



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN  
SISTEMA DE ENFRÍAMIENTO CON AGUA PARA  
EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.**

**TESIS:**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**Adrián Muñoz López**



**MÉXICO, D.F.**

**2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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:** Profesor: Ing. José Agustín Texta Mena

**VOCAL:** Profesor: Ing. Joaquín Rodríguez Torreblanca

**SECRETARIO:** Profesor: Dr. Alfonso Durán Moreno

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Dr. José Agustín García Reynoso

**2° SUPLENTE:** Profesor: Ing. Jorge Alejandro Avella Martínez

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**TORRE DE INGENIERÍA, 3ER PISO ALA SUR, CIUDAD UNIVERSITARIA.**

**ASESOR DEL TEMA:**

**Dr. Alfonso Durán Moreno** \_\_\_\_\_

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

**Ing. Carlos Alberto Ibarra Aguilar** \_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE:**

**Adrián Muñoz López** \_\_\_\_\_



## ÍNDICE

### ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1. Problemática.....	11
1.2. Justificación .....	11
1.3. Objetivo general.....	12
1.4. Objetivos particulares .....	12
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	13
2.1. Fundamentos térmicos .....	14
2.1.1. Evaluación térmica de una torre de enfriamiento.....	14
2.1.2. Evaluación térmica de los equipos de intercambio de calor de las plantas de proceso.....	19
2.2. Sistema de bombeo .....	19
2.3. Redes hidráulicas .....	23
2.4. Criterios económicos para la toma de decisiones en un proyecto .....	27
2.4.1. Valor Presente Neto.....	27
2.4.2. Tasa Interna de Retorno .....	28
2.4.3. Periodo de Recuperación de Inversión .....	29
3. CASO DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA.....	31
3.1. Caso de estudio.....	31
3.1.1. Situación actual de la torre de enfriamiento.....	31
3.1.2. Plantas de proceso del sistema de enfriamiento.....	32
3.1.3. Sistema de bombeo .....	33
3.1.4. Red de distribución de agua de enfriamiento.....	35
3.2. Metodología .....	36



## ÍNDICE

3.2.1. Diagnóstico Térmico .....	36
3.2.2. Evaluación del sistema de bombeo .....	38
3.2.3. Evaluación de la red de distribución. ....	39
3.2.4. Evaluación económica .....	41
4. RESULTADOS .....	43
4.1. Diagnóstico térmico .....	43
4.1.1. Evaluación térmica de la torre de enfriamiento .....	43
4.1.2. Evaluación térmica de las plantas de proceso .....	46
4.2. Evaluación del sistema de bombeo .....	47
4.3. Red de distribución de agua de enfriamiento.....	52
4.3.1. Planta de Hidrógeno. ....	52
4.3.2. Planta MTBE (Metil Terbutil Éter). ....	53
4.3.3. Planta TAME (Ter-Amil Metil Éter).....	54
4.3.4. Planta Reformadora de Naftas U-901.....	55
4.3.5. Planta HDS de Gasóleos. ....	56
4.3.6. Planta MAYA.....	57
4.4. Diagnóstico integral .....	61
4.5. Propuestas de mejora.....	61
4.5.1. Propuesta 1. Cabezal nuevo e independiente para planta MAYA, trayectoria actual. ....	62
4.5.2. Propuesta 2. Suministro de agua de enfriamiento proveniente de la torre CT-1004N. ....	64
4.5.3. Propuesta 3. Torre de enfriamiento nueva en área de almacenes. ....	67
4.6. Evaluación económica.....	72
4.6.1. Propuesta 1.....	72



## ÍNDICE

4.6.2. Propuesta 2.....	75
4.6.3. Propuesta 3.....	79
5. CONCLUSIONES.....	85
6. BIBLIOGRAFÍA .....	88
7. ANEXOS .....	90
7.1. Metodología para el análisis del sistema de bombeo .....	90
7.2. Metodología para la construcción de una curva de enfriamiento.....	94
7.3. Memoria de cálculo de simulación realizada en PIPEPHASE 9.2 .....	96
7.4. Glosario .....	103



## ÍNDICE

### TABLAS

Tabla 1.	Herramientas para modelar redes hidráulicas .....	23
Tabla 2.	Factores que se analizan en una red hidráulica.....	26
Tabla 3.	Características de diseño de torre de estudio .....	31
Tabla 4.	Temperaturas de entrada y de salida a plantas de proceso. ..	32
Tabla 5.	Información de las bombas del sistema. ....	34
Tabla 6.	Características de diseño de torre de estudio .....	36
Tabla 7.	Medición de temperaturas.....	37
Tabla 8.	Costos variables de los insumos (Datos internos de PEMEX )	41
Tabla 9.	Consideraciones porcentuales de parámetros económicos....	42
Tabla 10.	Cálculo de disipación de calor por Planta. ....	46
Tabla 11.	Resultados de la velocidad angular de cada bomba.....	48
Tabla 12.	Resultados para la carga dinámica total de cada bomba.....	48
Tabla 13.	Resultados del cálculo de la potencia de accionamiento y al freno.....	48
Tabla 14.	Resultados para la potencia hidráulica de cada bomba.....	49
Tabla 15.	Resultados del NSPHd (disponible).....	49
Tabla 16.	Resultados para la eficiencia de la bomba y la total del motor-bomba. ....	50
Tabla 17.	Resultados de simulación hidráulica con la alternativa de instalación de nuevo cabezal conservando la trayectoria actual. ....	63
Tabla 18.	Requerimientos de agua de enfriamiento .....	65



## ÍNDICE

Tabla 19.	Resultados de simulación hidráulica con la alternativa de Suministro de agua de enfriamiento proveniente de la torre CT-1004N. ....	66
Tabla 20.	Resultados de simulación con alternativa de torre nueva en área de almacenes.....	68
Tabla 21.	Comparación de propuestas de solución a las problemáticas hidráulicas presentes en la planta MAYA.....	70
Tabla 22.	Requerimientos e inversión para instalación de nuevo cabezal conservando la trayectoria actual. ....	72
Tabla 23.	Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento para propuesta 1. ....	73
Tabla 24.	Cálculo de VPN, TIR y PRI para la propuesta 1. ....	74
Tabla 25.	Requerimientos e inversión para el suministro de agua de la Torre CT-1004N a planta MAYA. ....	76
Tabla 26.	Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento para propuesta 2. ....	77
Tabla 27.	Cálculo de VPN, TIR y PRI para la propuesta 2. ....	78
Tabla 28.	Requerimientos e inversión para construcción de nueva torre de enfriamiento en área de almacenes.....	80
Tabla 29.	Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento para propuesta 3. ....	80
Tabla 30.	Cálculo de VPN, TIR y PRI para la propuesta 3. ....	81
Tabla 31.	Costos de inversión, operación y mantenimiento para cada una de las propuestas.....	83
Tabla 32.	Comparación de los parámetros económicos de las 3 propuestas	84





## ÍNDICE

### FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Composición de un sistema de enfriamiento. ....	13
<b>Figura 2.</b>	Diagnóstico térmico.....	14
<b>Figura 3.</b>	Corte transversal de una Torre de Enfriamiento. ....	16
<b>Figura 4.</b>	Curva característica de la bomba .....	20
<b>Figura 5.</b>	Diagrama de nodos de cabezal de suministro y retorno de agua de enfriamiento en simulador especializado PIPEPHASE.....	25
<b>Figura 6.</b>	Red de distribución de agua de enfriamiento.....	35
<b>Figura 7.</b>	Pasos a seguir para simular la red hidráulica en PIPE PHASE. . .....	40
<b>Figura 8.</b>	Simulador CTI toolkit, ver. 3.00.18.02.....	45
<b>Figura 9.</b>	Calor disipado por planta. ....	47
<b>Figura 10.</b>	Relación de consumo eléctrico, trabajo de flecha y potencia hidráulica en las bombas actuales. ....	50
<b>Figura 11.</b>	Eficiencias de las bombas.....	51
<b>Figura 12.</b>	Pérdidas por fricción en equipos de la planta Hidrógeno.....	53
<b>Figura 13.</b>	Pérdidas por fricción en equipos de la planta MTBE. ....	54
<b>Figura 14.</b>	Pérdidas por fricción en equipos de la planta TAME. ....	55
<b>Figura 15.</b>	Pérdidas por fricción en equipos de la planta U-901.....	56
<b>Figura 16.</b>	Pérdidas por fricción en equipos de la planta HDS de Gasóleos. .....	57
<b>Figura 17.</b>	Pérdidas por fricción en equipos de la planta MAYA. ....	58
<b>Figura 18.</b>	Carga dinámica total en los equipos usuarios de la torre de enfriamiento .....	59



## ÍNDICE

<b>Figura 19.</b> Curva característica del sistema de bombeo contra sistema hidráulico.....	60
<b>Figura 20.</b> Instalación de nuevo cabezal conservando la trayectoria actual .....	64
<b>Figura 21.</b> Integración de Torre CT-1004N a planta MAYA con cabezal de 40” .....	67
<b>Figura 22.</b> Ubicación de la nueva torre de enfriamiento en área de almacenes y trayectoria. ....	69
<b>Figura 23.</b> Valor presente neto a lo largo del periodo de evaluación para la propuesta 1. ....	75
<b>Figura 24.</b> Valor presente neto a lo largo del periodo de evaluación para la propuesta 2. ....	79
<b>Figura 25.</b> Valor presente neto a lo largo del periodo de evaluación para la propuesta 3. ....	82



## INTRODUCCIÓN

### 1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito industrial, un sistema de enfriamiento es un circuito utilizado para enfriar el agua caliente proveniente de los equipos de proceso por medio de una torre de enfriamiento.

En una torre de enfriamiento existe la transferencia de calor sensible y calor latente al entrar en contacto el agua caliente con el aire. La masa de agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del líquido, el cual es cedido al aire obteniéndose el enfriamiento del agua y el aumento de la temperatura del aire.

Las torres de enfriamiento utilizadas en el Sistema Nacional de Refinación son de las más grandes que se pueden encontrar en la industria mexicana. Entre sus características destacan el flujo de recirculación de 10 000 GPM por celda y que los sistemas de bombeo de agua de enfriamiento representan el consumo del 60% del total de energía eléctrica de una refinería.

En este trabajo se presenta un diagnóstico integral realizado a un sistema de enfriamiento, con el fin de detectar áreas de oportunidad de mejora y dar distintas propuestas técnicas para mejorar el sistema, cumpliendo los requerimientos de flujo y de presión del agua de enfriamiento de los equipos de intercambio de calor en las plantas de proceso.



## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Problemática

En el Sistema Nacional de Refinación, se tienen sistemas de enfriamiento que requieren un mantenimiento más efectivo dado que muchos de sus equipos y accesorios existentes ya han rebasado su vida útil y su operación actual, en muchos casos, difiere de sus condiciones de diseño.

Si una planta de proceso no tiene una correcta disipación de calor, presenta problemas en la producción ya que no se ingresa más materia prima a esta lo que ocasiona que se tenga limitante para la producción.

Así entonces, es necesario implementar estudios como el presente que tiene por objetivo mejorar la operación de los sistemas de enfriamiento, proponiendo opciones viables basadas en un correcto diagnóstico técnico y en análisis costo – beneficio.

### 1.2. Justificación

Con el fin de cumplir con una correcta disipación de calor en las plantas de proceso es importante determinar la situación actual del sistema y para eso se evalúan aspectos importantes que impactan sobre la correcta disipación de calor, como son; el flujo de suministro a plantas, las temperaturas de suministro y de retorno, y la presión de descarga.

Para determinar si existe una correcta disipación de calor se realizan diagnósticos térmicos e hidráulicos.

Un diagnóstico térmico consiste en hacer una evaluación del desempeño de una torre de enfriamiento, a través del cálculo de la disipación de calor en cada planta de la que se compone el sistema de enfriamiento.



## INTRODUCCIÓN

Un diagnóstico hidráulico en un sistema de distribución consiste en determinar las pérdidas de fricción, evaluar el sistema bombeo y determinar a qué presión y con qué flujo debe suministrarse agua a cada planta.

El presente estudio se justifica sobre la necesidad de mejorar el suministro de agua de enfriamiento a plantas de proceso en una refinería para garantizar una adecuada disipación de calor en los equipos de las mismas.

### 1.3. Objetivo general

Realizar un diagnóstico térmico e hidráulico de un sistema de enfriamiento con agua para equipos de proceso en una refinería, a través del uso de simuladores, con el fin de detectar áreas de oportunidad que permitan plantear propuestas de mejora del desempeño del sistema completo y comparar cuál de dichas propuestas es la más conveniente desde los puntos de vista técnico y económico.

### 1.4. Objetivos particulares

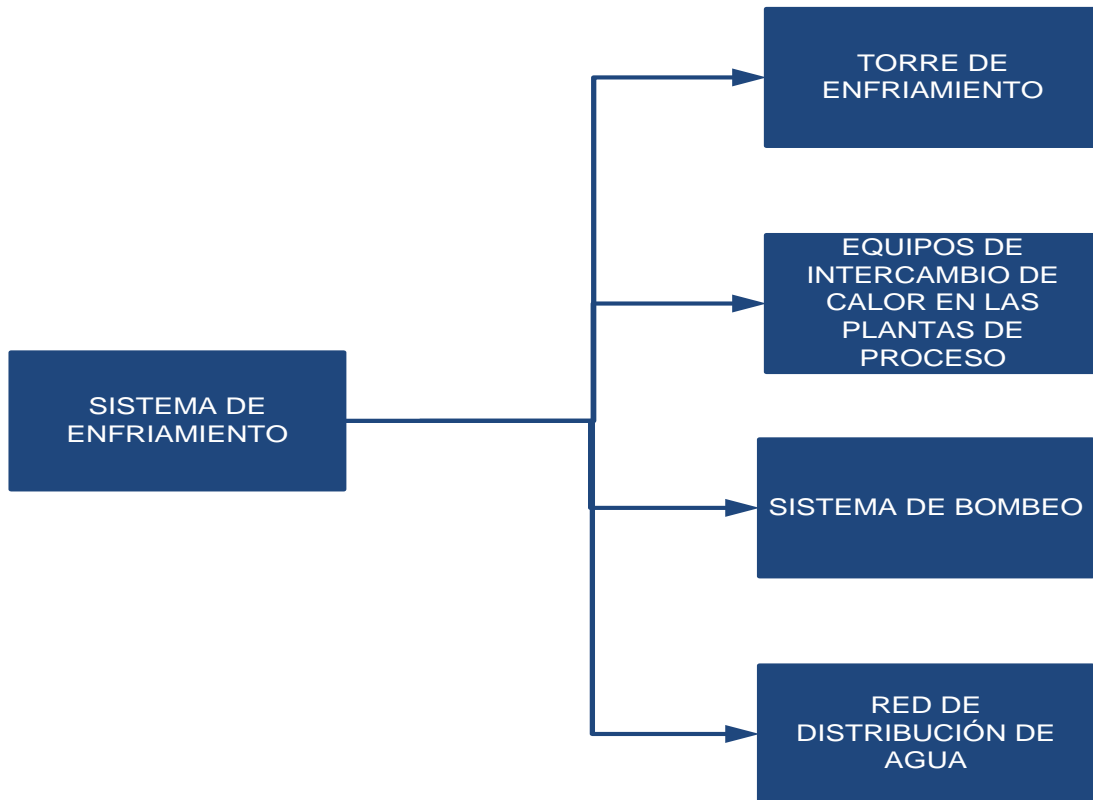
- ❖ Realizar un diagnóstico térmico de un sistema de enfriamiento.
- ❖ Realizar un análisis de eficiencia al sistema de bombeo de agua hacia los equipos de intercambio de calor en las plantas del sistema.
- ❖ Realizar un diagnóstico hidráulico de la red de distribución de agua de enfriamiento a equipos de plantas usuarias.
- ❖ Plantear propuestas de mejora del funcionamiento de la red de distribución de agua a plantas usuarias.
- ❖ Realizar un análisis económico de las diferentes propuestas para seleccionar la más conveniente.



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El presente trabajo consiste en la evaluación del desempeño de un sistema de enfriamiento existente en una refinería mexicana. Un sistema de enfriamiento con agua para equipos de proceso está compuesto por los elementos mostrados en la Figura 1.



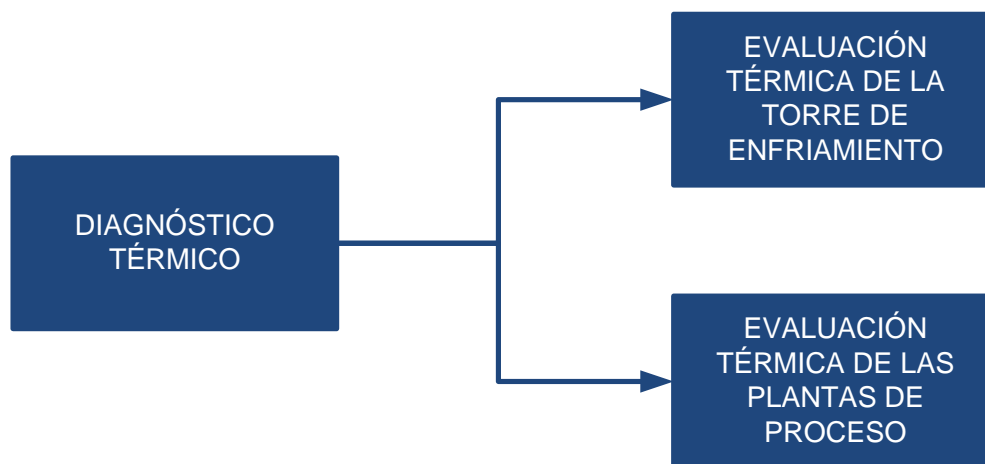
**Figura 1.** Composición de un sistema de enfriamiento.



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. Fundamentos térmicos

El diagnóstico térmico se divide en 2 partes, la primera consiste en la evaluación térmica a la torre de enfriamiento misma y la segunda parte consiste en la evaluación térmica a las plantas proceso que están en el sistema de enfriamiento (Figura 2).



**Figura 2.** Diagnóstico térmico

#### 2.1.1. Evaluación térmica de una torre de enfriamiento

Una torre de enfriamiento de acuerdo con el *Cooling Technology Institute* es un equipo de disipación de calor, que remueve calor a la atmósfera a través del enfriamiento de una corriente de agua (*Cooling Technology Institute, 2012*).

El enfriamiento ocurre cuando el agua, al caer a través de la torre, se pone en contacto directo con una corriente de aire que fluye a contracorriente o a flujo cruzado, con una temperatura de bulbo húmedo inferior a la temperatura del agua caliente. En estas condiciones, el agua se enfría por transferencia de masa (evaporación) y por



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS



transferencia de calor sensible y latente del agua al aire, lo que origina que la temperatura del aire y su humedad aumenten y que la temperatura del agua descienda. La temperatura límite de enfriamiento del agua es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada de la torre.

A continuación se presenta un diagrama de un corte transversal donde se indica las partes de una torre de enfriamiento (Figura 3).





DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CON AGUA PARA EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

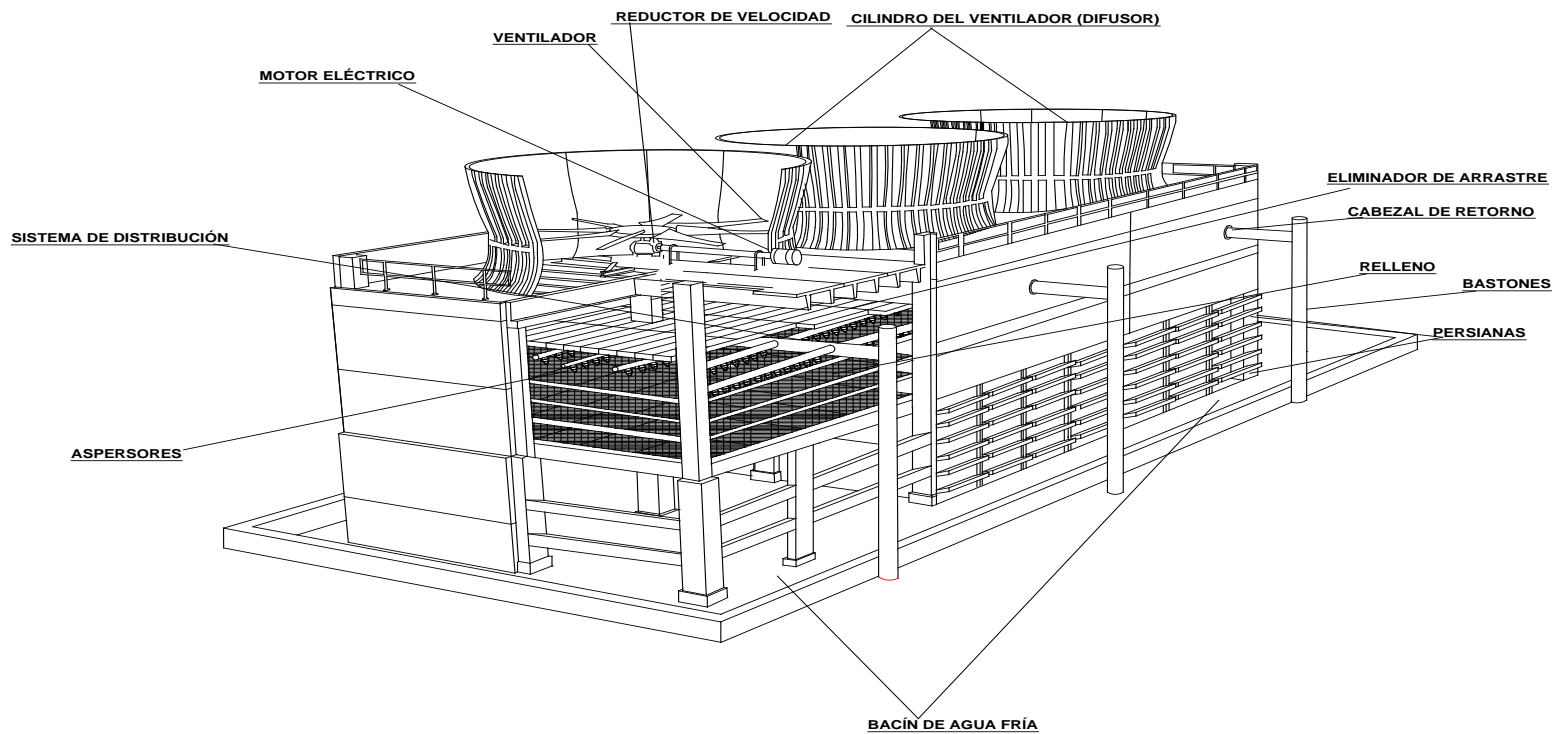


Figura 3. Corte transversal de una Torre de Enfriamiento.



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS



En la evaluación térmica de una torre de enfriamiento se consideran los siguientes parámetros (Ibarra, 2008):

- ❖ *Temperatura de agua caliente:* Temperatura del agua de recirculación de la torre que proviene de las plantas y llega a la tina de agua caliente de ésta. También se le conoce como temperatura de retorno.
- ❖ *Temperatura de agua fría:* Temperatura del agua de recirculación de la torre que sale del bacín de agua fría de ésta. También se le conoce como temperatura de suministro.
- ❖ *Temperatura del bulbo húmedo:* Temperatura de bulbo húmedo de una mezcla aire-agua, proporciona una medida de la humedad de la mezcla; entre menos sea la humedad mayor será la diferencia entre las temperaturas 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).
- ❖ *Rango de temperatura:* Es la diferencia entre la temperatura suministro y de retorno.
- ❖ *Aproximación de temperatura:* Es la diferencia entre la temperatura del agua suministro 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:



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- La cantidad de energía que se disipa. La disipación de calor es la cantidad de energía requerida para llevar a cabo el fenómeno de enfriamiento del agua, y se determina por la ecuación 1 (*Ibarra, 2008*).

$$Q = F * Cp * (TAC - TAF) * 8.35 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Q= Calor disipado (BTU/min)

F= Flujo de recirculación (GPM)

TAC= Temperatura del agua caliente (°F)

TAF= Temperatura del agua fría (°F)

Cp= Capacidad calorífica (kcal/kg°C)

8.35= Factor de conversión

- Determinación de la eficiencia térmica: Esta eficiencia es determinada mediante la relación entre la disipación de calor experimental y la disipación de calor de diseño, la cual es calculada con la ecuación número 2 (*Ibarra, 2008*):

$$E = \frac{Q_{prueba}}{Q_{diseño}} * 100$$

Ec. 2

Q<sub>prueba</sub>= Disipación de calor de prueba.

Q<sub>diseño</sub>= Disipación de calor de diseño.

- Capacidad de enfriamiento: Se define como la cantidad o flujo de agua de recirculación que la torre puede manejar a las condiciones de diseño, ésta es evaluada con el simulador **CTI toolkit, ver. 3.00.18.02**.



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS



### 2.1.2. Evaluación térmica de los equipos de intercambio de calor de las plantas de proceso.

Para determinar las condiciones actuales de operación y la distribución de la energía en las plantas de proceso, es necesario cuantificar cuánto calor es disipado por el agua de enfriamiento en cada planta de proceso, para eso se utiliza como principio la ecuación número 1.

Como la energía se debe conservar, el calor disipado en la torre de enfriamiento debe ser igual a la suma del calor transferido en todos los equipos de intercambio de calor en las plantas de proceso que utilizan agua de enfriamiento de esa torre.

### 2.2. Sistema de bombeo

Una bomba es una máquina que se utiliza para mover un líquido a través de un sistema de tuberías y para elevar la presión de este líquido. Una bomba puede definirse además como una máquina que utiliza varias transformaciones de energía para aumentar la presión de un líquido. La entrada de energía en la bomba es típicamente la electricidad que es utilizada para alimentar el accionador, hay formas alternativas de energía para la alimentación del accionador que incluyen vapor de alta presión para impulsar una turbina de vapor, aceite combustible para alimentar un motor hidráulico, y aire comprimido para accionar un motor (Volk, 2005).

El desempeño de los equipos de bombeo se representa gráficamente a través de una curva característica que muestra lo siguiente:

- Capacidad (expresada en unidades de volumen por unidad de tiempo, como GPM).
- Carga total (expresada en pies)



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- Velocidad a la cual funciona la bomba (RPM)

Adicionalmente la curva también proporciona los valores de la potencia al freno requerido y la eficiencia.

Un ejemplo de una curva característica se muestra en la Figura 4 (*FlowServe, 2013*).

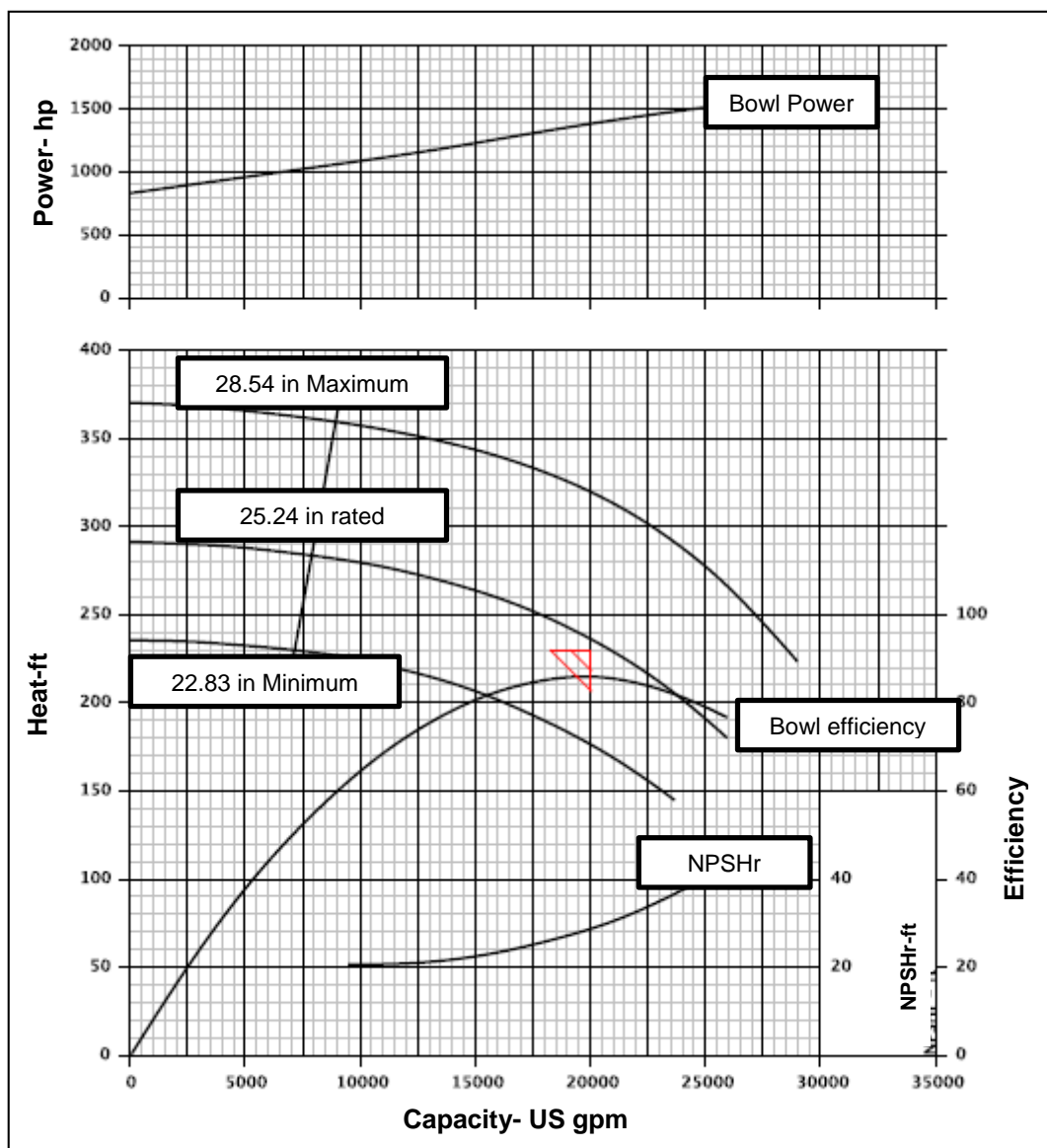


Figura 4. Curva característica de la bomba



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS



La Capacidad es el flujo que se puede bombear de acuerdo a la carga dinámica total de diseño.

La Carga total es la suma de la carga estática más la carga dinámica. Esta carga debe ser menor a la carga del sistema de bombeo.

La carga estática es la diferencia entre el nivel donde se encuentra el líquido y el nivel más alto al cual llega éste. Esta carga solamente toma la medida con respecto al eje de la bomba, no toma los recorridos horizontales.

La carga dinámica es la carga 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** que 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. Se calcula de acuerdo a la ecuación 3.

$$P_{ACC} = \sqrt{3} \times V \times I \times fp \quad \text{Ec. 3}$$

*Donde:*

$P_{ACC}$  *Potencia de accionamiento (W).*

$V$  *Voltaje de la línea de alimentación (V).*

$I$  *Intensidad de corriente (A).*

$fp$  *Factor de potencia.*



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La **potencia en la flecha o potencia al freno** es la energía por unidad de tiempo que se transfiere del motor a la flecha de la bomba. Se calcula de acuerdo a la ecuación 4.

$$P_{FRENO} = \sqrt{3} \times V \times I \times fp \times \eta_m \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$P_{FRENO}$  Potencia al freno (W).

$V$  Voltaje de la línea de alimentación (V).

$I$  Intensidad de corriente (A).

$fp$  Factor de potencia.

$\eta_m$  Eficiencia del motor eléctrico.

La **potencia hidráulica** 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 las plantas. Se calcula de acuerdo a la ecuación 5.

$$P_H = Q \times \rho \times g \times H_{DT} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$P_H$  Potencia hidráulica (w).

$Q$  Gasto volumétrico ( $m^3/s$ ).

$\rho$  Densidad del agua ( $kg/m^3$ ).

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

$H_{DT}$  Carga dinámica total, (m).



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La **velocidad** a la cual funciona la bomba es la velocidad de giro del impulsor de acuerdo a su curva característica.

### 2.3. Redes hidráulicas

Una red hidráulica es el conjunto de tuberías, equipo y accesorios que integran un sistema de suministro y conducción de un fluido, en este caso agua desde los puntos de producción y almacenamiento hasta los puntos de consumo.

Existen varias herramientas para realizar la evaluación de una red hidráulica, en la Tabla 1 se muestran algunos de ellos y se describe brevemente cada uno.

Tabla 1. Herramientas para modelar redes hidráulicas

HERRAMIENTA	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
PIPE LOSS (Manual del simulador).	Software para cálculo de segmentos y accesorios	El flujo se considera a tubo lleno, la tubería siempre se considera de sección transversal circular. El fluido se considera de una sola fase, se apoya en el modelo de Moody, se pueden considerar varios tipos de válvulas.
EPANET (Manual del simulador).	Software para cálculo de segmentos rectos, válvulas y redes.	Las pérdidas por carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chazy-Manning, únicamente funciona para trayectorias rectas, se pueden considerar varios tipos de válvulas.
PIPE PHASE (Manual del simulador).	Software para cálculo de segmentos rectos, accesorios y redes.	Las pérdidas por carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chazy-Manning, se pueden considerar varios tipos de válvulas.





## FUNDAMENTOS TEÓRICOS



Más adelante se presenta un caso de estudio donde se utilizó el simulador especializado PIPE PHASE para la evaluación hidráulica y las pérdidas por carga se calcularon con base en la fórmula de Darcy-Weisbach.

La ecuación de Darcy-Weisbach es una ecuación ampliamente usada en hidráulica. Esta fórmula permite la evaluación apropiada del efecto de cada uno de los factores que inciden en la pérdida de energía en una tubería.

La ventaja de esta fórmula es que puede aplicarse a todos los tipos de flujo hidráulico (laminar, transicional y turbulento), dependiendo del tipo de flujo el coeficiente de fricción toma los valores adecuados.

A continuación la ecuación 6 representa la fórmula de Darcy-Weisbach (Crane, 1969).

$$h_L = f \frac{L*v^2}{2D*g} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$h_L$ : Pérdida de carga debida a la fricción (m).

$f$ : Factor de fricción de Darcy.

$L$ : Longitud de la tubería (m).

$D$ : Diámetro de la tubería (m).

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

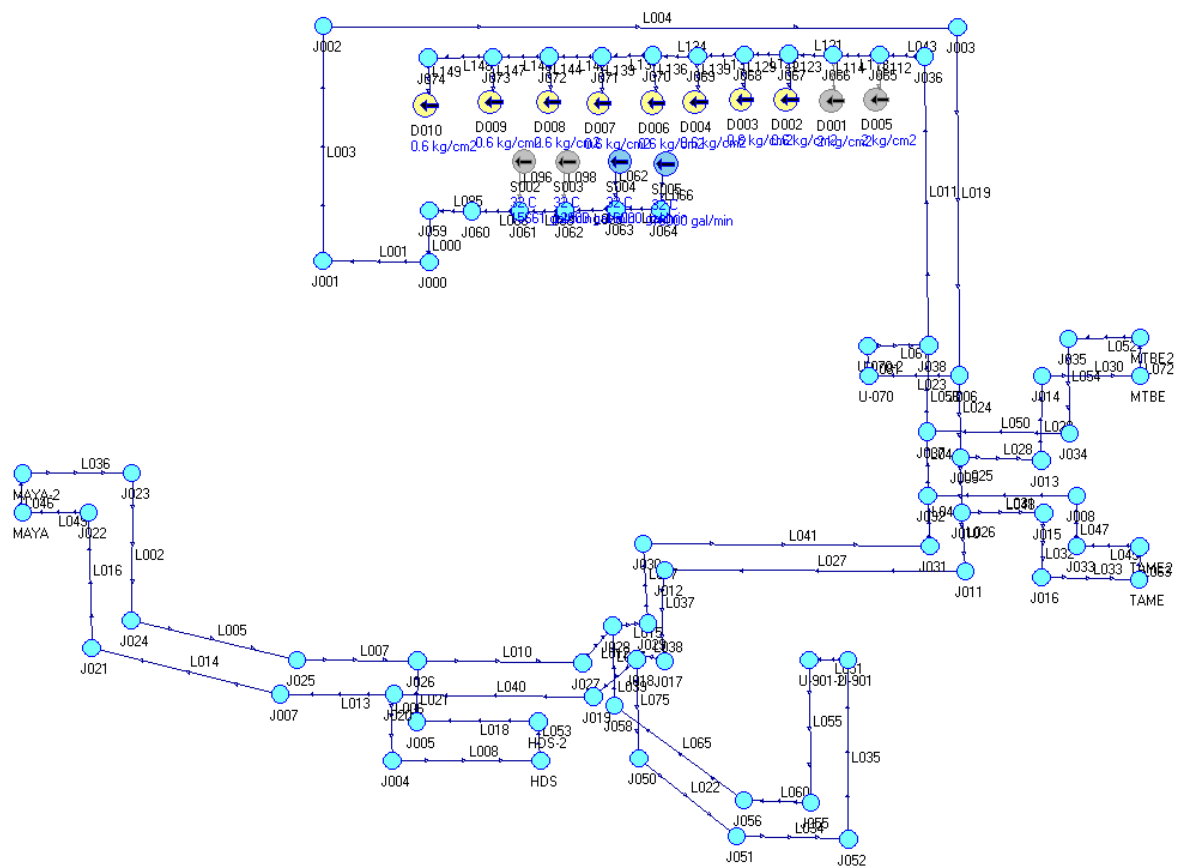
$g$ : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

Un ejemplo de un modelo simplificado de una red hidráulica se muestra en la Figura 5, donde se representa la cantidad de plantas a las que se les proporciona el servicio de enfriamiento.



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El modelo se desarrolla en dos líneas por separado para evaluar los cabezales de distribución de agua de enfriamiento por suministro y retorno. Se da un requerimiento de diseño en límite de batería, para fijar el parámetro para evaluar caídas de presión por el flujo circulado.



**Figura 5.** Diagrama de nodos de cabezal de suministro y retorno de agua de enfriamiento en simulador especializado PIPEPHASE.

En esta red hidráulica los factores que se analizan son: el embalse, depósitos, nudos de caudal, la tubería, las bombas y las válvulas (Tabla 2).



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Tabla 2. Factores que se analizan en una red hidráulica.

FACTOR	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.	No se requieren datos.	No existen resultados derivados de cálculo.
Depósitos	Nudos con capacidad de almacenamiento.	No se requieren datos.	No existen resultados derivados de 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).	Cota respecto a un nivel de referencia (usualmente el nivel de mar). Demanda de agua (flujo que abandona la red).	Presión
Tubería	Líneas que transportan agua de un nudo a otro.	Nudos inicial y final. Diámetro Longitud Estado (abierto, cerrada, o con válvula de retención).	Flujo
Bombas	Líneas que comunican energía al fluido.	Nudos de aspiración e impulsión. Curva característica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flujo trasegado</li> <li>Incremento de carga comunicada al fluido.</li> </ul>
Válvulas	Líneas que limitan la presión o el caudal en un punto determinado de la red.	Los nudos aguas arriba y aguas abajo. Diámetro Consigna	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flujo de paso</li> <li>Pérdida de carga.</li> </ul>



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS



### 2.4. Criterios económicos para la toma de decisiones en un proyecto

Los modelos de evaluación económica son instrumentos que permiten a los inversionistas tomar sus decisiones, de ahí la importancia de conocer estos instrumentos, ya que su correcta aplicación y uso depende el éxito del proyecto (Ciceri, 2009).

#### Tasa de descuento

La Tasa de descuento es la tasa aplicable en el comparador público privado, la cual representa el costo de oportunidad de utilizar recursos públicos en el proyecto. Dicha tasa dependerá de la clasificación de riesgo establecida para México, tomando como referencia la tasa libre de riesgo en moneda local, la tasa que se deberá utilizar en el análisis de rentabilidad será del 12 por ciento anual en términos reales (*DOF, 2012*).

#### Métodos de análisis

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

##### 2.4.1. Valor Presente Neto

El Valor Presente Neto (VPN) simplemente significa traer del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente. Para calcularlo, sólo 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 de la tasa social de descuento.

El VPN es un método que no presenta desventajas teóricas; siempre utiliza una sola tasa de descuento y aunque presente varios cambios de signo, su cálculo es una simple suma algebraica de flujos descontados, que produce un resultado concreto



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS



expresado en dinero, tomando como referencia el valor de cero, que es contra el que se compara (BACA, 2003).

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

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

Ec. 7

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 social de descuento.

Se espera que el resultado de este análisis sea un valor del VPN positivo, esto significa que se recuperará la inversión y se tendrá una ganancia. 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.

### 2.4.2. Tasa Interna de Retorno

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:



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS



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

Ec. 8

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

### 2.4.3. Periodo de Recuperación de Inversión

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.



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS



*Costo de agua de enfriamiento:* Costo asociado al agua de repuesto de la torre de enfriamiento con su tratamiento químico.

*Costo de servicios auxiliares.* Considera el consumo de energía eléctrica, utilizado en la iluminación, bombas y ventiladores del sistema de enfriamiento.

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

*Costo fijo directo:* Son los relacionados al mantenimiento de los equipos.

*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).



### 3. CASO DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA.

A continuación se presenta el sistema de enfriamiento de estudio y la metodología que se utilizó para realizar el diagnóstico térmico, el análisis electromecánico a sus bombas y la evaluación hidráulica a la red de distribución de agua.

#### 3.1. Caso de estudio

A continuación se presenta el sistema de enfriamiento de estudio.

##### 3.1.1. Situación actual de la torre de enfriamiento

En la Tabla 3 se muestran las características de diseño de la Torre de enfriamiento del sistema de estudio.

Tabla 3. Características de diseño de torre de estudio

<b>Tipo de operación</b>	Contra flujo
<b>Número de celdas</b>	10
<b>Flujo por celda (GPM)</b>	10,000 (2,271.2 m <sup>3</sup> /h)
<b>Tipo de estructura</b>	Concreto y relleno de PVC
<b>Capacidad de diseño (GPM)</b>	100,000 (22,712.4 m <sup>3</sup> /h)
<b>Capacidad de operación (GPM)</b>	70,000 (15,898.7 m <sup>3</sup> /h)
<b>Año de inicio de operaciones</b>	1978
<b>Marca</b>	ECODYNE





La torre de enfriamiento opera de la siguiente manera:

- Flujo de suministro: 29439 GPM
- Flujo de retorno: 29439 GPM
- Temperatura del agua fría: 31.4°C
- Temperatura del agua caliente: 35.9°C
- Temperatura del bulbo seco: 30.6 °C
- Temperatura del bulbo húmedo: 27.7 °C
- Intervalo: 4.5 °C

### 3.1.2. Plantas de proceso del sistema de enfriamiento.

En el sistema de enfriamiento se suministra agua a seis plantas de proceso.

En la Tabla 4 se muestra las plantas usuarias; y las temperaturas de agua de suministro y de agua retorno para cada planta de proceso.

Tabla 4. Temperaturas de entrada y de salida a plantas de proceso.

PLANTA	TEMPERATURA DE AGUA FRÍA (°F)	TEMPERATURA DE AGUA CALIENTE (°F)
HIDRÓGENO	88.5	94.8
MTBE	88.5	92.5
TAME	88.5	97.5
U-901	88.5	96.4
HDS	88.5	95.9
MAYA	88.5	97.5

A partir de los valores medidos se determinó que el intervalo promedio de temperatura con el que actualmente opera la torre es aproximadamente de 8.1° F (4.5° C).



### 3.1.3. Sistema de bombeo

El sistema de bombeo está compuesto por 4 bombas, de las cuales 3 operan utilizando energía eléctrica y una de ellas vapor (turbo-bomba).

De estas 4 bombas actualmente están operando 2, las características de las bombas del sistema se presenta en la Tabla 5.



**DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CON AGUA PARA EQUIPOS  
DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.**



**CASO DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA**

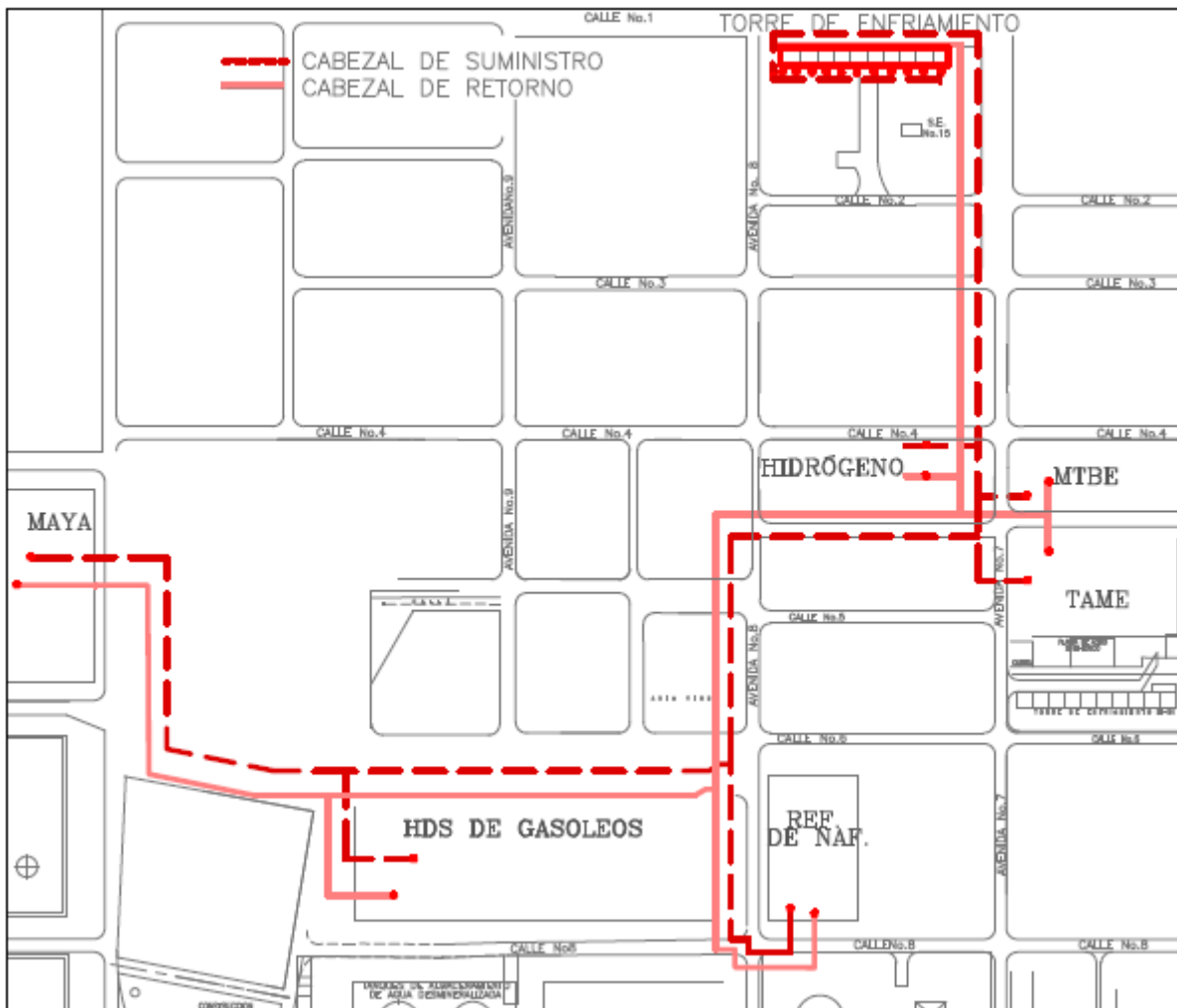
Tabla 5. Información de las bombas del sistema.

TAG	SERVICIO	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ESTADO FÍSICO Y OPERACIÓN	INSTRUMENTACIÓN ASOCIADA	OBSERVACIONES	FLUJO (GPM)	CARGA DINÁMICA TOTAL (m)
GA-001 A	Agua de Enfriamiento	Capacidad Caudal: 4,600 m <sup>3</sup> /h, H: 70.3 m, RPM: 1180, Presión trabajo adm: 7.5 kg/cm <sup>2</sup> , T <sub>Max. Amb.</sub> =75°C	Buen Estado En Operación  Manual  continua	Con manómetro en la línea de descarga	P= 6.8 kg/cm <sup>2</sup>	13,429	73
GA-001 B	Agua de Enfriamiento	Sin datos de placa en motor y bomba. Capacidad: 4,600 m <sup>3</sup> /h.	Oxidada	Con manómetro en la línea de descarga	Fuera de Operación	Disponible	68
GA-001 C	Agua de Enfriamiento	Sin datos de placa en motor y bomba. Capacidad: 4,600 m <sup>3</sup> /h.	Buen Estado En Operación  Manual continua	Con manómetro en la línea de descarga	P= 6.4 kg/cm <sup>2</sup>	16,010	72
GA-001 RT	Agua de Enfriamiento	Capacidad: 4,600 m <sup>3</sup> /h.	Buen Estado	Sin manómetro en la línea de descarga	Fuera de Operación	Disponible	73



### 3.1.4. Red de distribución de agua de enfriamiento

De acuerdo a la Figura 6 se obtiene la trayectoria de la red de distribución de la torre de enfriamiento.



**Figura 6.** Red de distribución de agua de enfriamiento.

En la Tabla 6 se presentan los requerimientos de flujo de agua y de presión para cada planta usuaria:



Tabla 6. Características de diseño de torre de estudio

PLANTA	FLUJO DE DISEÑO (GPM)	PRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )
HIDRÓGENO	3,302.0	5.0
MTBE	1,777.0	4.2
TAME	3,952.0	4.7
U-901	4,801.0	5.0
HDS	7,657.8	4.6
MAYA	20,167.5	5.1

### 3.2. Metodología

A continuación se presenta la metodología que se utilizó para realizar la evaluación del sistema de enfriamiento.

#### 3.2.1. Diagnóstico Térmico

❖ Evaluación térmica de la torre de enfriamiento

Para llevar a cabo un Diagnóstico Térmico de la torre de enfriamiento se realiza lo siguiente:

1. Se toman las temperaturas en la torre de enfriamiento de la manera descrita en la Tabla 7.



Tabla 7. Medición de temperaturas

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

2. Medir el flujo de agua fría de la torre.
3. Realizar el cálculo de calor disipado en la torre a condiciones de diseño y a condiciones actuales con la ecuación 1.
4. Realizar el cálculo de la eficiencia térmica con la ecuación 2.
5. Calcular la capacidad de enfriamiento de la torre utilizando el simulador **CTI Toolkit, Ver. 3.00.18.02** del *Cooling Technology Institute*, el cual requiere datos de diseño y prueba.

El procedimiento que se lleva a cabo para calcular la capacidad de enfriamiento es el siguiente:

- Seleccionar el apéndice precargado del simulador para torres de enfriamiento de una capacidad aproximada de 100, 000 GPM.



- Ingresar al simulador los datos de diseño de la torre de enfriamiento a la cual se calculó su capacidad.
- Ingresar 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.

#### 6. Realizar un análisis entre los datos obtenidos

- ❖ Evaluación térmica de las plantas de proceso

Para hacer la evaluación térmica de cada planta de proceso es necesario lo siguiente:

- Medir el flujo a la entrada y salida de cada planta (en el cabezal de suministro y retorno de agua de enfriamiento).
- Medir temperatura a la entrada y salida de cada planta (en el cabezal de suministro y retorno de agua de enfriamiento).

Al obtener estos datos, se calcula la disipación de calor por cada planta.

#### 3.2.2. Evaluación del sistema de bombeo

En un sistema de bombeo en paralelo, se debe considerar el número de bombas que operan normalmente, la torre de enfriamiento de estudio tiene el espacio para montar 4 bombas verticales de 20,000 GPM cada una, de las cuales dos están operando normalmente.

Para analizar un sistema de bombeo se realizan las actividades descritas a continuación:  
(*Pump System. Basic Assessment Guide, 2012*)

- Tomar lecturas de presión de los manómetros colocados en las descargas de bombas.



- Medir las RPM de la bomba, para ello se utiliza un tacómetro mecánico acoplado en el perímetro de la flecha.
- Medir la corriente y voltaje o cuando no se pueda medir debido a las condiciones operativas tomar las lecturas de los visualizadores de datos o “displays” conectados a los buses en la sub-estación.
- Medir el flujo de descarga de cada bomba.
- Con el valor de flujo y con el apoyo de la curva característica de la bomba obtener datos básicos como carga total y eficiencia de operación actual.
- Calcular el NPSH disponible de las bombas y determinar si hay problemas de cavitación.
- Calcular los términos de potencia de accionamiento ( $P_{am}$ ), potencia hidráulica (WHP) y potencia en la flecha (BHP).
- Realizar un análisis entre los datos obtenidos.

### 3.2.3. Evaluación de la red de distribución.

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

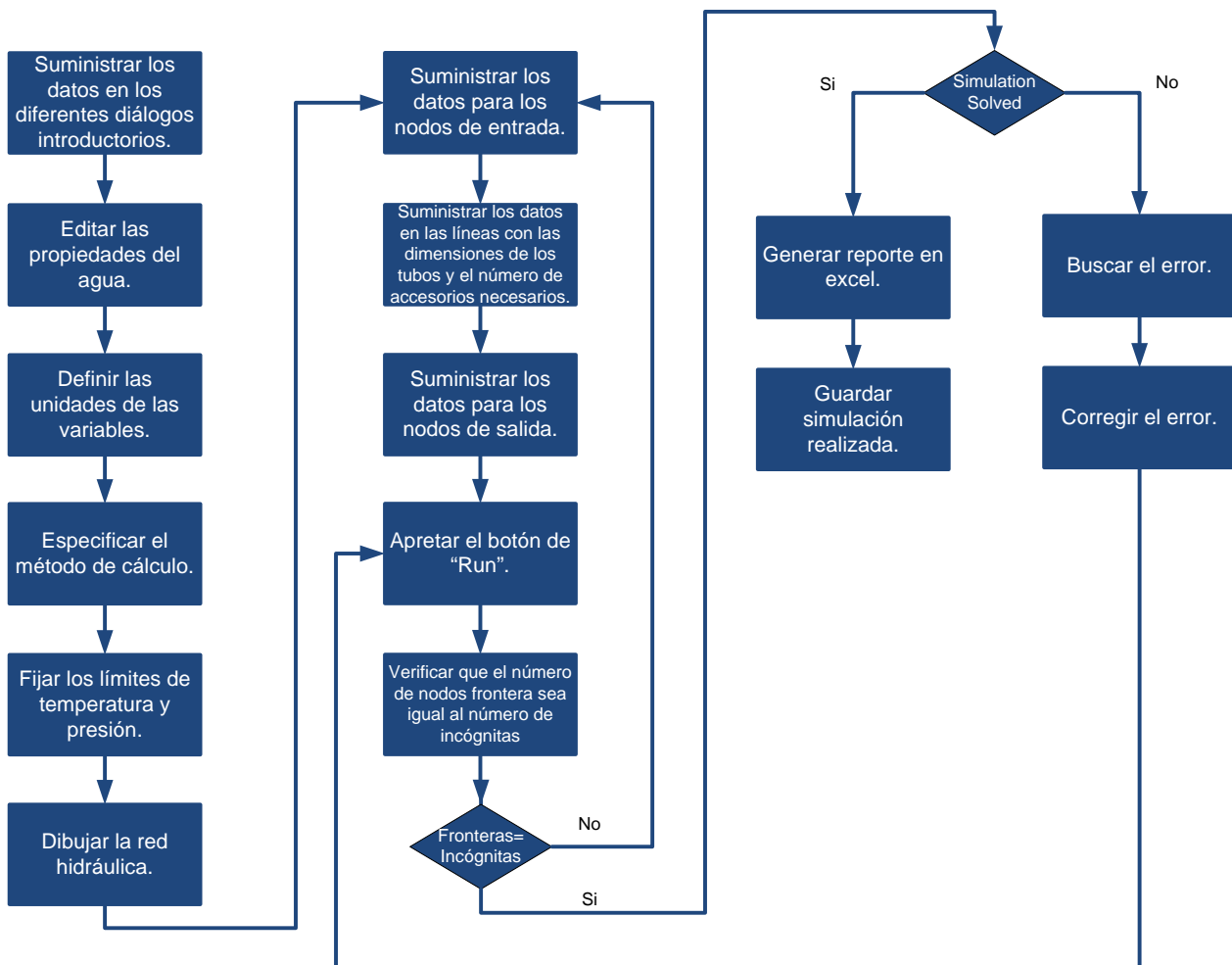
- Diagramas isométricos de la red de distribución de agua de enfriamiento.
- Presión en los puntos de suministro.
- Flujo volumétrico (GPM) en cada punto de suministro de las plantas usuarias del servicio de enfriamiento.





- Flujo volumétrico de descarga de cada bomba (GPM).

Para la evaluación de la red hidráulica se utilizó el software especializado PIPE PHASE utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach. En la Figura 7 se muestra un diagrama de bloques simplificando los pasos que se siguieron para la simulación de la red hidráulica.



**Figura 7.** Pasos a seguir para simular la red hidráulica en PIPE PHASE.

- Construir la curva del sistema de bombeo contra el sistema de enfriamiento. La metodología de la construcción de esta curva se muestra en el Anexo 7.2.
- Realizar análisis de los resultados obtenidos.



### 3.2.4. Evaluación económica

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

- Calcular la inversión inicial.
- Calcular el costo variable de producción con base en los costos unitarios de los insumos para la refinería, los cuales se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Costos variables de los insumos (Datos internos de PEMEX )

INSUMOS	COSTO UNITARIO	UNIDADES
AGUA CRUDA	8.4624	\$/m <sup>3</sup>
TRATAMIENTO QUÍMICO PARA EL AGUA DE RECIRCULACIÓN	1.3545	\$/m <sup>3</sup>
ENERGÍA ELÉCTRICA	1.2200	\$/kW-h
CRUDO MAYA	6.6540	\$/L

\*Datos actualizados a Enero 2013.

- Estimar los parámetros necesarios para utilizar los métodos de análisis tomando como referencia los porcentajes de la Tabla 9 (Peters, 2003).



Tabla 9. Consideraciones porcentuales de parámetros económicos

PARÁMETRO	PORCENTAJE CON RESPECTO A LA INVERSIÓN INICIAL
COSTOS DE OPERACIÓN	1
COSTO DIRECTO	3
DEPRECIACIÓN	5

- Calcular los ahorros en la producción de la gasolina Magna para lo cual se considera el costo real de la gasolina es de \$10.91 (precio enero 2013) por litro, pero se ajusta el precio a \$7.70 ya que se le descuenta una parte porque al salir de la planta MAYA no es un producto final (Datos internos de PEMEX).
- Calcular con los flujos estimados de costos de operación y los ahorros, los flujos de efectivo para un periodo de 20 años.
- Calcular el valor presente neto (VPN), utilizando la tasa social de descuento establecida por la Secretaria de Hacienda y Crédito Público que es del 12%.
- Calcular la TIR, la cual requiere los flujos de efectivo durante el periodo del proyecto.
- Para calcular el PRI se utiliza el método de interpolación, tomando los valores de referencia del VPN negativo y el inmediato VPN positivo.
- Por último se hizo una comparación económica de las 3 propuestas.



## RESULTADOS

### 4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de la evaluación térmica e hidráulica del sistema de enfriamiento de estudio.

#### 4.1. Diagnóstico térmico

El diagnóstico térmico se divide en 2 partes, la primera consiste en evaluación térmica a la torre de enfriamiento y la segunda parte consiste en la evaluación térmica a las plantas proceso que están en el sistema de enfriamiento. Los resultados se muestran a continuación.

##### 4.1.1. Evaluación térmica de la torre de enfriamiento

- Cálculo de disipación de calor torre de enfriamiento

Utilizando la ecuación 1 se calculó el calor disipado de la torre a las condiciones de diseño y a las condiciones actuales.

##### Para las condiciones de diseño

$$F= 100,000 \text{ GPM}$$

$$T_{AC}= 107.6 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$T_{AF}= 89.6 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$C_P= 1$$

$$Q= 100,000(107.6-89.6)*1*8.35$$

$$Q= 15,030,000 \text{ BTU/min}$$



## RESULTADOS

### Para la situación de prueba

$$F = 29,439 \text{ GPM}$$

$$T_{AC} = 96.56 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$T_{AF} = 88.52 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$C_P = 1$$

$$Q = 29,439(96.56 - 88.52) * 1 * 8.35$$

$$Q = 1,976,358 \text{ BTU/min}$$

- Determinación de la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento

Utilizando la ecuación 2 y con los valores de calor disipado para las condiciones de diseño y de operación actual, se calculó la eficiencia térmica.

$$E = \frac{1,976,358}{15,030,000} * 100$$

$$E = 13.15\%$$

- Determinación de la capacidad de enfriamiento

Con el simulador **CTI toolkit, ver. 3.00.18.02** (Figura 8) del *Cooling Technology Institute*, se determinó una capacidad de enfriamiento del 30.4%.

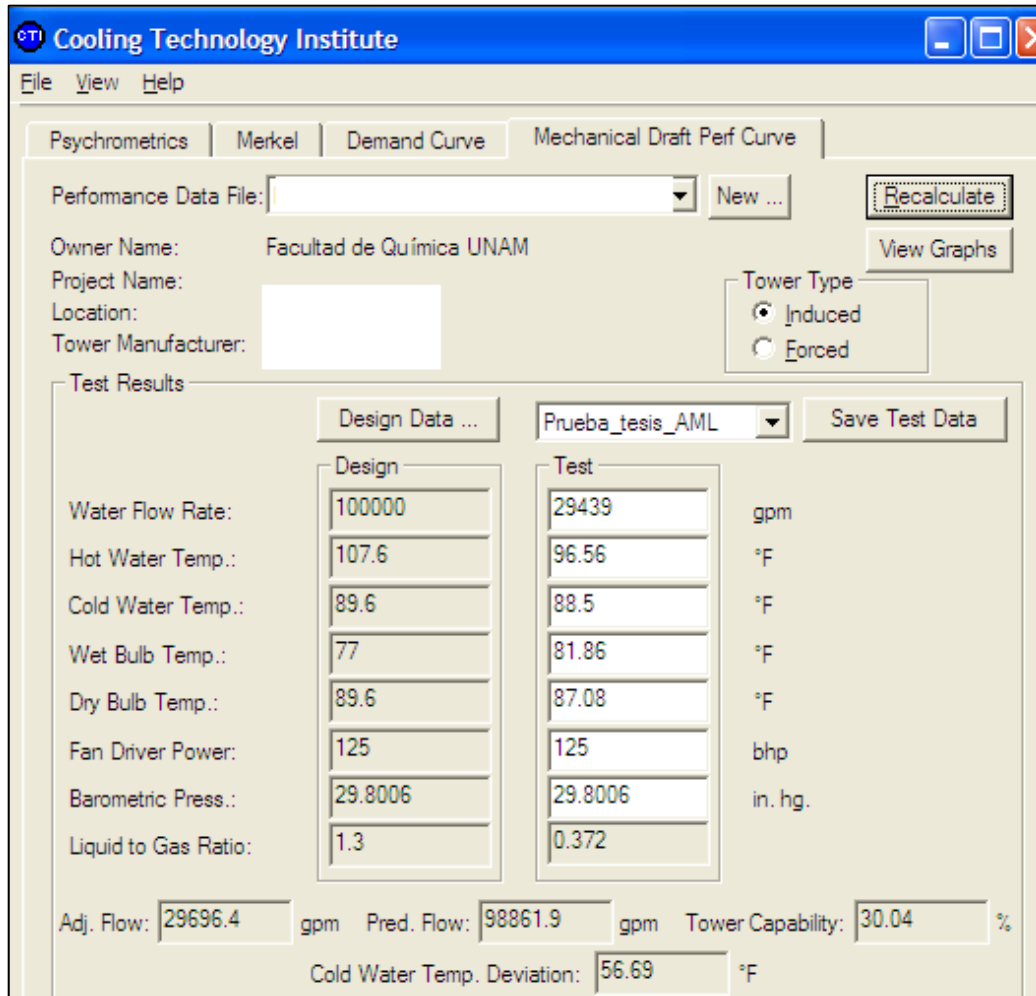
El porcentaje resultante multiplicado por el flujo de diseño, representa la cantidad de agua que se está enfriando al intervalo de diseño de la torre, es decir que la cantidad de agua que está enfriando la torre al intervalo de diseño es de 30,040 GPM, la cual no es muy aceptable, ya que no cumple con la demanda actual de agua que es de 47,437 GPM.



DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO  
CON AGUA PARA EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.



## RESULTADOS



**Figura 8.** Simulador CTI toolkit, ver. 3.00.18.02.

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.

$$Q = \frac{30.04}{100} \times 100,000 \text{ GPM} = 30,040 \text{ GPM}$$



## RESULTADOS

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 55 % menor con respecto al de diseño (4.5 ° C), por lo que la carga térmica actual de las plantas de proceso que tiene que disipar la torre de enfriamiento es de 1,976,358 BTU/min, lo cual representa el 13.15% del valor de diseño (15,030,000 BTU/min), esto indica que el proceso de transferencia de calor no es el más adecuado.

### 4.1.2. Evaluación térmica de las plantas de proceso

Utilizando la ecuación 1 se hace el cálculo de disipación de calor por planta, en la Tabla 10 se muestran los resultados.

Tabla 10. Cálculo de disipación de calor por Planta.

PLANTA	DELTA T (°C)		FLUJO (GPM)		CARGA DISIPADA (BTU/min)	
	DISEÑO	ACTUAL	DISEÑO	ACTUAL	DISEÑO	ACTUAL
MAYA	10	5.0	20,168	14,398	3,029,159	1,081,315
HDS	10	4.1	7,658	5,280	1,150,202	325,138
MTBE	10	2.2	1,855	1,687	278,666	55,745
TAME	10	5.0	3,952	2,294	593,635	172,249
HIDROGENO	10	3.5	3,302	2,766	495,915	145,409
NAFTAS	10	4.4	4,802	3,009	721,245	198,870

Los valores de la carga disipada en cada planta son muy bajos comparados con el de diseño, esto debido a que las plantas no operan al 100% de su capacidad de diseño a excepción de la planta MAYA.

En la Figura 9 se presentan los valores de calor disipado en cada planta, donde la Planta Maya es en la que necesita remover más calor.



## RESULTADOS

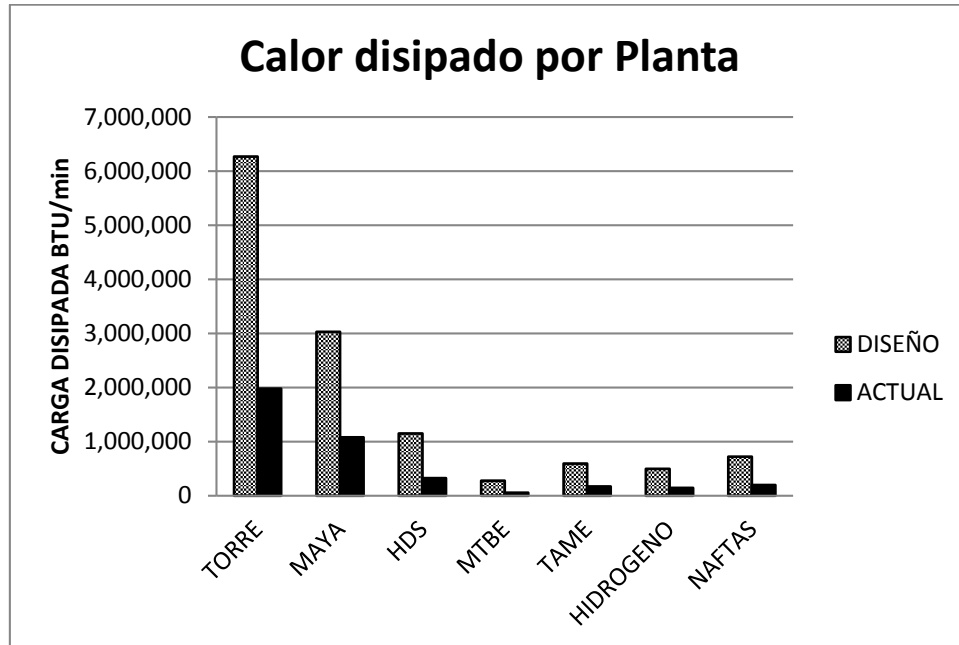


Figura 9. Calor disipado por planta.

### 4.2. Evaluación del sistema de bombeo

Para análisis del sistema de bombeo se desarrolló una memoria de cálculo que se muestra en el Anexo 7.1, esto para obtener los parámetros característicos de una bomba.

#### Velocidad angular

Los resultados para el cálculo de la velocidad angular de la bomba se muestran en la Tabla 11.





## RESULTADOS

Tabla 11. Resultados de la velocidad angular de cada bomba.

BOMBA	DIÁMETRO COPE EN BOMBA	DIÁMETRO POLEA DEL TACÓMETRO	LÉCTURA TACÓMETRO	VELOCIDAD ANGULAR CÁLCULADA
	cm	cm	RPM	RPM
GA-001A	22.86	5	5394.96	1180
GA-001B	22.86	5	5394.96	1180
GA-001C	22.86	5	5394.96	1180

### Carga dinámica total

Se calculó la carga dinámica total para cada bomba del sistema, los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados para la carga dinámica total de cada bomba.

BOMBA	FLUJO	PRESIÓN	TEMP	COLUMNA DE SUCCIÓN	CARGA DINÁMICA TOTAL
	m <sup>3</sup> /h	kg/cm <sup>2</sup>	°C	m	m
GA-001A	3,050.00	7.53	28.00	2.30	73.0
GA-001B	3,636.27	7.03	28.00	2.30	68.0
GA-001C	3,636.27	7.43	28.00	2.30	72.0

### Potencia de accionamiento y potencia al freno

Se calculó la potencia de accionamiento y la potencia al freno, los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados del cálculo de la potencia de accionamiento y al freno.

BOMBA	VOLTAJE	CORRIENTE	FASES	FACTOR DE POTENCIA	EF MOTOR	P <sub>ACC</sub>	P <sub>FRENO</sub>
	V	A			%	w	w
GA-001A	2,300	189.433	3	0.98	95	739534	702557
GA-001B	2,300	208.000	3	0.98	95	812017	771416
GA-001C	2,300	207.700	3	0.98	95	810846	770304



## RESULTADOS

### Potencia hidráulica

Se calculó la potencia hidráulica en base al flujo y a la carga dinámica total de cada bomba, los resultados se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados para la potencia hidráulica de cada bomba.

BOMBA	FLUJO		CARGA DINÁMICA TOTAL	DENSIDAD	POTENCIA HIDRÁULICA
	m <sup>3</sup> /hr	m <sup>3</sup> /s	m	kg/m <sup>3</sup>	W
GA-001A	3050	0.847	73	996	604294
GA-001B	3636	1.010	68	996	671105
GA-001C	3636	1.010	72	996	710582

### Cálculo del NPSH<sub>d</sub> (disponible)

Se realizó el cálculo de NPSH disponible, el cual indica que ninguna bomba tiene problemas de cavitación, los resultados se muestran la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados del NSPHd (disponible).

BOMBA	PRESIÓN ATMOSFÉRICA	TEMP	PRESIÓN DE VAPOR	COLUMNA DE SUCCIÓN	PÉRDIDAS POR FRICCIÓN	NPSH <sub>d</sub>	NPDH <sub>r</sub>
	Pa	°C	Pa	m	m	m	m
GA-001A	101324.956	31.4	4592.956	2.3	0.01	12.15	10.7
GA-001B	101324.956	31.4	4592.956	2.3	0.01	12.15	10.7
GA-001C	101324.956	31.4	4592.956	2.3	0.01	12.15	10.7

La eficiencia de la bomba es el cociente de la Potencia Hidráulica entre la Potencia al freno y la eficiencia total del arreglo motor-bomba es el cociente de la Potencia Hidráulica entre la Potencia de accionamiento.

Los resultados del cálculo de la eficiencia de la bomba y del motor-bomba se muestran en la Tabla 16.

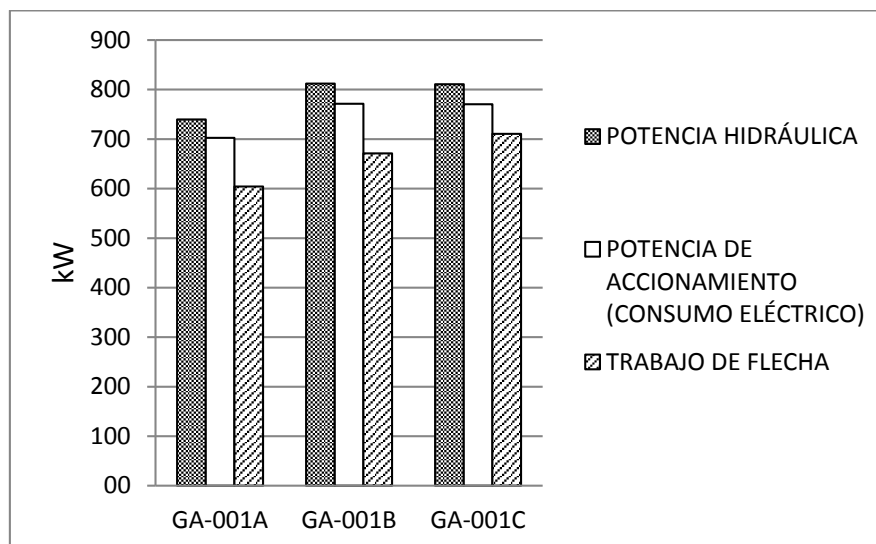


## RESULTADOS

Tabla 16. Resultados para la eficiencia de la bomba y la total del motor-bomba.

BOMBA	POTENCIA DE ACCIONAMIENTO	POTENCIA AL FRENO	POTENCIA HIDRÁULICA	EFICIENCIA DE LA BOMBA	EFICIENCIA TOTAL
	kW	kW	kW	%	%
GA-001A	739.53	702.56	604.29	86.01	81.71
GA-001B	812.02	771.42	671.10	87.00	82.65
GA-001C	810.85	770.30	710.58	92.25	87.63

Los valores de la potencia hidráulica, consumo eléctrico y el trabajo de flecha son representados respectivamente de derecha a izquierda en la Figura 10.

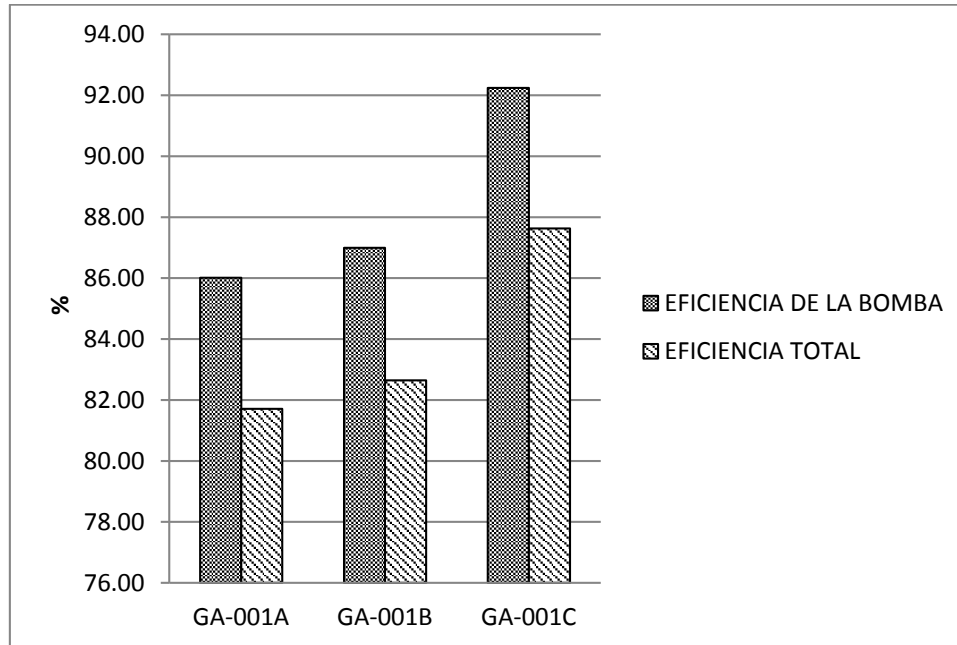


**Figura 10.** Relación de consumo eléctrico, trabajo de flecha y potencia hidráulica en las bombas actuales.

Las eficiencias de las bombas se determinaron a partir de los datos registrados en bitácoras de operación y de las mediciones realizadas.



## RESULTADOS



**Figura 11.** Eficiencias de las bombas.

En la Figura 11 se muestran las eficiencias de la bombas y las eficiencias totales para las bombas del sistema, se puede apreciar que se tiene una buena eficiencia (arriba del 80%) en todas las bombas, lo que implica que el uso de la energía eléctrica que es utilizada en la bomba es el adecuado.

La bomba GA-001 A es la que presenta una menor eficiencia que es del 81.71% y la bomba GA-001 C es la que presenta una mayor eficiencia la cual es del 87.63%



DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO  
CON AGUA PARA EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.

## RESULTADOS



### 4.3. Red de distribución de agua de enfriamiento

El análisis hidráulico del sistema de distribución de agua se realizó para los cabezales principales de distribución y retorno de agua de enfriamiento a las plantas a las que da servicio (Hidrógeno, MTBE, TAME, U-901, HDS y MAYA), así como los principales equipos usuarios de agua de enfriamiento dentro de éstas.

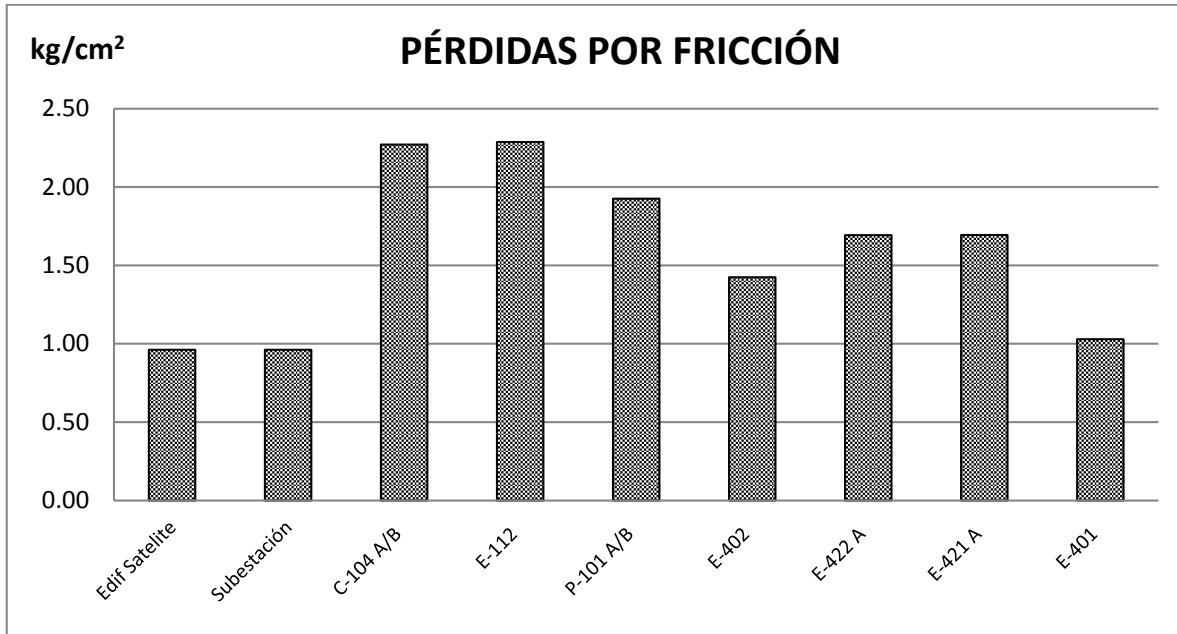
A continuación se presenta, por planta, el resultado del análisis hidráulico realizado en cada uno de los equipos usuarios de agua de enfriamiento.

#### 4.3.1. Planta de Hidrógeno.

La Planta Hidrógeno tiene un promedio de pérdidas por fricción en la tubería de 1.58 kg/cm<sup>2</sup>. Los equipos que representan las mayores pérdidas son el C-104 A/B y el E-112. En la Figura 12 se muestran las pérdidas para los equipos de la Planta Hidrógeno.



## RESULTADOS



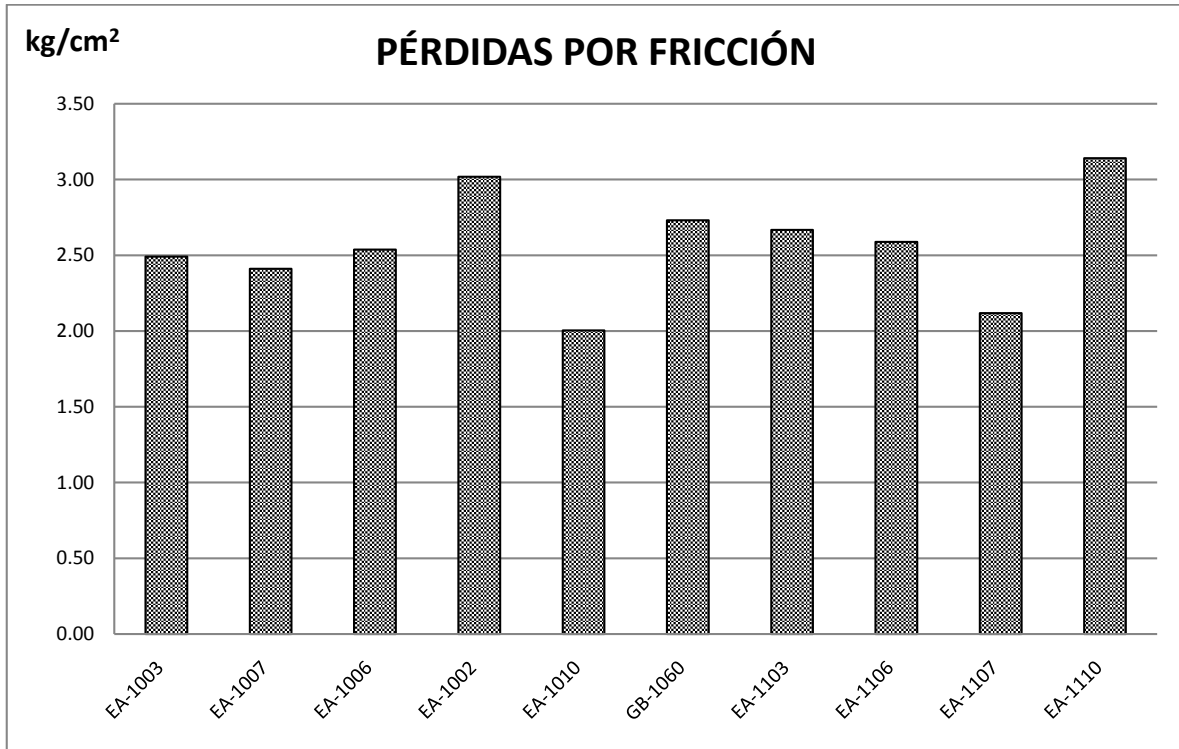
**Figura 12.** Pérdidas por fricción en equipos de la planta Hidrógeno.

### 4.3.2. Planta MTBE (Metil Terbutil Éter).

La Planta MTBE tiene un promedio de pérdidas por fricción en la tubería de 2.57 kg/cm<sup>2</sup>. En la Figura 13 se muestran las pérdidas para los equipos principales de la Planta MTBE.



## RESULTADOS



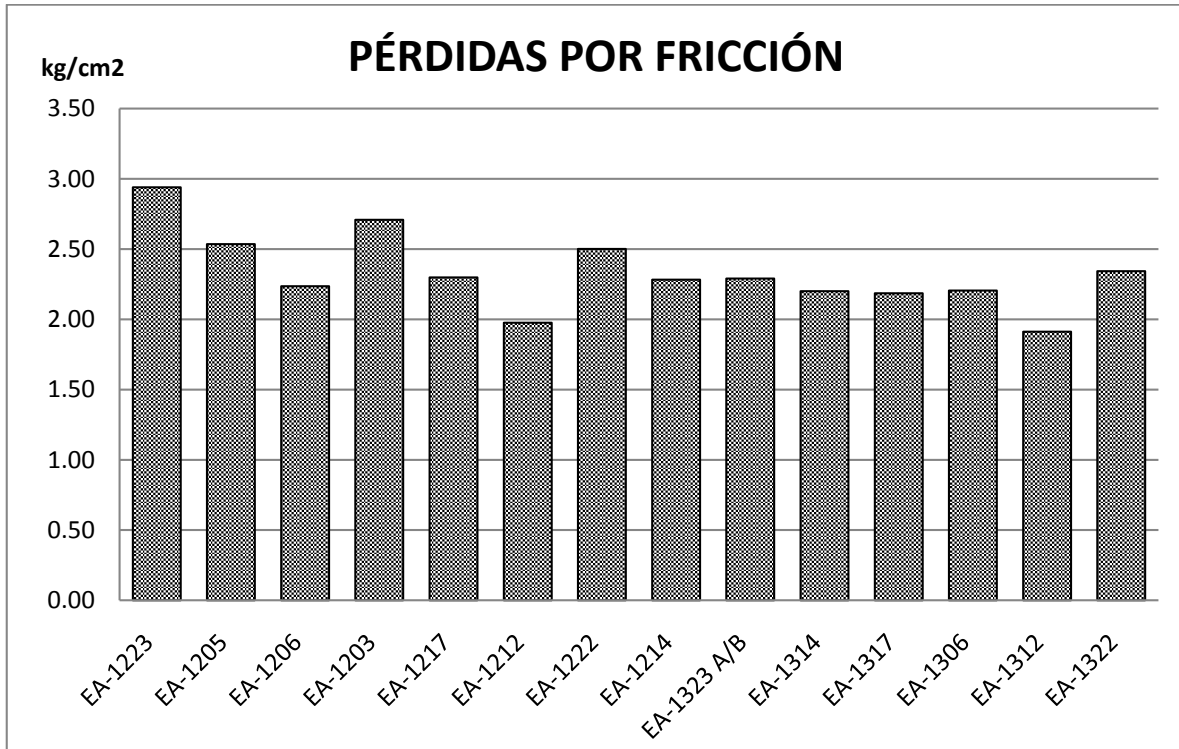
**Figura 13.** Pérdidas por fricción en equipos de la planta MTBE.

### 4.3.3. Planta TAME (Ter-Amil Metil Éter).

La Planta TAME tiene un promedio de pérdidas por fricción en la tubería de 2.33 kg/cm<sup>2</sup>. En la Figura 14 se muestran las pérdidas para los todos los equipos de la Planta TAME.



## RESULTADOS



**Figura 14.** Pérdidas por fricción en equipos de la planta TAME.

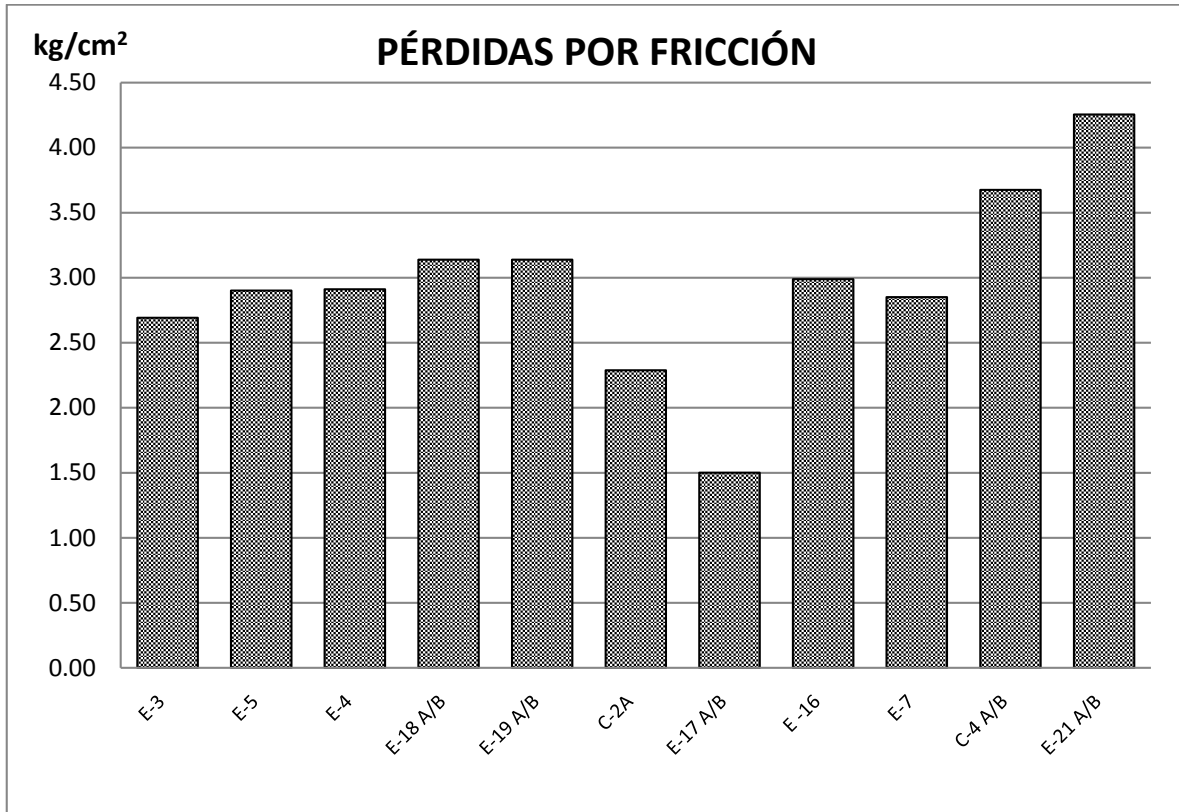
### 4.3.4. Planta Reformadora de Naftas U-901.

La Planta Reformadora de Naftas (U-901) tiene un promedio de pérdidas por fricción en la tubería de 2.94 kg/cm<sup>2</sup>. El equipo que presenta una mayor caída de presión es el E-21 A/B, el cual tiene un flujo de 130.3 GPM y una tubería de 3 pulgadas de diámetro. En la Figura 15 se muestran las pérdidas para los equipos de la Planta Reformadora de Naftas (U-901).





## RESULTADOS



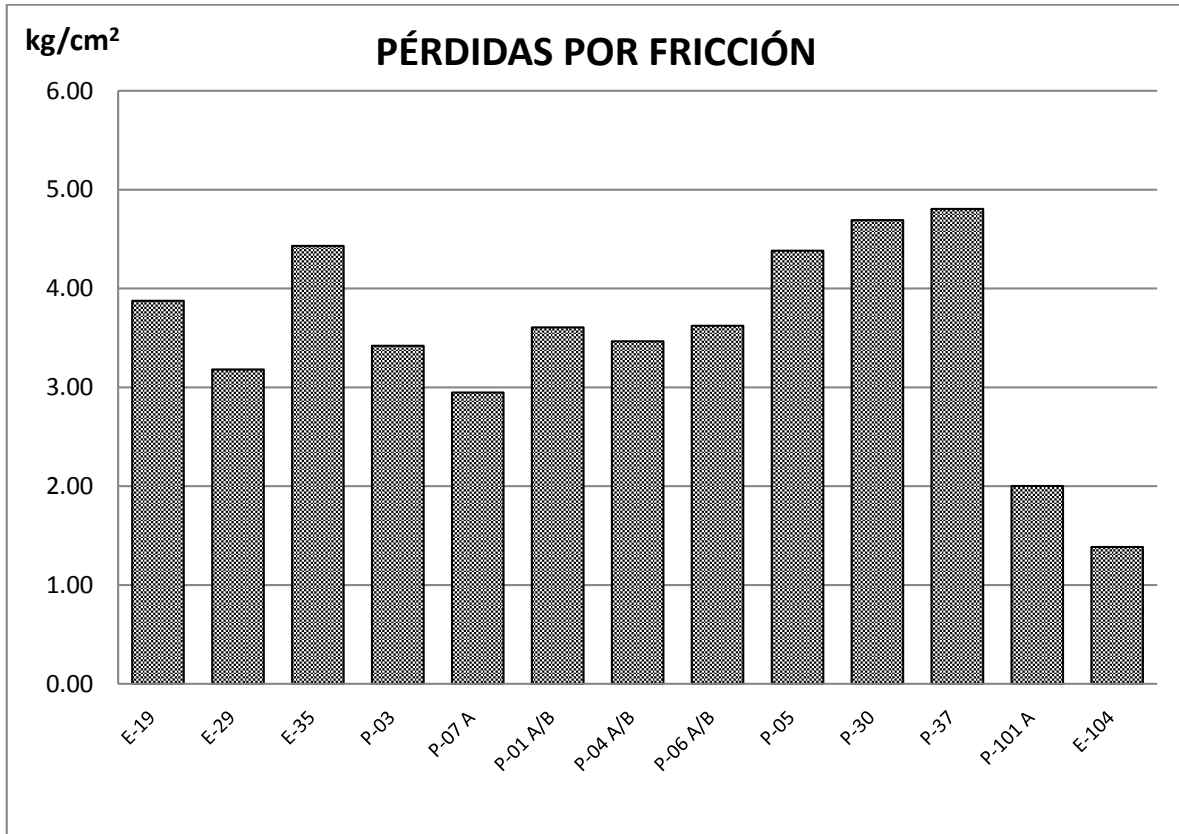
**Figura 15.** Pérdidas por fricción en equipos de la planta U-901.

### 4.3.5. Planta HDS de Gasóleos.

La Planta Hidrodesulfuradora de Gasóleos tiene un promedio de pérdidas por fricción en la tubería de 3.52 kg/cm<sup>2</sup>. El equipo que representa las menor pérdida es el E-104, el cual tiene un flujo 151.9 GPM y una tubería de 6 pulgadas de diámetro. En la Figura 16 se muestran las pérdidas para todos los equipos de la Planta Hidrodesulfuradora de Gasóleos.



## RESULTADOS



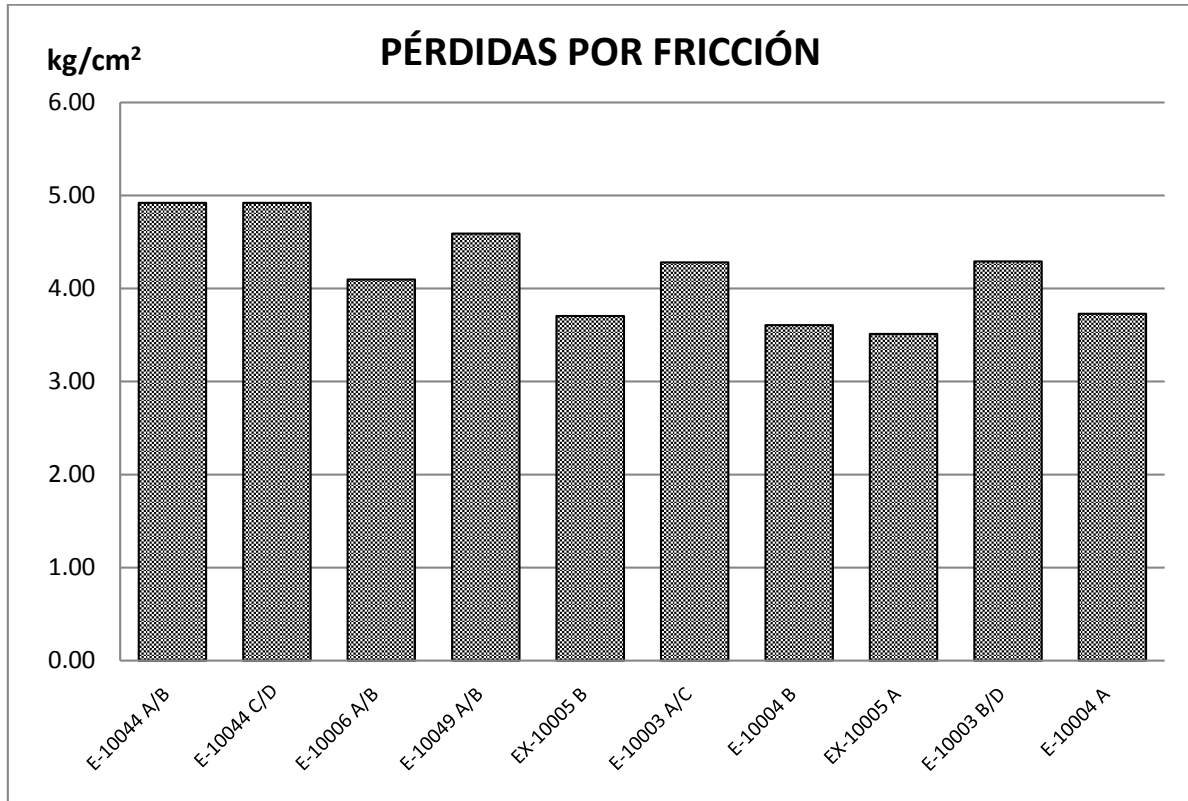
**Figura 16.** Pérdidas por fricción en equipos de la planta HDS de Gasóleos.

### 4.3.6. Planta MAYA

La Planta MAYA tiene un promedio de pérdidas por fricción en la tubería de 4.17 kg/cm<sup>2</sup>. En la Figura 17 se muestran las pérdidas para todos los equipos de la Planta MAYA.



## RESULTADOS



**Figura 17.** Pérdidas por fricción en equipos de la planta MAYA.

Una vez obtenidas las pérdidas por fricción de todos los equipos usuarios de agua de enfriamiento de la torre, se determinó la carga dinámica total como la suma de las pérdidas por fricción en los equipos, las pérdidas en el cabezal de distribución (que corresponde a  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ ) y la carga estática (o geométrica con valor de  $1 \text{ kg/cm}^2$ ). La carga dinámica total en promedio para el sistema es de  $4.37 \text{ kg/cm}^2$ , el 66% corresponde a pérdidas por fricción en tuberías, el 23% a la carga geométrica y el 11% restante a las pérdidas en el cabezal de distribución. Los resultados de carga dinámica total para cada equipo se presentan en la Figura 18.



DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CON AGUA PARA EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.



RESULTADOS

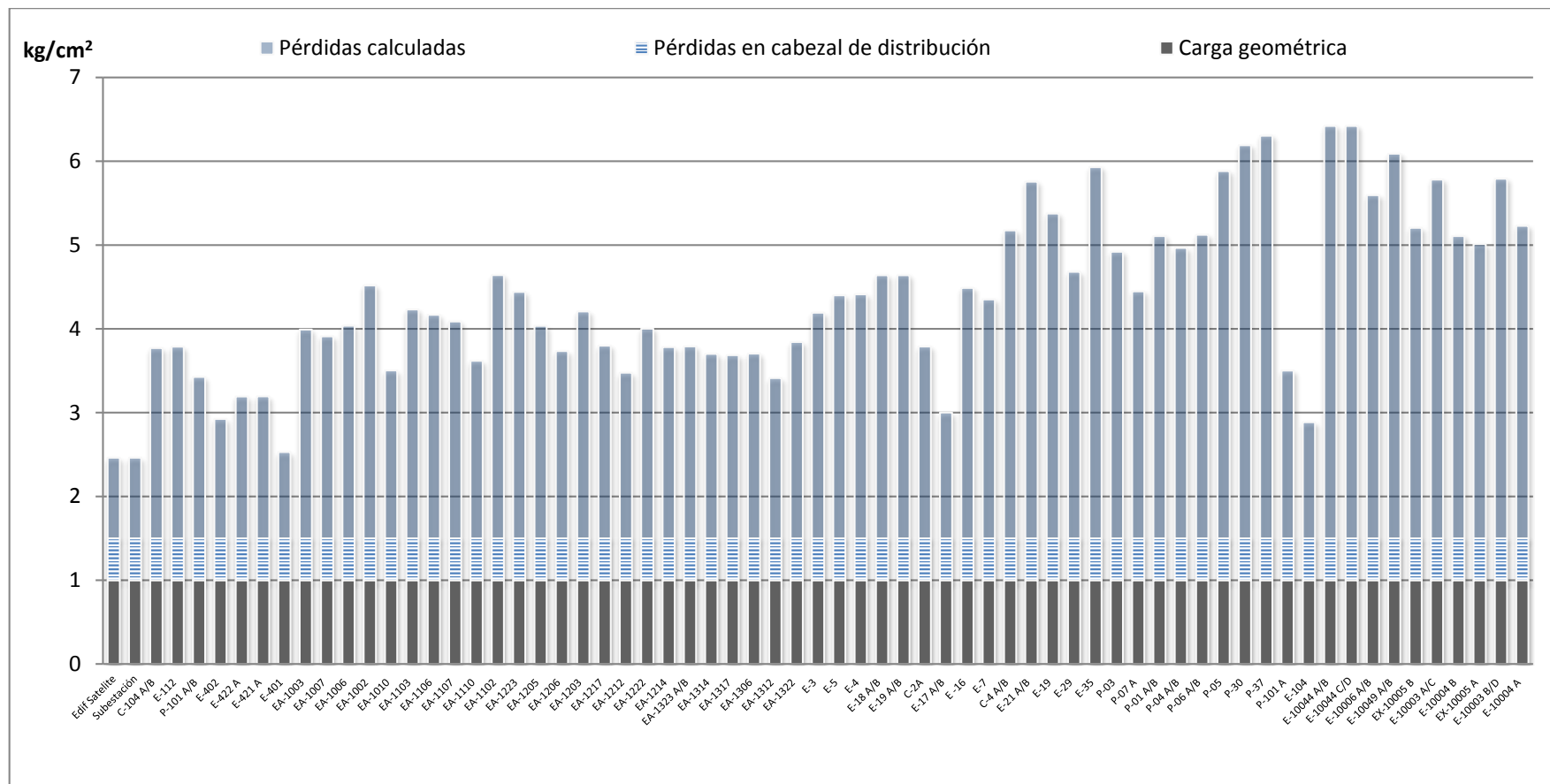


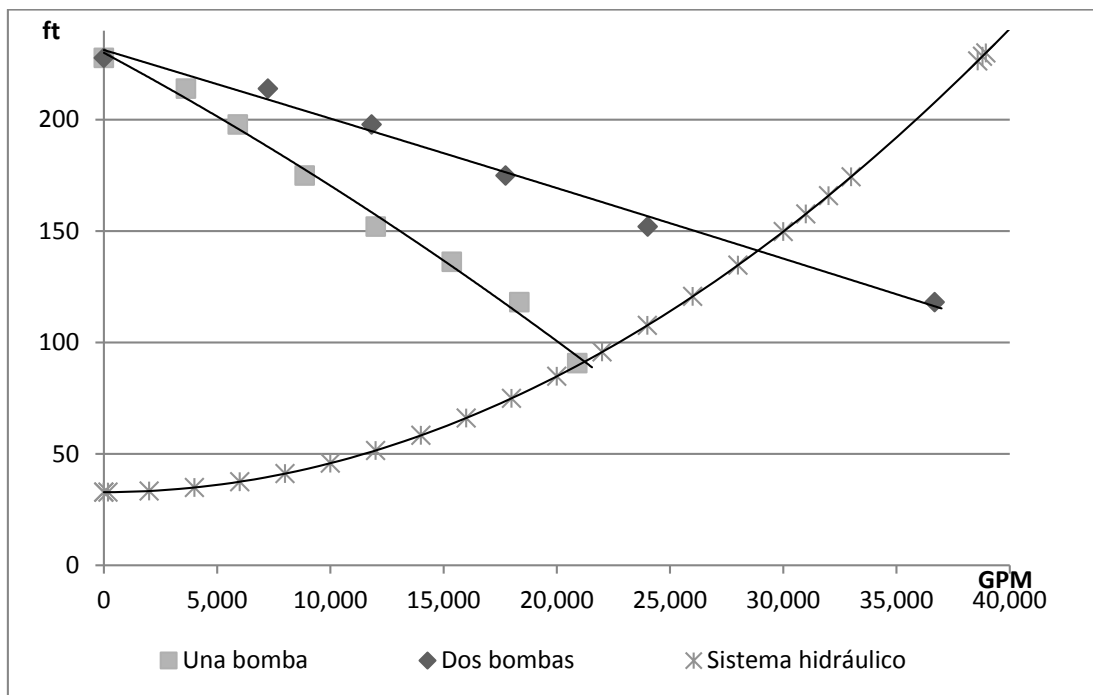
Figura 18. Carga dinámica total en los equipos usuarios de la torre de enfriamiento



## RESULTADOS

Para cada equipo usuario se calcularon las pérdidas por fricción y locales, desde la salida de agua de enfriamiento de la torre en las bombas GA-001 A/B/C/RT, hasta el retorno de ésta en la descarga del último bastón de la torre, lo anterior con el apoyo de la información obtenida y utilizando, el software especializado PIPE PHASE.

Considerando el flujo de recirculación de 29,439 GPM medido y una presión de descarga de 7.0 kg/cm<sup>2</sup> en los manómetros, se presenta en la Figura 19 la curva del sistema de enfriamiento con la descripción del punto de operación confirmado, una proyección de una y dos bombas operando en el sistema actual.



**Figura 19.** Curva característica del sistema de bombeo contra sistema hidráulico



## RESULTADOS



### 4.4. Diagnóstico integral

La torre de enfriamiento que se estudió en el presente trabajo tiene un intervalo de temperatura 55 % menor con respecto al de diseño ( $4.5^{\circ}\text{C}$ ), por lo que la carga térmica actual de las plantas de proceso que tiene que disipar la torre de enfriamiento es de 1,976,358 BTU/min, lo cual representa el 13.15% del valor de diseño (15,030,000 BTU/min), esto indica que el proceso de transferencia de calor no es el más adecuado.

Las eficiencias de las bombas y las eficiencias motor-bomba de los equipos del sistema, son adecuadas ya que indica que el uso de la energía eléctrica que es utilizada en las bombas está muy cercano a ser el óptimo, por lo que se aprovecha la energía al máximo.

La torre de estudio brinda servicio a las plantas Hidrógeno, MTBE, TAME, U-901, HDS y MAYA suministrando un flujo total de 29,439 GPM que corresponden al 62% del total de diseño (47,737 GPM) considerando que las plantas operan al 100%.

De acuerdo con la actual capacidad de operación de las plantas, se realizó el análisis tanto del flujo de agua de suministro a las plantas de proceso, como de la carga térmica que aporta cada una de ellas. Se determinó que el suministro de agua es el adecuado para las plantas de proceso, a excepción de la planta MAYA, debido a las limitantes hidráulicas de la red y que la temperatura del bulbo húmedo es mayor en la época de calor extremo (3 meses), la capacidad de la torre disminuye, esto ocasiona que a la planta dejen de ingresar 3,000 barriles de crudo por día.

### 4.5. Propuestas de mejora



## RESULTADOS



A continuación se presentan las **3 propuestas de mejora** del sistema de distribución de agua de enfriamiento:

### 4.5.1. Propuesta 1. Cabezal nuevo e independiente para planta MAYA, trayectoria actual.

Esta alternativa consiste en la instalación de un nuevo cabezal de 1,300 m de longitud, de 40" de diámetro, con la trayectoria actual de suministro de agua de enfriamiento y sobre el rack existente, para el suministro de agua de enfriamiento a las condiciones de flujo y presión requeridas; desde la torre del sistema de estudio hasta la planta MAYA.

Con la finalidad de determinar la distribución de flujo y los requerimientos energéticos para la ejecución de la alternativa descrita, se realizó una simulación hidráulica con el software especializado PIPE PHASE obteniendo los resultados presentados en Tabla 17 .



## RESULTADOS

Tabla 17. Resultados de simulación hidráulica con la alternativa de instalación de nuevo cabezal conservando la trayectoria actual.

PLANTA	FLUJO (GPM)		PRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	
	DISEÑO	CON ALTERNATIVA	DISEÑO	CON ALTERNATIVA
MAYA	20,167	23,034	4.5	5.88
HIDRÓGENO	3,302	4,431	5.0	4.45
MTBE	1,855	2,852	5.0	4.44
TAME	3,952	4,060	5.0	4.38
U-901 (Reformadora de naftas)	4,802	4,886	5.0	4.34
HDS DE GASÓLEOS	7,657	6,032	5.0	4.31

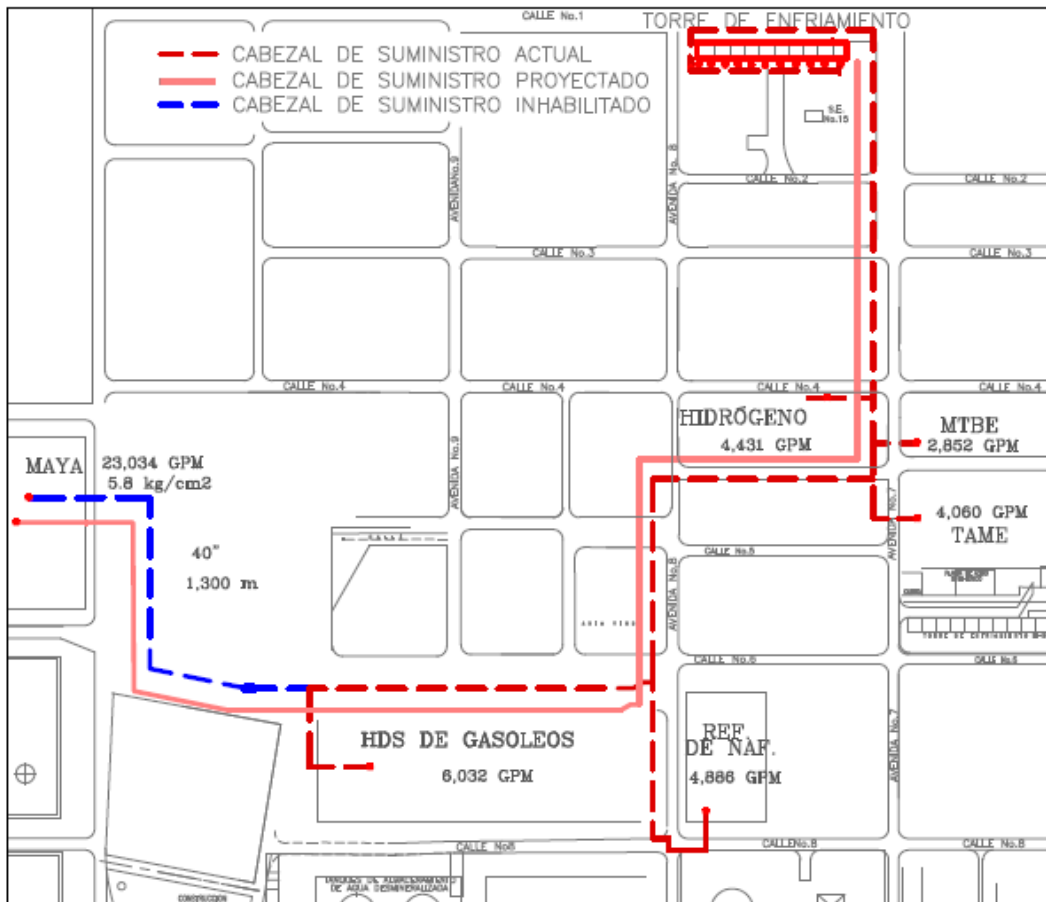
Como se observa de la tabla anterior, mediante la implementación de la alternativa descrita se logrará el envío de flujo y presión requeridos por diseño para la planta MAYA.

En la Figura 20 se representa la alternativa anteriormente descrita, de la instalación de un nuevo cabezal de suministro de agua de enfriamiento conservando la trayectoria actual y utilizando un nuevo sistema de bombeo compuesto por 3 bombas de 1200 HP cada una.





## RESULTADOS



**Figura 20.** Instalación de nuevo cabezal conservando la trayectoria actual

4.5.2. Propuesta 2. Suministro de agua de enfriamiento proveniente de la torre CT-1004N.

Actualmente está en proceso de construcción la Torre de enfriamiento CT-1004N, la cual brindará servicio a las Plantas Desulfuradoras de Gasolina Catalítica 1 y 2 con un requerimiento de 7,401 GPM.

La Torre de enfriamiento CT-1004N tiene una capacidad de 15,000 GPM distribuidos en 3 celdas de 5,000 GPM cada una.



## RESULTADOS

En la Tabla 18 se presentan los requerimientos de agua de enfriamiento para las plantas.

Tabla 18. Requerimientos de agua de enfriamiento

PARÁMETROS	Diseño Torre de enfriamiento CT-1004N	Requerimientos por Plantas de Proceso para la CT-1004N	Requerimientos condensadores PLANTA MAYA	Requerimiento Total
FLUJO [GPM]	15,000	7,401	23,000	30,401
SUMINISTRO [°C]	42	42	40	42
RETORNO [°C]	32	32	32	32

Con la finalidad de solventar la problemática de enfriamiento en los condensadores de vacío de la planta MAYA con un requerimiento de flujo de 23,000 GPM surgen la alternativa de utilizar la infraestructura de la torre CT-1004N, adicionando 4 celdas más de 5,000 GPM para tener un total en la torre de 35,000 GPM.

Adicionalmente a esto se requiere cambiar el equipo de bombeo a unos que proporcionen un flujo de 15,000 GPM.

Con la finalidad de determinar la distribución de flujo y los requerimientos energéticos para la ejecución de la alternativa descrita, se realizó una simulación hidráulica con el software especializado PIPE PHASE obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 19.



## RESULTADOS

Tabla 19. Resultados de simulación hidráulica con la alternativa de Suministro de agua de enfriamiento proveniente de la torre CT-1004N.

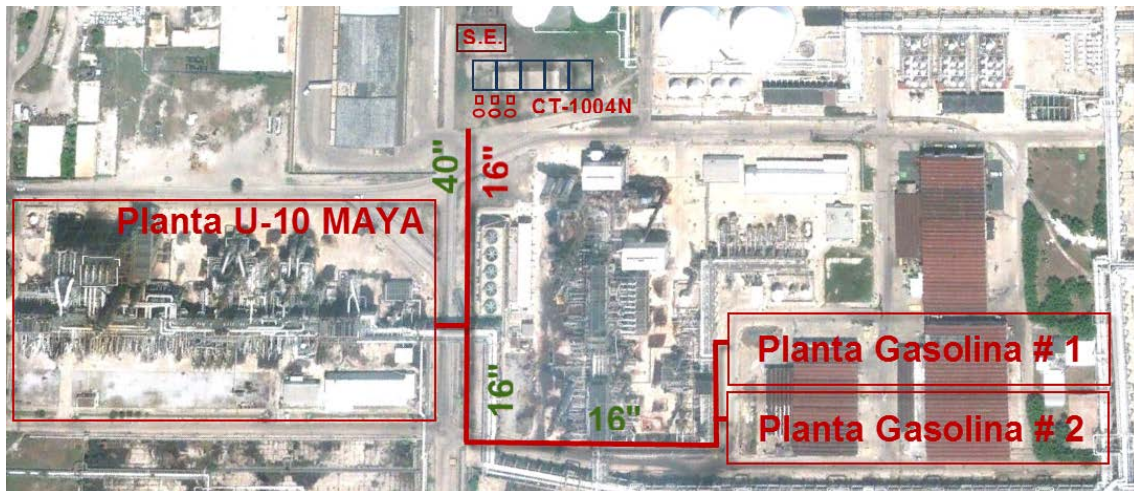
PLANTA	FLUJO (GPM)		PRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	
	DISEÑO	CON ALTERNATIVA	DISEÑO	CON ALTERNATIVA
MAYA	20,167	23,034	4.5	5.00
HIDRÓGENO	3,302	4,431	5.0	4.45
MTBE	1,855	2,852	5.0	4.44
TAME	3,952	4,060	5.0	4.38
U-901 (Reformadora de naftas)	4,802	4,886	5.0	4.34
HDS DE GASÓLEOS	7,657	6,032	5.0	4.31

Como se observa de la tabla anterior, mediante la implementación de la alternativa descrita se logrará el envío del flujo y presión requeridos por diseño para la planta MAYA.

El cabezal actual de suministro y de retorno es de 16" se requiere sustituir un tramo de 165 m a 40" de diámetro como se muestra en la Figura 21.



## RESULTADOS



**Figura 21.** Integración de Torre CT-1004N a planta MAYA con cabezal de 40”.

Se requiere la instalación del sistema eléctrico para la torre CT-1004N.

### 4.5.3. Propuesta 3. Torre de enfriamiento nueva en área de almacenes.

Debido a las necesidades de agua de enfriamiento y la importancia de la planta MAYA en el proceso de Refinación, se propone la construcción de una nueva torre de enfriamiento que dé servicio exclusivo a esta planta suministrando 23,034 GPM. Lo anterior permitirá cubrir los requerimientos de suministro de agua de enfriamiento, contribuyendo principalmente a la maximización en la generación de vacío en la planta y esto a su vez en el incremento de la producción. También se liberará la carga hidráulica de la torre de estudio mejorando el suministro de agua de enfriamiento a las plantas Hidrógeno, MTBE, TAME, U-901 (Reformadora de naftas) y HDS de gasóleos.

Con la finalidad de determinar la distribución de flujo y los requerimientos energéticos para la ejecución de la alternativa descrita, se realizó una simulación hidráulica con el software PIPEPHASE obteniendo los resultados presentados en Tabla 20.



## RESULTADOS

Tabla 20. Resultados de simulación con alternativa de torre nueva en  
área de almacenes.

PLANTA	FLUJO (GPM)		PRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	
	DISEÑO	CON ALTERNATIVA	DISEÑO	CON ALTERNATIVA
MAYA	20,167	23,034	4.5	6.3
HIDRÓGENO	3,302	3,215	5.0	5.36
MTBE	1,855	1,806	5.0	5.34
TAME	3,952	3,848	5.0	5.00
U-901 (Reformadora de naftas)	4,802	4,676	5.0	4.99
HDS DE GASÓLEOS	7,657	7,455	5.0	4.99

Las características generales del sistema torre de enfriamiento -red de suministro de agua son las siguientes:

- Longitud de la red de agua de enfriamiento que permita el suministro y retorno de agua de enfriamiento de 120 m.
- Diámetro de la tubería de suministro y retorno de agua de enfriamiento de 36".
- Sistema de bombeo constituido por 3 bombas de 10,000 GPM cada una y potencia de 600 HP que permitan suministrar al menos 23,034 GPM a 6.6 kg/cm<sup>2</sup> en la Planta MAYA.

Adicional a lo anterior se requerirá la construcción de una subestación eléctrica y un cuarto de control de motores (CCM) para la correcta operación de la nueva torre de enfriamiento.



## RESULTADOS

En el Figura 22 se presenta la ubicación y trayectoria propuesta para el suministro de 23,034 GPM de agua de enfriamiento a Planta MAYA desde una nueva torre de enfriamiento ubicada en la actual área de almacenes.



**Figura 22.** Ubicación de la nueva torre de enfriamiento en área de almacenes y trayectoria.

En la Tabla 21 se muestra la comparación conceptual entre las propuestas.





RESULTADOS

Tabla 21. Comparación de propuestas de solución a las problemáticas hidráulicas presentes en la planta MAYA.

PLANTA	PROPUESTA 1	PROPUESTA 2	PROPUESTA 3
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Cabezal nuevo e independiente para planta MAYA, trayectoria actual.	Suministro de agua de enfriamiento proveniente de la torre CT-1004N.	Torre de enfriamiento nueva en área de almacenes.
<b>FLUJO (GPM) A PLANTA MAYA CON IMPLEMENTACIÓN DE ALTERNATIVA</b>	23,034	23,034	23,034
<b>REQUERIMIENTOS</b>	Cabezal de suministro y retorno para planta MAYA de 40 pulgadas por 1,300 m. Rehabilitación de cárcamo Tres bombas de 15,000 GPM y 1200 hp.	Cabezal de suministro y retorno para planta MAYA de 40 pulgadas por 165 m. Rehabilitación de cárcamo Tres bombas de 15,000 GPM y 1000 hp 4 Nuevas celdas para la torre de 5,000 GPM cada una.	Torre de Enfriamiento nueva de 3 celdas de 10,000GPM Tres bombas de 10,000 GPM y 600 hp. Subestación y CCM nuevos Integración de cabezal de 36 pulgadas. Racks existentes



## RESULTADOS

PLANTA	PROPUESTA 1	PROPUESTA 2	PROPUESTA 3
<b>VENTAJAS</b>	<p>Flexibilidad operativa para suministro de agua a plantas por preferencia de flujos.</p> <p>Aprovechamiento de Rack existentes</p>	<p>Aprovechamiento de infraestructura.</p> <p>Liberación de carga hidráulica de la torre. Mejora en suministro de flujo a HDS de Gasóleos, MTBE y TAME, HIDROGENO, U-901..</p>	<p>Liberación de carga hidráulica de la torre. Mejora en suministro de flujo HDS de Gasóleos, MTBE y TAME, HIDROGENO, U-901.</p> <p>Posibilidad de reconfigurar la Torre con nuevos requerimientos.</p> <p>La operación demanda menor uso de energía eléctrica.</p>
<b>DESVENTAJAS</b>	<p>Infraestructura de gran volumen de obra, con una torre de enfriamiento, de generación anterior, espacio reducido para la integración de los cabezales.</p> <p>La operación demanda mayor uso de energía eléctrica.</p>	<p>Limitación de espacio debido a que la torre ya está diseñada.</p>	<p>Requerimiento de integración a red de agua de repuesto.</p>





## RESULTADOS

Las tres propuestas cumplen técnicamente con los requerimientos de agua de enfriamiento a la planta MAYA. Desde el punto de vista ambiental, la propuesta 3 es la mejor opción, ya que poner una torre cercana a la planta se reducen las pérdidas por fricción en las tuberías lo que implicaría equipos de bombeo con menor potencia y en consecuencia un uso menor de energía eléctrica.

### 4.6. Evaluación económica.

A continuación se presenta la estimación de costos y los parámetros para la evaluación económica de las propuestas técnicas para el sistema de distribución de agua de enfriamiento a los condensadores de vacío de la planta MAYA.

#### 4.6.1. Propuesta 1

Los requerimientos y la inversión inicial para la instalación del nuevo cabezal con la trayectoria actual se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Requerimientos e inversión para instalación de nuevo cabezal conservando la trayectoria actual.

REQUERIMIENTO	INVERSIÓN (\$MXN)
1,300 M DE TRAYECTORIA DE CABEZAL DE 40"	31,203,400
3 BOMBAS NUEVAS DE 1200 HP	15,720,000
RACK EXISTENTE	0
<b>TOTAL</b>	<b>46,923,400</b>

Para esta propuesta la inversión inicial es de \$ 46,923,400, la cual considera la construcción de un nuevo cabezal independiente con su nuevo sistema de bombeo para el envío de agua de enfriamiento a los condensadores de la planta MAYA.



## RESULTADOS

Los costos de inversión inicial, operación, y mantenimiento considerados para este caso se observan en la Tabla 23.

Tabla 23. Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento para propuesta 1.

DESCRIPCIÓN	COSTO EN PESOS POR AÑO
INVERSIÓN INICIAL	46,923,400
MANTENIMIENTO	1,407,702
CONSUMO ELÉCTRICO	49,294,710
AGUA DE ENFRIAMIENTO	18,558,172

Los flujos estimados se presentan en la Tabla 24.



## RESULTADOS

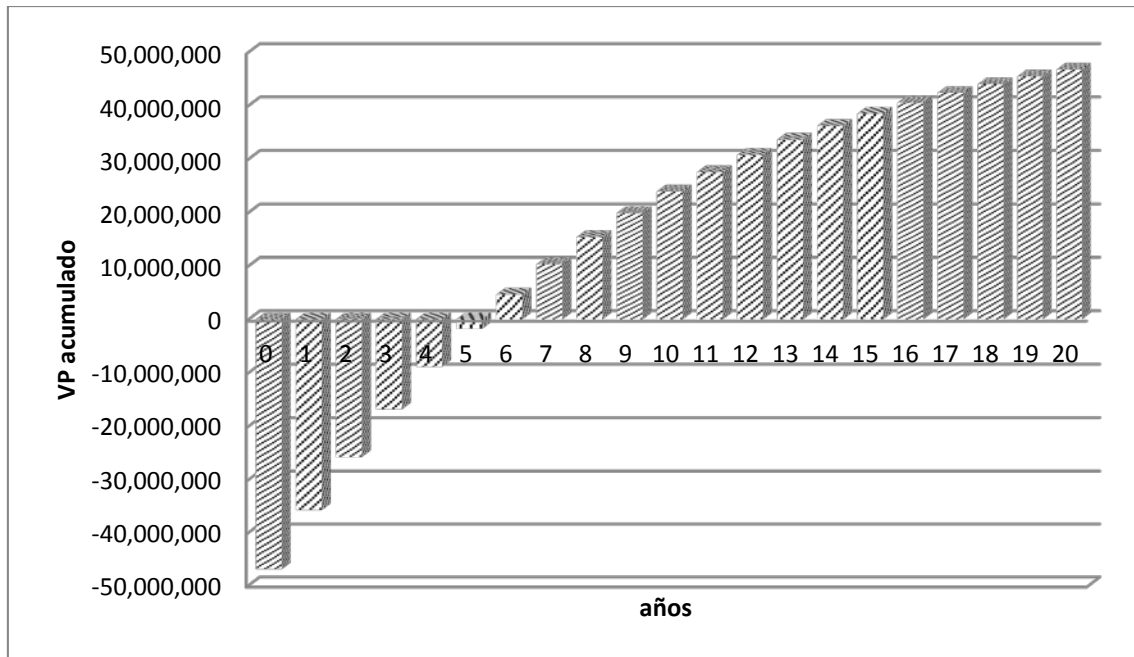
Tabla 24. Cálculo de VPN, TIR y PRI para la propuesta 1.

AÑO	FLUJO DE EFECTIVO (\$)	FLUJO DE EFECTIVO DESCONTADO(\$)	VP ACUMULADO (\$)
0	-46,923,400	-46,923,400	-46,923,400
1	12,535,757	11,192,640	-35,730,760
2	12,535,757	9,993,428	-25,737,332
3	12,535,757	8,922,704	-16,814,628
4	12,535,757	7,966,700	-8,847,928
5	12,535,757	7,113,125	-1,734,803
6	12,535,757	6,351,004	4,616,201
7	12,535,757	5,670,540	10,286,741
8	12,535,757	5,062,982	15,349,723
9	12,535,757	4,520,519	19,870,242
10	12,535,757	4,036,178	23,906,420
11	12,535,757	3,603,730	27,510,151
12	12,535,757	3,217,616	30,727,767
13	12,535,757	2,872,872	33,600,639
14	12,535,757	2,565,064	36,165,703
15	12,535,757	2,290,236	38,455,939
16	12,535,757	2,044,853	40,500,793
17	12,535,757	1,825,762	42,326,555
18	12,535,757	1,630,145	43,956,699
19	12,535,757	1,455,486	45,412,186
20	12,535,757	1,299,541	46,711,727
		<b>VPN</b>	<b>46,711,727</b>
		<b>TIR</b>	<b>26%</b>
		<b>PRI</b>	<b>6 años</b>

En la Figura 23 se muestra el valor presente neto para la propuesta 1 a lo largo del periodo de evaluación.



## RESULTADOS



**Figura 23.** Valor presente neto a lo largo del periodo de evaluación para la propuesta 1.

### 4.6.2. Propuesta 2

Con base en los requerimientos para la propuesta 2, se ha determinado un monto de inversión inicial para la ejecución de esta mismo que se presenta en la Tabla 25.



## RESULTADOS

Tabla 25. Requerimientos e inversión para el suministro de agua de la Torre CT-1004N a planta MAYA.

REQUERIMIENTO	INVERSIÓN (\$MXN)
4 CELDAS NUEVAS PARA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CT-1004 N DE 5,000 GPM C/U	38,400,000
BOMBAS NUEVAS	15,720,000
INSTALACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO	12,000,000
330 M DE TRAYECTORIA DE CABEZAL DE 40"	7,920,000
<b>TOTAL</b>	<b>74,040,000</b>

Para esta propuesta la inversión inicial es de \$ 74,040,000 que considera la interconexión de la Torre de enfriamiento CT-1004N para el envío de agua de enfriamiento a los condensadores de la planta MAYA, esto incluye a construcción de cuatro celdas más de 5,000 GPM, la integración a subestación eléctrica y el CCM, la adquisición de las nuevas bombas y el nuevo cabezal de 40”.

Los costos de inversión inicial, operación, y mantenimiento considerados para este caso se observan en la Tabla 26.



## RESULTADOS

Tabla 26. Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento para propuesta 2.

DESCRIPCIÓN	COSTO EN PESOS POR AÑO
INVERSIÓN INICIAL	74,040,000
MANTENIMIENTO	2,221,200
CONSUMO ELÉCTRICO	39,275,460
AGUA DE ENFRIAMIENTO	18,558,172

Los flujos estimados se presentan en la Tabla 27.



## RESULTADOS

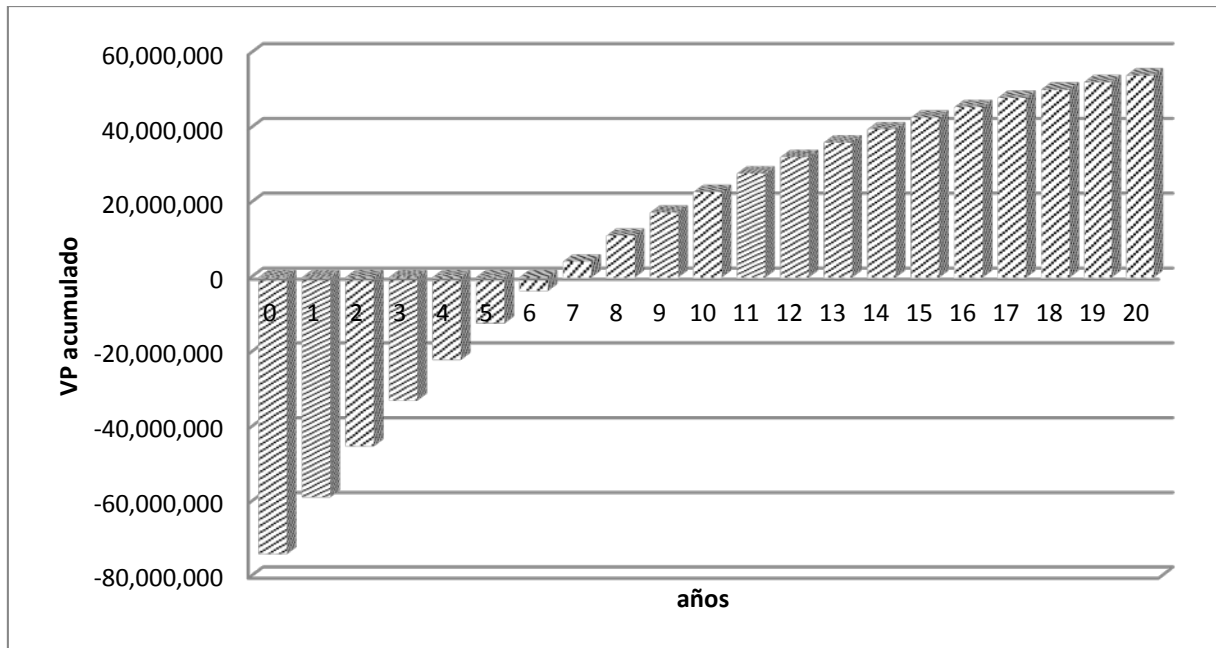
Tabla 27. Cálculo de VPN, TIR y PRI para la propuesta 2.

AÑO	FLUJO DE EFECTIVO (\$)	FLUJO DE EFECTIVO DESCONTADO(\$)	VP ACUMULADO (\$)
0	-74,040,000	-74,040,000	-74,040,000
1	17,131,687	15,296,149	-58,743,851
2	17,131,687	13,657,276	-45,086,576
3	17,131,687	12,193,996	-32,892,580
4	17,131,687	10,887,497	-22,005,083
5	17,131,687	9,720,979	-12,284,104
6	17,131,687	8,679,446	-3,604,658
7	17,131,687	7,749,505	4,144,847
8	17,131,687	6,919,201	11,064,047
9	17,131,687	6,177,858	17,241,905
10	17,131,687	5,515,945	22,757,850
11	17,131,687	4,924,951	27,682,800
12	17,131,687	4,397,277	32,080,078
13	17,131,687	3,926,140	36,006,218
14	17,131,687	3,505,482	39,511,701
15	17,131,687	3,129,895	42,641,596
16	17,131,687	2,794,549	45,436,145
17	17,131,687	2,495,133	47,931,278
18	17,131,687	2,227,797	50,159,076
19	17,131,687	1,989,105	52,148,180
20	17,131,687	1,775,987	53,924,167
		<b>VPN</b>	<b>53,924,167</b>
		<b>TIR</b>	<b>23%</b>
		<b>PRI</b>	<b>7 años</b>

En la Figura 24 se muestra el valor presente neto para la propuesta 2 a lo largo del periodo de evaluación.



## RESULTADOS



**Figura 24.** Valor presente neto a lo largo del periodo de evaluación para la propuesta 2.

### 4.6.3. Propuesta 3

Con base en los requerimientos para la propuesta 3, se ha determinado un monto de inversión preliminar para la ejecución de esta mismo que se presenta en la Tabla 28.





## RESULTADOS

Tabla 28. Requerimientos e inversión para construcción de nueva torre de enfriamiento en área de almacenes.

REQUERIMIENTO	INVERSIÓN (\$MXN)
TORRE DE ENFRIAMIENTO DE 3 CELDAS 10,000 GPM C/U	48,000,000
BOMBAS NUEVAS	12,720,000
SUBESTACIÓN Y CCM NUEVOS	17,220,000
<b>TOTAL</b>	<b>77,940,000</b>

Para esta propuesta la inversión inicial es de \$ 77,940,000 que considera la construcción de una nueva Torre de enfriamiento de 3 celdas de 10,00 GPM C/U.

Los costos de inversión inicial, operación, y mantenimiento considerados para este caso se observan en la Tabla 29.

Tabla 29. Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento para propuesta 3.

DESCRIPCIÓN	COSTO EN PESOS POR AÑO
INVERSIÓN INICIAL	77,940,000
MANTENIMIENTO	2,338,200
CONSUMO ELÉCTRICO	33,664,680
AGUA DE ENFRIAMIENTO	18,558,172



## RESULTADOS

Los flujos estimados se presentan en la Tabla 30.

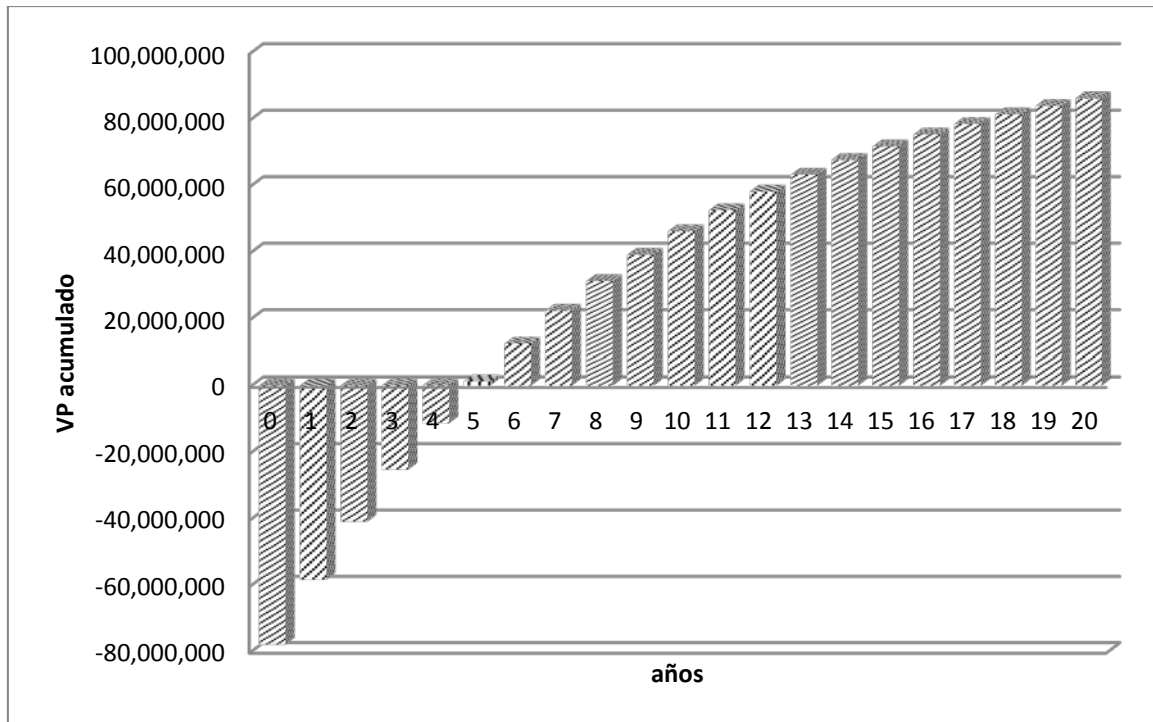
Tabla 30. Cálculo de VPN, TIR y PRI para la propuesta 3.

AÑO	FLUJO DE EFECTIVO (\$)	FLUJO DE EFECTIVO DESCONTADO(\$)	VP ACUMULADO (\$)
0	-77,940,000	-77,940,000	-77,940,000
1	21,962,467	19,609,345	-58,330,655
2	21,962,467	17,508,344	-40,822,311
3	21,962,467	15,632,450	-25,189,861
4	21,962,467	13,957,545	-11,232,317
5	21,962,467	12,462,093	1,229,777
6	21,962,467	11,126,869	12,356,646
7	21,962,467	9,934,705	22,291,350
8	21,962,467	8,870,272	31,161,622
9	21,962,467	7,919,886	39,081,508
10	21,962,467	7,071,326	46,152,834
11	21,962,467	6,313,684	52,466,519
12	21,962,467	5,637,218	58,103,737
13	21,962,467	5,033,230	63,136,967
14	21,962,467	4,493,956	67,630,923
15	21,962,467	4,012,461	71,643,384
16	21,962,467	3,582,554	75,225,938
17	21,962,467	3,198,709	78,424,647
18	21,962,467	2,855,990	81,280,637
19	21,962,467	2,549,991	83,830,628
20	21,962,467	2,276,778	86,107,406
		<b>VPN</b>	<b>86,107,406</b>
		<b>TIR</b>	<b>28%</b>
		<b>PRI</b>	<b>5 años</b>

En la Figura 25 se muestra el valor presente neto para la propuesta 3 a lo largo del periodo de evaluación.



## RESULTADOS



**Figura 25.** Valor presente neto a lo largo del periodo de evaluación para la propuesta 3.

En la Tabla 31 se muestra el resumen de los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento para cada una de las propuestas, donde se pueda observar que la propuesta 1 es donde se requiere una menor inversión inicial, pero sus costos de operación son mayores, por el contrario la propuesta 3 es la que tiene el costo más elevado en inversión inicial, pero los costos de operación son inferiores comparados con las otras propuestas.



## RESULTADOS

Tabla 31. Costos de inversión, operación y mantenimiento para cada una de las propuestas.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PROPUESTA 1	PROPUESTA 2	PROPUESTA 3
INVERSIÓN INICIAL	\$	46,923,400.00	74,040,000.00	77,940,000.00
MANTENIMIENTO	\$/AÑO	1,407,702.00	2,221,200.00	2,338,200.00
OPERACIÓN	\$/AÑO	67,852,882.00	57,833,632.00	52,222,852.00
AGUA DE RECIRCULACIÓN TORRE-PLANTA MAYA	GPM	23,034	23,034	23,034
COSTO DE OPERACIÓN POR METRO CÚBICO DE AGUA	\$/m <sup>3</sup>	1.48	1.26	1.14

En la Tabla 32 se muestra el resumen de los parámetros económicos para las 3 propuestas.



## RESULTADOS

Tabla 32. Comparación de los parámetros económicos de las 3 propuestas

PARÁMETRO	PROPUESTA 1	PROPUESTA 2	PROPUESTA 3
INVERSIÓN INICIAL	\$46,923,400.00	\$74,040,000.00	\$77,940,000.00
VPN	\$46,711,727	\$53,924,167	\$86,107,406
TIR	26%	23%	28%
PRI	6 años	7 años	5 años

Se puede observar que en la propuesta 3 se obtiene un rendimiento mayor, el periodo de retorno es menor y se tiene un mayor valor presente neto que es de \$86,107,406 pesos.



## CONCLUSIONES



### 5. CONCLUSIONES

Con el diagnóstico térmico realizado al sistema de enfriamiento de estudio se determinó que la torre de estudio entrega agua de enfriamiento con una temperatura promedio de 31.4 °C y la temperatura de retorno promedio a la torre es de 35.9 °C; la carga térmica actual de las plantas de proceso que tiene que disipar la torre de enfriamiento es de 1,976,358 BTU/min, lo cual representa el 13.15% del valor de diseño (15,030,000 BTU/min). El resultado de la simulación realizada para determinar la capacidad de enfriamiento con el software **CTI toolkit, ver. 3.00.18.02** es de 30.04%, es decir que se están enfriando 30,040 GPM al intervalo de diseño de la torre. Tanto la eficiencia como la capacidad son muy bajos en comparación con la eficiencia y capacidad promedio de las torres de enfriamiento que se encuentran en un promedio de 80 %, por lo que se está desaprovechando la infraestructura existente.

Como resultado del análisis electromecánico se determinó que las eficiencias totales de las bombas que actualmente operan (GA-001 A/C), son de 81.71% y 87.63% respectivamente esto indica que el sistema de bombeo es muy eficiente y la energía eléctrica que se utiliza para las bombas se usa adecuadamente.

Actualmente la torre de estudio da servicio a las plantas Hidrógeno, MTBE, TAME, U-901, HDS y MAYA , al realizar un diagnóstico hidráulico al sistema de enfriamiento se determinó que la torre suministra un flujo total de 29,439 GPM que corresponden al 62% del total de diseño (47,737 GPM) tomando en consideración que las plantas operan al 100%.

La única planta que resulta afectada de acuerdo a la operación actual es la planta MAYA, ya que por las limitantes hidráulicas de la red no se cumplen con los requerimientos de agua de enfriamiento y presión. Actualmente se suministran 14,399 GPM a una presión de 4.2 kg/cm<sup>2</sup> y se requiere un flujo mínimo de 20,167



## CONCLUSIONES

GPM a una presión de  $5.1 \text{ kg/cm}^2$ , lo que representa un déficit de flujo de 28.6 % con respecto a lo requerido, esto ocasiona que a la planta dejen de ingresar 3,000 barriles de crudo Maya por día.

Para tratar de solventar la problemática se plantearon y desarrollaron tres propuestas a nivel conceptual. La primera consiste en la instalación de un nuevo cabezal con la trayectoria actual de suministro de agua de enfriamiento, la segunda es utilizar una torre que actualmente está en construcción y en la tercera se propone la construcción de una nueva torre de enfriamiento que dé servicio exclusivo a esta planta.

Con base en un análisis técnico realizado a las tres propuestas, todas cumplen con los requerimientos. Se logra un flujo de agua de enfriamiento para la propuesta 1 de 23,034 GPM a una presión de  $5.88 \text{ kg/cm}^2$ , para la propuesta 2 un flujo de 23,034 GPM a una presión de  $5.00 \text{ kg/cm}^2$  y para la propuesta 3 un flujo de 23,034 GPM a una presión de  $6.30 \text{ kg/cm}^2$

Con base en el análisis técnico-económico que se realizó a las tres propuestas, la mejor propuesta es la 3, ya que a pesar de que es la que tiene una mayor inversión inicial, es la que presenta mayores ventajas ya que permite un menor uso de energía eléctrica, se obtiene una liberación de carga hidráulica de la torre de estudio por lo que también se mejoraría el suministro de flujo a las plantas HDS de Gasóleos, MTBE y TAME, HIDROGENO, U-901, además de que es la que da un mayor rendimiento de la inversión (28%) y un periodo de recuperación menor (5 años).

Para darle continuidad a esta propuesta, se recomienda realizar la ingeniería básica, de detalle y un volumen de obra para la construcción de una nueva Torre de Enfriamiento en el área de almacenes que proporcione agua de enfriamiento en las condiciones requeridas a la Planta MAYA.



## CONCLUSIONES

En la actualidad no se ha documentado una guía para evaluar un sistema de enfriamiento de forma integral en los aspectos hidráulicos y térmicos, por lo que en este trabajo se presentó una metodología general para evaluar estos aspectos, permitiendo así su uso como una guía de evaluación.

Ante la problemática que presentan los sistemas de enfriamiento, mi formación como Ingeniero Químico contribuyó a resolver este problema, utilizando en conjunto los conocimientos adquiridos en Ingeniería de Fluidos, Transferencia de calor, Ingeniería Ambiental, Ingeniería Económica e Ingeniería de proyectos.





## 6. BIBLIOGRAFÍA

### Publicaciones

1. Baca Urbina G. *Fundamentos de Ingeniería Económica*. Mc Graw Hill, México, (2003).
2. Ciceri, Hugo. Decisiones de inversión en plantas Química. Modelos y criterios. Facultad de Química. México D.F. (2009).
3. CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Editorial Mc GRAW HILL. (1969).
4. Ibarra A. Carlos A. *Diagnóstico y propuesta de mejora del funcionamiento de una torre de enfriamiento y de su red de distribución de agua en una refinería*. Tesis en Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. (2008).
5. Leland T Blank. *Ingeniería Económica*. Mc Graw Hill, Colombia (1999)
6. Merle C. Potter. *Mecánica de Fluidos*. Editorial Thomson, Tercera Edición (2002).
7. Peters,Max. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. Editorial Mc GRAW HILL, Quinta edición (2003).
8. Volk, Michael. *Pump characteristics and applications*. Editorial Taylor y Francis,USA, Segunda edición (2005).



## BIBLIOGRAFÍA

### Páginas web


- DOF, lineamientos que establecen las disposiciones para determinar la rentabilidad social, así como la conveniencia de llevar a cabo un proyecto mediante un esquema de asociación público-privada,( DOF en línea).( 20 de marzo del 2013) Disponible en:  
[http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5278655&fecha=22/11/2012](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5278655&fecha=22/11/2012)
- Flowserve, Herramienta de selección de bombas,(aplicación en línea)(Enero 2013) Disponible en:  
<http://flowserve.com/Applications/FlowSelex-Portal-Pump-Selection-Tool>
- Pump systems matter and Hydraulic Institute. Optimizing pumping Systems. (PDF en línea), (Agosto 2012) Disponible en:  
<http://www.pumps.org/>
- Pump systems matter. Pump System. Basic Assessment Guide. (PDF en línea), (Agosto 2012) Disponible en:  
<http://www.pumps.org/>
- Web del profesor, Torres de enfriamiento, (PDF en línea), 12 de marzo del 2012). Disponible en:  
<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/OPIV/torres1.pdf>
- Cooling Technology Institute (CTI), What is a cooling tower? (en línea), (10 de enero del 2012). Disponible en:  
[www.cti.org/whatis/coolingtower.shtml](http://www.cti.org/whatis/coolingtower.shtml)



## ANEXOS

### 7. ANEXOS


#### 7.1. Metodología para el análisis del sistema de bombeo



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ANÁLISIS ELECTROMECÁNICO DE SISTEMAS DE BOMBEO



---

**METODOLOGÍA PARA CÁLCULO DE VELOCIDAD Y CARGA DINÁMICA TOTAL**

---

**PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO**

LA SIGUIENTE MEMORIA DE CÁLCULO COMPRENDE SIETE PASOS PARA LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO COMO SE DESCRIBE A CONTINUACIÓN:

**PASO 1** CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE LA BOMBA  
**PASO 2** CÁLCULO DE LA CARGA DINÁMICA TOTAL  
**PASO 3** CÁLCULO DE LA POTENCIA DE ACCIONAMIENTO DEL MOTOR ELÉCTRICO  
**PASO 4** CÁLCULO DE LA POTENCIA AL FRENO  
**PASO 5** CÁLCULO DE LA POTENCIA HIDRÁULICA  
**PASO 6** CÁLCULO DEL NPSHD (DISPONIBLE) DE LA INSTALACIÓN Y COMPARACIÓN CON EL REQUERIDO DE LA BOMBA  
**PASO 7** CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA BOMBA  
**PASO 8** CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TOTAL MOTOR-BOMBA

PARA CADA PASO A REALIZAR EN LA EVALUACIÓN ELECTRO MECÁNICA, SE PRESENTAN LOS VALORES PARA EL CÁLCULO UN EJEMPLO DE CÁLCULO PARA UNA BOMBA A EVALUAR Y LOS RESULTADOS DEL TOTAL DE BOMBAS.

**PASO 1 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE LA BOMBA**

LA VELOCIDAD ANGULAR DE LA BOMBA SE CALCULA CON LA SIGUIENTE FORMULA:

$$\omega = \frac{\omega_0 \times r_0}{r_1}$$

DONDE:

- $\omega$  ES LA VELOCIDAD ANGULAR DE LA FLECHA DE LA BOMBA
- $\omega_0$  ES LA VELOCIDAD ANGULAR EN EL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
- $r_0$  ES EL RADIO DE LA PUNTA MEDIDORA DEL INSTRUMENTO
- $r_1$  ES EL RADIO DE LA FLECHA DONDE SE REALIZA LA MEDICIÓN

TABLA DE MEDICIONES PARA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA BOMBA

BOMBA	DIÁMETRO COPEL EN BOMBA	DIÁMETRO POLEA DEL TACOMETRO	LECTURA TACÓMETRO
	cm	cm	RPM
GA-001A	22.86	5	5394.96
GA-001B	22.86	5	5394.96
GA-001C	22.86	5	5394.96

PARA LA BOMBA GA-001A SE SUSTITUYE SOBRE LA ECUACIÓN COMO SIGUE:

$$\omega_0 = \frac{(5395) \times (23)}{5} = 1180 \text{ RPM}$$

TABLA DE VELOCIDADES MEDIDAS EN BOMBAS

BOMBA	VELOCIDAD DE DISEÑO	VELOCIDAD MEDIDA
	RPM	RPM
GA-001A	1180	1180
GA-001B	1180	1180
GA-001C	1180	1180

TABLA DE VALORES TOMADOS O MEDIDOS PARA EVALUACIÓN DE LA CARGA DINÁMICA TOTAL

BOMBA	FLUJO	PRESIÓN	TEMP	COLUMNA DE SUCCIÓN
	m <sup>3</sup> /hr	kg/cm <sup>2</sup>	°C	m
GA-001A	3,050.00	7.00	28.00	1.80
GA-001B	3,636.27	7.00	28.00	1.80
GA-001C	3,636.27	7.00	28.00	1.80



# ANEXOS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ANÁLISIS ELECTROMECÁNICO DE SISTEMAS DE BOMBEO

---

**METODOLOGÍA PARA CÁLCULO DE POTENCIAS**

**PASO 2 CÁLCULO DE LA CARGA DINÁMICA TOTAL**

PARA BOMBAS HORIZONTALES:

$$H_{DT} = \frac{P_B}{\rho g} + (z_B - z_A) + H_p$$

PARA BOMBAS VERTICALES:

$$H_{DT} = \frac{P_B}{\rho g} + (z_B - z_A)$$

DONDE:

- $H_{DT}$  CARGA DINÁMICA TOTAL, EN METROS
- $P_B$  PRESIÓN MANOMÉTRICA TOMADA DE LA DESCARGA DE LA BOMBA.
- $Z_B$  ES LA COTA DE POSICIÓN DEL PUNTO B, EN METROS
- $Z_A$  ES LA COTA DE POSICIÓN DEL PUNTO A, EN METROS
- $g$  ES LA ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD EXPRESADA EN  $m/s^2$
- $\rho$  ES LA DENSIDAD DEL AGUA EXPRESADA EN  $kg/m^3$
- $H_p$  PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN LA SUCCIÓN DE LA BOMBA, EN METROS

PARA LA BOMBA **GA-001A** SE SUSTITUYE SOBRE LA ECUACIÓN PARA BOMBAS HORIZONTALES:

$$H_{DT} = \frac{686,466}{(1000)(9.81)} + (0.00 - 1.80) + 0.0050 = 68.21 \text{ [m]}$$

TABLA DE RESULTADOS DE CARGA DINÁMICA TOTAL PARA EL CONJUNTO DE BOMBAS

BOMBA	FLUJO	COLUMNA DE SUCCIÓN	PÉRDIDAS POR	PRESIÓN SUCCIÓN	PRESIÓN DESCARGA	PRESIÓN DIFERENCIAL	CARGA DINÁMICA TOTAL
	$m^3/hr$	m	m	$kg/cm^2$	$kg/cm^2$	$kg/cm^2$	m
GA-001A	3,050.00	1.80	0.01	0.18	7.00	7.30	73.00
GA-001B	3,636.27	1.80	0.01	0.48	7.00	6.80	68.00
GA-001C	3,636.27	1.80	0.01	0.48	7.00	7.20	72.00

**PASO 3 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE ACCIONAMIENTO DEL MOTOR ELÉCTRICO**

LA POTENCIA DE ACCIONAMIENTO SE CALCULA MEDIANTE LA SIGUIENTE FÓRMULA:

$$P_{ACC} = \sqrt{3} \times V \times I \times fp$$

DONDE:

- $P_{ACC}$  ES LA POTENCIA DE ACCIONAMIENTO EN WATT.
- $V$  ES EL VOLTAJE DE LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN, EN VOLTS.
- $I$  ES LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN AMPERES.
- $fp$  ES EL FACTOR DE POTENCIA, ADIMENSIONAL.

TABLA DE VALORES PARA CÁLCULO DE POTENCIA DE ACCIONAMIENTO Y AL FRENO DE LAS BOMBAS

BOMBA	VOLTAJE	CORRIENTE	FASES	FACTOR DE POTENCIA	EF MOTOR
	V	A			%
GA-001A	1,328	189.433	3	0.98	95
GA-001B	1,328	208.000	3	0.98	95
GA-001C	1,328	207.700	3	0.98	95

PARA LA BOMBA **GA-001A** SE SUSTITUYE :

$$P_{ACC} = \sqrt{3} (1,328) (189.43) (0.98) = 426,983 \text{ W}$$

**PASO 4 CÁLCULO DE LA POTENCIA AL FRENO**

LA POTENCIA AL FRENO SE CALCULA MEDIANTE LA SIGUIENTE FÓRMULA:

$$P_{FRENO} = \sqrt{3} \times V \times I \times fp \times \eta_m$$

DONDE:


- $P_{FRENO}$  ES LA POTENCIA AL FRENO EN WATTS.
- $V$  ES EL VOLTAJE DE LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN, EN VOLTS.
- $I$  ES LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN AMPERES.
- $fp$  ES EL FACTOR DE POTENCIA, ADIMENSIONAL.
- $\eta_m$  ES LA EFICIENCIA DEL MOTOR ELÉCTRICO, ADIMENSIONAL

PARA LA BOMBA **GA-001A** SE SUSTITUYE :

$$P_{FRENO} = \sqrt{3} (1,328) (189.43) (0.98) (0.95) = 405,634 \text{ W}$$




## ANEXOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ANÁLISIS ELECTROMECÁNICO DE SISTEMAS DE BOMBEO



---

**CÁLCULO DEL NPSHD**

---

**PASO 5 CÁLCULO DE LA POTENCIA HIDRÁULICA**

LA POTENCIA HIDRÁULICA SE CALCULA MEDIANTE LA SIGUIENTE FÓRMULA:

$$P_H = Q \times \rho \times g \times H_{DT}$$

DONDE:

- $P_H$  ES LA POTENCIA HIDRÁULICA EN WATTS.
- $Q$  ES EL GASTO VOLUMÉTRICO, EN  $m^3/s$ .
- $\rho$  ES LA DENSIDAD DEL AGUA, EN  $kg/m^3$ .
- $g$  ES LA ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD, EN  $m/s^2$ .
- $H_{DT}$  ES LA CARGA DINÁMICA TOTAL, EN METROS.

**TABLA DE VALORES PARA EL CÁLCULO DE LA POTENCIA HIDRÁULICA**

BOMBA	FLUJO		CARGA DINÁMICA TOTAL	DENSIDAD
	$m^3/hr$	$m^3/s$	m	$kg/m^3$
GA-001A	3,050.0	0.847	73.0	996
GA-001B	3,636.3	1.010	68.0	996
GA-001C	3,636.3	1.010	72.0	996

PARA LA BOMBA **GA-001A** SE SUSTITUYE :

$$P_H = ( 0.847 ) ( 996 ) ( 9.81 ) ( 73.0 ) = 604,294 \text{ W}$$

**TABLA DE RESULTADO DE POTENCIAS PARA LAS BOMBAS**

BOMBA	POTENCIA DE ACCIONAMIENTO	POTENCIA AL FRENO	POTENCIA HIDRÁULICA
	kW	kW	kW
GA-001A	739.56	702.578	604.29
GA-001B	812.04	771.439	671.11
GA-001C	810.87	770.326	710.58

---

**PASO 6 CÁLCULO DEL NPSHD (DISPONIBLE) DE LA INSTALACIÓN Y COMPARACIÓN CON EL REQUERIDO DE LA BOMBA**

TABLA DE VALORES PARA EL CÁLCULO DE CARGA NETA POSITIVA DE SUCCIÓN DISPONIBLE (NPSH)

BOMBA	PRESIÓN ATMOSFÉRI	TEMP	PRESIÓN DE VAPOR	COLUMNA DE SUCCIÓN	PÉRDIDAS POR FRICCIÓN
	Pa	°C	Pa	m	m
GA-001A	101,325	28	3,783	1.80	0.01
GA-001B	101,325	28	3,783	1.80	0.01
GA-001C	101,325	28	3,783	1.80	0.01

EL NPSH SE CALCULA MEDIANTE LA SIGUIENTE FÓRMULA:

$$NPSH_d = \frac{P_A - P_v}{\rho g} + h - H_{PS}$$

DONDE:


- $NPSH_d$  CARGA NETA POSITIVA DE SUCCIÓN (DISPONIBLE)
- $P_A$  PRESIÓN ABSOLUTA EN LA SUPERFICIE DEL LIQUIDO EN EL CÁRCAMO O RECIPIENTE, EN Pa
- $P_v$  PRESION DE SATURACIÓN DEL VAPOR A LA TEPERATURA DEL LÍQUIDO MEDIDA, EN °C
- $h$  ALTURA TOMADA DESDE LA SUPERFICIE DEL LIQUIDO HASTA LA LINEA CENTRAL DEL IMPULSOR, EN METROS
- $H_{PS}$  CARGA DE PERDIDAS DE FRICCIÓN DE TUBERÍA DE SUCCIÓN, EN METROS
- $\rho$  ES LA DENSIDAD DEL AGUA, EN  $kg/m^3$ .
- $g$  ES LA ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD, EN  $m/s^2$ .



DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO  
CON AGUA PARA EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.

ANEXOS






UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ANÁLISIS ELECTROMECÁNICO DE SISTEMAS DE BOMBEO



---

**CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA BOMBA Y CUADRO DE RESULTADOS**

PARA LA BOMBA **GA-001A** SE SUSTITUYE SOBRE LA ECUACIÓN:

$$NPSH_d = \frac{(101325)}{(1000)} - \frac{(3783)}{(9.81)} + 1.80 - 0.01 = 11.74 \text{ [m]}$$

**PASO 7 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA BOMBA**

LA EFICIENCIA DE LA BOMBA SE CALCULA DE MANERA DIRECTA CON LA SIGUIENTE FORMULA

$$\eta_b = \frac{\text{Potencia Hidráulica}}{\text{Potencia al Freno}} = \frac{Q\rho gH_{DT}}{\sqrt{3}VIfp \eta_m} \times 100$$

PARA LA BOMBA **GA-001A** A PARTIR DE LAS POTENCIAS OBTENIDAS SE SUSTITUYE SOBRE LA ECUACIÓN:

$$\eta_d = \frac{604,294.5}{702,578.0} \times 100 = 86.01 \%$$

**PASO 8 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TOTAL MOTOR-BOMBA**

LA EFICIENCIA DEL CONJUNTO MOTOR-BOMBA SE CALCULA LA EFICIENCIA TOTAL DE MANERA DIRECTA CON LA SIGUIENTE FORMULA:

$$\eta_b = \frac{\text{Potencia Hidráulica}}{\text{Potencia de Accionamiento}} = \frac{Q\rho gH_{DT}}{\sqrt{3}VIfp} \times 100$$

PARA LA BOMBA **GA-001A** A PARTIR DE LAS POTENCIAS OBTENIDAS SE SUSTITUYE SOBRE LA ECUACIÓN:

$$\eta_d = \frac{604,295}{739,556} \times 100 = 81.71 \%$$

TABLA DE RESULTADOS DE EVALUACIÓN ELECTROMECÁNICA DE BOMBAS

BOMBA	FLUJO	CARGA DINÁMICA	POTENCIA DE ACCIONAMIENT	POTENCIA AL FRENO	POTENCIA HIDRÁULICA	NPSH DISPONIBLE	EFICIENCIA DE LA	EFICIENCIA TOTAL
	m <sup>3</sup> /hr	m	kW	kW	kW	m	%	%
GA-001A	3,050.0	715.885	739.6	702.58	604.29	11.74	86.0	81.7
GA-001B	3,636.3	666.852	812.0	771.44	671.11	11.74	87.0	82.6
GA-001C	3,636.3	706.079	810.9	770.33	710.58	11.74	92.2	87.6



## ANEXOS

### 7.2. Metodología para la construcción de una curva de enfriamiento.

Para la construcción de la curva característica de un sistema de tuberías con ramificaciones se puede utilizar el simulador de flujo PIPEPHASE. Para un sistema de tuberías nuevo es necesario conocer la distribución de flujo mediante este simulador, para una red de tubería existente se debe tener conocimiento de la distribución de flujo mediante las mediciones realizadas en campo.

1. Se calculan las pérdidas primarias y secundarias de toda la red de tuberías con el método de cálculo de Darcy-Weisbach. Como resultado se obtendrá un conjunto de pérdidas por fricción que deberán ser sumadas de acuerdo a lo que se especifica en los siguientes puntos.
2. Se toma como referencia el punto más cercano al cabezal común de descarga de las bombas, en la tubería del cabezal principal de suministro, para comenzar la suma de pérdidas por fricción. Se toma otro punto de referencia en el cabezal principal de retorno a la misma altura del punto de referencia en el cabezal principal de suministro.
3. La suma de pérdidas por fricción se realiza de forma ordenada empezando desde el punto de referencia en el cabezal principal de suministro hasta el primer equipo al cual se le da servicio.
4. Se suman las pérdidas por fricción en el equipo y se suman las pérdidas de fricción en la tubería de retorno hasta el punto de referencia en el cabezal principal.
5. Esta operación se realiza tantas veces como equipos existan y a los cuales se les distribuya flujo.
6. La carga de pérdida por fricción  $H_P$  será el promedio de las sumas realizadas por equipo desde el cabezal principal de suministro hasta el cabezal principal de retorno.

La carga dinámica total  $H_{DT}$  será la suma de la carga de pérdidas por fricción  $H_P$  más la carga estática del sistema  $H_E$ , que se obtiene de acuerdo al Paso 1. La carga dinámica total representa sólo un punto de la curva característica del sistema, por lo que para obtener todo el trazo



## ANEXOS

de la curva característica es necesario aplicar la relación cuadrática que mantiene la carga con respecto al flujo que se muestra a continuación:

$$H_{P1} = \left( \frac{Q_1}{Q_0} \right)^2 \times H_{P0}$$

Dónde:

$H_{P1}$ : es la carga de pérdidas por fricción a calcular

$Q_1$ : es el siguiente flujo propuesto para el cual no se conoce su carga total

$Q_0$ : es el flujo conocido del punto de operación conocido

$H_{P0}$ : es la carga de pérdidas por fricción conocida





## ANEXOS

### 7.3. Memoria de cálculo de simulación realizada en PIPEPHASE 9.2

```

Solution History

R
PIPEPHASE Version 9.2 - INPUT MODULE
=====

*** SCANNING
GENERAL DATA
METHODS DATA
PROPERTY DATA
STRUCTURE DATA

END OF PRE-PROCESSING -- NO ERRORS

R
PIPEPHASE Version 9.2 - CROSS CHECKING MODULE
=====

*** CHECKING
GENERAL DATA
PROPERTY DATA
STRUCTURE DATA
CASE STUDY DATA
PVTG DATA
METHODS DATA

*** INPUT REPRINT
GENERAL DATA
GENERAL DATA
METHODS DATA
STRUCTURE DATA
NETWORK DATA

*** FORMATTING DATA

END OF INPUT PROCESSING -- NO ERRORS
-- 1 WARNING

END OF INPUT CROSS-CHECKING -- NO ERRORS.

R
PIPEPHASE Version 9.2 - CALCULATION MODULE
=====

PRIMARY CONTINUATION STEP = 1 MAXIMUM STEPS = 1
INITIAL NODAL FLOW IMBALANCE ( BPD): RMS = 2.45E+05 MAX = 7.14E+06

```



DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO  
CON AGUA PARA EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.



ANEXOS

ITER	PRES. CHANGE (PSIA)		FLOW IMBALANCE ( BPD)	
	RMS	MAX	RMS	MAX
1	1.23E+12	3.27E+13	2.45E+05	7.14E+06
2	6.19E+11	1.64E+13	5.00E+10	2.65E+12
3	3.06E+11	8.12E+12	3.53E+10	1.87E+12
4	1.55E+11	4.11E+12	2.50E+10	1.33E+12
5	7.67E+10	2.04E+12	1.77E+10	9.38E+11
6	3.89E+10	1.03E+12	1.25E+10	6.65E+11
7	1.94E+10	5.14E+11	8.85E+09	4.70E+11
8	9.67E+09	2.56E+11	6.25E+09	3.32E+11
9	4.86E+09	1.29E+11	4.42E+09	2.34E+11
10	2.42E+09	6.42E+10	3.11E+09	1.65E+11
11	1.17E+09	3.11E+10	2.18E+09	1.16E+11
12	5.16E+08	1.09E+10	1.54E+09	8.16E+10
13	4.12E+08	1.01E+10	1.22E+09	6.12E+10
14	2.02E+08	4.95E+09	8.57E+08	4.30E+10
15	1.01E+08	2.47E+09	6.05E+08	3.03E+10
16	5.03E+07	1.23E+09	4.28E+08	2.14E+10
17	2.51E+07	6.15E+08	3.02E+08	1.51E+10
18	1.25E+07	3.07E+08	2.13E+08	1.07E+10
19	6.25E+06	1.53E+08	1.51E+08	7.54E+09
20	3.12E+06	7.63E+07	1.06E+08	5.33E+09
21	1.56E+06	3.81E+07	7.51E+07	3.76E+09
22	7.72E+05	1.89E+07	5.30E+07	2.66E+09
23	3.89E+05	9.53E+06	3.76E+07	1.88E+09
24	1.94E+05	4.75E+06	2.65E+07	1.33E+09
25	9.69E+04	2.37E+06	1.87E+07	9.39E+08
26	4.83E+04	1.18E+06	1.32E+07	6.63E+08
27	2.41E+04	5.91E+05	9.35E+06	4.68E+08
28	1.19E+04	2.93E+05	6.59E+06	3.31E+08
29	6.05E+03	1.48E+05	4.66E+06	2.34E+08
30	3.06E+03	7.44E+04	3.29E+06	1.65E+08
31	1.48E+03	3.58E+04	2.29E+06	1.15E+08
32	7.90E+02	1.93E+04	1.64E+06	8.23E+07
33	3.97E+02	9.67E+03	1.16E+06	5.81E+07
34	2.06E+02	5.04E+03	8.28E+05	4.15E+07
35	1.09E+02	2.69E+03	5.87E+05	2.95E+07
36	5.41E+01	1.33E+03	4.11E+05	2.06E+07
37	2.75E+01	6.76E+02	2.91E+05	1.46E+07
38	1.34E+01	3.27E+02	2.03E+05	1.01E+07
39	7.55E+00	1.86E+02	1.46E+05	7.33E+06
40	3.59E+00	8.67E+01	1.01E+05	5.02E+06
41	2.03E+00	4.95E+01	7.25E+04	3.62E+06
42	1.51E+00	3.82E+01	5.50E+04	2.76E+06
43	9.39E-01	2.40E+01	4.01E+04	2.02E+06
44	3.97E-01	9.77E+00	2.60E+04	1.29E+06
45	2.57E-01	6.37E+00	1.90E+04	9.52E+05
46	1.70E-01	4.26E+00	1.40E+04	7.03E+05
47	1.16E-01	2.92E+00	1.03E+04	5.20E+05
48	8.07E-02	2.04E+00	7.64E+03	3.86E+05



DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO  
CON AGUA PARA EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.



ANEXOS

49	5.70E-02	1.45E+00	5.66E+03	2.88E+05
50	4.07E-02	1.04E+00	4.20E+03	2.14E+05
51	2.94E-02	7.52E-01	3.12E+03	1.60E+05
52	2.14E-02	5.48E-01	2.32E+03	1.19E+05
53	1.56E-02	4.02E-01	1.73E+03	8.93E+04
54	1.15E-02	2.96E-01	1.29E+03	6.68E+04
55	8.48E-03	2.19E-01	9.62E+02	5.00E+04
56	6.27E-03	1.62E-01	7.19E+02	3.75E+04
57	4.65E-03	1.21E-01	5.37E+02	2.80E+04
58	3.46E-03	8.98E-02	4.02E+02	2.10E+04
59	2.57E-03	6.69E-02	3.00E+02	1.57E+04
60	1.92E-03	4.99E-02	2.25E+02	1.18E+04
61	1.43E-03	3.72E-02	1.68E+02	8.84E+03
62	1.06E-03	2.78E-02	1.26E+02	6.65E+03
63	7.95E-04	2.08E-02	9.49E+01	4.99E+03
64	5.93E-04	1.55E-02	7.11E+01	3.75E+03
65	4.44E-04	1.16E-02	5.33E+01	2.82E+03
66	3.32E-04	8.71E-03	4.02E+01	2.12E+03
67	2.47E-04	6.51E-03	3.03E+01	1.60E+03
68	1.85E-04	4.87E-03	2.27E+01	1.21E+03
69	1.40E-04	3.69E-03	1.67E+01	8.77E+02
70	1.03E-04	2.73E-03	1.25E+01	6.60E+02
71	7.60E-05	2.02E-03	9.36E+00	4.95E+02
72	5.58E-05	1.49E-03	7.06E+00	3.71E+02
73	4.35E-05	1.15E-03	5.40E+00	2.79E+02
74	3.26E-05	8.65E-04	4.24E+00	2.09E+02
75	2.43E-05	6.48E-04	3.40E+00	1.57E+02
76	1.79E-05	4.78E-04	2.80E+00	1.18E+02
77	1.39E-05	3.70E-04	2.37E+00	8.88E+01
78	9.29E-06	2.55E-04	4.33E+00	2.07E+02
79	6.63E-06	1.85E-04	4.22E+00	2.07E+02
80	4.06E-06	1.19E-04	4.18E+00	2.07E+02
81	3.59E-06	1.07E-04	4.14E+00	2.07E+02
82	2.77E-06	7.31E-05	3.71E+00	1.90E+02

ITERATION NUMBER 0. 0

LINK NAME	FROM NODE	TO NODE	FLOW RATE M3/HR	PRESSURE IN BAR	PRESSURE OUT BAR	IMBALANCE BAR
L066	S005	J064	3633.983	7.21	7.18	
L062	S004	J063	3633.983	7.20	7.18	
L090	J064	J063	3633.983	7.18	7.18	0.000
L089	J063	J062	7267.966	7.18	7.17	
L088	J062	J061	7267.966	7.17	7.17	
L086	J061	J060	7267.966	7.17	7.16	
L085	J060	J059	7267.966	7.16	7.15	
L000	J059	J000	7267.966	7.15	7.07	
L001	J000	J001	7267.966	7.07	6.95	
L003	J001	J002	7267.966	6.95	6.81	



DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO  
CON AGUA PARA EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.



ANEXOS

L004	J002	J003	7267.966	6.81	6.62	
L019	J003	J006	7267.966	6.62	5.87	
L023	J006	U-07	683.945	5.87	5.48	
L081	U-07	U-01	683.945	5.48	3.06	
L024	J006	J009	6584.021	5.87	5.85	
L025	J009	J010	6167.601	5.85	5.85	
L026	J010	J011	5601.312	5.85	5.83	
L027	J011	J012	5601.312	5.83	5.63	
L037	J012	J017	5601.312	5.63	5.57	
L038	J017	J018	5601.312	5.57	5.55	
L039	J018	J019	4858.034	5.55	5.54	
L040	J019	J020	4858.034	5.54	5.38	
L006	J020	J004	1303.751	5.38	5.33	
L008	J004	HDS	1303.751	5.33	5.17	
L028	J009	J013	416.420	5.85	5.70	
L031	J010	J015	566.289	5.85	5.58	
L029	J013	J014	416.420	5.70	5.62	
L030	J014	MTBE	416.420	5.62	5.42	
L032	J015	J016	566.289	5.58	5.41	
L033	J016	TAM1	566.289	5.41	5.21	
L075	J018	J050	743.279	5.55	5.51	
L053	HDS	HDS-	1303.751	5.17	3.32	
L063	TAM1	TAME	566.289	5.21	3.33	
L072	MTBE	MTB1	416.420	5.42	3.07	
L013	J020	J007	3554.282	5.38	5.37	
L014	J007	J021	3554.282	5.37	5.33	
L016	J021	J022	3554.282	5.33	5.29	
L018	HDS-	J005	1303.751	3.32	3.16	
L022	J050	J051	743.279	5.51	5.47	
L034	J051	J052	743.279	5.47	5.45	
L035	J052	U-90	743.279	5.45	5.18	
L045	TAME	J033	566.289	3.33	3.13	
L047	J033	J008	566.289	3.13	2.96	
L049	J022	MAYA	3554.282	5.29	5.28	
L051	U-90	U-91	743.279	5.18	3.36	
L052	MTB1	J035	416.420	3.07	2.97	
L054	J035	J034	416.420	2.97	2.88	
L055	U-91	J055	743.279	3.36	3.08	
L060	J055	J056	743.279	3.08	3.06	
L065	J056	J058	743.279	3.06	3.02	
L046	MAYA	MAY1	3554.282	5.28	3.28	
L036	MAY1	J023	3554.282	3.28	3.17	
L002	J023	J024	3554.282	3.17	3.15	
L005	J024	J025	3554.282	3.15	3.12	
L007	J025	J026	3554.282	3.12	3.12	
L021	J005	J026	1303.751	3.16	3.12	0.000
L010	J026	J027	4858.034	3.12	2.99	
L012	J027	J028	4858.034	2.99	2.98	
L077	J058	J028	743.279	3.02	2.98	0.000
L015	J028	J029	5601.312	2.98	2.96	



DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO  
CON AGUA PARA EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.



ANEXOS

L017	J029	J030	5601.312	2.96	2.91	
L041	J030	J031	5601.312	2.91	2.71	
L042	J031	J032	5601.312	2.71	2.70	
L048	J008	J032	566.289	2.96	2.70	0.000
L044	J032	J037	6167.601	2.70	2.70	
L050	J034	J037	416.420	2.88	2.70	0.001
L058	J037	J038	6584.021	2.70	2.69	
L061	U-01	J038	683.945	3.06	2.68	-0.005
L011	J038	J036	7267.966	2.69	1.92	
L043	J036	J065	7267.966	1.92	1.74	
L113	J065	J066	7267.966	1.74	1.73	
L121	J066	J067	7267.966	1.73	1.72	
L125	J067	J068	5858.345	1.72	1.71	
L131	J068	J069	4715.863	1.71	1.70	
L134	J069	J070	3787.526	1.70	1.70	
L137	J070	J071	2899.594	1.70	1.70	
L142	J071	J072	2113.189	1.70	1.70	
L146	J072	J073	1387.315	1.70	1.70	
L148	J073	J074	689.856	1.70	1.70	
L149	J074	D010	689.856	1.70	0.72	0.132
L147	J073	D009	697.459	1.70	0.72	0.132
L144	J072	D008	725.873	1.70	0.72	0.132
L139	J071	D007	786.406	1.70	0.72	0.132
L136	J070	D006	887.932	1.70	0.72	0.132
L133	J069	D004	928.337	1.70	0.72	0.132
L129	J068	D003	1142.481	1.71	0.72	0.132
L123	J067	D002	1409.621	1.72	0.72	0.132
MAX PRESSURE IMBALANCE =						0.1323 BAR AT NODE D002
ITERATION NUMBER		1. 0				
LINK NAME	FROM NODE	TO NODE	FLOW RATE M3/HR	PRESSURE IN BAR	PRESSURE OUT BAR	IMBALANCE BAR
L066	S005	J064	3633.983	7.08	7.05	
L062	S004	J063	3633.983	7.07	7.05	
L090	J064	J063	3633.983	7.05	7.05	0.000
L089	J063	J062	7267.966	7.05	7.04	
L088	J062	J061	7267.966	7.04	7.03	
L086	J061	J060	7267.966	7.03	7.03	
L085	J060	J059	7267.966	7.03	7.02	
L000	J059	J000	7267.966	7.02	6.94	
L001	J000	J001	7267.966	6.94	6.82	
L003	J001	J002	7267.966	6.82	6.68	
L004	J002	J003	7267.966	6.68	6.48	
L019	J003	J006	7267.966	6.48	5.74	
L023	J006	U-07	683.017	5.74	5.35	
L081	U-07	U-01	683.017	5.35	2.93	
L024	J006	J009	6584.948	5.74	5.72	
L025	J009	J010	6168.367	5.72	5.72	



DIAGNÓSTICO TÉRMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO  
CON AGUA PARA EQUIPOS DE PROCESO DE UNA REFINERÍA.



ANEXOS

L026	J010	J011	5602.011	5.72	5.69	
L027	J011	J012	5602.011	5.69	5.49	
L037	J012	J017	5602.011	5.49	5.43	
L038	J017	J018	5602.011	5.43	5.42	
L039	J018	J019	4858.965	5.42	5.41	
L040	J019	J020	4858.965	5.41	5.25	
L006	J020	J004	1303.689	5.25	5.19	
L008	J004	HDS	1303.689	5.19	5.04	
L028	J009	J013	416.582	5.72	5.57	
L031	J010	J015	566.356	5.72	5.45	
L029	J013	J014	416.582	5.57	5.49	
L030	J014	MTBE	416.582	5.49	5.29	
L032	J015	J016	566.356	5.45	5.28	
L033	J016	TAM1	566.356	5.28	5.08	
L075	J018	J050	743.045	5.42	5.38	
L053	HDS	HDS-	1303.689	5.04	3.19	
L063	TAM1	TAME	566.356	5.08	3.20	
L072	MTBE	MTB1	416.582	5.29	2.94	
L013	J020	J007	3555.276	5.25	5.24	
L014	J007	J021	3555.276	5.24	5.20	
L016	J021	J022	3555.276	5.20	5.16	
L018	HDS-	J005	1303.689	3.19	3.03	
L022	J050	J051	743.045	5.38	5.34	
L034	J051	J052	743.045	5.34	5.32	
L035	J052	U-90	743.045	5.32	5.05	
L045	TAME	J033	566.356	3.20	3.00	
L047	J033	J008	566.356	3.00	2.83	
L049	J022	MAYA	3555.276	5.16	5.14	
L051	U-90	U-91	743.045	5.05	3.22	
L052	MTB1	J035	416.582	2.94	2.83	
L054	J035	J034	416.582	2.83	2.75	
L055	U-91	J055	743.045	3.22	2.95	
L060	J055	J056	743.045	2.95	2.93	
L065	J056	J058	743.045	2.93	2.89	
L046	MAYA	MAY1	3555.276	5.14	3.15	
L036	MAY1	J023	3555.276	3.15	3.04	
L002	J023	J024	3555.276	3.04	3.02	
L005	J024	J025	3555.276	3.02	2.99	
L007	J025	J026	3555.276	2.99	2.98	
L021	J005	J026	1303.689	3.03	2.98	0.000
L010	J026	J027	4858.965	2.98	2.86	
L012	J027	J028	4858.965	2.86	2.85	
L077	J058	J028	743.045	2.89	2.85	0.001
L015	J028	J029	5602.011	2.85	2.83	
L017	J029	J030	5602.011	2.83	2.77	
L041	J030	J031	5602.011	2.77	2.58	
L042	J031	J032	5602.011	2.58	2.57	
L048	J008	J032	566.356	2.83	2.57	0.000
L044	J032	J037	6168.367	2.57	2.57	
L050	J034	J037	416.582	2.75	2.57	-0.001



## ANEXOS

L058	J037	J038	6584.948	2.57	2.55	
L061	U-01	J038	683.017	2.93	2.56	0.002
L011	J038	J036	7267.966	2.55	1.78	
L043	J036	J065	7267.966	1.78	1.61	
L113	J065	J066	7267.966	1.61	1.59	
L121	J066	J067	7267.966	1.59	1.58	
L125	J067	J068	5858.288	1.58	1.58	
L131	J068	J069	4715.747	1.58	1.57	
L134	J069	J070	3787.361	1.57	1.57	
L137	J070	J071	2899.345	1.57	1.57	
L142	J071	J072	2112.903	1.57	1.57	
L146	J072	J073	1387.024	1.57	1.57	
L148	J073	J074	689.619	1.57	1.57	
L149	J074	D010	689.619	1.57	0.59	0.000
L147	J073	D009	697.406	1.57	0.59	0.000
L144	J072	D008	725.879	1.57	0.59	0.000
L139	J071	D007	786.442	1.57	0.59	0.000
L136	J070	D006	888.016	1.57	0.59	0.000
L133	J069	D004	928.387	1.57	0.59	0.000
L129	J068	D003	1142.541	1.58	0.59	0.000
L123	J067	D002	1409.677	1.58	0.59	0.000
MAX PRESSURE IMBALANCE =					0.0020 BAR AT NODE J038	
END OF NETWORK PROCESSING --				NO ERRORS		
				--	2 WARNINGS	
*** BASE CASE SOLVED ***						
*** NETWORK SIMULATION SOLVED						
CALCULATION STARTED 21:59:58 03/13/12						
CALCULATION FINISHED 22:00:01 03/13/12						
CALCULATION RUN TIME 0 HR 0 MIN 2 SEC						
NETWORK SIMULATION SOLVED						



## ANEXOS

### 7.4. Glosario

*Aproximación de temperatura:* Es la diferencia entre la temperatura del agua suministro y la temperatura del bulbo húmedo.

*Capacidad de enfriamiento:* Cantidad o flujo de agua de recirculación que la torre puede manejar a las condiciones de diseño.

*Carga estática:* Diferencia entre el nivel donde se encuentra el líquido y el nivel más alto al cual llega éste. Esta carga solamente toma la medida con respecto al eje de la bomba, no toma los recorridos horizontales.

*Carga dinámica:* Carga 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.

*Rango de temperatura:* Es la diferencia entre la temperatura suministro y de retorno.

*Potencia de accionamiento:* Cantidad de energía eléctrica que consume el motor de la bomba y la transfiere a través de la flecha al impulsor de la misma.

*Potencia en la flecha:* Energía por unidad de tiempo que se transfiere del motor a la flecha de la bomba.

*Potencia hidráulica:* 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 las plantas.





## ANEXOS

*Red hidráulica:* Conjunto de tuberías, equipo y accesorios que integran un sistema de suministro y conducción de un fluido.

*Temperatura de agua caliente:* Temperatura del agua de recirculación de la torre que proviene de las plantas y llega a la tina de agua caliente de ésta, también se le conoce como temperatura de retorno.

*Temperatura de agua fría:* Temperatura del agua de recirculación de la torre que sale del bacín de agua fría de ésta, también se le conoce como temperatura de suministro.

*Temperatura del bulbo húmedo:* Temperatura de bulbo húmedo de una mezcla aire-agua, proporciona una medida de la humedad de la mezcla.