubrir el objetivo del proyecto, el cual es cumplir con una mejora de distribución de agua, buscando la alternativa con menor inversión, mayor ganancia y pronta recuperación.

En este trabajo con la propuesta 1 se encuentran resultados económicos poco atractivos y cumpliendo de manera aceptable el aspecto técnico. Por otra parte la propuesta 3 se descarta al no cumplir en el aspecto económico.

Se determinó que la mejor alternativa es la propuesta 2 ya que cumple el requerimiento técnico y económicamente resulta muy atractiva.



Capítulo 5. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo fue realizar un diagnóstico de una torre de enfriamiento y de su red de distribución de agua en una instalación industrial.

La información bibliográfica consultada permitió sustentar la metodología de trabajo que se utilizó para cubrir el objetivo anteriormente planteado. Esta metodología consistió en tres actividades principales:

- 1) Inspección física
- 2) Evaluación térmica
- 3) Evaluación hidráulica

De la inspección física se concluyó que los principales factores a analizar son los componentes estructurales que impactan directamente en el área de contacto entre el aire y el agua afectando la eficiencia térmica, además de componentes que puedan representar inseguridad para el personal que interactúe con la torre.

En el caso de la torre estudiada se constató que la condición estructural de los componentes que desfavorecen considerablemente la eficiencia de una torre son: *el relleno, el sistema de distribución y el ventilador.*

Con respecto a la evaluación térmica, la información bibliográfica y nuestro propio trabajo permiten concluir que los resultados de los parámetros térmicos permiten *definir el área de oportunidad*, es decir que tanto se puede optimizar la operación de la torre de enfriamiento. Una adecuación térmica implicaría una disminución en la cantidad de agua de recirculación, por lo tanto un decremento en el agua de repuesto. También puede impactar en la operación de los ventiladores, al mantener un ventilador disponible existiría una disminución en el consumo de energía eléctrica.



En lo que se refiere a la evaluación hidráulica, en este trabajo se confirmó que el mantenimiento inadecuado de los equipos en el sistema de bombeo afecta significativamente la eficiencia de la bomba, repercutiendo en un consumo de energía eléctrica que es desaprovechada.

En cuanto a la red de distribución se constató que el tiempo de vida útil fue rebasado, es un diseño antiguo con un que arreglo sacrifica mucha presión de bombeo. Aunado a esto la red está enterrada, lo cual dificulta el mantenimiento y no permite que se localicen fugas en caso de que se presenten.

En este trabajo en particular la tubería está excedida en el diámetro de acuerdo al flujo actual, situación que disminuye las caídas de presión a pesar de la incrustación, siendo una de las razones por la cual el sistema de bombeo actual tiene una distribución aceptable.

En el aspecto económico se confirmó la importancia de realizar un análisis debido a que es una etapa crítica para la toma de decisiones, sin embargo una decisión considera de igual importancia los resultados en aspectos técnicos y los económicos. En esta ocasión la alternativa que representó la mejor opción fue la económicamente más atractiva.

En el Caso 1, al realizar un balance entre el diagnóstico realizado y el beneficio que se obtiene, éste último se queda corto, mientras que en el caso 3 técnicamente es poco viable, además de no cumplir económicamente. En comparación con lo anterior el beneficio más completo se obtiene con el caso 2, siendo una propuesta aceptable en aspectos técnicos y económicos.



Con base en las actividades anteriores, se concluyó que los principales problemas en esta torre son:

- *La distribución de agua deficiente en la tina de agua caliente debido a su deterioro y a las boquillas tapadas.*
- *La filosofía de operación de las válvulas en los cabezales de retorno no es conveniente ya que se presentan flujos hasta del 50 % de la capacidad de diseño, limitando la eficiencia.*
- *Instrumentación inoperable.*
- *Incumplimiento de presión en el punto P5-CS1 de la red de distribución de agua de enfriamiento.*

Las propuestas de este trabajo para resolver la problemática encontrada son:

- *Mantenimiento general al sistema de distribución de agua caliente y la sustitución de las válvulas en los cabezales de retorno.*
- *Colocación de instrumentación para medición de presión, flujo y temperatura, tanto en los puntos de entrega a plantas como en el cabezal de suministro.*
- *Para cubrir el requerimiento de presión en el punto P5-CS1 se plantea sustituir la bomba de menor eficiencia por una bomba rehabilitada, además del remplazo del equipo actual de re-bombeo por uno nuevo de las mismas características.*



Ante la problemática que presentan las torres de enfriamiento la formación como ingeniero químico contribuyó a tratar este tema con una perspectiva global, considerando en conjunto aspectos de ingeniería ambiental, transferencia de calor, flujo de fluidos, ingeniería económica y seguridad industrial entre otras. Otro aspecto que facilitó el desarrollo de este proyecto fue utilizar un esquema de trabajo similar al que se emplea durante la carrera, en la que se comienza por definir la problemática, se establecen los alcances, se plantean metodologías y se desarrollan secciones de cálculos, resultados y análisis.

Por otra parte durante la realización de los trabajos particularmente en campo, la seguridad es un factor vital, debido a que los riesgos que están presentes en la industria de la refinación. El trabajo efectuado me deja claro que la seguridad es asunto de disciplina y responsabilidad, esto me parece que no sólo aplica para el ámbito profesional, si no también para el personal, en la etapa de campo. En contraste en la etapa del trabajo desarrollada en gabinete, debido a que generalmente en los casos reales no se cuenta con toda la información necesaria para realizar balances de materia y cotizaciones de los equipos, es trascendental tomar criterios bien sustentados a partir de fundamentos teóricos para tener estimados aceptables.

Finalmente se establece que la evaluación de torres de enfriamiento en instalaciones industriales permite identificar puntos de mejora que pueden redundar en ahorros de agua y energía eléctrica en un consecuente incremento en la rentabilidad de estos equipos.



Capítulo 6. Bibliografía

Artículos

- Delenikos, Randy (2006). “*Rx for Cooling Towers*”. Power Engineering. EUA. Vol. 110 Issue 11, pp. 68-74.
- Willa James (2005). “*Improve and Maintain Cooling Tower Efficiency*”. Chemical Engineering Progress. New York. EUA. Vol. 101, April, No. 4; pp. 31.
- Willa James (2005). “*Ensure Proper Distribution in Cooling Towers*”. Chemical Engineering Progress. New York. EUA. Vol. 101, Mai, No. 4; pp. 39.
- Huchler, Loraine (2000), “*Can you reduce your cooling tower blowdown rate?*”. Hydrocarbon Processing, Vol. 79 Issue 2, pp. 110, 121.
- Katzel Jeanine (2000), “*Trends in cooling towers*”. Plant Engineering Magazine. EUA. Vol. 54 Issue 1, pp. 38-42.
- Burger R (2000). “*Cooling tower fill:the neglected moneymaker*”, Hydrocarbon Processing, pp. 55.

Libros

- Cruz M. J. (2007). *Guía para la evaluación técnica de torres de enfriamiento en operación*. Tesis en Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM.
- Coss Raúl (2006). *Análisis y evaluación de proyectos de inversión*, Limusa, México, pp. 61-63,73-75.
- Baca Urbina G. (2003). *Fundamentos de Ingeniería Económica*. Mc Graw Hill, México, pp. 77-92.
- Leland T Blank (1999). *Ingeniería Económica*. Mc Graw Hill, Colombia, pp. 386.
- Hensley John (1998). “*Cooling Tower Fundamentals*”, Marley Cooling Technologies, EUA, pp. 8-11.



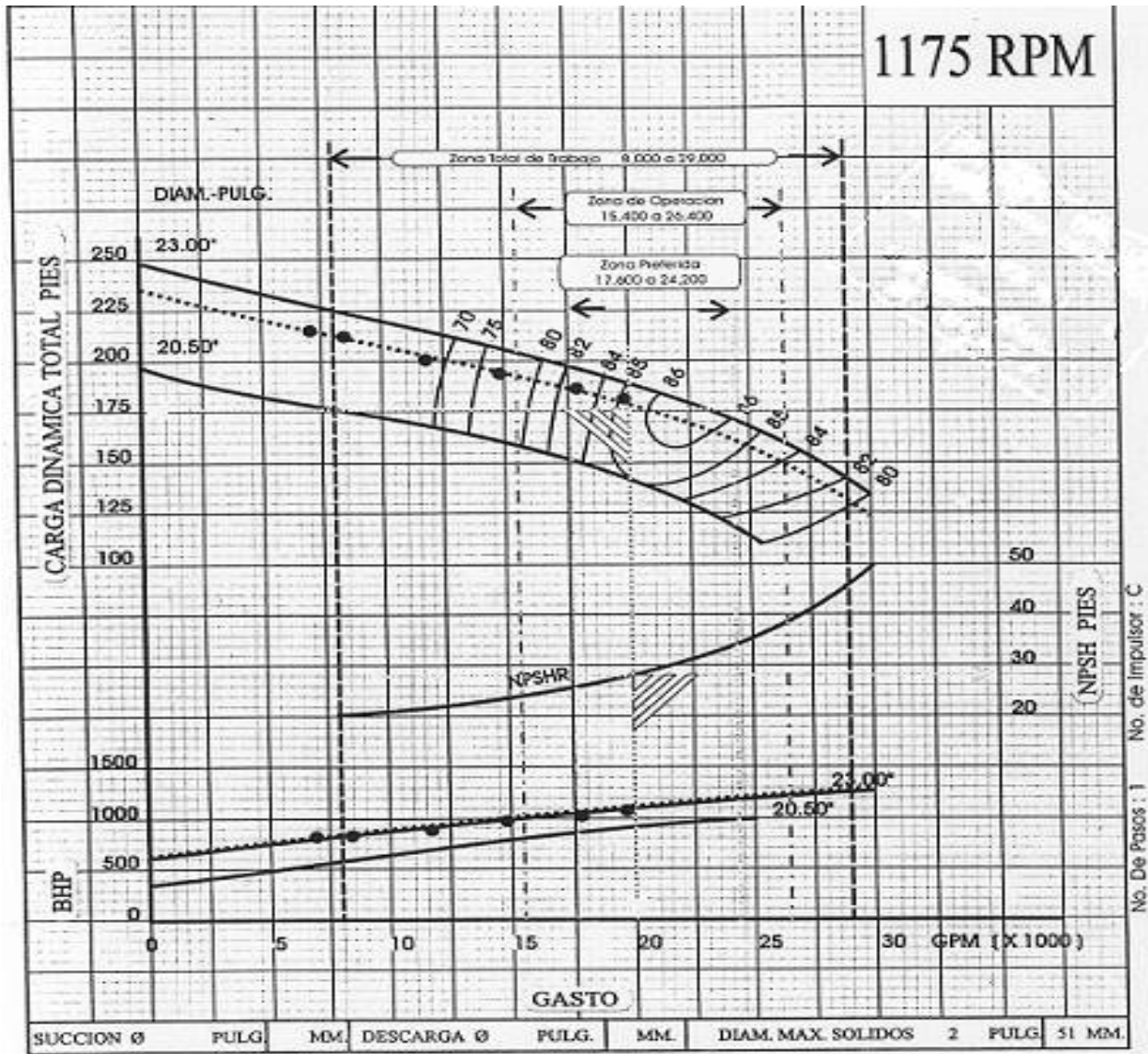
- Sapag Nassir (1997). *Criterios de evaluación de proyectos*, Mc Graw Hill, México.
- Kenneth J (1997). *Bombas, uso y mantenimiento*, McGraw-Hill, México, pp. 71-75.
- Mc Coy James (1983). "The *Chemical Treatment of Cooling Water*", Chemical publishing Company, EUA, pp. 1-11.
- Warring Ronald (1977). *Selección de bombas sistemas y aplicaciones*, Labor, Barcelona, pp. 34-39.

Paginas Web

- Cooling Technology Institute (CTI). *What is a cooling tower?* [en línea], [28 de febrero de 2008]. Disponible en:
<http://www.cti.org/whatis/coolingtower.shtml>
- Comisión Nacional para el ahorro de energía (CONAE). *Módulos Tecnológicos-Torres de enfriamiento* [en línea], 24 de octubre de 2005, [7 de abril de 2008]. Disponible en:
http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_442_1objetivo
- North Carolina Department of Environment and Natural Resources (NCDENR) Water efficiency. *Water Management Options* [en línea], [11 de abril de 2008]. Disponible en:
<http://www.p2pays.org/ref%5C04/03101.pdf>
- SPX Cooling Technologies (SPX). *Mechanical Draught Cooling Towers* [en línea], [28 de junio de 2008]. Disponible en:
http://spxcooling.com/pdf/SPX_MechDraught_e.pdf



Anexo 1. Curva de operación de las bombas de la torre de enfriamiento



Fuente: Curva proporcionada por el operador de la torre de enfriamiento.



Anexo 2. Metodologías

Metodología para medición de flujo

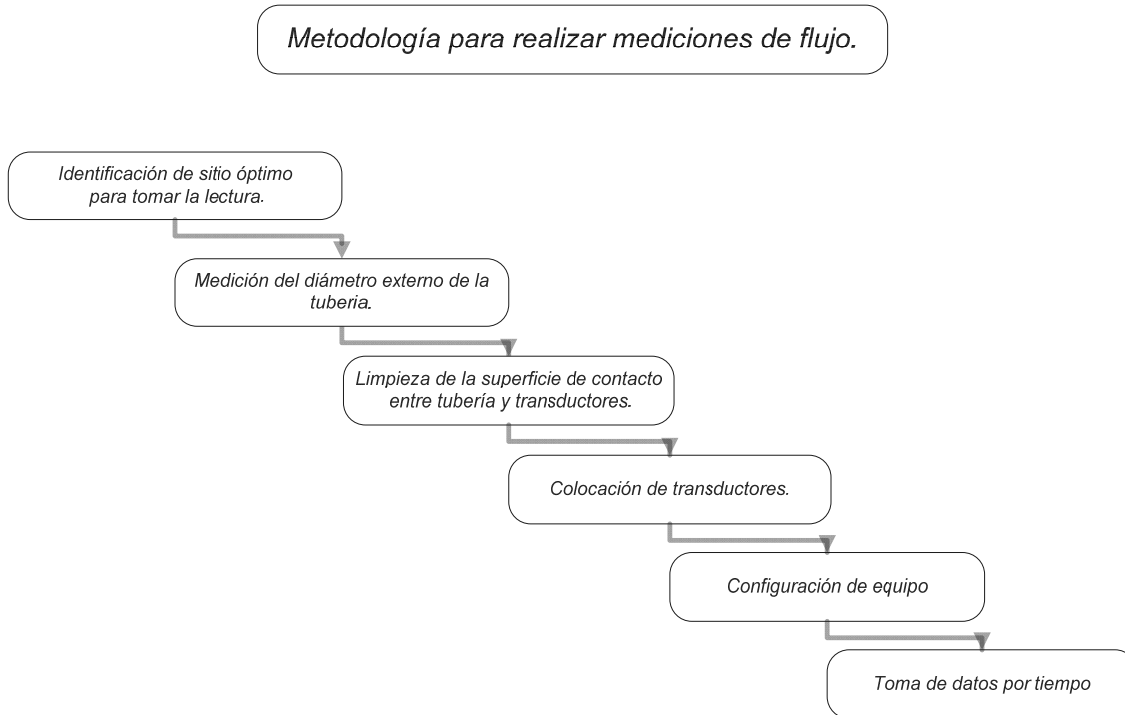
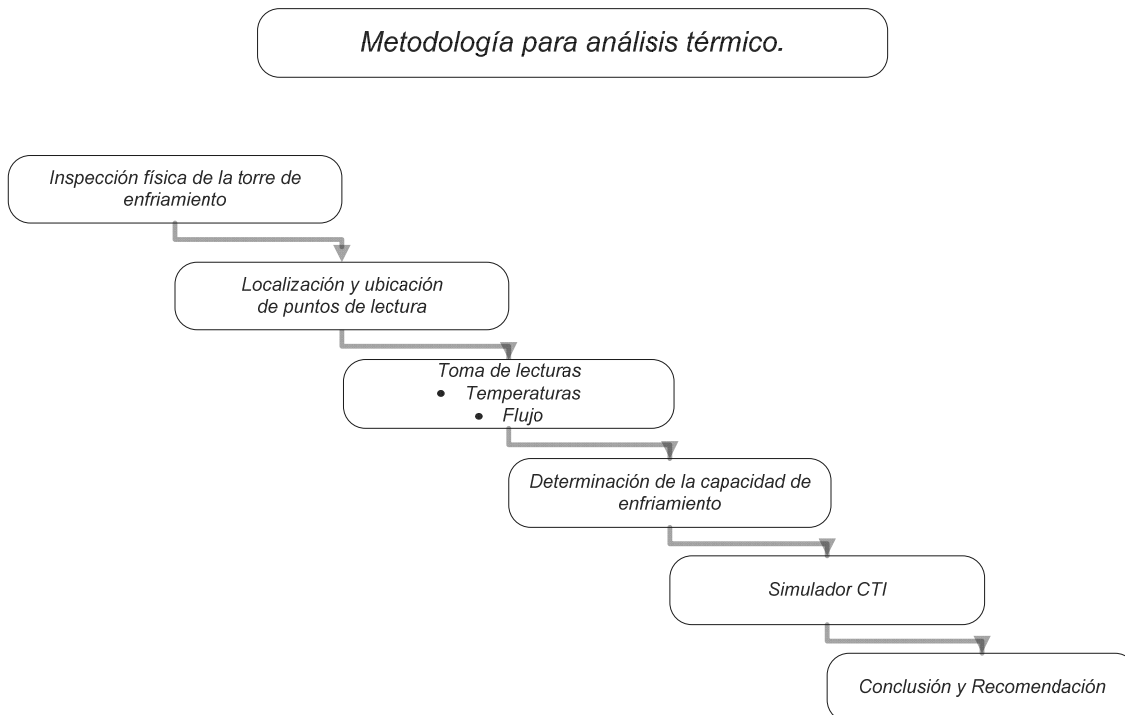


Diagrama de flujo del procedimiento para el anales térmico.





Anexo 3. Simulación Térmica



Tower Performance Report

Tesis UNAM

Owner: UNAM Facultad de Química

Project: Tesis

Manufacturer: CT-00

Tower Type: Induced Draft

Cooling Tower Design and Test Data

Parameters	Design	Test
Water Flow Rate	3785.4 l/s	3052.6 l/s
Hot Water Temp.	44.20 °C	39.58 °C
Cold Water Temp.	32.20 °C	30.40 °C
Wet Bulb Temp.	27.80 °C	24.33 °C
Dry Bulb Temp.	40.00 °C	26.75 °C
Fan Driver Power	74.57 kW	75.57 kW
Barometric Pressure	101.325 kPa	101.325 kPa
Liquid to Gas Ratio	2.000	1.543

Cold Water Temperatures vs. Range

At 24.33 °C Test Wet Bulb

Range	3225.0 l/s	3583.0 l/s	3942.0 l/s
17.00 °C	28.48 °C	29.28 °C	30.10 °C
18.80 °C	28.71 °C	29.51 °C	30.36 °C
21.00 °C	28.94 °C	29.74 °C	30.62 °C

Cold Water Temperature vs. Water Flow

At 24.33 °C Test Wet Bulb and 9.18 °C Test Range

3225.0 l/s	3583.0 l/s	3942.0 l/s
27.47 °C	28.27 °C	28.97 °C

Exit Air Properties

	Wet Bulb Temp	Density	Sp. Vol.	Enthalpy
Design	42.50	1.08294	0.9758	188.9569
Test	35.52	1.11872	0.9278	132.9407

Test Results

* Indicates predicted flow is extrapolated.

Adjusted Flow	Predicted Flow	CWT Deviation	Tower Capability
3072.2 l/s	4678.0 l/s *	2.66 °C	65.7%

This test result is only certified by CTI if the test data was collected by a CTI Licensed Testing Agency. See www.cti.org for an agency list.



Anexo 4. Memoria de cálculo para las bombas

1.-POTENCIA DE ACCIONAMIENTO MOTRIZ

Datos de la bomba B

$$V_o := 4160 \text{ [V]}$$

$$I := 113 \text{ [A]}$$

$$FP := 0.9$$

$$P_{am} := \frac{\sqrt{3} \cdot V_o \cdot I \cdot FP}{1000} \text{ [KW]}$$

$$P_{am} = 733 \text{ [KW]}$$

En Hp

$$P_{am} := P_{am} \cdot 1.341022$$

$$P_{am} = 983 \text{ [Hp]}$$

2.-REVOLUCIONES EN LA FLECHA DE ACOPLAMIENTO

Datos de la bomba B

$$N_L := 7000 \text{ [RPM]}$$

$$D_F := 16 \text{ [cm]}$$

$$N := \frac{N_L \cdot 25}{D_F \cdot 10} \text{ [RPM]}$$

$$N = 1094 \text{ [RPM]}$$

3.-CARGA DINÁMICA DE LA BOMBA

$$P_S := 0 \text{ [Pa]} \quad PDD := 4.4 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

$$P_D := PDD \cdot 98066.5 \text{ [Pa]}$$

$$P_D = 431492.6$$

$$\rho := 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad g_1 := 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$



$$H_{Dbomba} := \frac{P_D - P_S}{\rho \cdot g_1}$$

$$H_{Dbomba} = 43.985 \quad [m]$$

$$H_{DBomba} := H_{Dbomba} \cdot 3.28083$$

$$H_{DBomba} = 144 \quad [ft]$$

4.-POTENCIA HIDRÁULICA DE LA BOMBA

$$Q_1 := 19677 \quad [GPM]$$

$$\eta_{BOMBA} := 0.83$$

$$Q_L := Q_1 \cdot (6.30902 \cdot 10^{-5})$$

$$Q_L = 1.241 \quad [m^3/s]$$

$$WHP_1 := \frac{Q_L \cdot \rho \cdot g_1 \cdot H_{Dbomba}}{1000} \quad [kW]$$

$$WHP_1 = 535.7 \quad [KW]$$

En Hp

$$WHP := WHP_1 \cdot 1.341022$$

$$WHP = 718 \quad [Hp]$$

5.-POTENCIA EN LA FLECHA DE LA BOMBA

$$Q_1 = 19677 \quad [GPM]$$

$$DR := 1$$

$$BHP := \frac{Q_1 \cdot H_{DBomba} \cdot DR}{3960 \eta_{BOMBA}} \quad [Hp]$$

$$BHP = 864 \quad [Hp]$$



1.-POTENCIA DE ACCIONAMIENTO MOTRIZ

Datos de la bomba D

$$V_o := 4160 \text{ [V]}$$

$$I := 125 \text{ [A]}$$

$$FP := 0.9$$

$$P_{am} := \frac{\sqrt{3} \cdot V_o \cdot I \cdot FP}{1000} \text{ [kW]}$$

$$P_{am} = 811 \text{ [kW]}$$

En Hp

$$P_{am} := P_{am} \cdot 1.341022$$

$$P_{am} = 1087 \text{ [Hp]}$$

2.-REVOLUCIONES EN LA FLECHA DE ACOPLAMIENTO

Datos de la bomba D

$$N_L := 6700 \text{ [RPM]}$$

$$D_F := 16 \text{ [cm]}$$

$$N := \frac{N_L \cdot 25}{D_F \cdot 10} \text{ [RPM]}$$

$$N = 1047 \text{ [RPM]}$$

3.-CARGA DINÁMICA DE LA BOMBA

$$P_S := 0 \text{ [Pa]} \quad PDD := 4.4 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

$$P_D := PDD \cdot 98066.5 \text{ [Pa]}$$

$$P_D = 431492.6$$

$$\rho := 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad g_1 := 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$



$$H_{Dbomba} := \frac{P_D - P_S}{\rho \cdot g_1}$$

$$H_{Dbomba} = 43.985 \quad [\text{m}]$$

$$H_{DBomba} := H_{Dbomba} \cdot 3.28083$$

$$H_{DBomba} = 144 \quad [\text{ft}]$$

4.-POTENCIA HIDRÁULICA DE LA BOMBA

$$Q_1 := 18692 \quad [\text{GPM}]$$

$$\eta_{BOMBA} := 0.83$$

$$Q_L := Q_1 \cdot (6.3090210^{-5})$$

$$Q_L = 1.179 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$WHP_1 := \frac{Q_L \cdot \rho \cdot g_1 \cdot H_{Dbomba}}{1000} \quad [\text{kW}]$$

$$WHP_1 = 509 \quad [\text{kW}]$$

En Hp

$$WHP := WHP_1 \cdot 1.341022$$

$$WHP = 682 \quad [\text{Hp}]$$

5.-POTENCIA EN LA FLECHA DE LA BOMBA

$$Q_1 = 18692 \quad [\text{GPM}]$$

$$DR := 1$$

$$BHP := \frac{Q_1 \cdot H_{DBomba} \cdot DR}{3960 \cdot \eta_{BOMBA}} \quad [\text{Hp}]$$

$$BHP = 821 \quad [\text{Hp}]$$



1.-POTENCIA DE ACCIONAMIENTO MOTRIZ

Datos de la bomba E

$$V_o := 4160 \text{ [V]}$$

$$I := 126 \text{ [A]}$$

$$FP := 0.9$$

$$P_{am} := \frac{\sqrt{3} \cdot V_o \cdot I \cdot FP}{1000} \text{ [kW]}$$

$$P_{am} = 817 \text{ [kW]}$$

En Hp

$$P_{am} := P_{am} \cdot 1.341022$$

$$P_{am} = 1096 \text{ [Hp]}$$

2.-REVOLUCIONES EN LA FLECHA DE ACOPLAMIENTO

Datos de la bomba E

$$N_L := 11400 \text{ [RPM]}$$

$$D_F := 30 \text{ [cm]}$$

$$N := \frac{N_L \cdot 25}{D_F \cdot 10} \text{ [RPM]}$$

$$N = 950 \text{ [RPM]}$$

3.-CARGA DINÁMICA DE LA BOMBA

$$P_S := 0 \text{ [Pa]} \quad PDD := 4.6 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

$$P_D := PDD \cdot 98066.5 \text{ [Pa]}$$

$$P_D = 451105.9$$

$$\rho := 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad g_1 := 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$



$$H_{DBombas} := \frac{P_D - P_S}{\rho \cdot g_1}$$

$$H_{DBombas} = 45.984 \quad [\text{m}]$$

$$H_{DBombas} := H_{DBombas} \cdot 3.28083$$

$$H_{DBombas} = 151 \quad [\text{ft}]$$

4.-POTENCIA HIDRÁULICA DE LA BOMBA

$$Q_1 := 12546 \quad [\text{GPM}]$$

$$\eta_{BOMBA} := 0.70$$

$$Q_L := Q_1 \cdot (6.3090210^{-5})$$

$$Q_L = 0.792 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$WHP_1 := \frac{Q_L \cdot \rho \cdot g_1 \cdot H_{DBombas}}{1000} \quad [\text{kW}]$$

$$WHP_1 = 357.1 \quad [\text{kW}]$$

En Hp

$$WHP := WHP_1 \cdot 1.341022$$

$$WHP = 479 \quad [\text{Hp}]$$

5.-POTENCIA EN LA FLECHA DE LA BOMBA

$$Q_1 = 12546 \quad [\text{GPM}]$$

$$DR := 1$$

$$BHP := \frac{Q_1 \cdot H_{DBombas} \cdot DR}{3960 \eta_{BOMBA}} \quad [\text{Hp}]$$

$$BHP = 683 \quad [\text{Hp}]$$



Anexo 5. Simulación hidráulica

Página 1

16/10/2008 13:51:16

```

*****
*                               E P A N E T                               *
*                               Análisis Hidráulico y de Calidad          *
*                               para Redes de Distribución de Agua         *
*                               Version 2.0                                *
*                               *                                           *
* Traducción: Grupo REDHISP,UPV      Financ: Grupo Aguas de Valencia *
*****

```

Fichero Input: Caso actual.net

Tabla de Líneas y Nudos:

ID Línea	Nudo Inicial	Nudo Final	Longitud m	Diámetro mm
10	16	7	58	1371.6
12	7	9	75.5	1371.6
13	9	U-200	71.8	254.508
1	9	8	27	1371.6
11	13	14	3	1371.6
14	14	15	3	1371.6
15	15	16	3	1371.6
7	8	11	50	1371.6
9	11	17	8	1371.6
16	17	18	40	1371.6
17	18	19	11.5	1371.6
18	18	21	22	477.825
19	21	20	10	477.825
20	20	22	39	477.825
21	22	FCC-F8	10	477.825
22	19	24	67.3	477.825
23	24	FCC-FE-7	20	477.825
24	19	25	16.2	1371.6
25	25	26	43.3	477.825
26	26	28	5	477.825
27	28	FCC-G8	30	381
28	25	27	14.6	1371.6
29	27	30	51	1371.6
30	27	31	46	477.825
31	31	FCC-FE1A	2	477.825
32	30	10	5	876.3
33	23	33	36.5	876.3
35	33	34	54	477.825
36	34	FCC-FE2A	2	477.825
37	33	36	4.5	876.3
38	36	37	39	876.3
39	36	38	93.6	381
40	38	39	6	381
41	39	40	15	381
42	40	41	4	381



Página 2

Tabla de Líneas y Nudos: (continuación)

ID Línea	Nudo Inicial	Nudo Final	Longitud m	Diámetro mm	
43	41	42	.1	202.717	
45	43	44	20	303.225	
46	44	P5-CS1	24	303.225	
47	37	46	7	876.3	
49	47	48	99.7	1200.150	
50	48	49	53.5	1200.150	
51	49	50	15.6	1200.150	
52	49	51	9.7	477.825	
53	51	P2-CS2	24	574.650	
54	51	P2-EA	20	477.825	
55	50	P5-EA-100	8.7	381	
56	50	55	29.4	1200.150	
57	55	56	10.5	428.650	
58	56	Prepa3	3	428.650	
59	12	13	3	1371.6	
A	1	2	Sin Valor	Sin Valor	Bomba
B	1	3	Sin Valor	Sin Valor	Bomba
C	1	4	Sin Valor	Sin Valor	Bomba
D	1	5	Sin Valor	Sin Valor	Bomba
E	1	6	Sin Valor	Sin Valor	Bomba
44	42	43	Sin Valor	Sin Valor	Bomba
2	5	15	Sin Valor	876.3	Válvula
3	3	13	Sin Valor	876.3	Válvula
4	6	16	Sin Valor	876.3	Válvula
6	2	12	Sin Valor	876.3	Válvula
8	4	14	Sin Valor	876.3	Válvula
34	10	23	Sin Valor	876.3	Válvula
48	46	47	Sin Valor	876.3	Válvula

Consumo y Coste Energético:

Bomba	Porcent. Utiliz.	Rendim. Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B	100.00	75.00	0.20	858.23	858.23	0.00
C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D	100.00	75.00	0.20	823.38	823.38	0.00
E	100.00	75.00	0.22	606.08	606.08	0.00
44	100.00	75.00	0.03	7.75	7.75	0.00

Término Potencia: 0.00
 Coste Total: 0.00



Página 3

Resultados en los Nudos:

ID Nudo	Demanda LPS	Altura m	Presión m	Calidad
2	0.00	24.11	24.11	0.00
3	0.00	59.15	59.15	0.00
4	0.00	24.11	24.11	0.00
5	0.00	59.72	59.72	0.00
6	0.00	65.17	65.17	0.00
7	0.00	44.24	44.24	0.00
9	0.00	43.41	43.41	0.00
U-200	83.34	40.56	31.56	0.00
8	0.00	43.13	43.13	0.00
12	0.00	44.73	44.73	0.00
13	0.00	44.73	44.73	0.00
14	0.00	44.72	44.72	0.00
15	0.00	44.72	44.72	0.00
16	0.00	44.71	44.71	0.00
11	0.00	42.86	42.86	0.00
17	0.00	42.81	36.81	0.00
18	0.00	41.85	35.85	0.00
19	0.00	41.50	35.50	0.00
21	0.00	41.42	35.42	0.00
20	0.00	41.27	25.27	0.00
22	0.00	40.66	24.66	0.00
FCC-F8	293.68	40.42	14.42	0.00
24	0.00	40.44	34.44	0.00
FCC-FE-7	294.56	40.13	14.13	0.00
25	0.00	41.20	35.20	0.00
26	0.00	39.62	33.62	0.00
27	0.00	41.01	35.01	0.00
28	0.00	39.44	28.44	0.00
FCC-G8	449.77	35.70	24.70	0.00
30	0.00	40.94	34.94	0.00
31	0.00	38.90	32.90	0.00
FCC-FE1A	503.45	38.81	30.81	0.00
10	0.00	40.87	29.87	0.00
23	0.00	40.87	29.87	0.00
33	0.00	39.85	28.85	0.00
34	0.00	37.27	26.27	0.00
FCC-FE2A	513.74	36.93	23.93	0.00
36	0.00	39.61	28.61	0.00
37	0.00	39.36	28.36	0.00
38	0.00	39.28	28.28	0.00
39	0.00	39.26	22.26	0.00
40	0.00	39.20	22.20	0.00
41	0.00	39.19	26.19	0.00
42	0.00	39.18	26.18	0.00
43	0.00	47.00	34.00	0.00
44	0.00	46.75	13.75	0.00



Página 4

Resultados en los Nudos: (continuación)

ID Nudo	Demanda LPS	Altura m	Presión m	Calidad	
P5-CS1	75.83	46.46	13.46	0.00	
46	0.00	39.33	28.33	0.00	
47	0.00	39.33	28.33	0.00	
48	0.00	39.22	28.22	0.00	
49	0.00	39.12	28.12	0.00	
50	0.00	39.11	28.11	0.00	
51	0.00	37.96	26.96	0.00	
P2-CS2	93.37	37.95	14.95	0.00	
P2-EA	408.82	37.36	26.36	0.00	
P5-EA-100	114.00	39.04	28.04	0.00	
55	0.00	39.11	28.11	0.00	
56	0.00	38.94	27.94	0.00	
Prepa3	222.00	38.82	24.82	0.00	
1	-3052.56	3.50	0.00	0.00	Embalse

Resultados en las Líneas:

ID Línea	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérdida Unit. m/km	Estado
10	3052.56	2.07	8.11	Abierta
12	3052.56	2.07	11.05	Abierta
13	83.34	1.64	39.61	Abierta
1	2969.22	2.01	10.12	Abierta
11	1180.00	0.80	0.88	Abierta
14	1180.00	0.80	0.88	Abierta
15	2300.56	1.56	3.33	Abierta
7	2969.22	2.01	5.55	Abierta
9	2969.22	2.01	5.55	Abierta
16	2969.22	2.01	24.06	Abierta
17	2675.54	1.81	30.65	Abierta
18	293.68	1.64	19.31	Abierta
19	293.68	1.64	15.58	Abierta
20	293.68	1.64	15.58	Abierta
21	293.68	1.64	23.78	Abierta
22	294.56	1.64	15.68	Abierta
23	294.56	1.64	15.68	Abierta
24	2380.98	1.61	18.26	Abierta
25	449.77	2.51	36.53	Abierta
26	449.77	2.51	36.53	Abierta
27	449.77	3.95	124.46	Abierta
28	1931.21	1.31	13.08	Abierta
29	1427.76	0.97	1.28	Abierta
30	503.45	2.81	45.77	Abierta
31	503.45	2.81	45.77	Abierta
32	1427.76	2.37	14.07	Abierta



Página 5

Resultados en las Líneas: (continuación)

ID Línea	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérdida Unit. m/km	Estado	
33	1427.76	2.37	28.15	Abierta	
35	513.74	2.86	47.66	Abierta	
36	513.74	2.86	173.08	Abierta	
37	914.02	1.52	52.57	Abierta	
38	838.19	1.39	6.37	Abierta	
39	75.83	0.67	3.55	Abierta	
40	75.83	0.67	3.55	Abierta	
41	75.83	0.67	3.55	Abierta	
42	75.83	0.67	3.55	Abierta	
43	75.83	2.35	110.64	Abierta	
45	75.83	1.05	12.26	Abierta	
46	75.83	1.05	12.26	Abierta	
47	838.19	1.39	4.85	Abierta	
49	838.19	0.74	1.07	Abierta	
50	838.19	0.74	1.84	Abierta	
51	336.00	0.30	0.66	Abierta	
52	502.19	2.80	119.67	Abierta	
53	93.37	0.36	0.58	Abierta	
54	408.82	2.28	30.18	Abierta	
55	114.00	1.00	8.01	Abierta	
56	222.00	0.20	0.06	Abierta	
57	222.00	1.54	16.03	Abierta	
58	222.00	1.54	40.14	Abierta	
59	0.00	0.00	0.00	Abierta	
A	0.00	0.00	0.00	Parada	Bomba
B	1180.00	0.00	-55.65	Marcha	Bomba
C	0.00	0.00	0.00	Parada	Bomba
D	1120.56	0.00	-56.22	Marcha	Bomba
E	752.00	0.00	-61.67	Marcha	Bomba
44	75.83	0.00	-7.82	Marcha	Bomba
2	1120.56	1.86	15.00	Activa	Válvula
3	1180.00	1.96	14.42	Activa	Válvula
4	752.00	1.25	20.45	Activa	Válvula
6	0.00	0.00	0.00	Cerrada	Válvula
8	0.00	0.00	0.00	Cerrada	Válvula
34	1427.76	2.37	0.00	Activa	Válvula
48	838.19	1.39	0.00	Activa	Válvula