



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROYECTO DE AHORRO DE ENERGÍA EN EL SISTEMA DE BOMBEO DE
AGUA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.**

TESINA:
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
ESPECIALISTA EN AHORRO Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

PRESENTA:
ING. FABIAN ANDRÉS SILES

ASESOR: Fís. Judith Catalina Navarro Gómez

México D.F., 20 de Agosto de 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.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

AGRADECIMIENTOS:

AGRADEZCO A DIOS POR DARMER LA OPORTUNIDAD DE VIVIR Y CONTINUAR CON MI FORMACIÓN ACADÉMICA PARA CONTRIBUIR A TENER UNA MEJOR SOCIEDAD.

A MIS PADRES Y MI HERMANA AGRADEZCO EL APOYO, MOTIVACIÓN, COMPRENSIÓN Y CONFIANZA QUE ME HAN DEPOSITADO EN LAS DIVERSAS ETAPAS DE LA VIDA.

A MI TÍA MAGDA GRACIAS POR SU INCONDICIONALIDAD, MOTIVACIÓN, CARIÑO, APOYO Y ENSEÑANZAS QUE ME HA BRINDADO.

A IRAIS POR SU AMISTAD, PACIENCIA, APOYO Y COMPRENSIÓN QUE ME HA DEMOSTRADO.

A LOS PROFESORES DE LA ESPECIALIDAD QUE SE ESFORZARON POR TRANSMITIR DE LA MEJOR MANERA SUS CONOCIMIENTOS.

OFREZCO UN ESPECIAL AGRADECIMIENTO A LA MAESTRA JUDITH NAVARRO POR HABERME AYUDADO EN TODO MOMENTO PARA EL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DENTRO DE LA ESPECIALIDAD.

POR ÚLTIMO DEDICO ESTE TRABAJO A TODAS LAS PERSONAS QUE CONTRIBUYEN CADA DÍA A HACER DE MÉXICO UN MEJOR PAÍS.



ÍNDICE

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	6
ANTECEDENTES	7
JUSTIFICACIÓN	7
OBJETIVO.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ACTUAL	9
1.1. Definiciones.....	9
1.2. Descripción general del sistema de torre de enfriamiento.....	10
Fig. 1.2.1. Esquema de los elementos principales de la torre de enfriamiento.	11
1.3. Descripción de los actuales usuarios de agua de torre.....	12
Tabla 1.3.1. Tabla de flujos de usuarios de agua de torre por línea.	13
1.4. Descripción general del sistema de bombeo instalado.	14
Fig. 1.4.1. Esquema general del sistema de bombeo.	14
1.5. Descripción general del sistema de tuberías de distribución de agua de torre instalado.....	15
Tabla 1.5.1. Tabla de instalación mecánica de Línea 1.....	16
Tabla 1.5.2. Tabla de instalación mecánica de Línea 2.....	17
Tabla 1.5.3. Tabla de instalación mecánica de Línea 3.....	18
Tabla 1.5.4. Tabla de instalación mecánica del área de Servicios.	19
1.6. Sistema de control de distribución de agua de torre.	20
CAPÍTULO II. PROPUESTA DE AHORRO ENERGÉTICO	22
2.1. Diagnóstico Energético del sistema de bombeo de agua de torre.	22
Fig. 2.1.1. Gráfico de flujo de agua por línea de diseño (m^3/h).....	22
Fig. 2.1.2. Gráfico de flujo de agua por línea medido (m^3/h).....	23
Fig. 2.1.3. Gráfico de flujo de agua por usuario de Línea 1 de diseño (m^3/h).....	24
Fig. 2.1.4. Gráfico de flujo de agua por usuario de Línea 1 medido (m^3/h).....	24



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Fig. 2.1.5. Gráfico de flujo de agua por usuario de Línea 2 de diseño (m^3/h).....	25
Fig. 2.1.6. Gráfico de flujo de agua por usuario de Línea 2 medido (m^3/h).....	26
Tabla 2.1.1. Tabla de bombas instaladas (Total kWh anuales)	28
2.2. Identificación de oportunidades de ahorro energético.....	29
2.3. Propuesta de conexión en serie de usuarios de agua de torre.	31
Fig. 2.3.1. Diagrama de bloques de la conexión de usuarios de agua de torre.	32
Fig. 2.3.2. Diagrama de conexión actual en paralelo de condensador evaporador y condensador “finisher “ de Línea 1.	33
Fig. 2.3.3. Diagrama de conexión propuesta en serie de condensador evaporador y condensador finisher de Línea 1.....	34
Tabla 2.3.1. Tabla de cálculos propuesta en serie equipos Línea 1.	35
Tabla 2.3.2. Tabla de cálculos propuesta en serie equipos Línea 2.	38
2.4. Propuesta de modificación del sistema de bombeo.	39
Tabla 2.4.2. Tabla de presión de vapor del agua.....	42
Tabla 2.4.3. Tabla de valores aproximados de K para accesorios de tubería.	44
Tabla 2.4.4. Tabla de cálculos ΔH s en accesorios y tuberías de Línea 1.....	47
Tabla 2.4.5. Tabla de cálculos ΔH s en accesorios y tuberías de Línea 2.....	48
Tabla 2.4.6. Tabla de cálculos ΔH s en accesorios y tuberías de Línea 3.....	49
Tabla 2.4.7. Tabla de cálculos ΔH s en accesorios y tuberías de Servicios.	50
Tabla 2.4.8. Tabla de cálculos de NPSH.	51
Tabla 2.4.9. Tabla de NPSH requerido (en m) y flujos por línea de diseño (en gpm).....	52
Tabla 2.4.10. Tabla de bombas seleccionadas.....	57
2.5. Propuesta de modificación del sistema de tuberías.	57
2.6. Propuesta del sistema eléctrico y control de suministro de agua de torre.....	61
2.7. Cuantificación de los potenciales de ahorro.....	67
Tabla 2.7.1. Tabla de cálculo del consumo de energía anual propuesto.	67
Tabla 2.7.2. Tabla de cálculo de consumo de agua anual actual y propuesto.....	68
Tabla 2.7.3. Tabla de cálculo de ahorros por consumo de energía.	69



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 2.7.4. Tabla de cálculo de ahorros por consumo de agua.	69
Tabla 2.7.5. Tabla de resumen de ahorros propuestos	70
CAPÍTULO III. EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA	71
3.1. Presupuesto de la ejecución del proyecto	71
Tabla 3.1.1. Tabla de presupuesto de componentes principales estimados.....	71
3.2. Estudio de rentabilidad de proyecto	75
Tabla 3.2.1. Tabla de cálculo de rentabilidad del proyecto.	79
CONCLUSIONES.....	81
BIBLIOGRAFÍA	82
ANEXOS	84
Anexo A. Diagrama de Moody	84



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en México existen políticas energéticas orientadas a promover el óptimo aprovechamiento de la energía, mediante la adopción de medidas y de mejores prácticas para el ahorro y uso eficiente de la energía en los diferentes sectores de la economía, con lo cual se pretende un cambio hacia tecnología más eficiente y una modificación de hábitos en los usuarios finales de la energía, lo anterior con la participación de los sectores público, social y privado.

Como parte de los instrumentos de política energética hacia el mejor aprovechamiento de la energía se tienen:

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

La Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía y su Reglamento.

La Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Dada la importancia de la política energética en México y los beneficios que aportan los proyectos de ahorro y uso eficiente de la energía, el sector privado se ha interesado en invertir en identificar oportunidades, el diseño y puesta en marcha de este tipo de proyectos. Actualmente hay empresas de dicho sector interesadas en reducir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, derivadas de sus procesos productivos y por lo cual establecen metas de ahorro y uso eficiente de la energía y que logran a través de la puesta en marcha de proyectos en éstos temas. En el mismo tenor, es posible obtener beneficios económicos como consecuencia directa del ahorro energético.

Por lo anterior, resulta viable implementar proyectos de ahorro y uso eficiente de la energía, siendo el sector industrial un importante nicho de oportunidad.

En el presente trabajo se muestra un proyecto de ahorro de energía para una industria alimenticia, la cual cuenta con un sistema de bombeo y distribución de agua que es enfriada mediante una torre de enfriamiento.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

ANTECEDENTES

En una industria alimenticia que cuenta con un sistema de torre de enfriamiento de agua y la cual es distribuida a diversos equipos de proceso para su operación, se llevó a cabo una campaña de mediciones a principios del año 2012 y posteriormente se hizo un diagnóstico energético cuyo alcance fue evaluar si dicha torre se encuentra o no en los puntos adecuados de operación, mediante lo cual se concluyó lo siguiente:

1. Que el desempeño actual de la torre de enfriamiento es muy cercano a los puntos de diseño original y por tanto es aceptable su desempeño.
2. El flujo de agua que se maneja en la torre de enfriamiento es mayor al que requieren los usuarios.
3. No se cuenta con un sistema de control dedicado a distribuir el agua de torre y que permita variar la velocidad de los motores de los ventiladores.
4. Se observaron fenómenos de cavitación en tuberías, por lo que es necesario llevar a cabo un diagnóstico energético en el sistema de bombeo y distribución de agua de torre ya que se presentan problemas en su operación, sin embargo, el alcance del diagnóstico energético ya realizado en 2012 no consideró evaluar el sistema de bombeo y distribución.

Por políticas internas, la industria tiene como uno de sus objetivos el ahorro de agua y energía para este año 2013, y por lo cual implementarán proyectos que le permitan disminuir sus costos de operación.

JUSTIFICACIÓN

Por los antecedentes mencionados, resulta evidente la necesidad de evaluar el sistema de bombeo de agua de torre y posteriormente identificar oportunidades de ahorro de energía. En el mismo sentido, se observa adicionalmente la posibilidad de ahorro de agua, con lo cual se asocian mayores ventajas medioambientales.

La propuesta de un proyecto de ahorro en ésta industria se alinea a las políticas internas establecidas por la gerencia para el año 2013 ya que si se ejecuta adecuadamente, sería posible tener beneficios económicos. A corto plazo, se tendría la posibilidad de que la industria invierta en infraestructura capaz de mejorar los procesos



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

productivos ya que con un proyecto de éste tipo se podrían evitar sobrecostos por mantenimiento y paros de producción no programados derivados de una ineficiente operación en el sistema de distribución de agua de torre.

Dado lo anterior, se justifica llevar a cabo un proyecto de ahorro energético en la industria ya que sería posible obtener beneficios ambientales, mejoras técnicas en los procesos, disminución en costos de mantenimiento, ahorros de agua y energía y, como consecuencia ahorros económicos.

OBJETIVO

Hacer una propuesta para garantizar un servicio de suministro de agua de torre de enfriamiento energéticamente eficiente, para todos los procesos de una industria alimenticia; modificando la configuración del sistema actual y proponiendo una estrategia de control que permita una reducción en el consumo de energía eléctrica y agua.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Verificar cálculos en el sistema de bombeo hasta lograr satisfacer necesidades del cabezal de succión neta positiva (NPSH por sus siglas en inglés Net Positive Suction Head) en el sistema de bombeo.
2. Identificar oportunidades de ahorro de energía y agua que permitan obtener beneficios económicos cuantificables.
3. Hacer una propuesta para independizar los circuitos de distribución de agua de torre, tanto en la succión como en la descarga.
4. Proponer un sistema de control de agua de torre que permita ordenar el suministro a los diversos usuarios.
5. Plantear la instalación de bombas de respaldo para facilitar las labores de mantenimiento y evitar paros no programados.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ACTUAL

1.1. Definiciones

Ahorro de energía: Es aquella acción que tienda a la disminución en el consumo de energía, por cualquier vía, sin menoscabo de la calidad del servicio.

Torre de enfriamiento: Equipo que se usa para enfriar agua en grandes volúmenes. El agua se introduce por el domo de la torre por medio de vertederos o por boquillas para distribuir el agua en la mayor superficie posible. 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 del aire a la entrada de la torre.

Usuarios de agua de torre: Se refiere a todos los equipos instalados en las líneas de producción y que requieren del suministro de agua de torre para su operación.

Sistema de bombeo: Es el conjunto de dispositivos electromecánicos interconectados, cuya función es suministrar agua de torre a los equipos instalados dentro del proceso de la industria, desde un cabezal de succión de la torre de enfriamiento y cuya trayectoria finaliza en una tubería de descarga de dicha torre.

NPSH: Es la diferencia que existe entre la presión de entrada y el nivel inferior de presión dentro de la bomba.

Flujo volumétrico: Se define como la velocidad a la que el volumen de un líquido pasa a través de una superficie dada.

Flujo másico: Se define como la velocidad a la que la masa de una sustancia pasa a través de una superficie dada.

Calor: Es la forma de energía que se transfiere entre diferentes cuerpos que se encuentran a diferentes temperaturas. Su unidad de medida en el Sistema Internacional de Unidades es el Joule.

Calor específico: Es la energía necesaria para elevar 1°C la temperatura de un gramo de materia. Es un parámetro que depende del material y relaciona el calor que se proporciona a una masa determinada de una sustancia con el incremento de temperatura.

Diferencial de Temperatura: Es la magnitud física que refleja la cantidad de calor de un



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

cuerpo.

Transmisor: Es un instrumento que capta la variable en proceso y la transmite a distancia a un instrumento indicador o controlador.

Sensor: Es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas llamadas variables de instrumentación y convertirlas en variables eléctricas.

Intercambiador de calor: Es un dispositivo diseñado para transferir calor de un fluido a otro. En la industria existen instalados varios equipos cuyos fluidos de transferencia son productos de café y agua proveniente de la torre.

Evaporador: Es un intercambiador de calor en el cual se produce la transferencia de energía térmica desde un medio a ser enfriado hacia el fluido refrigerante que circula en el interior del dispositivo. Su nombre proviene del cambio de estado sufrido por el refrigerante al recibir ésta energía, luego de una brusca expansión que reduce su temperatura. Durante el proceso de evaporación, el fluido pasa del estado líquido al gaseoso.

Condensador: Es un intercambiador de calor entre fluidos, de modo que mientras uno de ellos se enfría, pasando de estado gaseoso a estado líquido, el otro se calienta. Se fabrican en tamaños y disposiciones diversas para ser empleados en numerosos procesos térmicos.

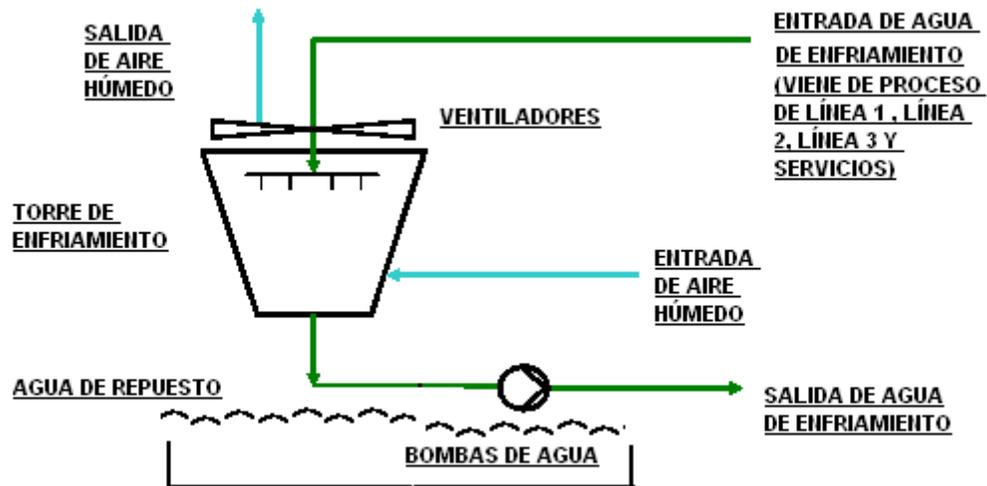
1.2. Descripción general del sistema de torre de enfriamiento.

Existe un sistema de bombeo instalado en la industria para distribuir agua proveniente de una torre de enfriamiento a diversos equipos del proceso de fabricación de café soluble tales como intercambiadores de calor evaporadores y condensadores. Se tiene un cabezal principal del cual se derivan tres líneas de tubería que suministran agua de torre hacia tres líneas de producción, más una línea que suministra agua al área de servicios. Actualmente se tienen instaladas 15 bombas, dos de estas son de 150 H.P. y las otras 13 son de 75 H.P. Se mide la temperatura de entrada y la temperatura de salida de agua de torre y los flujos de agua requeridos en los equipos que actualmente están instalados en producción.

A continuación se muestran los elementos principales de la torre de enfriamiento (Figura 1.2.1).

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Fig. 1.2.1. Esquema de los elementos principales de la torre de enfriamiento.



Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia.

En la industria se tienen medidos los parámetros de temperatura, presión, flujos del agua, flujos máxicos del aire y humedad específica. Se considera como un volumen de control que opera en estado permanente. En la torre de enfriamiento de acuerdo a la figura anterior se observa que se tiene una operación en contraflujo, el flujo de agua descende, mientras que el flujo de aire asciende. Las condiciones del aire y del agua solo cambian con su posición vertical en la torre. En el diagnóstico energético, que se llevó a cabo en el 2012, se consideró como un volumen de control que opera en estado permanente y se contemplaron las siguientes consideraciones iniciales:

- La torre de enfriamiento opera 364 días del año durante las 24 horas.
- La transferencia de calor y masa con el medio, la transferencia de calor entre el aire del ventilador de la torre y el agua son despreciables.
- El calor específico del agua y el aire, los coeficientes de transferencia de calor y masa son constantes a través de la torre.
- Las pérdidas de agua por arrastre del aire son despreciables.
- Las temperaturas del agua y el aire son uniformes en cualquier sección de la torre.

La torre consta de seis celdas con seis ventiladores accionados por seis motores de 75 H.P. El gasto de energía es producido por los motores instalados y no debe perderse de vista que los ventiladores se comportan como cargas de torque variable, por lo que



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

la potencia consumida depende de la velocidad del ventilador.

Como ya se mencionó el sistema de bombeo consta de 15 bombas, dos de 150 H.P. y 13 de 75 H.P.; esto lleva a hacer necesario un análisis detallado en dicho sistema, ya que probablemente o son demasiados motores o estén mal calculados y por consiguiente existe un consumo excesivo de energía que también se refleja en el costo de ésta.

Se tienen líneas de tuberías que alimentan agua de torre en una configuración desordenada hacia las tres líneas de producción y el área de servicios; por lo que resulta interesante, hacer una propuesta para ordenar dicho sistema.

Se verificó que se cuenta con un cuarto de control en donde está un Controlador Lógico Programable (PLC por sus siglas en inglés) que se instaló para controlar el flujo de agua de la torre, sin embargo, actualmente se encuentra fuera de operación y es conveniente hacer una propuesta para aprovechar el equipo con que ya cuenta la industria.

1.3. Descripción de los actuales usuarios de agua de torre.

Como se mencionó en párrafos anteriores la industria cuenta con tres líneas de producción más una de servicios. Los equipos instalados con sus respectivos flujos de agua de torre son los siguientes:



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 1.3.1. Tabla de flujos de usuarios de agua de torre por línea.

USUARIOS DE AGUA DE TORRE			
Línea de producción	Nombre de Usuario	Flujo Agua Medido	Flujo Agua Diseño
		(m ³ /h)	(m ³ /h)
Línea 1	Condensador P2C	8	11
	Condensador P3C	8	11
	Enfriador final Evaporador	58	58
	Condensador Finisher	273	237
	Condensador Evaporador	204	204
	Intercambiador wipped	10	10
	Enfriador final Extracción	226	30
	TOTAL: 7 USUARIOS	787	561
Línea 2	Intercambiador IPTA	418	354
	Condensador P2C	8	8
	Condensador P3C	8	8
	Condensador Finisher	173	130
	Condensador Evaporador	204	238
	Enfriador Final	130	36
	Enfriador Interefectos Actini	10	10
	Calentador Col. Stripping	587	58
	TOTAL: 8 USUARIOS	1538	842
Servicios	Condensador 1 Compresor M1	154	190
	Enfriador de Aceite C1	10	10
	Condensador 2 Compresor M2	0	190
	Enfriador de Aceite C2	10	10
	Condensador 3 Compresor M3	74	200
	TOTAL: 5 USUARIOS	248	600
Línea 3	Condensador Luwa	30	8
	Condensador Evaporativo 1	30	212
	Condensador Evaporativo 2	20	212
	Condensador Evaporativo NH3	30	30
	Condensador Columna	3	3
	Enfriador de Solvente	113	25
	TOTAL: 6 USUARIOS	226	490
TOTAL DEL SISTEMA		2799	2493

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

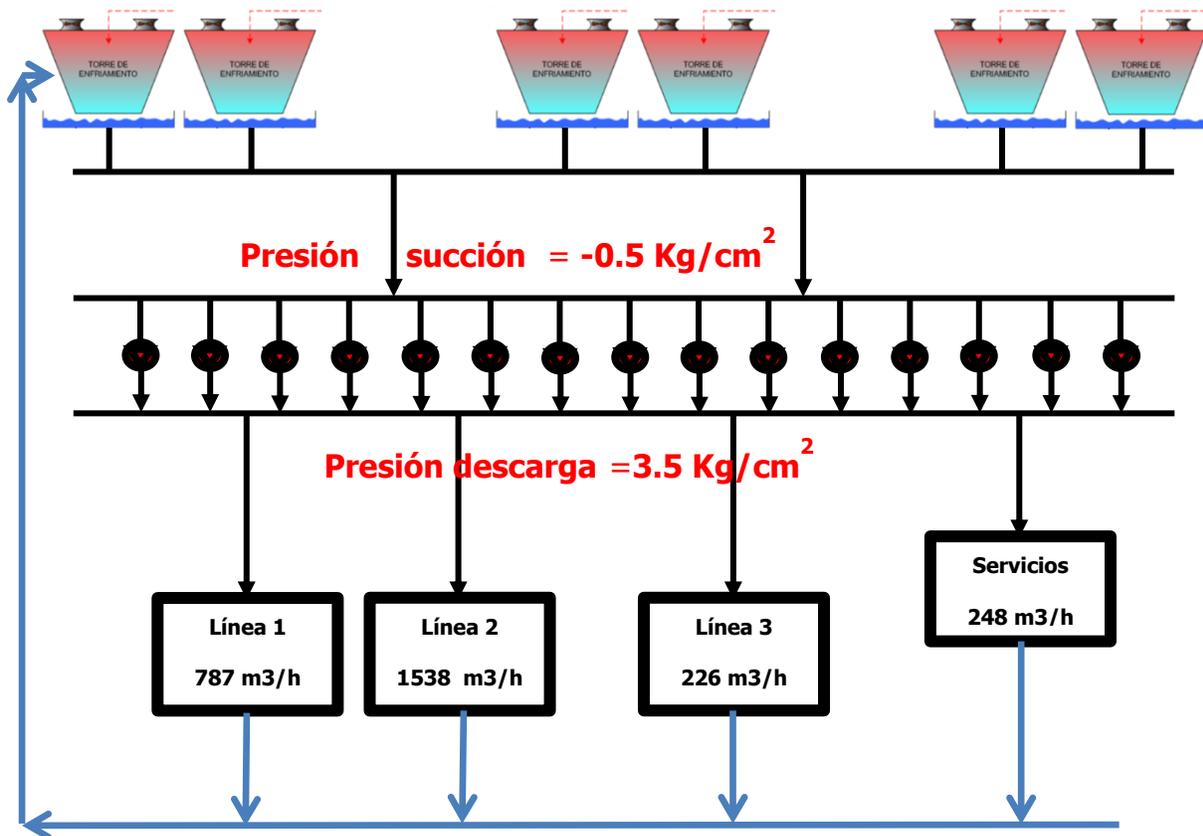
Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia

Notablemente los flujos de diseño son diferentes a los de operación.

1.4. Descripción general del sistema de bombeo instalado.

Como se ha mencionado, existe un sistema de 15 bombas: 13 de 75 H.P. y 2 de 150 H.P. el cual succiona agua desde un cabezal común y desordenadamente distribuye agua a las tres líneas de producción y una de servicios; después de funcionar en proceso, el agua de torre retorna también por un cabezal común, tal y como se muestra en el siguiente esquema:

Fig. 1.4.1. Esquema general del sistema de bombeo.



Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia

Es importante mencionar que el sistema de bombeo fue creciendo desordenadamente conforme aumentó la producción, por lo cual la selección e instalación de bombas no se hizo bajo criterios de eficiencia energética y las últimas bombas que se instalaron



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

fue en el 2004, con lo cual se sabe que éste sistema tiene por lo menos ocho años operando.

1.5. Descripción general del sistema de tuberías de distribución de agua de torre instalado.

Se llevó a cabo la cuantificación de tuberías y accesorios instalados en acero al carbón tanto en el cabezal de succión como en el cabezal de descarga y a su vez se cuantificó la instalación mecánica de las líneas de producción.

En las tablas 1.5.1, 1.5.2, 1.5.3 y 1.5.4, se muestra la información de instalación mecánica por línea de producción.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 1.5.1. Tabla de instalación mecánica de Línea 1.

INSTALACIÓN MECÁNICA LÍNEA 1	
Accesorio	CANT
Tubo de 20"	22
Tubo de 16"	18
Tubo de 10"	42
Tubo de 8"	22
Codos de 20X90	32
Codos de 20X45	0
Codos de 16X90	1
Codos de 16X45	2
Codos de 10X90	10
Codos de 10X45	0
Codos de 8X90	0
Codos de 8X45	5
Tees de 20"	4
Tees de 16"	1
Tees de 10"	2
Tees de 8"	2
Válvula de mariposa de 16"	2
Válvula check 16"	1
Válvula modulante de 16"	7
Entrada 20"	0
Entrada 16"	7
Entrada 10"	1
Entrada 8"	1
Salida 20"	1
Salida 16"	7
Salida 10"	1
Salida 8"	1

Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 1.5.2. Tabla de instalación mecánica de Línea 2.

INSTALACIÓN MECÁNICA LÍNEA 2	
Accesorio	CANT
Tubo de 20"	26
Tubo de 16"	21
Tubo de 10"	51
Tubo de 8"	36
Codos de 20X90	27
Codos de 20X45	0
Codos de 16X90	1
Codos de 16X45	3
Codos de 10X90	8
Codos de 10X45	0
Codos de 8X90	2
Codos de 8X45	3
Tees de 20"	5
Tees de 16"	3
Tees de 10"	4
Tees de 8"	1
Válvula de mariposa de 16"	3
Válvula check 16"	2
Válvula modulante de 16"	8
Entrada 20"	0
Entrada 16"	8
Entrada 10"	1
Entrada 8"	1
Salida 20"	1
Salida 16"	8
Salida 10"	1
Salida 8"	1

Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 1.5.3. Tabla de instalación mecánica de Línea 3

INSTALACIÓN MECÁNICA LÍNEA 3	
Accesorio	CANT
Tubo de 20"	29
Tubo de 16"	15
Tubo de 10"	28
Tubo de 8"	30
Codos de 20X90	11
Codos de 20X45	1
Codos de 16X90	1
Codos de 16X45	2
Codos de 10X90	5
Codos de 10X45	6
Codos de 8X90	4
Codos de 8X45	3
Tees de 20"	2
Tees de 16"	2
Tees de 10"	3
Tees de 8"	2
Válvula de mariposa de 16"	1
Válvula modulante de 16"	6
Válvula check 16"	1
Entrada 20"	0
Entrada 16"	6
Entrada 10"	1
Entrada 8"	1
Salida 20"	1
Salida 16"	1
Salida 10"	1
Salida 8"	1

Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 1.5.4. Tabla de instalación mecánica del área de Servicios.

INSTALACIÓN MECÁNICA SERVICIOS	
Accesorio	CANT
Tubo de 20"	31
Tubo de 16"	26
Tubo de 10"	32
Tubo de 8"	29
Codos de 20X90	6
Codos de 20X45	0
Codos de 16X90	2
Codos de 16X45	2
Codos de 10X90	4
Codos de 10X45	6
Codos de 8X90	4
Codos de 8X45	4
Tees de 20"	2
Tees de 16"	2
Tees de 10"	2
Tees de 8"	1
Válvula de mariposa de 16"	1
Válvula check 16"	1
Válvula modulante de 16"	5
Entrada 20"	1
Entrada 16"	5
Entrada 10"	1
Entrada 8"	1
Salida 20"	1
Salida 16"	5
Salida 10"	1
Salida 8"	1

Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

1.6. Sistema de control de distribución de agua de torre.

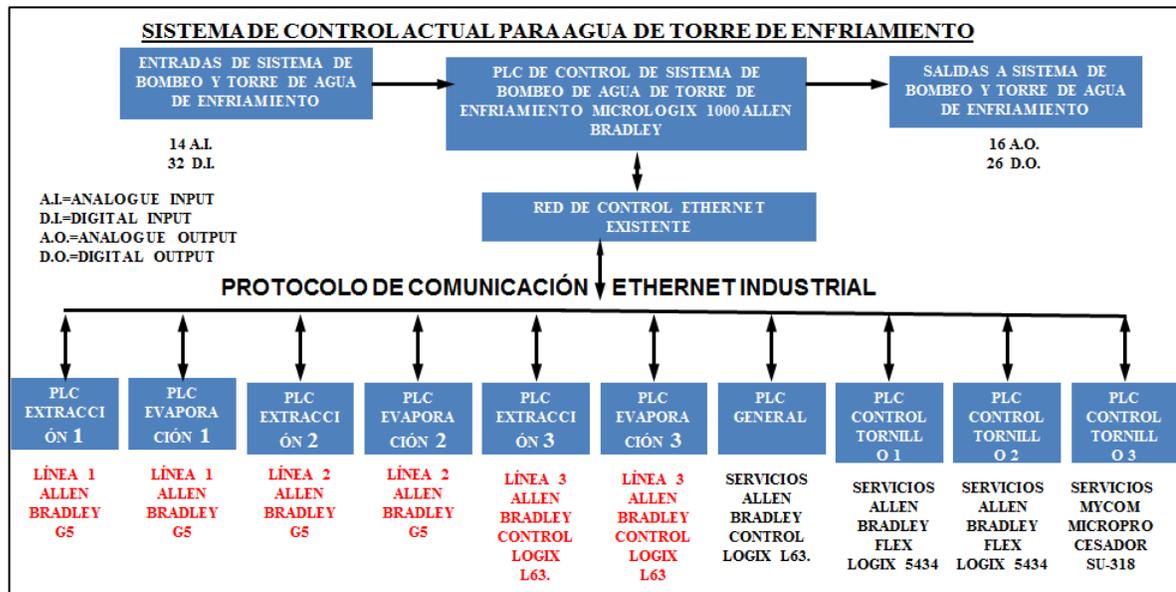
La industria alimenticia que se está analizando, tiene construido un cuarto de control, dentro del cual se encuentra instalado un PLC, Marca Allen Bradley, que fue diseñado para controlar la distribución del agua de torre. A su vez, existen instalados 15 Centros de Control de Motores (CCM's) de los cuales, dos son de 150 H.P. y trece más son de 75 H.P. con sus respectivas tarjetas de control, fuentes de alimentación, protecciones y cableados tanto de control como de fuerza.

Es importante mencionar que también se tienen instalados 10 variadores de velocidad cuatro de 150 H.P. y seis de 75 H.P. ya cableados en control y fuerza, alojados en sus respectivos gabinetes. Asimismo, se tienen otros 6 variadores de velocidad de la marca Allen Bradley de 75 H.P. que tienen como objetivo controlar a los ventiladores de la torre de enfriamiento.

Los equipos mencionados en los tres párrafos anteriores, se encuentran simplemente instalados y cableados, pero desafortunadamente el sistema de control no está funcionando ya que es un proyecto que no se finalizó porque después de la compra, suministro e instalación de los mismos en años anteriores la industria decidió no continuar con la ejecución de dicho proyecto por falta de un diagnóstico energético que asegurara el adecuado funcionamiento del sistema. El hecho de poner en marcha un sistema de control sin un previo diagnóstico energético representaba poner en riesgo el funcionamiento eficiente de la industria y debido a ese importante factor, la gerencia tomó la decisión de no poner en marcha el sistema de control (Figura 1.6.1).

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Fig. 1.6.1. Esquema general del sistema de control actual.



Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia.

El PLC Micro Logix1000 de la Marca Allen Bradley instalado para el agua de torre cuenta con lo siguiente:

1. 1 Fuente de alimentación 1769-PA4.
2. 1 Procesador CPU 1769-L32E.
3. 1 Tarjeta de comunicación para protocolo Device Net.
4. 1 Tarjeta de comunicación para protocolo Ethernet.
5. 3 Tarjetas de 8 entradas analógicas cada una.
6. 4 Tarjetas de 8 entradas digitales cada una.
7. 3 Tarjetas de 8 salidas analógicas cada una.
8. 4 Tarjetas de 8 salidas digitales cada una.
9. 1 Memoria de respaldo compact flash card P/N 1748-CF 64.

El PLC se encuentra cableado tanto en fuerza como en control y ya se encuentra conectado a la red de control Ethernet.

La función del PLC que se diseñó es regular el flujo de suministro de agua de torre mediante el sistema de bombeo y ventiladores de la torre. Por otro lado, cada uno de los PLC instalados en proceso ya se encuentran operando y se controlan con su propia Interface Hombre-Máquina (HMI por sus siglas en inglés Human Machine Interface).

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Actualmente se cuenta con un sistema de control distribuido que controla a todos los usuarios de agua de torre. En total se tienen en cada línea de producción (Línea 1, Línea 2 y Línea 3) dos PLC's : un PLC en el proceso de evaporación y un PLC en el proceso de extracción respectivamente. En el área de Servicios se tienen cuatro PLC's: un PLC General, un PLC para Control de tornillo1, un PLC para Control de tornillo 2 y un PLC para Control de Tornillo 3.

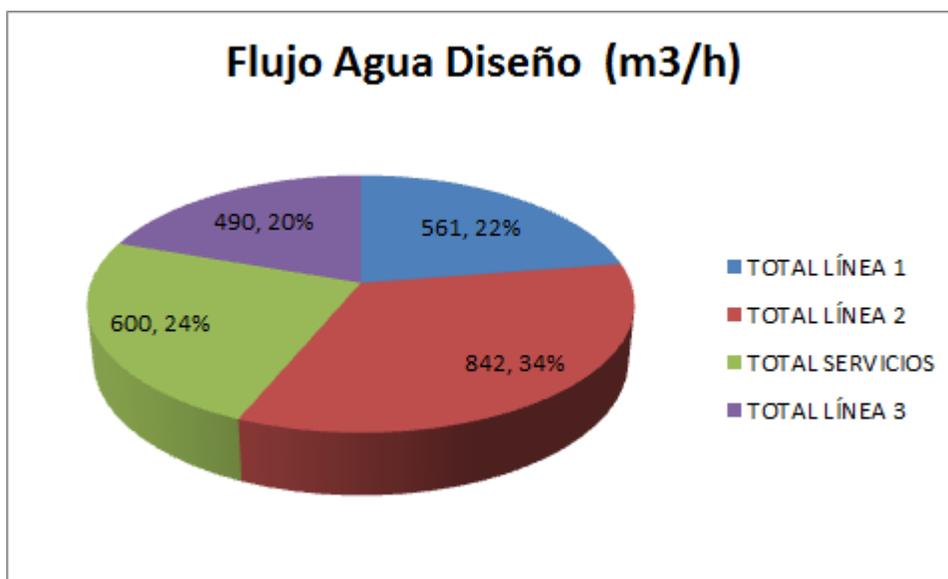
CAPÍTULO II. PROPUESTA DE AHORRO ENERGÉTICO

2.1. Diagnóstico Energético del sistema de bombeo de agua de torre.

Primeramente se procedió a identificar los usuarios de agua de torre que más consumo de agua tienen, ya que la cantidad de agua está directamente relacionada con la cantidad de energía.

En la Figura 2.1.1. se presenta el total de flujo de agua de diseño por cada línea de producción:

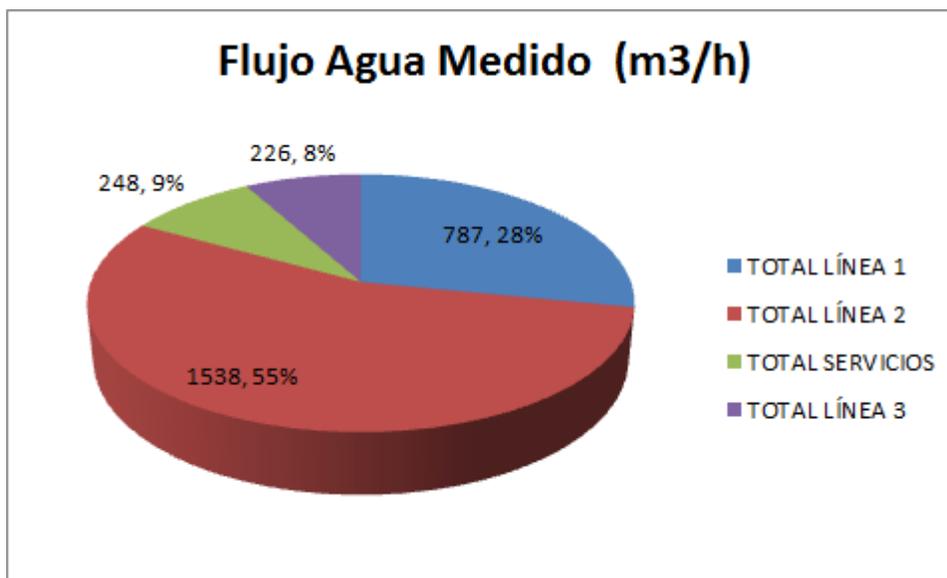
Fig. 2.1.1. Gráfico de flujo de agua por línea de diseño (m³/h).



Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia y la tabla 1.3.1.

La Figura 2.1.2 presenta el flujo de agua medido por cada línea de producción:

Fig. 2.1.2. Gráfico de flujo de agua por línea medido (m^3/h).



Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia y la tabla 1.3.1.

De la figura 2.1.2. se observa que las líneas 1 y 2 de producción representan un 83% del consumo total de agua y por tanto se observa en dichas líneas el mayor consumo energético.

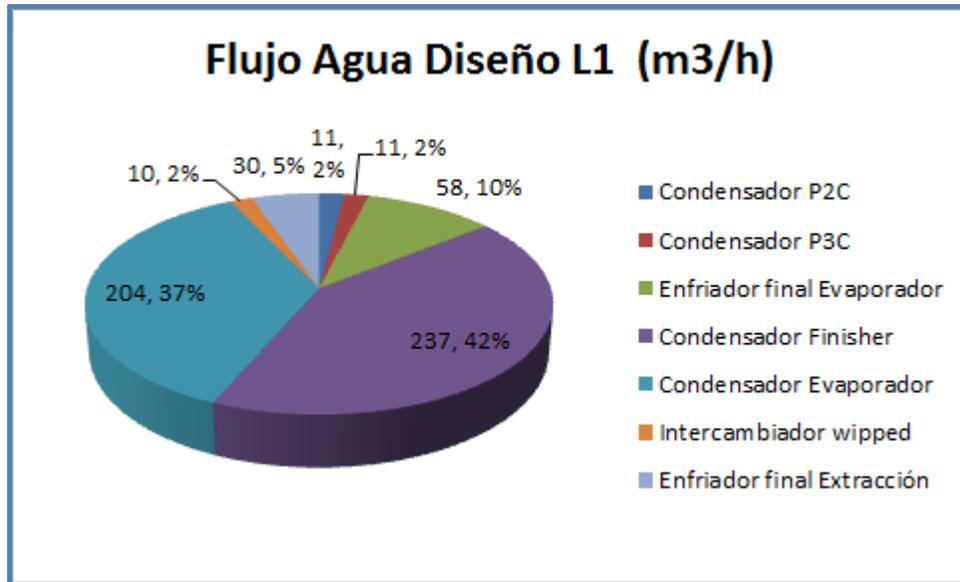
Al comparar el gráfico del flujo de agua medido vs el gráfico de flujo de agua de diseño se observa que la línea 1 y línea 2 están consumiendo una mayor cantidad de agua respecto a los valores de diseño con lo que se hace necesario un análisis más detallado en ambas líneas y resulta aún más interesante, ya que claramente se observa que las líneas que más consumen agua son éstas.

En otro sentido, la línea 3 y servicios representan un flujo medido inferior respecto a los flujos de diseño y esto se justifica ya que éstos equipos no operan al 100% de acuerdo con la información recopilada con los operadores. En total ambos flujos representan el 17% de consumo actual total de la torre.

A continuación se muestran los gráficos de flujos de diseño y flujos medidos para observar los consumos de cada usuario de línea 1 y línea 2.

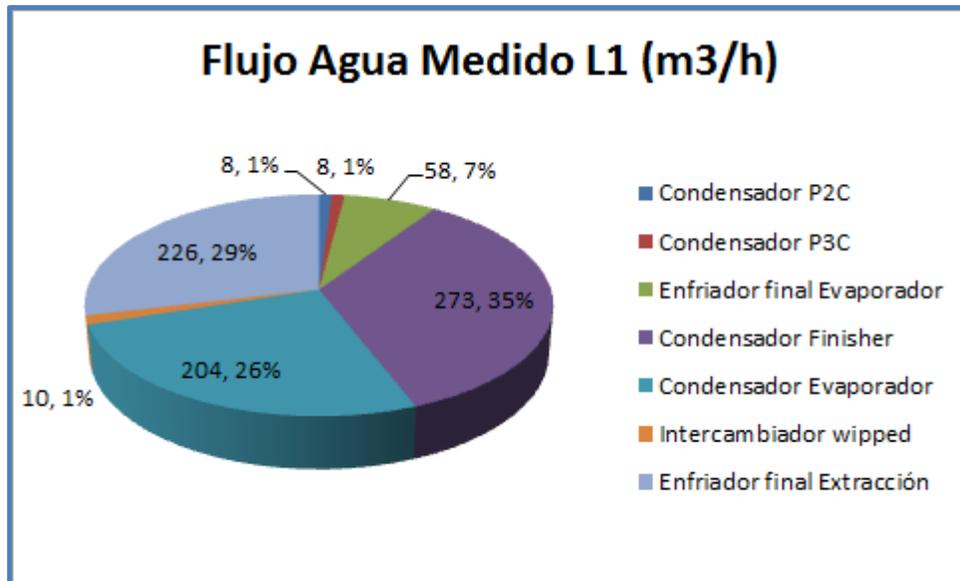
Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Fig. 2.1.3. Gráfico de flujo de agua por usuario de Línea 1 de diseño (m³/h).



Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia y la tabla 1.3.1.

Fig. 2.1.4. Gráfico de flujo de agua por usuario de Línea 1 medido (m³/h).



Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia y la tabla 1.3.1.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

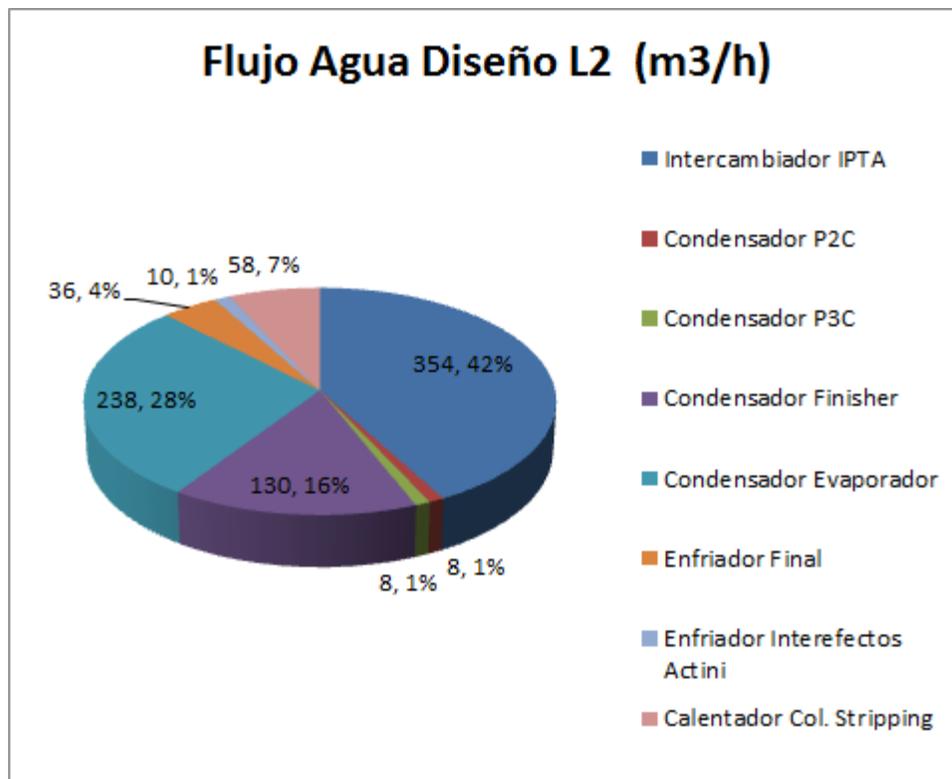
De acuerdo con la Figura 2.1.3. y 2.1.4., se observa que en línea 1 sucede lo siguiente:

El condensador evaporador y el condensador “finisher” representan el 61% del consumo actual de agua.

El enfriador final de extracción tiene un flujo medido de 226 m³/h mientras que el flujo de diseño es de 30 m³/h, lo cual representa un excesivo suministro de agua. Se observan recirculaciones ociosas de agua que han generado problemas durante la operación de éste equipo ya que no se tienen válvulas modulantes.

En seguida se muestran las figuras 2.1.5. y 2.1.6. reflejan los flujos de diseño y los flujos medidos de línea 2.

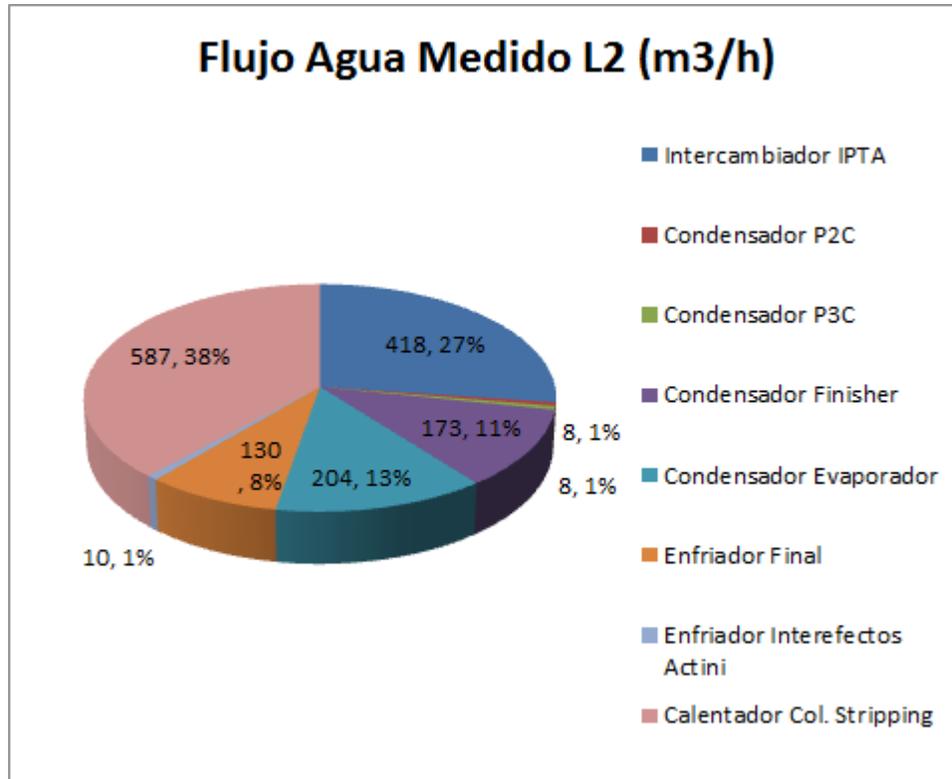
Fig. 2.1.5. Gráfico de flujo de agua por usuario de Línea 2 de diseño (m³/h).



Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia y la tabla 1.3.1.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Fig. 2.1.6. Gráfico de flujo de agua por usuario de Línea 2 medido (m^3/h).



Fuente: Elaboración propia con información de la industria alimenticia y la tabla 1.3.1.

De acuerdo con las figuras 2.1.5. y 2.1.6., se observa que en línea 2 sucede lo siguiente:

El Intercambiador denominado “IPTA” con el condensador “Finisher” en conjunto representan el 38% y el condensador de la columna “stripping” representa el 38% del consumo actual de agua.

- El enfriador final tiene un flujo medido de $130 m^3/h$ mientras que el flujo de diseño es de $36 m^3/h$, el calentador de la columna stripping tiene un flujo de agua medido de $587 m^3/h$ mientras que el de diseño es de $58 m^3/h$, lo cual representa un excesivo suministro de agua. Se observan recirculaciones ociosas de agua que han generado problemas durante la operación de estos equipos ya que no se tienen válvulas modulantes.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

De acuerdo a lo observado en las líneas 1 y 2 se determinó lo siguiente:

- En base a los flujos de agua medidos y de diseño e información recopilada con los operadores se determinó que existe un desorden en la distribución de agua, por tal motivo algunos flujos actuales son inferiores a los de diseño.
- En los casos en que se tiene un flujo excesivo y que representan un porcentaje considerable del total de consumo por línea es importante proponer soluciones orientadas a reducir los consumos y analizar la posibilidad de interconectar algunos equipos en serie ya que todos se encuentran conectados en paralelo, con lo cual se tienen posibles recirculaciones innecesarias de agua.
- En los casos en que se observan flujos inferiores con respecto a los de diseño se verificó que no existen problemas de operación y se concluye que es debido a que son equipos que no se encuentran operando al 100%.

Posteriormente, se hizo un estudio de la instalación en el cuarto de bombas verificando que tanto el cableado como las propias bombas se encuentran en un estado físico muy deteriorado.

Se realizó además, un censo de todas las bombas instaladas para determinar el consumo de energía eléctrica en cada una de ellas.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

En la tabla 2.1.1. se muestra el censo de las bombas instaladas para distribuir el agua:

Tabla 2.1.1. Tabla de bombas instaladas (Total kWh anuales)

ID BOMBA	TIPO DE BOMBA	CAPACIDAD H.P.	TENSIÓN DE OPERACIÓN VOLTS	DÍAS DE OPERACIÓN AL AÑO	HORAS DE OPERACIÓN AL DÍA	HORAS DE DE OPERACIÓN AL AÑO	CONSUMO KWh ANUAL	AÑO EN QUE FUE INSTALADA
BOMBA 1	HORIZONTAL	150	440 V	364	20	7,280	814,632	2004
BOMBA 2	HORIZONTAL	150	440 V	364	20	7,280	814,632	2004
BOMBA 3	HORIZONTAL	75	440 V	364	20	7,280	407,316	2002
BOMBA 4	HORIZONTAL	75	440 V	364	18	6,552	366,584.4	2002
BOMBA 5	HORIZONTAL	75	440 V	364	18	6,552	366,584.4	2002
BOMBA 6	HORIZONTAL	75	440 V	364	18	6,552	366,584.4	2002
BOMBA 7	HORIZONTAL	75	440 V	364	18	6,552	366,584.4	2002
BOMBA 8	HORIZONTAL	75	440 V	364	18	6,552	366,584.4	2002
BOMBA 9	HORIZONTAL	75	440 V	364	18	6,552	366,584.4	1998
BOMBA 10	HORIZONTAL	75	440 V	364	18	6,552	366,584.4	1998
BOMBA 11	HORIZONTAL	75	440 V	364	18	6,552	366,584.4	1998
BOMBA 12	HORIZONTAL	75	440 V	364	16	5,824	325,852.8	1998
BOMBA 13	HORIZONTAL	75	440 V	364	16	5,824	325,852.8	1998
BOMBA 14	HORIZONTAL	75	440 V	364	16	5,824	325,852.8	1998
BOMBA 15	HORIZONTAL	75	440 V	364	16	5,824	325,852.8	1998
VENTILADOR 1	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005
VENTILADOR 2	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

VENTILADO R 3	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005
VENTILADO R 4	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005
VENTILADO R 5	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005
VENTILADO R 6	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005
TOTAL							9,205,341.6	

Fuente: Elaboración propia con información de la industria.

Del censo anterior se concluye lo siguiente:

- Se tiene estimado un consumo total de **9,205,341.6 kWh anuales**.
- 7 bombas de 75 H.P. tienen 15 años operando.
- 6 bombas de 75 H.P. tienen 11 años en operación.
- 2 bombas de 150 H.P. llevan operando 9 años.
- Es necesario hacer un cálculo para determinar la cantidad, capacidad y tipo de bombas que en realidad se requieren.
- Actualmente el sistema de bombeo tiene instalados manómetros analógicos en los cuales se observaron valores de presión negativos y variaciones de presión de succión por lo cual se concluyó que existen problemas de cavitación que se atribuyen al crecimiento desordenado en el sistema de bombeo.

2.2. Identificación de oportunidades de ahorro energético.

Es preciso considerar que el caudal de agua que circula por la torre, en general, viene fijado por especificaciones de diseño. El caudal real necesario para satisfacer la demanda de agua puede ser menor que el diseño, por lo cual se tiene una oportunidad de ahorro energético. A mayor caudal de agua a enfriar, es necesario proveer un mayor flujo de aire, con el consecuente gasto extra de energía. Siempre que sea posible se debe disminuir el flujo de agua que circula por la torre. El caudal de aire de la torre es el que se presta a una manipulación directa, y para las torres de enfriamiento pueden utilizarse diferentes alternativas de control del mismo.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Las oportunidades de ahorro energético que se lograron identificar son las siguientes:

- I. Oportunidad de ahorrar energía mediante la variación de velocidad de los motores ventiladores de la torre. Existen variadores de velocidad ya instalados; sin embargo, es necesario configurarlos en el PLC de torre para controlar la velocidad de los motores ventiladores y a su vez no mantenerlos operando, en todo momento, al 100% de su velocidad nominal.

Como la velocidad es proporcional al caudal del aire, la mejor manera de controlar el consumo energético es variando dicha velocidad. En el diagnóstico energético que se hizo en 2012 se determinó que estos motores deben estar, en promedio, funcionando al 70% de su velocidad.

- II. Oportunidad de ahorrar agua y energía mediante la modificación en el sistema de tuberías de distribución y succión de agua de torre .La oportunidad de ahorro consiste, básicamente, en instalar una tubería de alimentación y una tubería de retorno por cada línea de producción y otra para servicios con lo cual se independizaría el suministro de agua en la industria.

- III. Oportunidad de ahorrar agua y energía mediante la modificación del sistema de bombeo. La oportunidad de ahorro es posible al modificar el sistema de tuberías, ya que de este modo, resulta técnicamente viable rediseñar el sistema de bombeo con una mejor flexibilidad de operación y mantenimiento y de forma paralela resulta posible independizar las bombas (una para cada línea de producción y otra para servicios).

- IV. Oportunidad de ahorro de agua y energía mediante la conexión mecánica en serie de alimentación de agua de torre de algunos usuarios tanto de línea 1 como de línea 2.

- a. En línea 1, se debe disminuir el flujo excesivo que circula a través del enfriador final de extracción ya que tiene un flujo medido de $226 \text{ m}^3/\text{h}$ vs un flujo de diseño de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ a lo cual se le atribuyen diversos problemas de operación del equipo. Posteriormente se debe analizar la posibilidad de conectar en serie la tubería de salida de agua de torre del condensador evaporador (flujo de diseño de $204 \text{ m}^3/\text{h}$) con la tubería de entrada de agua de torre del condensador “finisher” (flujo de diseño de $237 \text{ m}^3/\text{h}$).

- b. En línea 2, se debe disminuir el flujo excesivo del enfriador final ya que



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

tiene un flujo medido de $130 \text{ m}^3/\text{h}$ vs un flujo de diseño de $36 \text{ m}^3/\text{h}$ y del calentador de columna “stripping” ya que tiene un flujo medido de $587 \text{ m}^3/\text{h}$ vs un flujo de diseño de $58 \text{ m}^3/\text{h}$. Posteriormente se debe estudiar la posibilidad de conectar en serie la tubería de salida de agua de torre del condensador evaporador (flujo de diseño de $238 \text{ m}^3/\text{h}$) y la salida de agua de torre del condensador “finisher” (flujo de diseño de $130 \text{ m}^3/\text{h}$) con la tubería de entrada de agua de torre del Intercambiador “IPTA” (flujo de diseño de $354 \text{ m}^3/\text{h}$).

- V. Oportunidad de ahorro de energía y agua mediante la implementación de un sistema de control que permita suministrar específicamente la cantidad de flujo de agua requerida por cada equipo de proceso tanto en línea 1, línea 2, línea 3 y Servicios. La propuesta requiere el suministro e instalación de válvulas modulantes.

2.3. Propuesta de conexión en serie de usuarios de agua de torre.

En la Figura 2.3.1.se muestra un diagrama de bloques del sistema de agua de torre instalado y la forma en qué están conectados los equipos de cada línea y servicios.

Como se puede observar se tiene conectado el suministro de agua de torre en paralelo a cada uno de los equipos. Se observa también que las conexiones de tuberías de los retornos de agua proveniente de los equipos a la torre de enfriamiento se encuentran también en paralelo.

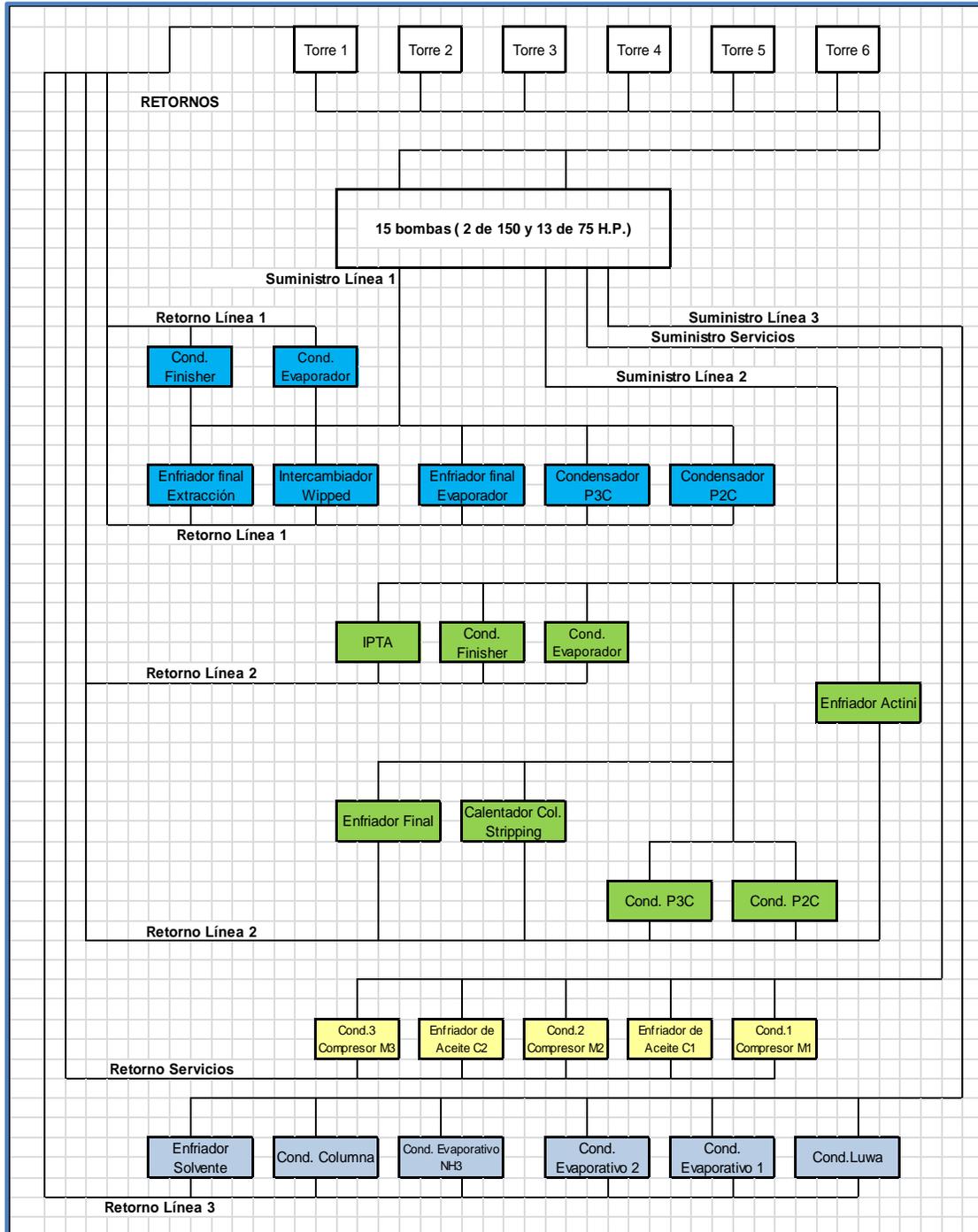
Según lo comentado en el punto anterior resulta conveniente verificar la posibilidad de hacer esta conexión en serie :

- a. **En línea 1:** Conectar en serie la tubería de salida de agua de torre del condensador evaporador (flujo de diseño de $204 \text{ m}^3/\text{h}$) con la tubería de entrada de agua de torre del condensador “finisher” (flujo de diseño de $237 \text{ m}^3/\text{h}$).
- b. **En línea 2:** Conectar en serie la tubería de salida de agua de torre del condensador evaporador (flujo de diseño de $238 \text{ m}^3/\text{h}$) y la salida de agua de torre del condensador “finisher” (flujo de diseño de $130 \text{ m}^3/\text{h}$) con la tubería de entrada de agua de torre del Intercambiador “IPTA” (flujo de diseño de $354 \text{ m}^3/\text{h}$).

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Para lograr lo anterior, es necesario llevar un análisis energético más detallado para llegar a los puntos de operación de diseño.

Fig. 2.3.1. Diagrama de bloques de la conexión de usuarios de agua de torre.

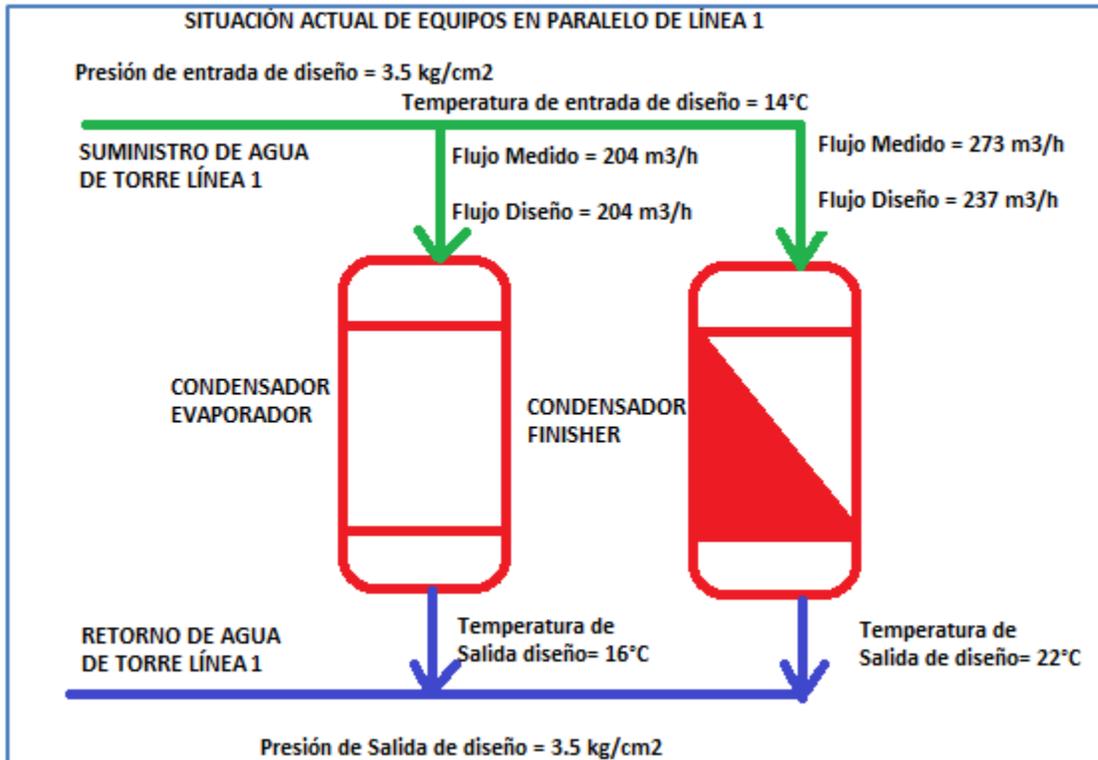


Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Fuente: Elaboración propia con información de la industria.

De acuerdo a lo comentado anteriormente, se tiene la oportunidad de ahorro en línea 1, mediante la conexión mecánica en serie del condensador evaporador con el condensador “finisher”. Para tal fin se muestra en la Figura 2.3.2. la situación actual de los equipos.

Fig. 2.3.2. Diagrama de conexión actual en paralelo de condensador evaporador y condensador “finisher “ de Línea 1.

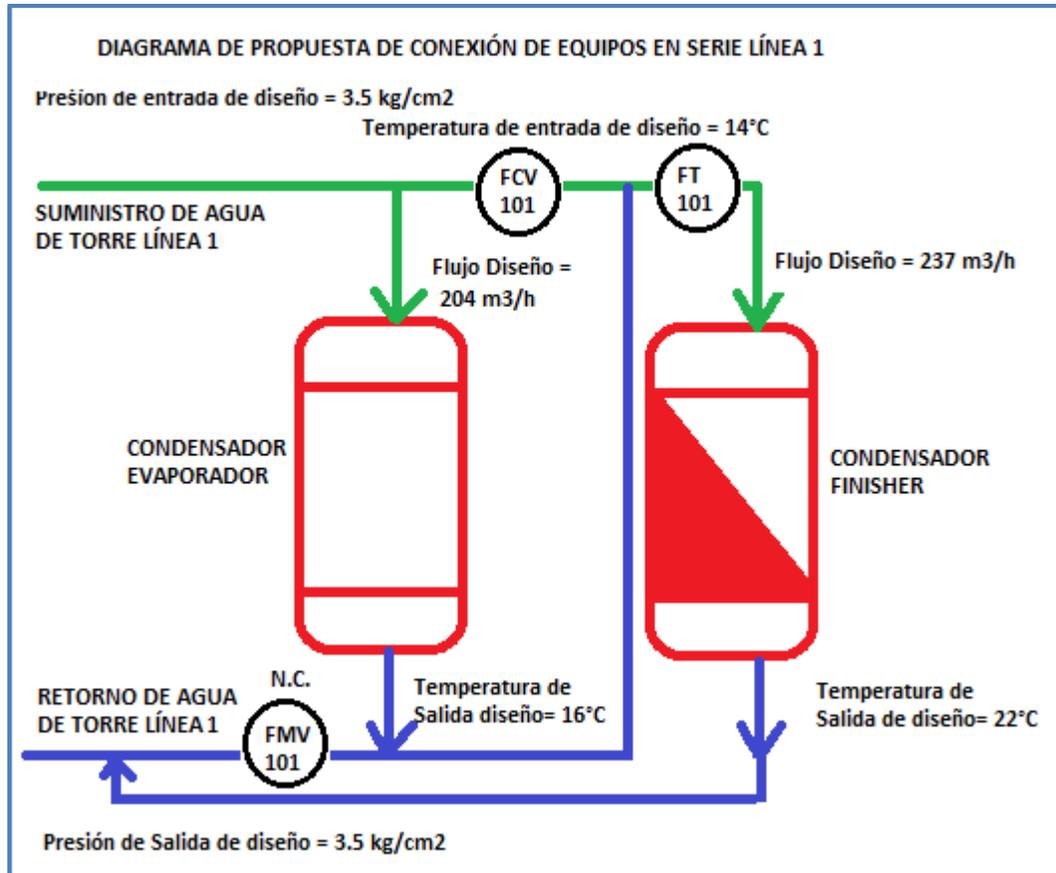


Fuente: Elaboración propia con información de la industria y la tabla 1.3.1.

En la Figura 2.3.3. se muestra la propuesta de puesta en serie del condensador evaporador con el condensador finisher.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Fig. 2.3.3. Diagrama de conexión propuesta en serie de condensador evaporador y condensador finisher de Línea 1.



Fuente: Elaboración propia con información de la industria y la tabla 1.3.1.

En línea 1, se propone conectar en serie, la salida del condensador evaporador a la entrada del condensador finisher y el flujo adicional que se requiere se plantea que se complemente desde la línea de suministro actual mediante un sistema de control que module una válvula en función del flujo a compensar.

Para lo anterior, se determinó el flujo de agua de suministro directo de la torre requerido para compensar la tasa de transferencia de energía en el finisher (ϕ_{comp}) en [m³/h]. La tabla 2.3.1 muestra el cálculo llevado a cabo para estimar lo expresado.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 2.3.1. Tabla de cálculos propuesta en serie equipos Línea 1.

CÁLCULOS DE CONEXIÓN EN SERIE PARA LÍNEA 1								
EQUIPO	Tasa de transferencia de energía en [kJ/h] $Q=\dot{m} C_p dT$	Flujo de diseño en [m ³ /h] ϕ	Densidad del agua a 25°C en [kg/m ³] ρ	Flujo másico en [kg/h] $\dot{m}=\phi\rho$	Calor específico del agua a 25°C en [kJ/(kg.K)] C_p	Temperatura de entrada en [°K] $T_i=^{\circ}C+273.15$	Temperatura de Salida [°K] $T_f=^{\circ}C+273.15$	Diferencial de Temperatura en [°K] $dT = T_f - T_i$
CONDENSADOR EVAPORADOR LÍNEA 1 EN SERIE	1,701,950.78	204	997	203,388	4.184	287.15	289.15	2
DISEÑO CONDENSADOR FINISHER LÍNEA 1	7,909,065.41	237	997	236,289	4.184	287.15	295.15	8
Cálculo para compensar la Q requerida en el finisher mediante la conexión en serie con suministro de agua de torre al finisher	Tasa de transferencia de energía que requiere ser compensada con agua de suministro directa de la torre en [kJ/h] $Q_{comp}= Q_{finisher} - Q_{evaporador}$	Flujo de agua de suministro directo de la torre requerido para compensar la tasa de transferencia de energía en el finisher en [m ³ /h] $\phi_{comp}= \dot{m}/\rho$	Densidad del agua a 25°C en [kg/m ³] ρ	Flujo másico en [kg/h] $\dot{m}= Q_{comp}/(C_p dT)$	Calor específico del agua a 25°C en [kJ/(kg.K)] C_p	Temperatura de entrada en [°K] $T_i=^{\circ}C+273.15$	Temperatura de Salida [°K] $T_f=^{\circ}C+273.15$	Diferencial de Temperatura en [°K] $dT = T_f - T_i$
	6,207,114.63	186	997	185,442	4.184	287.15	295.15	8

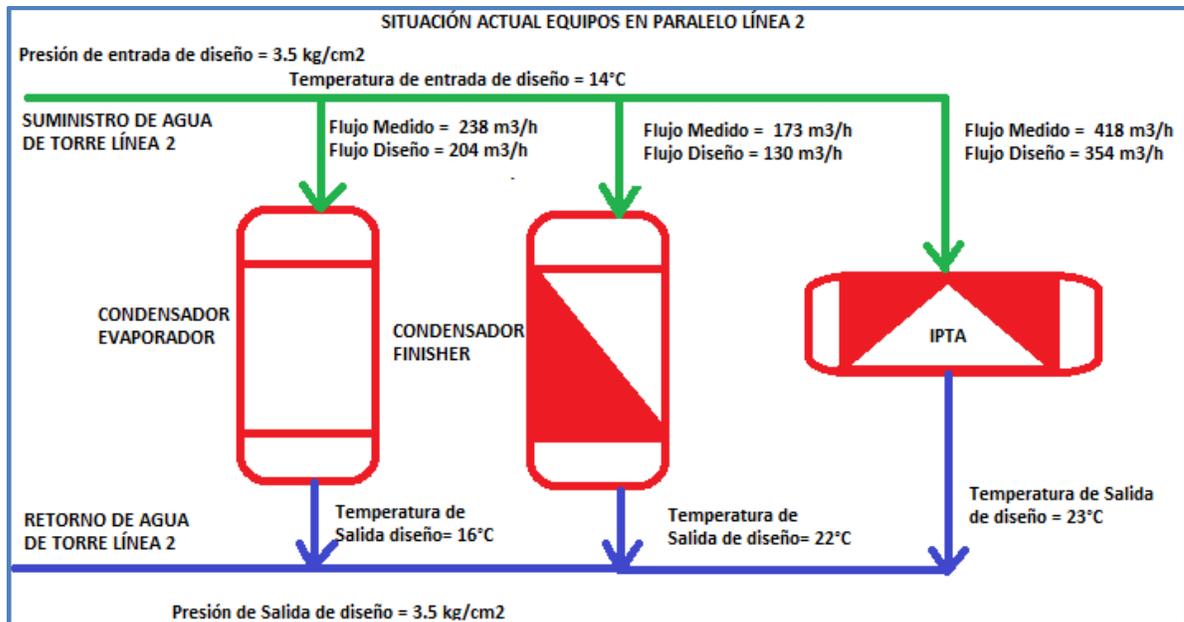
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2.3.1. se verifica que la compensación en línea 1, tendría que ser por 186 m³/h en vez de enviar 237 m³/h al “finisher”, lo cual representa un 21.5% de ahorro en agua solo en el suministro de ese equipo y lo que representaría tan solo el 1.8% del consumo actual total.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

De acuerdo a lo comentado anteriormente se tiene la oportunidad de ahorro en línea 2, mediante la conexión mecánica en serie de la salida del condensador evaporador y la salida del condensador “finisher” con el “IPTA”. Para tal fin se muestra en la Figura 2.3.4. la situación actual de los equipos.

Fig. 2.3.4. Diagrama de conexión actual en paralelo de condensador evaporador ,condensador finisher e IPTA de Línea 2.

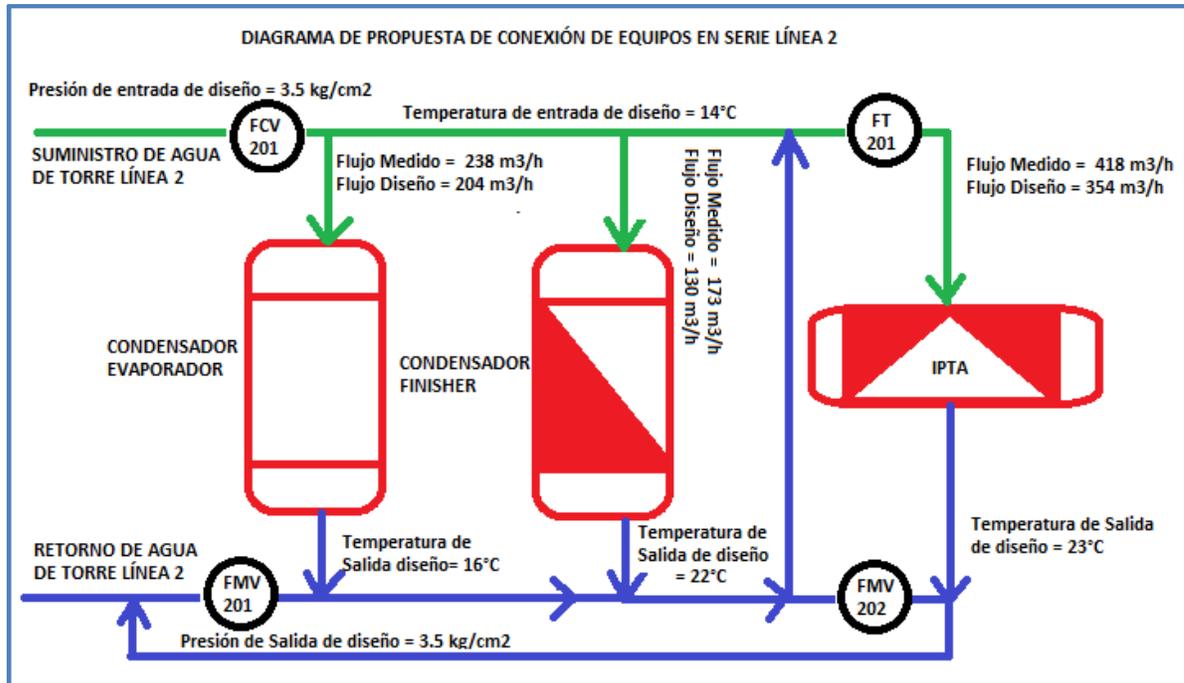


Fuente: Elaboración propia con información de la industria.

En línea 2, se propone conectar en serie la salida del condensador evaporador y la salida del condensador finisher a la entrada del IPTA y el flujo adicional que se requiere se plantea que se complemente desde la línea de suministro actual mediante un sistema de control que module una válvula en función del flujo a compensar, como se muestra en la Figura 2.3.5.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Fig. 2.3.5. Diagrama de conexión propuesta en serie de condensador evaporador, condensador finisher e IPTA Línea 2.



Fuente: Elaboración propia con información de la industria.

Para lo anterior se determinó el flujo de agua de suministro directo de la torre requerido para compensar la tasa de transferencia de energía en el IPTA (ϕ_{comp}) en [m³/h]. La Tabla 2.3.2. muestra el cálculo llevado a cabo para este arreglo en línea 2.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 2.3.2. Tabla de cálculos propuesta en serie equipos Línea 2.

CÁLCULOS DE CONEXIÓN EN SERIE PARA LÍNEA 2								
EQUIPO	Tasa de transferencia de energía en [kJ/h] $Q=\dot{m} C_p dT$	Flujo de diseño en [m ³ /h] ϕ	Densidad del agua a 25°C en [kg/m ³] ρ	Flujo másico en [kg/h] $\dot{m} = \phi \rho$	Calor específico o del agua a 25°C en [kJ/(kg. K)] C_p	Temperatura de entrada en [°K] $T_i = °C + 273.15$	Temperatura de Salida [°K] $T_f = °C + 273.15$	Diferencial de Temperatura en [°K] $dT = T_f - T_i$
CONDENSADOR EVAPORADOR LÍNEA 2 EN SERIE	1,701,950.78	204	997	203,388	4.184	287.15	289.15	2
CONDENSADOR FINISHER LÍNEA 2 EN SERIE	4,338,305.92	130	997	129,610	4.184	287.15	295.15	8
DISEÑO INTERCAMBIADOR IPTA LÍNEA 2	13,290,233.33	354	997	352,938	4.184	287.15	296.15	9
Cálculo para compensar la Q requerida en el IPTA mediante la conexión en serie del evaporador y el finisher con suministro de agua de torre al IPTA	Tasa de transferencia de energía que requiere ser compensada con agua de suministro directa de la torre en [kJ/h] $Q_{comp} = Q_{evaporador} - Q_{finisher}$	<u>Flujo de agua de suministro directo de la torre requerido para compensar la tasa de transferencia de energía en el IPTA en [m³/h] $\phi_{comp} = \dot{m} / \rho$</u>	Densidad del agua a 25°C en [kg/m ³] ρ	Flujo másico en [kg/h] $\dot{m} = Q_{comp} / (C_p dT)$	Calor específico o del agua a 25°C en [kJ/(kg. K)] C_p	Temperatura de entrada en [°K] $T_i = °C + 273.15$	Temperatura de Salida [°K] $T_f = °C + 273.15$	Diferencial de Temperatura en [°K] $dT = T_f - T_i$
	7,249,976.63	193	997	192,531.78	4.184	287.15	296.15	9

Fuente: Elaboración propia con información de la industria.

Se verifica que la compensación en línea 2, tendría que ser por 193 m³/h en vez de enviar 354 m³/h al IPTA, lo cual representa un 45.4% de ahorro en agua solo en el suministro de ese equipo y lo que representaría tan solo el 5.75% del consumo actual total.

Las dos propuestas anteriores se plantearon con los encargados de producción; sin



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

embargo, no aprobaron dichas propuestas ya que informaron que en ocasiones no todos los equipos se encuentran operando adecuadamente y que en casos de falla se ve la posibilidad de parar producción con la puesta en serie. Otra observación fue, que el diseño original pretende que cada equipo sea lo más independiente posible. Por otro lado el hecho de llevar a cabo esta interconexión físicamente resulta muy complicado en cuanto a maniobras ya que en industria los espacios son reducidos y las tuberías a maniobrar son demasiado grandes, al mismo tiempo, representa un fuerte factor de riesgos de accidente, ya que implicaría trabajo de operación, reparación o mantenimiento en lugares altos, en espacios muy pequeños y, finalmente para llevar a cabo estos trabajos se estima que se tendría que parar producción, aproximadamente por tres días, para llevar a cabo las interconexiones; ahora y haciendo un análisis minucioso, los ahorros que representa éste cambio no son lo suficientemente significantes para sustentarlo. Por todo lo expuesto se determinó que la propuesta de interconectar equipos en serie no es viable. En el tenor de ahorrar agua se procedió a buscar otra alternativa para éstas dos líneas.

Otra propuesta consiste, simplemente, en ordenar los flujos en todos los equipos y no permitir que tengan valores por encima de los de diseño, lo cual se lograría mediante un sistema de control, lo cual resulta viable porque en todos los equipos usuarios de agua de torre, de las tres líneas de producción y servicios existen válvulas modulantes ya instaladas y cableadas hacia los PLC existentes pero no están programadas aún.

Previo a llevar a cabo esa acción es necesario calcular un nuevo sistema de bombeo que permita independizar la distribución de agua de torre por cada línea y servicios.

2.4. Propuesta de modificación del sistema de bombeo.

El cálculo del sistema de bombeo requiere de cálculos previos: el NPSH, el caudal de bombeo máximo por día requerido y la carga dinámica total del sistema de bombeo.

La cavitación, además de producir daños físicos y ruidos molestos, puede llegar a reducir de manera considerable el caudal y rendimiento de la bomba. Para rediseñar el sistema de bombeo se destacan dos valores de NPSH: el NPSH disponible y el NPSH requerido.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

El NPSH disponible es función del diseño de fabricación de la bomba, su valor, determinado experimentalmente, es proporcionado por el fabricante y corresponde a la carga mínima que necesita la bomba para mantener un funcionamiento estable. Se basa en una elevación de referencia, generalmente considerada como el eje de giro de la bomba.

El NPSH requerido es función del sistema de succión de la bomba, se calcula en metros de agua, mediante la fórmula siguiente:

$$NPSH_{requerido} = H_{atm} - (H_{vap} + h_s + \Delta H_s)$$

Dónde:

$NPSH_{requerido}$ = Carga neta de succión positiva requerido (m).

H_{atm} = Presión atmosférica (m) (valores de tabla 2.4.1.).

H_{vap} = Presión de vapor (m)(valores de tabla 2.4.2.).

h_s = Altura estática de succión (m) (Dato de campo).

ΔH_s = Pérdida de carga por fricción de accesorios y tubería (m).(Dato por calcular en función de la instalación mecánica existente).

El diseño debe garantizar que:

$$NPSH_{disponible} > NPSH_{requerido}$$

Una de las variables para poder calcular el $NPSH_{requerido}$ es la Presión atmosférica H_{atm} , que se presenta en la tabla 2.4.1. en función de la altura sobre el nivel del mar.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 2.4.1. Tabla de disminución de la presión atmosférica

Disminución de la presión atmosférica.

Altura sobre el nivel del mar		Presión atmosférica (Pa)	
m	ft	m	Pa
0	0	10.33	14.69
250	820	10.03	14.26
500	1640	9.73	13.83
750	2640	9.43	13.41
1000	3280	9.13	12.98
1250	4101	8.83	12.55
1500	4291	8.53	12.13
1750	5741	8.25	11.73
2000	6561	8.00	11.38
2250	73.81	7.75	11.02
2500	8202	7.57	10.68
2750	9022	7.28	10.35
3000	9842	7.05	10.02
3250	10662	6.83	9.71
3500	11483	6.62	9.42
3750	12303	6.41	9.12
4000	13123	6.20	8.82
4250	13943	5.98	8.52
4500	14764	5.78	8.22

Fuente: [<http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>]



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Otra de las variables para poder calcular el $NPSH_{requerido}$ es la Presión de vapor del agua H_{vap} , que se presenta en la tabla 2.4.2. en función de la temperatura.

Tabla 2.4.2. Tabla de presión de vapor del agua.

Temperatura		Peso específico Kg/dm ³	Presión de vapor (P.V.P)	
C°	F°		M. Abs.	P.SI.Abs
0	32	0.9998	0.062	0.088
5	41	1.000	0.089	0.127
10	50	0.9996	0.125	0.1781
15	59	0.9990	0.174	0.247
20	68	0.9982	0.238	0.338
25	77	0.9970	0.323	0.459
30	86	0.9955	0.432	0.614
35	95	0.9939	0.573	0.815
40	104	0.9921	0.752	1.070
45	113	0.9900	0.977	1.389
50	122	0.9880	1.258	1.789
55	131	0.9857	1.605	2.283
60	140	0.9831	2.031	2.889
70	158	0.977	3.177	4.519
75	167	0.9748	3.931	5.591
80	179	0.9718	4.829	6.869
85	185	0.9687	5.894	8.383
90	194	0.9653	7.149	10.168
95	203	0.9619	8.619	12.259
100	212	0.9583	10.332	14.696

Fuente: [<http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>]

A continuación, se describen las variables faltantes para poder calcular el $NPSH_{requerido}$:

Pérdida de carga por fricción de accesorios y tubería ΔH_s

Cuando un fluido se desplaza uniformemente por una tubería recta, larga y de diámetro constante, la configuración del flujo indicada por la distribución de la velocidad sobre el diámetro de la tubería adopta una forma característica. Cualquier obstáculo en la tubería, cambia la dirección de la corriente en forma total o parcial, altera la configuración característica de flujo y ocasiona turbulencia, causando una pérdida de energía mayor de la que normalmente se produce en un flujo por una tubería recta.

Ya que las válvulas y accesorios en una línea de tubería alteran la configuración de flujo, producen una pérdida de presión adicional la cual se puede determinar por:



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

$$\Delta Hs \text{ de accesorios} = \frac{K \times V^2}{2 \times g}$$

Dónde:

K= Coeficiente de resistencia según el tipo específico de válvula o conexión
(Adimensional)

V= Velocidad del fluido (m/s) En este sistema la velocidad de diseño es de 1 ft/s que equivale a 0.305 (m/s)

g= aceleración gravitacional = 9.81 (m/s²)

ΔHs de accesorios= Pérdida de carga por fricción de accesorios

A continuación se muestra la tabla 2.4.3.de valores aproximados de K para poder calcular las pérdidas de energía debidas a los accesorios instalados.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 2.4.3. Tabla de valores aproximados de K para accesorios de tubería.

VALORES DEL COEFICIENTE K EN PÉRDIDAS SINGULARES		
Accesorio	K	L/D
Válvula esférica (totalmente abierta)	10	350
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5	175
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2,5	-
Válvula de retención (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0,2	13
Válvula de compuerta (abierta 3/4)	1,15	35
Válvula de compuerta (abierta 1/2)	5,6	160
Válvula de compuerta (abierta 1/4)	24	900
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-	40
T por salida lateral	1,80	67
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0,90	32
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0,75	27
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0,60	20
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0,45	-
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0,40	-
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0,35	-

Fuente: [<http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>]

Posteriormente se ha calculado la ΔH s de las tuberías instaladas:

Una de las fórmulas más utilizadas para tal fin es la de Darcy-Weisbach que por la complejidad para calcular el coeficiente de fricción “f” ha caído en desuso; sin embargo es posible calcularla mediante el diagrama de Moody. Dicha fórmula se expresa de la siguiente manera:



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

$$\Delta Hs \text{ de tuberías} = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2 \times g}$$

Dónde:

f= Coeficiente de fricción (Adimensional)

L= Longitud de la tubería (m)

D= Diámetro interno de la tubería (m)

V= Velocidad del fluido (m/s) En este sistema la velocidad de diseño es de 1 ft/s que equivale a 0.305 (m/s).

g= Aceleración gravitacional = 9.81 (m/s²)

ΔHs de tuberías = Pérdida de carga por fricción de tuberías (m)

El coeficiente de fricción f es función del número de Reynolds (Re) y del coeficiente de rugosidad o rugosidad relativa de las paredes de la tubería (ϵ_r):

$$f = f(Re, \epsilon_r)$$

Como f es posible calcularlo a partir del número de Reynolds:

$$Re = \frac{D \times V \times \rho}{\mu}$$

Dónde:

Re = No. De Reynolds (Adimensional)

D = Diámetro interno de la tubería (m)

V= Velocidad del fluido (m/s) En este sistema la velocidad de diseño es de 1 ft/s que equivale a 0.305 (m/s)

ρ = Densidad del agua a 25°C (kg/m³)

μ = Viscosidad del agua a 25°C (N s / m²)

$$\epsilon r = \frac{\epsilon}{D}$$

Dónde:



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

ϵ_r = Rugosidad relativa de las paredes de la tubería (adimensional)

ϵ = Rugosidad absoluta de la tubería (m) para el acero al carbón es de 0.00006 mm

D = Diámetro interno de la tubería (m)

Se tiene el dato de que la tubería es de Acero al Carbón Cédula 506 y en función de esta característica se obtuvo el Diámetro interno.

Una vez que se calculó el Re y ϵ_r se obtuvo el valor de f en el diagrama de Moody(para consulta ver el Anexo 1).

Para llevar a cabo los cálculos antes mencionados se utilizaron las tablas 2.4.4. para para línea 1, la 2.4.5. para línea 2, la 2.4.6. para línea 3 y la 2.4.7. para servicios para cada línea de producción y se obtuvo lo siguiente:



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 2.4.4. Tabla de cálculos ΔH_s en accesorios y tuberías de Línea 1.

INSTALACIÓN MECÁNICA LÍNEA 1														
Accesorio	CANT	ΔH_s por accesorio (m)	K (adim)	V (m/s)	g (m/s ²)	ΔH_s de tubería (m)	f (adim)	L (m)	D (m)	Re	ρ (a 25°C en kg/m ³)	μ (a 25°C en N s / m ²)	ϵ (m)	ϵr (adim)
Tubo de 20"	22			0.305	9.81	0.02	0.017	132	0.478	163,317.56	997	0.00089	0.00006	0.0001255
Tubo de 16"	18			0.305	9.81	0.03	0.019	108	0.381	130,175.71	997	0.00089	0.00006	0.0001575
Tubo de 10"	42			0.305	9.81	0.09	0.02	252	0.255	87,125.478	997	0.00089	0.00006	0.0002353
Tubo de 8"	22			0.305	9.81	0.1	0.034	132	0.203	69,358.714	997	0.00089	0.00006	0.0002956
Codos de 20X90	32	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 20X45	0	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 16X90	1	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 16X45	2	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 10X90	10	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 10X45	0	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 8X90	0	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 8X45	5	0	0.35	0.305	9.81									
Tees de 20"	4	0.04	1.8	0.305	9.81									
Tees de 16"	1	0.01	1.8	0.305	9.81									
Tees de 10"	2	0.02	1.8	0.305	9.81									
Tees de 8"	2	0.02	1.8	0.305	9.81									
Válvula de mariposa de 16"	2	0	0	0.305	9.81									
Válvula check 16"	1	0	0.2	0.305	9.81									
Válvula modulante de 16"	7	0.14	5	0.305	9.81									
Entrada 20"	0	0		0.305	9.81	0	0.017	0	0.478	163,317.56	997	0.00089	0.00006	0.0001255
Entrada 16"	7	0		0.305	9.81	0	0.019	3.5	0.381	130,175.71	997	0.00089	0.00006	0.0001575
Entrada 10"	1	0		0.305	9.81	0	0.02	0.5	0.255	87,125.478	997	0.00089	0.00006	0.0002353
Entrada 8"	1	0		0.305	9.81	0	0.034	0.5	0.203	69,358.714	997	0.00089	0.00006	0.0002956
Salida 20"	1	0		0.305	9.81	0	0.017	0.5	0.478	163,317.56	997	0.00089	0.00006	0.0001255
Salida 16"	7	0		0.305	9.81	0	0.019	3.5	0.381	130,175.71	997	0.00089	0.00006	0.0001575
Salida 10"	1	0		0.305	9.81	0	0.02	0.5	0.255	87,125.478	997	0.00089	0.00006	0.0002353
Salida 8"	1	0		0.305	9.81	0	0.034	0.5	0.203	69,358.714	997	0.00089	0.00006	0.0002956
TOTAL		0.23				0.24								

Fuente: Elaboración propia, Tabla 1.5.1., Tabla 2.4.1., Tabla 2.4.2. y Tabla 2.4.3.

En línea 1 se observa una ΔH_s por accesorios de 0.23 m y una ΔH_s de tubería de 0.24 m que en total representa una ΔH_s de 0.47 m.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 2.4.5. Tabla de cálculos ΔH_s en accesorios y tuberías de Línea 2.

INSTALACIÓN MECÁNICA LÍNEA 2														
Accesorio	CANT	ΔH_s por accesorio (m)	K (adim)	V (m/s)	g (m/s ²)	ΔH_s de tubería (m)	f (adim)	L (m)	D (m)	Re	ρ (a 25°C en kg/m ³)	μ (a 25°C en N s / m ²)	ϵ (m)	ϵr (adim)
Tubo de 20"	26			0.305	9.81	0.03	0.017	156	0.478	163,317.562	997	0.00089	0.00006	0.00012552
Tubo de 16"	21			0.305	9.81	0.03	0.019	126	0.381	130,175.713	997	0.00089	0.00006	0.00015748
Tubo de 10"	51			0.305	9.81	0.11	0.02	306	0.255	87,125.4775	997	0.00089	0.00006	0.00023529
Tubo de 8"	36			0.305	9.81	0.17	0.034	216	0.203	69,358.7135	997	0.00089	0.00006	0.00029557
Codos de 20X90	27	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 20X45	0	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 16X90	1	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 16X45	3	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 10X90	8	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 10X45	0	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 8X90	2	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 8X45	3	0	0.35	0.305	9.81									
Tees de 20"	5	0.05	1.8	0.305	9.81									
Tees de 16"	3	0.03	1.8	0.305	9.81									
Tees de 10"	4	0.04	1.8	0.305	9.81									
Tees de 8"	1	0.01	1.8	0.305	9.81									
Válvula de mariposa de 16"	3	0	0	0.305	9.81									
Válvula check 16"	2	0	0.2	0.305	9.81									
Válvula modulante de 16"	8	0.16	5	0.305	9.81									
Entrada 20"	0	0		0.305	9.81	0	0.017	0	0.478	163,317.562	997	0.00089	0.00006	0.00012552
Entrada 16"	8	0		0.305	9.81	0	0.019	4	0.381	130,175.713	997	0.00089	0.00006	0.00015748
Entrada 10"	1	0		0.305	9.81	0	0.02	0.5	0.255	87,125.4775	997	0.00089	0.00006	0.00023529
Entrada 8"	1	0		0.305	9.81	0	0.034	0.5	0.203	69,358.7135	997	0.00089	0.00006	0.00029557
Salida 20"	1	0		0.305	9.81	0	0.017	0.5	0.478	163,317.562	997	0.00089	0.00006	0.00012552
Salida 16"	8	0		0.305	9.81	0	0.019	4	0.381	130,175.713	997	0.00089	0.00006	0.00015748
Salida 10"	1	0		0.305	9.81	0	0.02	0.5	0.255	87,125.4775	997	0.00089	0.00006	0.00023529
Salida 8"	1	0		0.305	9.81	0	0.034	0.5	0.203	69,358.7135	997	0.00089	0.00006	0.00029557
TOTAL		0.29				0.34								

Fuente: Elaboración propia, Tabla 1.5.2. ,Tabla 2.4.1.,Tabla 2.4.2 y Tabla 2.4.3.

En línea 2 se calculó una ΔH_s por accesorios de 0.29 m y una ΔH_s de tubería de 0.34 m, que en total representa una ΔH_s de 0.63 m.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 2.4.6. Tabla de cálculos ΔH_s en accesorios y tuberías de Línea 3.

INSTALACIÓN MECÁNICA LÍNEA 3														
Accesorio	CANT	ΔH_s por accesorio (m)	K (adim)	V (m/s)	g (m/s ²)	ΔH_s de tubería (m)	f (adim)	L (m)	D (m)	Re	ρ (a 25°C en kg/m ³)	μ (a 25°C en N s / m ²)	ϵ (m)	ϵr (adim)
Tubo de 20"	29			0.305	9.81	0.03	0.017	174	0.478	163,317.562	997	0.00089	0.00006	0.00012552
Tubo de 16"	15			0.305	9.81	0.02	0.019	90	0.381	130,175.713	997	0.00089	0.00006	0.00015748
Tubo de 10"	28			0.305	9.81	0.06	0.02	168	0.255	87,125.4775	997	0.00089	0.00006	0.00023529
Tubo de 8"	30			0.305	9.81	0.14	0.034	180	0.203	69,358.7135	997	0.00089	0.00006	0.00029557
Codos de 20X90	11	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 20X45	1	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 16X90	1	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 16X45	2	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 10X90	5	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 10X45	6	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 8X90	4	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 8X45	3	0	0.35	0.305	9.81									
Tees de 20"	2	0.02	1.8	0.305	9.81									
Tees de 16"	2	0.02	1.8	0.305	9.81									
Tees de 10"	3	0.03	1.8	0.305	9.81									
Tees de 8"	2	0.02	1.8	0.305	9.81									
Válvula de mariposa de 16"	1	0	0	0.305	9.81									
Válvula modulante de 16"	6	0	0.2	0.305	9.81									
Válvula check 16"	1	0.02	5	0.305	9.81									
Entrada 20"	0	0		0.305	9.81	0	0.017	0	0.478	163,317.562	997	0.00089	0.00006	0.00012552
Entrada 16"	6	0		0.305	9.81	0	0.019	3	0.381	130,175.713	997	0.00089	0.00006	0.00015748
Entrada 10"	1	0		0.305	9.81	0	0.02	0.5	0.255	87,125.4775	997	0.00089	0.00006	0.00023529
Entrada 8"	1	0		0.305	9.81	0	0.034	0.5	0.203	69,358.7135	997	0.00089	0.00006	0.00029557
Salida 20"	1	0		0.305	9.81	0	0.017	0.5	0.478	163,317.562	997	0.00089	0.00006	0.00012552
Salida 16"	1	0		0.305	9.81	0	0.019	0.5	0.381	130,175.713	997	0.00089	0.00006	0.00015748
Salida 10"	1	0		0.305	9.81	0	0.02	0.5	0.255	87,125.4775	997	0.00089	0.00006	0.00023529
Salida 8"	1	0		0.305	9.81	0	0.034	0.5	0.203	69,358.7135	997	0.00089	0.00006	0.00029557
TOTAL		0.11				0.25								

Fuente: Elaboración propia, Tabla 1.5.3., Tabla 2.4.1., Tabla 2.4.2. y Tabla 2.4.3.

En línea 3 se observa una ΔH_s por accesorios de 0.11 m y una ΔH_s de tubería de 0.25 m, que en total representa una ΔH_s de 0.36 m.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 2.4.7. Tabla de cálculos ΔH_s en accesorios y tuberías de Servicios.

INSTALACIÓN MECÁNICA SERVICIOS														
Accesorio	CANT	ΔH_s por accesorio (m)	K (adim)	v (m/s)	g (m/s ²)	ΔH_s de tubería (m)	f (adim)	L (m)	D (m)	Re	ρ (a 25°C en kg/m ³)	μ (a 25°C en N s / m ²)	ϵ (m)	ϵr (adim)
Tubo de 20"	31			0.305	9.81	0.03	0.017	186	0.48	163,317.562	997	0.00089	0.00006	0.00012552
Tubo de 16"	26			0.305	9.81	0.04	0.019	156	0.38	130,175.713	997	0.00089	0.00006	0.00015748
Tubo de 10"	32			0.305	9.81	0.07	0.02	192	0.26	87,125.4775	997	0.00089	0.00006	0.00023529
Tubo de 8"	29			0.305	9.81	0.14	0.034	174	0.2	69,358.7135	997	0.00089	0.00006	0.00029557
Codos de 20X90	6	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 20X45	0	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 16X90	2	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 16X45	2	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 10X90	4	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 10X45	6	0	0.35	0.305	9.81									
Codos de 8X90	4	0	0.6	0.305	9.81									
Codos de 8X45	4	0	0.35	0.305	9.81									
Tees de 20"	2	0.02	1.8	0.305	9.81									
Tees de 16"	2	0.02	1.8	0.305	9.81									
Tees de 10"	2	0.02	1.8	0.305	9.81									
Tees de 8"	1	0.01	1.8	0.305	9.81									
Válvula de mariposa de 16"	1	0	0	0.305	9.81									
Válvula check 16"	1	0	0.2	0.305	9.81									
Válvula modulante de 16"	5	0.1	5	0.305	9.81									
Entrada 20"	1	0		0.305	9.81	0	0.017	0.5	0.48	163,317.562	997	0.00089	0.00006	0.00012552
Entrada 16"	5	0		0.305	9.81	0	0.019	2.5	0.38	130,175.713	997	0.00089	0.00006	0.00015748
Entrada 10"	1	0		0.305	9.81	0	0.02	0.5	0.26	87,125.4775	997	0.00089	0.00006	0.00023529
Entrada 8"	1	0		0.305	9.81	0	0.034	0.5	0.2	69,358.7135	997	0.00089	0.00006	0.00029557
Salida 20"	1	0		0.305	9.81	0	0.017	0.5	0.48	163,317.562	997	0.00089	0.00006	0.00012552
Salida 16"	5	0		0.305	9.81	0	0.019	2.5	0.38	130,175.713	997	0.00089	0.00006	0.00015748
Salida 10"	1	0		0.305	9.81	0	0.02	0.5	0.26	87,125.4775	997	0.00089	0.00006	0.00023529
Salida 8"	1	0		0.305	9.81	0	0.034	0.5	0.2	69,358.7135	997	0.00089	0.00006	0.00029557
TOTAL		0.17				0.28								

Fuente: Elaboración propia, Tabla 1.5.4. , Tabla 2.4.1., Tabla 2.4.2. y Tabla 2.4.3.

En Servicios se determinó una ΔH_s por accesorios de 0.17 m y una ΔH_s de tubería de 0.28 m, que en total representa una ΔH_s de 0.45 m.

Una vez calculada la ΔH_s , se procedió a calcular el NPSH requerido para cada una de las líneas de producción y para servicios con el fin de proponer un sistema de bombeo



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

más eficiente.

El valor de H_{atm} se obtiene de la tabla 2.4.1. sabiendo que la industria se encuentra a 2500 metros sobre el nivel del mar y la H_{vap} se obtiene de la tabla 2.4.2. ya que sabemos que el agua se bombea de 14°C a 15°C.

$$NPSH_{requerido} = H_{atm} - (H_{vap} + h_s + \Delta H_s)$$

La altura de succión es de 3.5 metros y el dato fue tomado con medición directa en la industria.

En la siguiente tabla 2.4.8. se muestran los cálculos realizados de $NPSH_{requerido}$.

Tabla 2.4.8. Tabla de cálculos de NPSH.

Línea	NPSH requerido (m)	Hatm (m)	Hvap (m)	hs (m)	ΔH_s (m)	ΔH_s por accesorio (m)	ΔH_s por tubería(m)
Línea 1	3.426	7.57	0.174	3.5	0.47	0.23	0.24
Línea 2	3.266	7.57	0.174	3.5	0.63	0.29	0.34
Línea 3	3.536	7.57	0.174	3.5	0.36	0.11	0.25
Servicios	3.446	7.57	0.174	3.5	0.45	0.17	0.28

Fuente: Elaboración propia, Tabla 2.4.4., Tabla 2.4.5., Tabla 2.4.6. y Tabla 2.4.7.

En seguida, se informó a personal de la industria, las características de NPSH requerido, flujo y las condiciones del proceso en el sistema de bombeo. Después de informarles lo anterior, dieron la indicación de que las bombas a seleccionar deben ser de la marca Armstrong debido a que se tiene una política interna que pretende estandarizar dicha marca en todos los motores que se instalen en producción. Posteriormente, se enviaron vía correo electrónico los requerimientos y en seguida, un proveedor de acuerdo a las especificaciones solicitadas sugirió las bombas verticales de la serie Armstrong pumps Series 4300 de 14 x 14 x 14.

En la página web de Armstrong, se consultaron las curvas de comportamiento de las bombas, para poder seleccionar la capacidad en H.P. y tipo de bombas requeridas, en función del flujo, el $NPSH_{requerido}$ y el $NPSH_{disponible}$, verificando que existan impulsores que operen con una eficiencia de al menos un 70%.

A continuación, en las figuras 2.4.1, 2.4.2. , 2.4.3. y 2.4.4., se muestran las curvas características del comportamiento de bombas requerido para línea 1, línea 2 ,línea 3 y servicios, con las cuales, fue posible determinar la capacidad de las bombas e



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

impulsores.

En la tabla 2.4.9. se resumen los datos de NPSH requerido (en m) y flujos por línea de diseño (en gpm), con la finalidad de tener presente dicha información, ya que será de gran utilidad para determinar la curva característica para cada una de las bombas.

Tabla 2.4.9. Tabla de NPSH requerido (en m) y flujos por línea de diseño (en gpm).

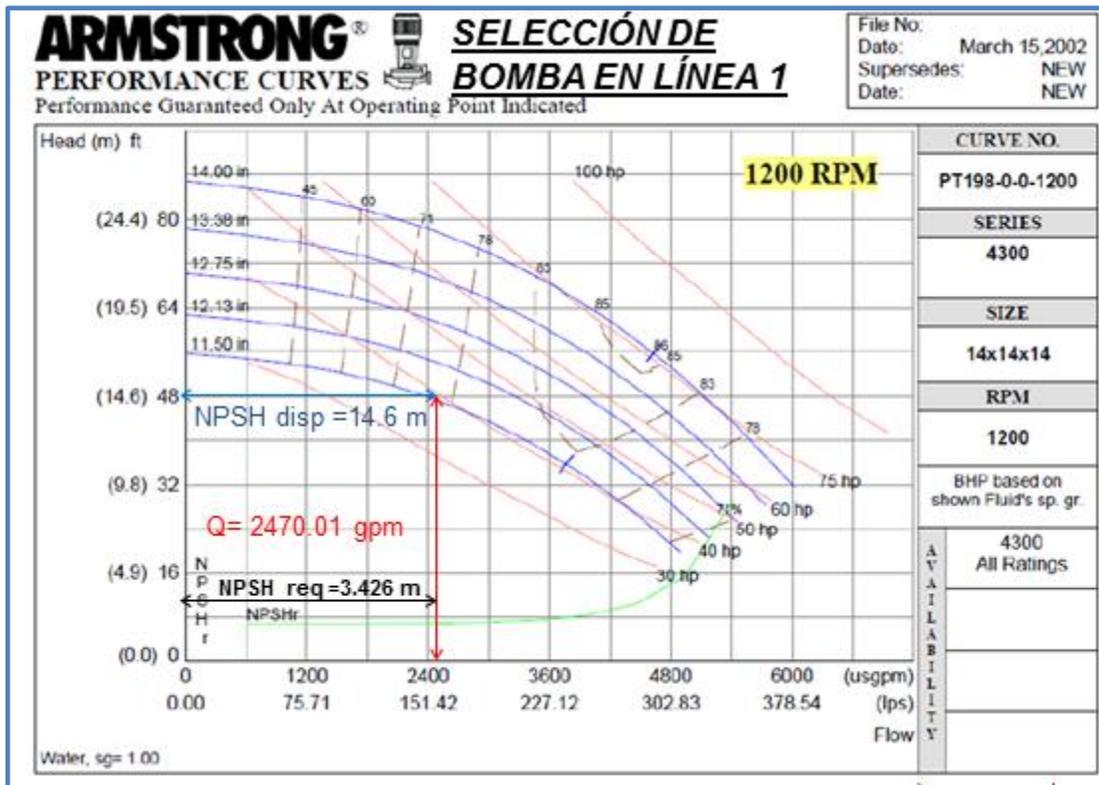
Línea	NPSH requerido (m)	Q (m ³ /h)	Q (gpm)
Línea 1	3.426	561	2,470.01
Línea 2	3.266	842	3,707.21
Línea 3	3.536	490	2,157.41
Servicios	3.446	600	2,641.72

Fuente: Elaboración propia, Tabla 1.3.1. y Tabla 2.4.8.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

En la Figura 2.4.1., se representa el flujo requerido en línea 1, de 2,470.01 gpm y un NPSH requerido de 3.426 m. La bomba más adecuada es la de 40 H.P. con un impulsor de 11.50 pulgadas ya que ofrece aproximadamente un 78% de eficiencia y satisface los requerimientos. No se recomienda el uso de la bomba de 30 H.P. porque no se alcanzan puntos de operación eficientes superior al 70%.

Fig. 2.4.1. Curva característica para seleccionar la bomba de Línea 1.



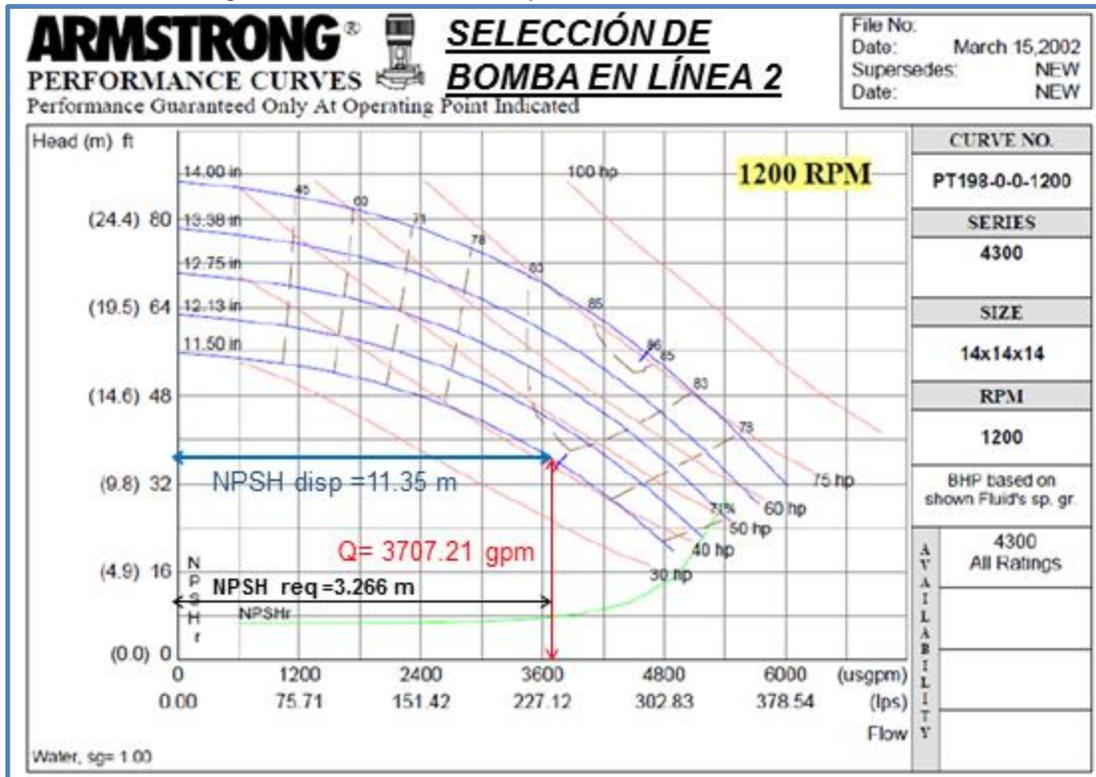
Fuente: Elaboración propia y tabla 2.4.9.

El NPSH disponible con ésta bomba y el impulsor antes mencionado es de 14.6 m con lo cual se asegura que el NPSH disponible es mayor que el NPSH requerido.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

En la figura 2.4.2., se representa el flujo requerido en línea 2, de 3,707.21 gpm y un NPSH requerido de 3.266 m. La bomba más adecuada es la de 40 H.P. con un impulsor de 11.50 pulgadas ya que ofrece aproximadamente un 86% de eficiencia y satisface los requerimientos. No se recomienda el uso de la bomba de 30 H.P. porque no se alcanzan puntos de operación eficientes superior al 70%.

Fig. 2.4.2. Curva característica para seleccionar la bomba de Línea 2.



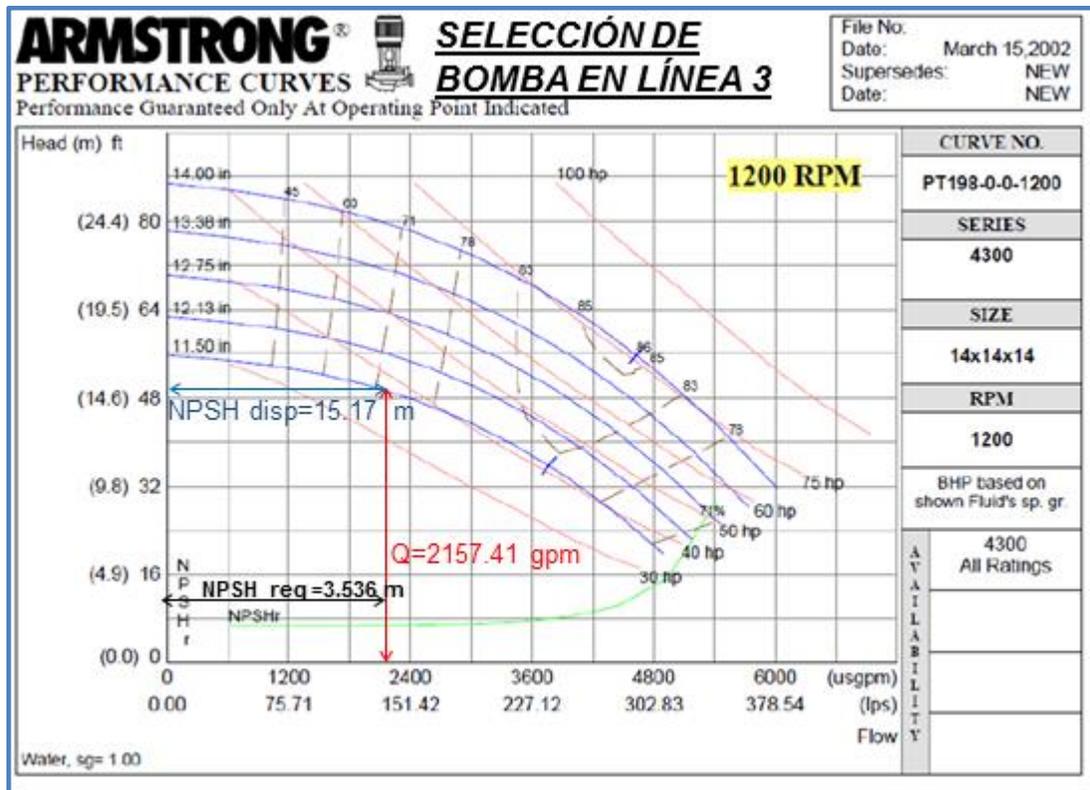
Fuente: Elaboración propia y tabla 2.4.9.

El NPSH disponible con ésta bomba y el impulsor antes mencionado es de 11.35 m con lo cual se asegura que el NPSH disponible es mayor que el NPSH requerido.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

En la figura 2.4.3., se representa el flujo requerido en línea 3, de 2,157.41 gpm y un NPSH requerido de 3.536 m. La bomba más adecuada es la de 40 H.P. con un impulsor de 11.50 pulgadas ya que ofrece aproximadamente un 75% de eficiencia y satisface los requerimientos. No se recomienda el uso de la bomba de 30 H.P. porque no se alcanzan puntos de operación eficientes superior al 70%.

Fig. 2.4.3. Curva característica para seleccionar la bomba de Línea 3.



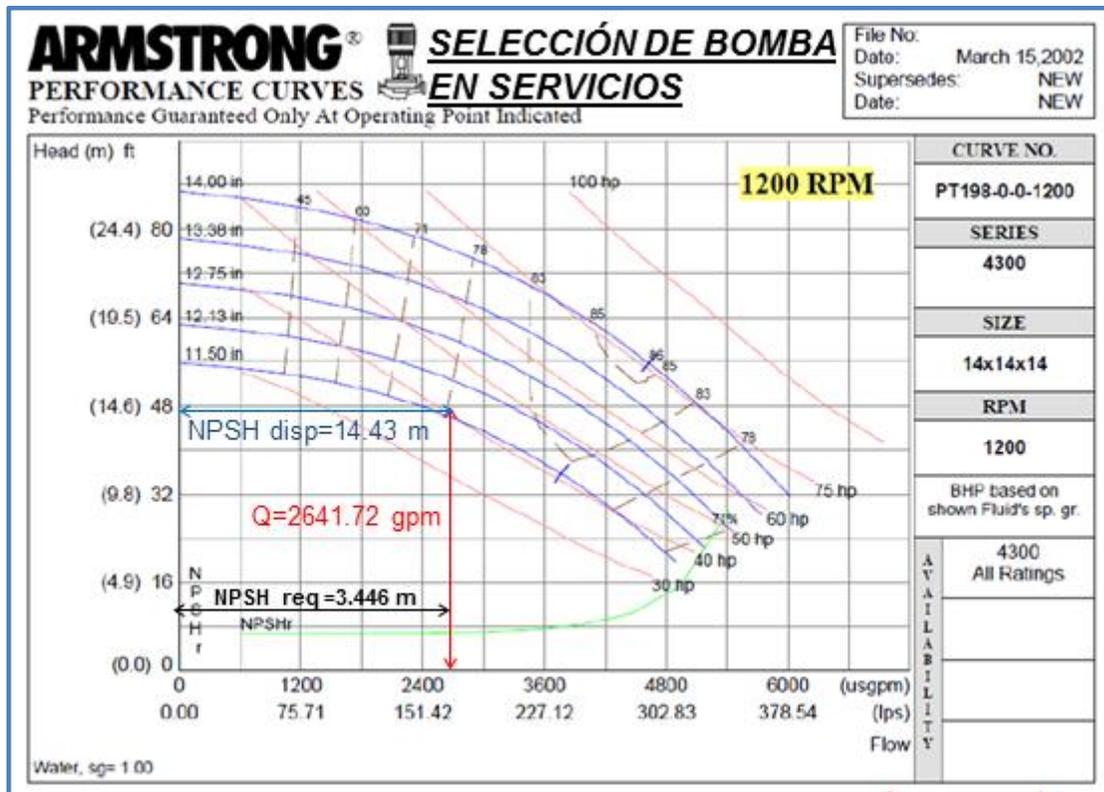
Fuente: Elaboración propia y tabla 2.4.9.

El NPSH disponible con ésta bomba y el impulsor antes mencionado es de 15.17 m con lo cual se asegura que el NPSH disponible es mayor que el NPSH requerido.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

En la figura 2.4.4., se representa el flujo requerido en Servicios de 2,641.72 gpm y un NPSH requerido de 3.446 m. La bomba más adecuada es la de 40 H.P. con un impulsor de 11.50 pulgadas ya que ofrece aproximadamente un 78% de eficiencia y satisface los requerimientos. No se recomienda el uso de la bomba de 30 H.P. porque no se alcanzan puntos de operación eficientes superior al 70%.

Fig. 2.4.4. Curva característica para seleccionar la bomba de Servicios.



Fuente: Elaboración propia y tabla 2.4.9.

El NPSH disponible con ésta bomba y el impulsor antes mencionado es de 14.43 m con lo cual se asegura que el NPSH disponible es mayor que el NPSH requerido.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

De la información anterior se presenta a continuación la tabla 2.4.10., con el resumen de selección de bombas para cada una de las líneas.

Tabla 2.4.10. Tabla de bombas seleccionadas.

Línea	NPSH requerido (m)	Q (m ³ /h)	Q (gpm)	Tipo de bomba	H.P. bomba	NPSH disponible (m)	Diámetro del impulsor (pulg)	n (%)	No. Fases del motor
Línea 1	3.426	561	2,470.01	Vertical	40	14.6	11.5	78	3
Línea 2	3.266	842	3,707.21	Vertical	40	11.35	11.5	86	3
Línea 3	3.536	490	2,157.41	Vertical	40	15.17	11.5	75	3
Servicios	3.446	600	2,641.72	Vertical	40	14.43	11.5	78	3

Fuente: Elaboración propia, fig. 2.4.1., 2.4.2., 2.4.3. y 2.4.4.e información proporcionada por la industria

Para respaldo, es posible observar que una bomba adicional de 40 H.P. y un impulsor de 11.50 pulgadas, permitirá satisfacer las necesidades de las tres líneas de producción y la de servicios, cuando requieran dar mantenimiento o en caso de falla de sus respectivas bombas.

Con la información de bombas descrita en las páginas anteriores, se garantiza que es posible mantener operando el proceso con tan sólo cinco bombas de 40 H.P.

Posteriormente, se hizo una propuesta general para modificar el sistema de tuberías que se describe en el siguiente punto y permite la instalación de las bombas antes mencionadas.

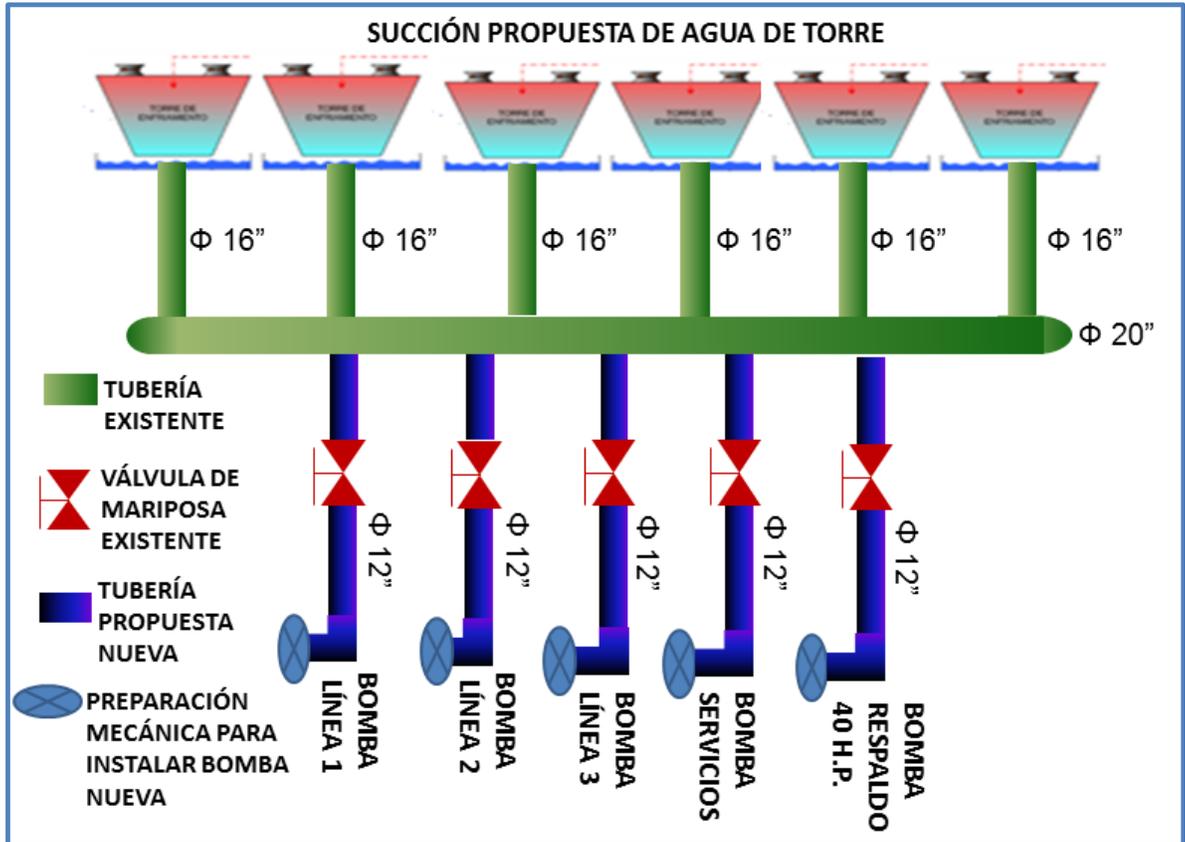
2.5. Propuesta de modificación del sistema de tuberías.

Del lado de la succión, se tiene un cabezal común de 20 pulgadas, al cual se encuentran conectados mediante tubería de 16 pulgadas, los bacines que contienen el agua de la torre de enfriamiento. En ese cabezal común, se propone conectar tuberías de 12 pulgadas con sus respectivas válvulas marca Keystone por ser un estándar de ésta industria, para cada una de las líneas de suministro y respaldo, que permitirán succionar el agua a través de los impulsores de las bombas propuestas. Lo anterior se

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

ilustra en la figura 2.5.1.

Fig. 2.5.1. Instalación Mecánica propuesta para cabezal de succión de torre de enfriamiento.

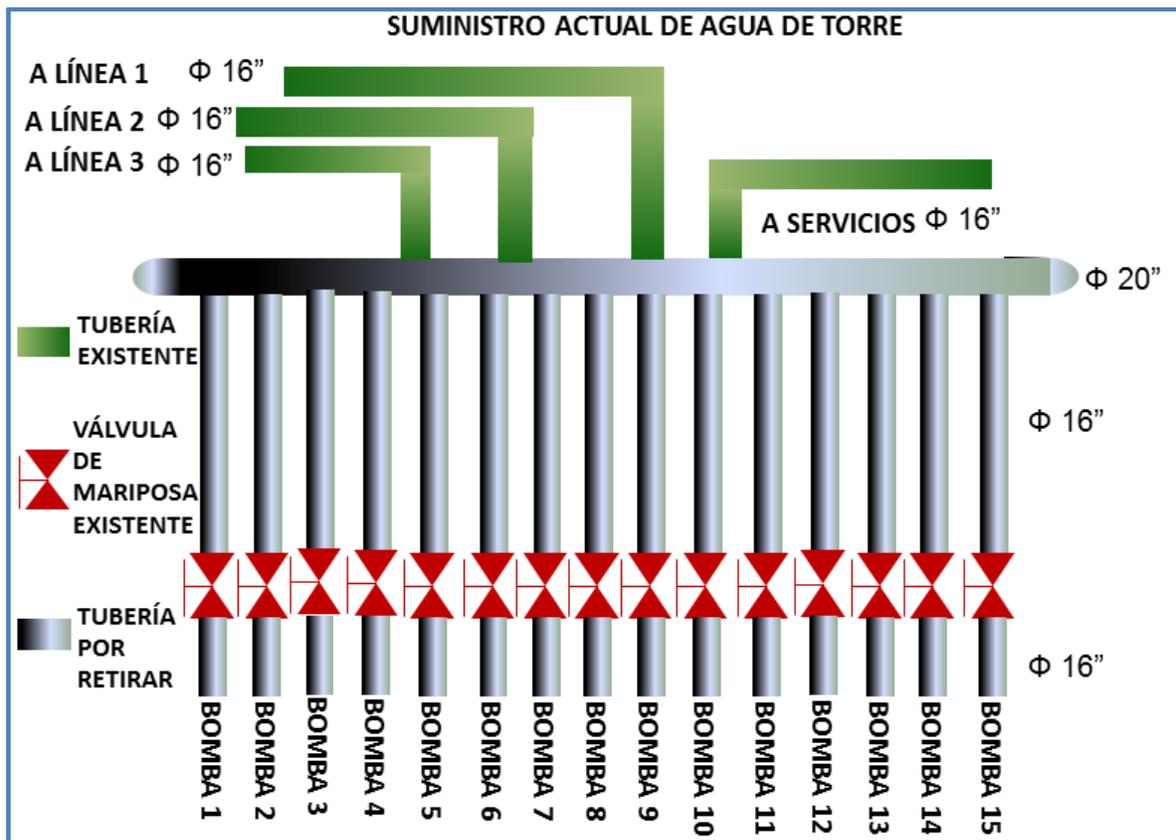


Fuente: Elaboración propia e información proporcionada por la industria

Dentro de las modificaciones requeridas, es necesario ordenar la tubería en el lado del suministro de agua para que línea 1, línea 2, línea 3 y servicios tengan líneas independientes de suministro. Para tal fin, será necesario retirar quince tubos de 16 pulgadas. De este desmantelamiento, resulta viable recuperar cinco de las válvulas de 16 pulgadas para hacer las modificaciones pertinentes a fin de conectar el sistema de bombeo propuesto. Lo anterior se ilustra en la figura 2.5.2.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre de enfriamiento.

Fig. 2.5.2. Instalación Mecánica actual de suministro de agua de torre de enfriamiento a líneas de producción.

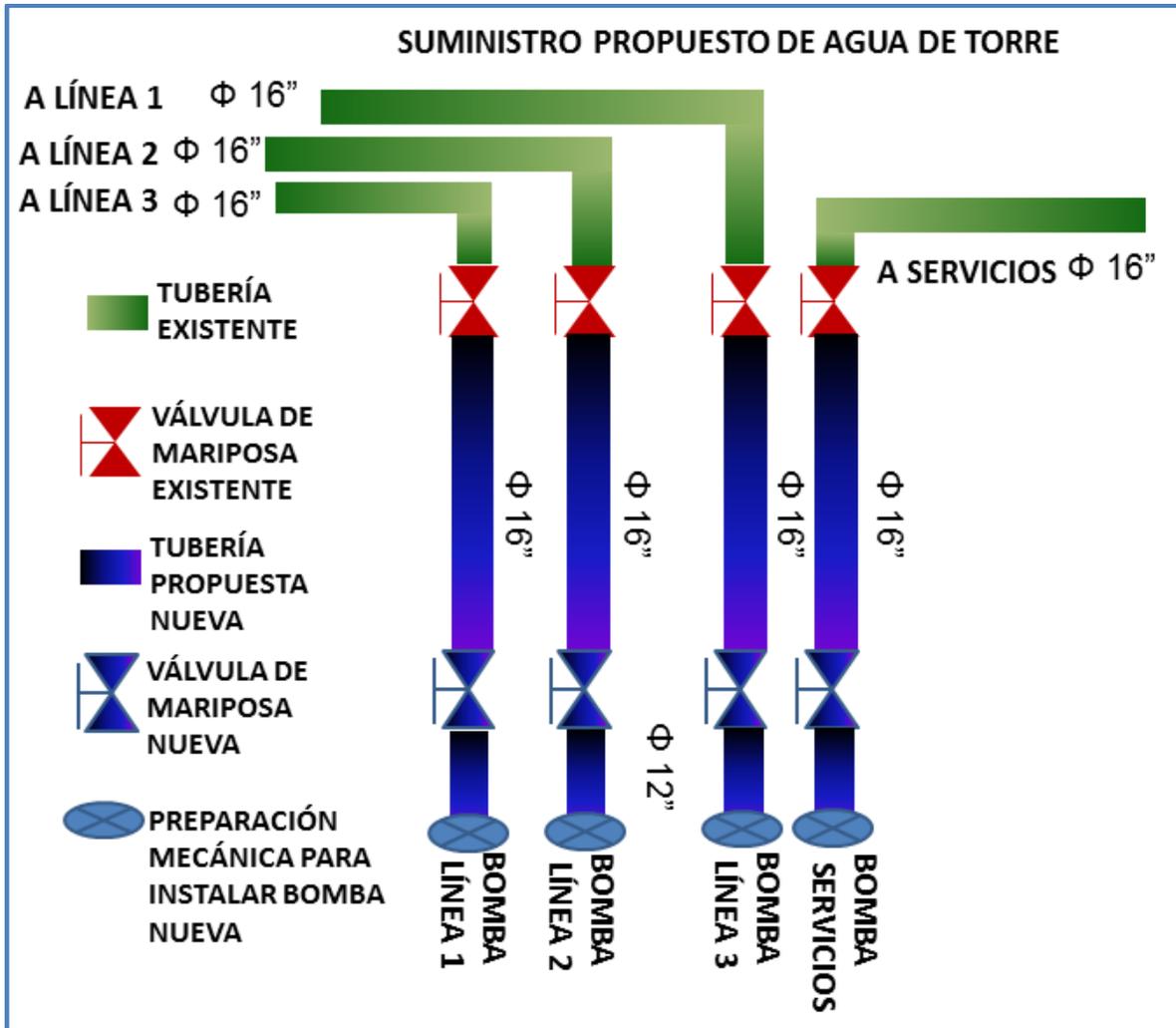


Fuente: Elaboración propia e información proporcionada por la industria

Otra modificación necesaria, para eliminar el cabezal de 20 pulgadas e independizar el suministro de agua de torre para cada línea, tal y como se muestra en la figura 2.5.3., es instalar tubería nueva de 16 y 12 pulgadas en cada una de las líneas con sus respectivas preparaciones mecánicas de acuerdo a típicos de instalación que serán proporcionadas (soldaduras, reducciones, tornillería, accesorios y bridas) para instalar las cinco bombas nuevas.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre de enfriamiento.

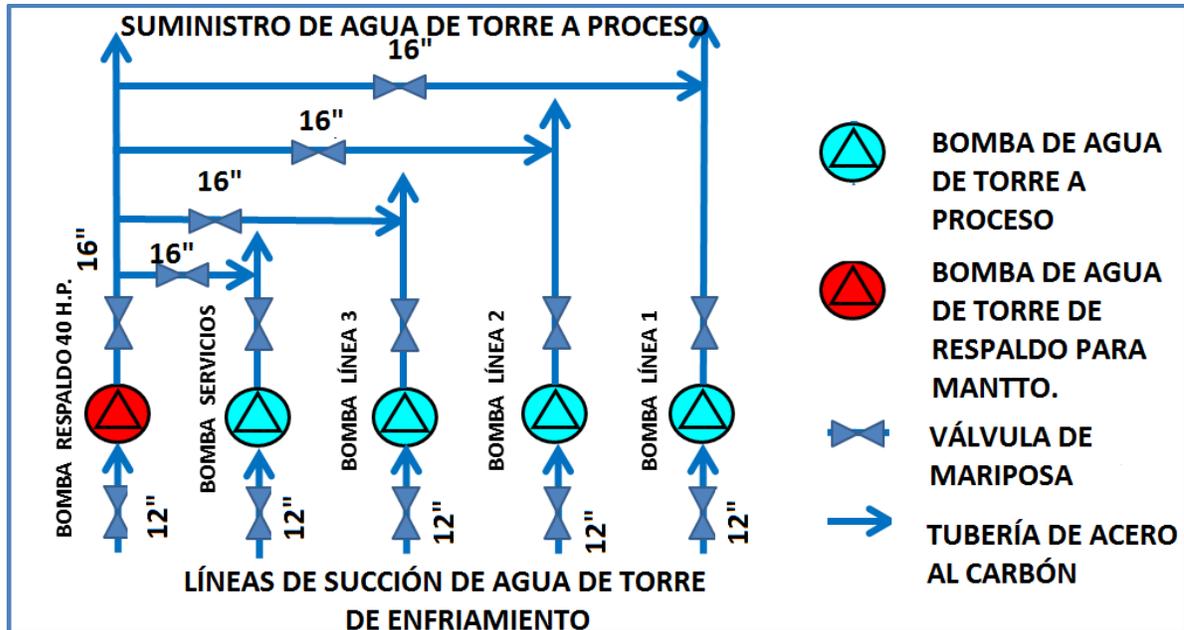
Fig. 2.5.3. Instalación Mecánica propuesta para suministro de agua de torre de enfriamiento a líneas de producción.



Fuente: Elaboración propia e información proporcionada por la industria

En la figura 2.5.4., se muestra que del lado de la succión, se deberán instalar 5 válvulas tipo mariposa de 12" marca Keystone, para contar con un by pass de la bomba de respaldo y así mejorar la confiabilidad en el suministro de agua de torre a cualquiera de las líneas o servicios, en caso de que se requieran hacer labores de mantenimiento o en caso de falla. Para tal fin, se deberán instalar cinco válvulas de 16 pulgadas de la misma marca que estarán normalmente cerradas. A continuación, se muestra un esquema del arreglo antes mencionado.

Fig. 2.5.4. Instalación Mecánica propuesta para by pass con bomba de respaldo.



Fuente: Elaboración propia e información proporcionada por la industria

Para todas las modificaciones descritas, será necesario desarrollar una ingeniería de detalle, que permita tener con precisión cada conexión mecánica, sin embargo, con la ingeniería básica antes mencionada, es posible aproximar los costos de instalación con la ayuda de algún contratista local que actualmente sea proveedor en este tipo de servicios de la industria y conozca las instalaciones actuales de la misma.

2.6. Propuesta del sistema eléctrico y control de suministro de agua de torre.

Todos los equipos de las líneas de producción y servicios, cuentan con válvulas modulantes instaladas y cableadas para suministro de agua de torre; sin embargo, se encuentran fuera de operación ya que no se han programado en los PLC existentes.

Por otro lado, se encuentran instalados CCM's con variadores de velocidad para 75 H.P. y 150 H.P., de los cuales, se utilizarán cinco de 75 H.P. que deberán ser reconfigurados para que controlen los cinco motores nuevos de 40 H.P. ,y también, se les deberá cambiar la



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

protección eléctrica ya que están sobredimensionados para los nuevos requerimientos.

A cada bomba, se les instalará un interruptor de seguridad del tipo “Hand-Switch”, como medida de seguridad.

Se ha propuesto una arquitectura de control, que estará comunicada con el protocolo de comunicación tipo **ETHERNET INDUSTRIAL**, debido a que actualmente la planta ya cuenta con dicha red y su tendencia es integrar todos los elementos de control existentes a este protocolo, a su vez, es preciso indicar que la mayor parte de señales que se requieren ya cuentan con una dirección IP (Por sus siglas en inglés Internet Protocol) que basta con mandarla a llamar en un programa principal para lograr leer su valor. Con esta propuesta, se logrará tener una red flexible y sencilla.

Actualmente se cuenta con un sistema de control para todos los usuarios de agua de torre. En línea 1, se tienen dos PLC : un PLC en proceso de evaporación y otro PLC en el proceso de extracción; en línea 2, también hay dos PLC's: un PLC en el proceso de evaporación y otro PLC en el proceso de extracción ;en línea 3,se tienen igualmente dos PLC: uno para evaporación y otro para extracción; en servicios, existen cuatro PLC's: un PLC General que controla todo el proceso ,otro denominado” Control de tornillo1”, un PLC denominado “Control de tornillo 2” y un PLC denominado “Control de Tornillo 3”. Para el sistema de agua de torre, se cuenta con un PLC independiente que regula el flujo de suministro de agua de torre mediante sistema de bombeo y ventiladores de la torre. Así mismo, cada uno de los PLC cuenta con su propio HMI con los mismos nombres antes mencionados. Se deberán instalar nuevas tarjetas de entradas y salidas digitales y analógicas, en donde así lo requiera por falta de espacio y todas las señales nuevas, deberán integrarse a la red Ethernet existente. Para más precisión, se deberá elaborar la lista de PLC's existentes por áreas de proceso, listas de entradas y salidas de cada PLC, toda la Ingeniería de detalle de Control.

Es necesario diseñar y poner en marcha, un sistema de control distribuido, el cual, gran parte del mismo ya se encuentra integrado en la red de control de la industria. La distribución del sistema, debe ser diseñado en función del proceso que controla y de acuerdo a la línea de producción correspondiente. Se tienen 10 zonas de control, que se distribuyeron de acuerdo a necesidades de producción de los equipos de proceso de la planta que utilizan agua de torre de enfriamiento. En cada zona de proceso que requieran señales de entradas y salidas adicionales a las existentes, se deberán integrar las señales faltantes a los lazos de control de industria correspondientes, según lo descrito en el párrafo anterior y bajo los requerimientos de operación de acuerdo a las necesidades específicas de cada usuario, por lo cual, los flujos de agua de torre de cada equipo de proceso serán controlados por PLC's y



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

HMI's, mediante válvulas modulantes de proceso. Como se mencionó, hay un PLC instalado pero no programado, dedicado exclusivamente al control del sistema de bombeo que suministra agua de torre y solo recibirá señales vía IP de referencia de temperatura, presión y flujo y modulación de válvulas mediante una comunicación industrial tipo ETHERNET, en donde serán procesados cada uno de los datos de acuerdo a las instrucciones alojadas en el programa principal, para poder enviar información a las salidas de cada uno de los PLC's de proceso. El sistema contará con dos formas de operar: en automático y manual. Para más detalle al respecto, se deben consultar con personal de la industria, los requerimientos de operación mínimos y máximos de cada equipo usuario agua de torre.

Existirá una condición de seguridad, la cual contempla que en caso de que falle el PLC de Agua de Torre, cada uno de los PLC de proceso tendrá la capacidad de abrir totalmente las válvulas, solicitando un flujo de agua máximo según los valores de diseño y logrando posteriormente controlar manualmente el flujo de agua de torre directamente en los usuarios.

Para el caso de los cambios propuestos, relativos a los equipos de proceso, se monitoreará el flujo, la presión y la temperatura de entrada de agua de torre según la variable que requiera ser controlada en cada equipo.

La filosofía de control será la siguiente:

A) BOMBAS.

- i) Arranque.-** El arranque se debe efectuar de dos maneras: 1) en forma manual, oprimiendo un botón de arranque que está programado en la pantalla del "panelview" y 2) en forma automática, oprimiendo un botón de control automático, lo que permite que el equipo arranque, dependiendo de las condiciones de presión en el cabezal de distribución correspondiente.
- ii) Paro.-** El paro se efectúa de dos maneras: 1) en forma manual, oprimiendo un botón de paro que está programado en la pantalla del "panelview" y 2) en forma automática, oprimiendo un botón de control automático, lo que permite que el equipo pare, dependiendo de las condiciones de presión en el cabezal de distribución correspondiente.
- iii) Operación.-** El sistema cuenta con cuatro bombas de agua de torre y una de respaldo de 40 H.P., operadas mediante variador de frecuencia ya instalados, que se reutilizarán y deberán ser reconfigurados ya que son de una mayor capacidad al de las



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

bombas que se han calculado.

El PLC recibe la señal analógica de un sensor de presión, instalado a la descarga de cada bomba.

Cuando la presión es mayor al “set point” (término utilizado comúnmente en elementos de control para definir el punto de referencia deseado por el sistema), el PLC envía una señal PID (Proporcional-Integral-Derivativa, que es la estrategia de control más utilizada en control industrial) a los variadores de frecuencia de las bombas para reducir su velocidad. Si esta velocidad permanece más de 5 minutos por debajo de 25 Hz y la presión se mantiene por arriba del “set point”, el controlador envía una alarma de bomba sobredimensionada.

Cuando la presión es menor al “set point”, el PLC envía una señal PID a los variadores de frecuencia de las bombas y aumenta su velocidad. Si esta velocidad permanece más de cinco minutos en 60 Hz y la presión sigue por debajo del “set point”, el controlador envía una alarma de capacidad insuficiente.

B) VÁLVULAS MODULANTES

Los usuarios de agua de torre en la industria, cuentan con una válvula que regula el flujo, en función de la variable de control en el proceso, sin embargo, falta programarlas y se hará dicha programación de acuerdo con lo siguiente:

- i. **Condensadores de Proceso (Evaporadores y Eyectores).**- El PLC que controla el proceso recibe la señal analógica de un sensor de presión ya instalado que mide el nivel de vacío en el equipo.

Cuando la presión es mayor al “set point”, el PLC envía una señal PID al actuador de la válvula que modula el flujo de agua de torre e incrementa su apertura. Si esta apertura permanece más de cinco minutos al 100% y la presión se mantiene por arriba del “set point”, el controlador envía una alarma de enfriamiento insuficiente.

Cuando la presión es menor al “set point”, el PLC envía una señal PID al actuador de la válvula que modula el flujo de agua de torre y disminuye la apertura. Si esta apertura permanece más de cinco minutos al 0% y la presión se mantiene por abajo del “set point”, el controlador envía una alarma de falla de válvula.



- ii. **Condensadores de Refrigeración.-** El equipo que controla la refrigeración recibe la señal analógica de un sensor de presión, instalado a la descarga de los compresores.

Cuando la presión es mayor al “set point”, el PLC envía una señal PID al actuador de la válvula que modula el flujo de agua de torre e incrementa la apertura. Si esta apertura permanece más de cinco minutos al 100% y la presión se mantiene por arriba del “set point”, el controlador envía una alarma de enfriamiento insuficiente.

Cuando la presión es menor al “set point”, el PLC envía una señal PID al actuador de la válvula que modula el flujo de agua de torre y disminuye la apertura. Si esta apertura permanece más de cinco minutos al 0% y la presión se mantiene por abajo del “set point”, el controlador envía una alarma de falla de válvula.

- iii. **Compresores.-** El equipo que controla la operación de los compresores recibe la señal analógica de un sensor que mide la temperatura del aceite de lubricación.

Cuando la temperatura es mayor al “set point”, el PLC envía una señal PID al actuador de la válvula que modula el flujo de agua de torre e incrementa la apertura. Si esta apertura permanece más de cinco minutos al 100% y la temperatura se mantiene por arriba del “set point”, el controlador envía una alarma de enfriamiento insuficiente.

Cuando la temperatura es menor al “set point”, el PLC envía una señal PID al actuador de la válvula que modula el flujo de agua de torre y disminuye la apertura. Si esta apertura permanece más de cinco minutos al 0% y la presión se mantiene por abajo del “set point”, el controlador envía una alarma de falla de válvula.

- iv. **Intercambiadores de calor.-** El PLC que controla el proceso recibe la señal analógica de un sensor que mide la temperatura del fluido a enfriar.

Cuando la temperatura es mayor al “set point”, el PLC envía una señal PID al actuador de la válvula que modula el flujo de agua de torre e incrementa su apertura. Si esta apertura permanece más de cinco minutos al 100% y la temperatura se mantiene por arriba del “set point”, el controlador envía una alarma de enfriamiento insuficiente.

Cuando la temperatura es menor al “set point”, el PLC envía una señal PID al actuador



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

de la válvula que modula el flujo de agua de torre y disminuye la apertura. Si esta apertura permanece más de cinco minutos al 0% y la presión se mantiene por abajo del “set point”, el controlador envía una alarma de falla de válvula.

En todos los casos anteriores, el equipo de control deberá mantener la válvula modulante en 0% de apertura, cuando el usuario de agua de torre correspondiente esté fuera de operación.

C) VENTILADORES DE LA TORRE

- i. **Arranque.-** El arranque se efectúa de dos maneras: 1) en forma manual, oprimiendo el botón de arranque que está programado en la pantalla del “panelview” y 2) en forma automática, oprimiendo el botón de control automático, lo que permite que el equipo arranque, dependiendo de las condiciones de temperatura del agua en el bacín de la torre.
- ii. **Paro.-** El paro se efectúa de dos maneras: 1) en forma manual, oprimiendo el botón de paro que está programado en la pantalla del “panelview” y 2) en forma automática, oprimiendo el botón de control automático, lo que permite que el equipo pare, dependiendo de las condiciones de temperatura del agua en el bacín de la torre.
- iii. **Operación.-** El sistema cuenta con seis ventiladores de torre, operados mediante variador de frecuencia.

El PLC recibe la señal analógica de un sensor de temperatura, instalado en el cabezal de succión de las bombas de agua de torre.

Cuando dicha temperatura es mayor al “set point” (temperatura distintiva), el PLC envía una señal PID a los variadores de frecuencia de los ventiladores y mantiene su velocidad en 60 Hz.

Cuando la temperatura es menor al “set point” (temperatura distintiva), el PLC envía una señal PID a los variadores de frecuencia de los ventiladores y disminuye su velocidad. Si esta velocidad permanece más de cinco minutos en 25 Hz y la temperatura sigue por debajo del “set point”, el controlador para uno de los ventiladores. Si la condición se repite, para otro ventilador y así sucesivamente, hasta que se logre la condición deseada.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Si la temperatura del agua de torre llega a 3 °C, con todos los ventiladores fuera de operación, el controlador envía una alarma de peligro de congelamiento.

Evidentemente, para todo lo anterior, también será necesario desarrollar una ingeniería eléctrica y de control a detalle, en colaboración con los operadores de la planta que permita tener cada lazo de control y set point precisos, sin embargo, con la ingeniería básica antes mencionada es posible aproximar los costos de automatización con la ayuda de algún contratista local que actualmente sea proveedor en este tipo de servicios de la industria y conozca las instalaciones actuales de la misma.

2.7. Cuantificación de los potenciales de ahorro.

Con la nueva propuesta se elaboró la tabla 2.7.1., para determinar la cantidad de energía que se consumirá y así poder verificar los ahorros.

Tabla 2.7.1. Tabla de cálculo del consumo de energía anual propuesto.

ID BOMBA	TIPO DE BOMBA	CAPACIDAD H.P.	TENSIÓN DE OPERACIÓN VOLTS	DÍAS DE OPERACIÓN AL AÑO	HORAS DE OPERACIÓN AL DÍA	HORAS DE DE OPERACIÓN AL AÑO	CONSUMO KWh ANUAL	AÑO DE INSTALACIÓN
BOMBA LINEA 1	VERTICAL	40	440 V	364	20	7,280	217,235.2	PROPUESTA
BOMBA LÍNEA 2	VERTICAL	40	440 V	364	18	6,552	195,511.68	PROPUESTA
BOMBA LÍNEA 3	VERTICAL	40	440 V	364	18	6,552	195,511.68	PROPUESTA
BOMBA SERVICIOS	VERTICAL	40	440 V	364	16	5,824	173,788.16	PROPUESTA
BOMBA RESPALDO	VERTICAL	40	440 V	364	EL CONSUMO DE ESTA BOMBA YA ESTÁ CONSIDERADO PORQUE ES RESPALDO DE LA BOMBA LÍNEA 1, BOMBA LÍNEA 2, BOMBA LÍNEA 3 Y SERVICIOS			PROPUESTA
VENTILADOR 1	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005
VENTILADOR 2	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005
VENTILADOR 3	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005
VENTILADOR 4	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005
VENTILADOR 5	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005
VENTILADOR 6	HORIZONTAL	75	440 V	364	24	8,736	488,779.2	2005



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

TOTAL	3,714,721.92
--------------	---------------------

Fuente: Elaboración propia con información de la industria

De acuerdo a la tabla 2.7.1 se observa que si se lleva a cabo la instalación del sistema propuesto sin considerar el ahorro debido a la configuración de los variadores de velocidad y la puesta en marcha del sistema de control automático de modulación de válvulas de agua de torre, en total se tendría un consumo anual de 3,714,721.92 kWh.

Y la cantidad de agua a consumir se muestra en la tabla 2.7.2:

Tabla 2.7.2. Tabla de cálculo de consumo de agua anual actual y propuesto.

INSTALACIÓN	Flujo Agua Actual	Flujo Agua Actual	Flujo Agua Propuesto	Flujo Agua propuesto
	(m ³ /h)	litro/hora	(m ³ /h)	litro/hora
TOTAL LÍNEA 1	787	787,000	561	561,000
TOTAL LÍNEA 2	1,538	1,538,000	842	842,000
TOTAL SERVICIOS	248	248,000	600	600,000
TOTAL LÍNEA 3	226	226,000	490	490,000
TOTAL	2,799	2,799,000	2,493	2,493,000

Fuente: Elaboración propia con información de la industria

Sin considerar los fenómenos por evaporación ni el vaciado de agua en líneas de producción (cuando es necesario parar alguna línea por razones de mantenimiento), la torre de enfriamiento anualmente requiere para su operación 2,799,000 litros que recirculan en los procesos, ya que solo se vacía la torre una vez al año durante el paro total programado en industria. Con la propuesta realizada y bajo estas mismas consideraciones, la industria requeriría recircular para su operación 2,493,000 litros.

La industria tiene un denominado “Master plan”, en el que se han determinado los costos promedio por concepto de agua y energía, de acuerdo a información de la industria, proyecciones para el año 2013 y a información estadística de la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se estimó por personal de la industria que en promedio el costo por concepto de energía se estimó en 1.55 \$/ kWh y el costo promedio por concepto de agua se ha estimado en 1.10 \$/litro.

Por tanto, los ahorros en energía, agua y económicos son:

De acuerdo a la tabla 2.7.3, se estima que el ahorro en energía será de 5,490,620 kWh/año y el ahorro económico propuesto por concepto del pago de energía es de



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

\$8,510,460.50 anuales.

Tabla 2.7.3. Tabla de cálculo de ahorros por consumo de energía.

AHORROS POR CONSUMO DE ENERGÍA						
Consumo de Energía Actual	Consumo de Energía Propuesta	Costo Estimado (Master Plan)	Consumo de Energía Actual	Consumo de Energía Propuesto	Ahorro de energía	Ahorro económico por concepto de energía
kWh/Año	kWh/Año	\$/kWh	\$/Anual	\$/Anual	kWh/Año	\$/Anual
9,205,341.6	3,714,721.92	\$ 1.55	\$ 14,268,279.48	\$ 5,757,818.98	5,490,620	\$ 8,510,460.50

Fuente: Elaboración propia con información de la industria

En la tabla 2.7.4. se observa que el ahorro en agua estimado es de 306,000 litros por año y en consecuencia es posible ahorrar \$ 336,000 al año por concepto de pago de agua anualmente.

Tabla 2.7.4. Tabla de cálculo de ahorros por consumo de agua.

AHORROS POR CONSUMO DE AGUA						
Consumo de Agua Actual	Consumo de Agua Propuesto	Costo Estimado (Master Plan)	Consumo de Agua Actual	Consumo de Agua Propuesto	Ahorro de agua	Ahorro económico por concepto de agua
Litro/Año	Litro/Año	\$/Litro	\$/Anual	\$/Anual	Litro/Año	\$/Anual
2,799,000	2,493,000	\$ 1.10	\$ 3,078,900.00	\$ 2,742,300.00	306,000	\$ 336,600.00

Fuente: Elaboración propia con información de la industria

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

De acuerdo a la tabla 2.7.5., el ahorro económico total propuesto anual es de:

\$ 8,847,060.50 pesos M.N.

Tabla 2.7.5. Tabla de resumen de ahorros propuestos

Resumen de Ahorros		
CONCEPTO	CANTIDAD	UNIDAD
Consumo actual de agua	2,799,000	Litro/año
Consumo propuesto de agua	2,493,000	Litro/año
Costo actual por concepto de agua	\$ 3,078,900.00	\$/año
Costo propuesto por concepto de agua	\$ 2,742,300.00	\$/año
Ahorro en agua	306,000	Litro/año
Ahorro económico propuesto por concepto de pago de agua	\$ 336,600.00	\$/año
Ahorro en agua	10.93	%
Ahorro económico propuesto por concepto de pago de agua	10.93	%
Consumo actual de energía	9,205,341.6	kWh/año
Consumo propuesto de energía	3,714,721.92	kWh/año
Costo actual por concepto de energía	\$14,268,279.48	\$/año
Costo propuesto por concepto de energía	\$ 5,757,818.98	\$/año
Ahorro en energía	5,490,619.68	kWh/año
Ahorro económico propuesto por concepto de pago de energía	\$ 8,510,460.50	\$/año
Ahorro en energía	59.65	%
Ahorro económico propuesto por concepto de pago de energía	59.65	%
Costo total actual por concepto de agua y energía	\$17,347,179.48	\$/año
Costo total propuesto por concepto de agua y energía	\$ 8,500,118.98	\$/año
Ahorro económico total propuesto por concepto de pago de agua y energía	\$ 8,847,060.50	\$/año
Ahorro económico total propuesto por concepto de pago de agua y energía	51.00	%

Fuente: Elaboración propia con información de la industria

A lo anterior, se le adicionarán los ahorros que conlleve el sistema de control para las válvulas modulantes ya instaladas, la reconfiguración y reconexión de variadores de velocidad que se instalen en las nuevas bombas y ventiladores de la torre de



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

enfriamiento que para efectos de estimación de los ahorros no fueron cuantificados por la complejidad que llevaría incluirlos, aunado a la falta de ingeniería de detalle.

En seguida, se muestra la evaluación económica del proyecto de modificación del sistema de bombeo de agua de torre.

CAPÍTULO III. EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA

3.1. Presupuesto de la ejecución del proyecto

Con la finalidad de obtener una cotización aproximada de los costos que implica ejecutar este proyecto, se proporcionaron los datos de ingeniería básica expuesta en el capítulo anterior a dos empresas contratistas de la industria a quienes de manera verbal se les explicó el proyecto y con quienes se hizo un recorrido en las instalaciones de la industria para conocer a grandes rasgos los trabajos por desarrollar.

El presupuesto que se presenta a continuación fue elaborado en base a cotizaciones preliminares de estas dos empresas proveedoras de servicios en la industria y en base a la exposición del proyecto con el respectivo recorrido al lugar de los trabajos por desarrollar. Es un presupuesto con precios elevados respecto a los precios que normalmente contrata la industria ya que son partidas aproximadas y estimadas con la finalidad de tener un costo máximo posible para poder evaluar su rentabilidad. Si se desea conocer a detalle y con exactitud un presupuesto, previamente será necesario desarrollar toda una ingeniería de detalle, pero para fines prácticos es conveniente considerar la tabla 3.1.1.

Tabla 3.1.1. Tabla de presupuesto de componentes principales estimados

PRESUPUESTO DE COMPONENTES PRINCIPALES ESTIMADOS DEL PROYECTO DE MODIFICACIÓN DE SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA DE TORRE					
PARTIDA	CONCEPTO	UNIDAD	CANT	P.U.	PRECIO TOTAL
OBRA MECÁNICA					
MEC-01	DESARROLLO DE INGENIERÍA DE DETALLE EN OBRA MECÁNICA PARA INSTALACIÓN DE 5 BOMBAS DE 40 H.P. DE AGUA DE TORRE, DESMANTELAMIENTOS EN CABEZAL DE SUMINISTRO DE AGUA ACTUAL A PROCESOS Y MODIFICACIONES EN INSTALACIÓN MECÁNICA. INCLUYE: CARPETA DE ENTREGABLES TÉCNICOS ESPECIFICADOS EN CONTRATO EN ARCHIVO DIGITAL E IMPRESO HASTA ENTERA SATISFACCIÓN DE LA INDUSTRIA.	LOTE	1	\$ 176,500.00	\$ 176,500.00



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

MEC-02	CONSTRUCCIÓN DE BASES DE CONCRETO EN CUARTO DE MÁQUINAS CON LOS NIVELES DE COMPACTACIÓN Y RESISTENCIA REQUERIDOS PARA SOPORTAR 5 BOMBAS CON SUS RESPECTIVOS RIELES DE ESTRUCTURA METÁLICA PARA SU FIJACIÓN. INCLUYE: DEMOLICIONES, MATERIALES, MANO DE OBRA, ACARREOS, EQUIPO Y HERRAMIENTA.	LOTE	1	\$ 104,000.00	\$ 104,000.00
MEC-03	SUMINISTRO DE BOMBAS DE 40 H.P., TRIFÁSICAS DE 440 VOLTS, 60 Hz, 1200 RPM, MARCA ARMSTRONG MODELO 4300. INCLUYE: SUMINISTRO DE IMPULSOR DE 11.50 PULGADAS MARCA ARMSTRONG. FLETES Y MANIOBRAS DE DESCARGA HASTA ALMACÉN INDICADO POR INDUSTRIA.	PZA	5	\$ 475,000.00	\$ 2,375,000.00
MEC-04	SUMINISTRO DE MATERIALES Y MANO DE OBRA PARA INSTALAR 5 BOMBAS VERTICALES DE 40 H.P. PARA ALIMENTACION AGUA DE TORRE A LÍNEAS DE PRODUCCIÓN 1,2,3, SERVICIOS Y RESPALDO PROVENIENTES DEL CABEZAL PRINCIPAL EXISTENTE. INCLUYE: SOLDADURAS CON ARGÓN, MATERIALES, TUBERÍA DE 16" Y 12" CON SUS RESPECTIVAS REDUCCIONES Y BRIDAS, MANO DE OBRA, EQUIPO, HERRAMIENTA, CONSUMIBLES Y MANIOBRAS NECESARIAS CON GRÚA TELESCÓPICA.	LOTE	1	\$ 234,000.00	\$ 234,000.00
MEC-05	SUMINISTRO DE MATERIALES Y MANO DE OBRA PARA INSTALAR 5 BOMBAS DE PROCESO CON CABEZALES INDEPENDIENTES NUEVOS PARA SUCCIÓN DE 12" CON VALVULAS Y ACCESORIOS. INCLUYE: MATERIALES, CONSUMIBLES, SOLDADURA EN ARGÓN, TUBERÍA DE ACERO AL CARBÓN, EQUIPO, HERRAMIENTA Y MANO DE OBRA.	LOTE	1	\$ 76,000.00	\$ 76,000.00
MEC-06	SUMINISTRO DE MATERIALES Y MANO DE OBRA PARA REINSTALAR MECÁNICAMENTE VÁLVULAS DE CONTROL CON BY PASS EN EQUIPOS CONSUMIDORES DE AGUA DE TORRE EN LINEA 1.	PZA	3	\$ 425.00	\$ 1,275.00
MEC-07	SUMINISTRO DE MATERIALES Y MANO DE OBRA PARA REINSTALAR VÁLVULAS DE CONTROL CON BY PASS EN EQUIPOS CONSUMIDORES DE AGUA DE TORRE EN LINEA 2	PZA	2	\$ 470.00	\$ 940.00
MEC-08	SUMINISTRO DE MATERIALES Y MANO DE OBRA PARA INSTALAR VÁLVULAS PARA BY PASS DE RESPALDO EN LÍNEA 1,2,3 Y SERVICIOS. INCLUYE: SUMINISTRO DE VÁLVULAS DE 16" TIPO MARIPOSA DE LA MARCA KEYSTONE CON SUS RESPECTIVAS BRIDAS Y SOLDADURA CON ARGÓN, ACCESORIOS DE ACERO AL CARBÓN, EQUIPO, HERRAMIENTA Y MANO DE OBRA.	PZA	5	\$ 63,500.00	\$ 317,500.00
MEC-09	SUMINISTRO DE MATERIALES Y MANO DE OBRA PARA FABRICAR EN INSTALAR UN RIEL CON POLIPASTO CAPACIDAD DE CARGA 3000 kg/cm ² .	PZA	1	\$ 15,000.00	\$ 15,000.00
MEC-10	SUMINISTRO DE MATERIALES Y MANO DE OBRA PARA DESMANTELAR TUBERÍA DE 20" DE CABEZAL ACTUAL, 15 LÍNEAS DE TUBERÍA DE 16" DE SUMINISTRO DE AGUA DE TORRE ACTUAL, DESMONTE DE 15 VÁLVULAS DE MARIPOSA DE 16" CON SU RESPECTIVA RECUPERACIÓN. INCLUYE: MATERIALES, EQUIPO, MANO DE OBRA, HERRAMIENTAS, ACARREO Y ALMACENAMIENTO DE MATERIAL DESMANTELADO EN ÁREA DE DESPERDICIO INDUSTRIAL DE LA PLANTA.	LOTE	1	\$ 70,000.00	\$ 70,000.00
MEC-11	REUBICACION DE ESCALERA MARINA EN AREA DE CUARTO DE MÁQUINAS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	LOTE	1	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00

TOTAL: OBRA MECÁNICA

OBRA ELÉCTRICA Y DE AUTOMATIZACIÓN



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

EYA-01	DESARROLLO DE INGENIERÍA DE DETALLE EN OBRA ELÉCTRICA Y AUTOMATIZACIÓN PARA INSTALACIÓN DE 5 BOMBAS DE 40 H.P. DE AGUA DE TORRE, DESMANTELAMIENTOS EN CABEZAL DE SUMINISTRO DE AGUA ACTUAL A PROCESOS Y MODIFICACIONES EN INSTALACIÓN MECÁNICA. INCLUYE: CARPETA DE ENTREGABLES TÉCNICOS ESPECIFICADOS EN CONTRATO EN ARCHIVO DIGITAL E IMPRESO HASTA ENTERA SATISFACCIÓN DE LA INDUSTRIA.	LOTE	1	\$ 145,000.00	\$ 145,000.00
EYA-02	REINSTALACIÓN DE CONEXIONES ELÉCTRICAS PARA 16 VÁLVULAS DE CONTROL, INCLUYE MATERIALES, MANO DE OBRA, EQUIPO Y HERRAMIENTA. NOTA: EL CABLEADO SE HARÁ SOBRE CHAROLA TIPO CABLOFIL EXISTENTES Y NUEVAS.(NO CONSIDERAR LA CHAROLA EN ESTA PARTIDA)	m	192	\$ 85.00	\$16,320.00
EYA-03	INSTALACIÓN DE CONEXIONES DE MEDIDORES (5 DE FLUJO, 7 DE PRESIÓN Y 6 DE TEMPERATURA), INCLUYE: MATERIALES, CABLEADO DE 10 M C/U, CALIBRACIÓN, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA. NOTA: LOS MEDIDORES YA ESTÁN INSTALADOS EN LA INDUSTRIA. (NO INCLUYE CERTIFICADOS DE CALIBRACION CON TRAZABILIDAD.)	PZA	18	\$ 3,250.00	\$58,500.00
EYA-04	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UN PLC MARCA ALLEN BRADLEY MODELO COMPACT LOGIX MODELO 1769-L24QB1B, INCLUYE: SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE PLC, CABLEADO Y FUENTE DE ALIMENTACIÓN, BASES DE SUJECIÓN, MATERIALES, EQUIPO, HERRAMIENTA Y MANO DE OBRA.	PZA	1	\$ 32,655.00	\$32,655.00
EYA-05	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UNA TARJETA MARCA ALLEN BRADLEY MODELO FLEX I/O ANALOGUE COMBO 1794-IE-4XOE2. INCLUYE: BASES DE SUJECIÓN, MATERIALES, EQUIPO, HERRAMIENTA Y MANO DE OBRA.	PZA	2	\$ 23,280.00	\$46,560.00
EYA-06	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UNA TARJETA MARCA ALLEN BRADLEY MODELO FLEX I/O DE ENTRADAS ANALÓGICAS PARA PLC COMPACT LOGIX. INCLUYE: MATERIALES, EQUIPO, HERRAMIENTA Y MANO DE OBRA.	PZA	1	\$ 14,320.00	\$14,320.00
EYA-07	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UNA TARJETA MARCA ALLEN BRADLEY MODELO FLEX I/O DE SALIDAS ANALÓGICAS COMPATIBLE CON FLEXLOGIX 5434. INCLUYE MATERIALES, EQUIPO, HERRAMIENTA Y MANO DE OBRA.	PZA	1	\$ 22,450.00	\$22,450.00
EYA-08	PROGRAMACIÓN DE NUEVAS SALIDAS ANALÓGICAS E INTEGRACIÓN A PLCS DE PROCESO (2 EN PLC EXTRACC L3, 1 EN PLC EVAP L3, 4 EN PLC EVAP L2, 2 EN PLC EXTRACC L2, 1 EN PLC EXTRACC L1, 4 EN PLC EVAP L1, 1 EN PLC CONTROL DE TORNILLO 1, 1 EN PLC CONTROL DE TORNILLO 2, 1 EN PLC CONTROL DE TORNILLO 3) INCLUYE: USO DE LICENCIAS DE SOFTWARE, MANO DE OBRA CERTIFICADA POR ALLEN BRADLEY O RISOUL, PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA DE SISTEMA.	SEÑAL ANALÓGICA	17	\$ 2,800.00	\$47,600.00
EYA-09	PROGRAMACIÓN DE NUEVAS ENTRADAS ANALÓGICAS E INTEGRACIÓN A PLCS DE PROCESO (2 EN PLC EVAP L2, 3 EN PLC EXTRACC L2, 3 EN PLC EXTRACC L1, 2 EN PLC EVAP L1, 4 EN PLC CONTROL DE TORNILLO 3) INCLUYE: CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN, USO DE LICENCIAS DE SOFTWARE, MANO DE OBRA CERTIFICADA POR ALLEN BRADLEY O RISOUL, PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA DE SISTEMA.	SEÑAL ANALÓGICA	14	\$ 2,800.00	\$39,200.00



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

EYA-10	CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE AGUA DE TORRE EN PLC EXISTENTE E INTEGRACIÓN A LA RED DE CONTROL ETHERNET INDUSTRIAL DE INDUSTRIA BAJO PROTOCOLOS ESTANDARIZADOS POR NESTLÉ. INCLUYE: CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN, USO DE LICENCIAS DE SOFTWARE, MANO DE OBRA CERTIFICADA POR ALLEN BRADLEY O RISOU, PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA DE SISTEMA. NOTA: EL PLC YA CUENTA CON RED DE CONTROL ETHERNET	LOTE	1	\$ 305,000.00	\$305,000.00
EYA-11	REINSTALACIÓN Y RECONFIGURACIÓN DE VARIADORES DE VELOCIDAD MARCA DANFOSS PARA BOMBAS DE AGUA DE TORRE. INCLUYE: SUMINISTRO DE MATERIALES Y CONSUMIBLES PARA LA INSTALACIÓN EN GABINETES, APRIETE DE BORNES, CONEXIONES ELÉCTRICAS, CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN, USO DE LICENCIAS DE SOFTWARE, MANO DE OBRA CERTIFICADA POR ALLEN BRADLEY O RISOU, PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA	PZA	5	\$ 26,300.00	\$131,500.00
EYA-12	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CONDUCTOR DE COBRE TIPO TRIFÁSICO PLANO PARA BOMBA CALIBRE 4 AWG , 600V A 75°C CUBIERTA EXTERIOR DE PVC. INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	m	150	\$ 370.00	\$55,500.00
EYA-13	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CHAROLA DE 3 M TIPO MALLA CABLOFIL DE ACERO INOXIDABLE 304 L CÉDULA CF105/150 INCLUYE: SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE SOPORTERÍAS, SOLDADURAS REQUERIDAS, MATERIALES, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	PZA	8	\$ 3,577.00	\$28,616.00
EYA-14	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CHAROLA DE 3 M TIPO MALLA CABLOFIL DE ACERO INOXIDABLE 304 L CÉDULA CF54/50 INCLUYE: SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE SOPORTERÍAS, SOLDADURAS REQUERIDAS, MATERIALES, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	PZA	12	\$ 1,906.00	\$22,872.00
EYA-15	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO SQUARE D KAL DE 3 POLOS 25 KA 480 VCA DE 75 A CLASE 650 PARA BOMBA DE 40 HP INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	PZA	5	\$ 10,650.00	\$53,250.00
EYA-16	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE INTERRUPTOR DE SEGURIDAD TIPO HAND SWITCH (PARO DE EMERGENCIA) PARA BOMBAS. INCLUYE: RELEVADOR DE SEGURIDAD, CABLEADOS, BOTONERAS, CONEXIONES, MATERIALES, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	PZA	5	\$ 11,200.00	\$56,000.00
EYA-17	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE GABINETE DE ACERO INOXIDABLE CON MIRILLA DE ACRÍLICO (800X1000X300 CM) CON CLEMAS DE CONEXIÓN Y RIEL DE SOPORTE PARA ALOJAR NUEVO PLC EN ÁREA DE SERVICIOS, INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	PZA	1	\$ 18,200.00	\$18,200.00
EYA-18	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE GABINETE DE ACERO INOXIDABLE CON MIRILLA DE ACRÍLICO (800X1000X300 CM) CON CLEMAS DE CONEXIÓN Y RIEL DE SOPORTE PARA ALOJAR NUEVO PLC EN ÁREA DE SERVICIOS, INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	PZA	1	\$ 18,200.00	\$18,200.00
EYA-19	VIÁTICOS	LOTE	1	\$ 85,000.00	\$85,000.00
TOTAL: OBRA ELÉCTRICA Y AUTOMATIZACIÓN					
TOTAL :PRESUPUESTO DE COMPONENTES PRINCIPALES ESTIMADOS DEL PROYECTO DE MODIFICACIÓN DE SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA DE TORRE					\$ 4,586,958.00

Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por la industria y dos empresas contratistas de servicios de la industria.

En el presupuesto anterior se observa que la inversión requerida aproximada es de **\$4,586,958.00 (Cuatro millones quinientos ochenta y seis mil novecientos cincuenta y ocho pesos 00/100 M.N.)** para desarrollar trabajos de ingeniería



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

mecánica, eléctrica y automatización. Cabe resaltar que es una aproximación, ya que para tener un presupuesto exacto es necesario desarrollar la ingeniería de detalle correspondiente.

3.2. Estudio de rentabilidad de proyecto

Con la finalidad de evaluar la rentabilidad de proyecto, es preciso definir lo siguiente:

El Valor Presente Neto (VPN): Es un método que consiste en transformar a valor presente, vía una tasa de descuento, todos los componentes del flujo de fondos de un proyecto. Si la inversión total (S_0) se realiza en el tiempo cero ($t=0$ normalmente representa momento del inicio de operaciones), el valor presente neto es la diferencia entre dicha inversión y el flujo futuro de fondos actualizado. El VPN representa, en valor presente (VP), la magnitud absoluta en que los ingresos equivalentes de un flujo de caja superan a, o son superados por, los egresos equivalentes de dicho flujo.

$$VPN = -S_0 + \frac{S_1}{(1+i)} + \frac{S_2}{(1+i)^2} + \frac{S_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{S_n}{(1+i)^n}$$

$$VPN = -S_0 + \sum_i^n \frac{S_i}{(1+i)^i}$$

Para el caso del presente proyecto:

$$VPN = VP \text{ de beneficios por ahorro} - VP \text{ de costos de inversión}$$

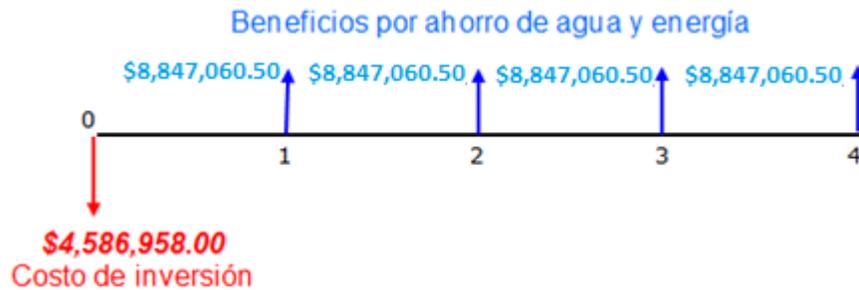
Generalmente se toma en cuenta el valor del dinero en el tiempo, cabe destacar que la tasa de descuento o de actualización (i) apropiada se determinó externamente al proyecto, tomando como referencia el uso alternativo que se le puede dar al dinero y el riesgo de realizar la inversión. **Es común utilizar indebidamente como tasa de descuento, la tasa de interés que se paga por la deuda, en lugar de un valor mayor que tome en cuenta el costo de oportunidad para el inversionista y que es denominada como tasa de rendimiento mínima atractiva (TREMA).** Esta tasa puede calcularse como la tasa que se ganaría en una inversión sin riesgo, más una prima por el nivel de riesgo del proyecto.

El área de contabilidad de la industria informó que la TREMA estimada para este tipo de proyectos es de 17%.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

En la figura 3.1.1., se observa el flujo de efectivo de éste proyecto evaluado a 4 años, a su vez, en el inicio del proyecto (año $t=0$) se requiere una inversión de 4,586,958.00, y durante los próximos 4 años se tendrá un beneficio económico derivado del ahorro de \$8,847,060.50 anuales.

Fig. 3.1.1. Instalación Mecánica propuesta para by pass con bomba de respaldo.



Fuente: Elaboración propia y Tabla 2.7.3, 2.7.4, 2.7.5 y 3.1.1.

La Relación Beneficio Costo (RBC): Es el cociente entre el valor presente de los resultados de operación (ingresos por beneficios menos costos de inversión) entre el valor presente del costo de inversión.

Los costos se consideran con signo positivo, ya que el objetivo de este indicador es evaluar, en valor presente, la proporción en que los beneficios superan, o son superados, por los costos del proyecto.

El criterio de decisión, es emprender el proyecto cuando la relación beneficio/costo sea mayor que uno. Cabe notar que cuando la RBC es igual a 1, el valor presente neto y la anualidad equivalente son cero.

La Tasa Interna de Retorno (TIR): es un índice de rentabilidad ampliamente aceptado. Se define como la tasa de interés "i" que reduce a cero el valor presente de una serie de ingresos y egresos.

En términos económicos, la TIR representa el porcentaje o tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, en forma tal, que al final de la vida del proyecto este saldo sea igual a cero. El saldo no recuperado de la inversión en cualquier punto del tiempo de la vida del proyecto es la fracción de la inversión original que aún permanece sin recuperar en ese momento. El concepto de la TIR es equivalente al de tasa de interés de un crédito, que se aplica sobre el saldo insoluto.

La regla de decisión es emprender el proyecto si TIR es mayor o igual que TREMA y rechazarlo en caso contrario. Por último, es evidente que la TIR no se puede calcular si



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

se tiene para un proyecto de inversión con un flujo de efectivo formado en su totalidad por costos, o bien por ingresos.

Muy importante de destacar es que la TIR supone que los ingresos del proyecto se reinvierten a la misma TIR, es decir, supone que existen oportunidades de inversión igualmente rentables a las cuales destinar los ingresos del proyecto (es decir, los ahorros de dinero resultantes de comparar una tecnología eficiente vs. una convencional), lo cual no siempre sería válido.

En algunos proyectos, tales como reemplazo de equipos o ahorro de energía, es posible encontrar que la TIR es muy superior a TREMA. Debido al supuesto antes mencionado, cuando no tenemos más proyectos tan atractivos, **debe utilizarse la tasa interna de retorno modificada (TIRM), como una medida más realista de rendimiento**, que supone que los beneficios del proyecto se reinvierten a tasas razonables de lograr, por ejemplo TREMA.

Cabe aclarar que esta función tiene dos tasas: (i) de financiamiento, para considerar los intereses durante el periodo de construcción del proyecto, la cual se aplica solo cuando los desembolsos de inversión se realizan en más de un periodo, y (ii) de reinversión, que es normalmente TREMA.

A este respecto se debe notar que la $TREMA < TIRM < TIR$.

Excel tiene las funciones programadas que permiten realizar los cálculos de dichas tasas en forma directa y basta con meterle los datos necesarios.

El Periodo de Recuperación de la Inversión (PR): En su versión simple (**PR simple**), es un método que consiste en medir el tiempo que tarda un inversionista para recuperar, mediante los ingresos netos (en moneda constante para monedas débiles o en moneda corriente para las fuertes) que produce el proyecto, la cantidad invertida inicialmente. Cuando se basa en el flujo de efectivo en moneda constante, considera únicamente a la inflación como medida del valor del dinero en el tiempo. El criterio de aceptación del proyecto lo establece el inversionista definiendo el periodo máximo en que debe de recuperarse la inversión. La gerencia de industria ha definido que el periodo máximo en este tipo de proyectos debe ser de dos años.

Por otro lado el periodo de recuperación **descontado (PR descontado)**, que se calcula a partir del valor presente de los flujos netos. Con este criterio, no se asigna el total de los flujos netos para recuperar la inversión, sino sólo la fracción de ellos que queda una vez que se descuenta el costo de oportunidad del dinero (medido mediante la tasa de descuento). De esta manera, salva casi todos los inconvenientes de la versión simple.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Así, un proyecto es atractivo si su periodo de recuperación descontado es menor o igual a la vida útil del mismo.

Cabe notar que el PR simple < PR descontado.

En base a la información revisada, se procedió a elaborar la tabla 3.2.1. para calcular el VPN del proyecto, PR simple, PR descontado, RBC, TIR y TIRM partiendo de una TREMA del 17% y también se deben tomar en cuenta los resultados obtenidos anteriormente en la tabla 2.7.5. y la tabla 3.1.1. Básicamente nos interesan los siguientes datos:

1. Que el costo total de inversión para modificar el sistema de bombeo actual es de: \$4, 586, 958.00.
2. Que el ahorro de energía anual propuesto es de \$8, 847,060.50.

El presente proyecto se ha evaluado en un periodo de 4 años para determinar su rentabilidad. Resulta conveniente recalcar, que no se han considerado costos nivelados de la energía para los últimos tres años y se ha tomado como referencia el costo de energía estimado por la industria para este año.

Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

Tabla 3.2.1. Tabla de cálculo de rentabilidad del proyecto.

ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO							
Año	Costos de inversión	Utilidad sin considerar precios nivelados	Incremental (Actual-Propuesto)				
T	Flujo Efectivo (a final de periodo)		Flujo Efectivo (a final de periodo)	$1/(1+i)^t$	VP Flujo Efec.	Flujo Efectivo	VP Flujo Efec.
				17%		Acumulado	Acumulado
0	\$4,586,958.00	\$ -	-4,586,958	1.000	-4,586,958	-4,586,958	-4,586,958
1	\$ -	\$8,847,060.50	8,847,061	0.855	7,561,590	4,260,103	3,641,113
2	\$ -	\$8,847,060.50	8,847,061	0.731	6,462,898	13,107,163	9,574,960
3	\$ -	\$8,847,060.50	8,847,061	0.624	5,523,844	21,954,224	13,707,571
4	\$ -	\$8,847,060.50	8,847,061	0.534	4,721,234	30,801,284	16,437,107
			Suma VP flujos ahorros		24,269,566	0.52	0.61
			Suma VP total flujos		19,682,608	PR simple	PR descontado
VPN	4,586,958	24,269,566	19,682,608				
RBC				5.29	La RBC > 1		
TIR				190.15%	PR simple < PR descontado y ambos < 1 año		
TIRM				77.45%	El VPN es positivo		
TREMA				17.0%	La TREMA < TIR < TIRM		

Fuente: Elaboración propia, información proporcionada por la industria y Tabla 2.7.3., 2.7.4., 2.7.5. y 3.1.1.

De la tabla 3.2.1. es posible observar que:

Inicialmente el VPN es positivo, lo cual indica que los beneficios son mayores que la inversión.

La RBC es de 5.29 por lo que resulta atractiva, ya que es superior a 1 y por tanto es un proyecto factible.

El PR simple es de 0.52 años y el PR descontado de 0.61 años. Dado que la industria para este tipo de proyectos tiene asignado un periodo máximo de 2 años, los valores de PR obtenidos, lo hacen un proyecto viable en este aspecto.

La TIR con un valor de 190.15% es mayor que la TIRM y al mismo tiempo, la TIRM DE 77.45% es muy superior a la TREMA de 17% planteada por la industria.

Por todo lo anterior, se verifica que el proyecto es rentable, por lo que se recomienda que la industria debe invertir en él, ya que adicionalmente a los beneficios económicos, es posible: disminuir los paros de línea no programados debidos a falla en el sistema



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

de bombeo actual, mejorar el desempeño del sistema, mejora e incremento de inversión en la infraestructura actual, disminución de los costos de mantenimiento y operación del sistema y tener ventajas medioambientales debidas a la reducción en el consumo anual de agua y energía.



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

CONCLUSIONES

Se observó que el sistema de bombeo actual está mal diseñado, y por consiguiente, presenta un excesivo consumo de energía y agua, ya que tiene instaladas bombas de 150 H.P. y bombas de 75 H.P. que suministran flujos de agua de torre mayores a los flujos de diseño a algunos usuarios.

No fue viable la conexión en serie de algunos equipos de línea 1 y línea 2, ya que los ahorros no fueron representativos y por otros motivos no los aceptó la gerencia de la industria.

Resultó viable independizar el suministro de agua de torre para cada una de las líneas de suministro y se calculó que el NPSH requerido de línea 1 es de 3.426 m, en línea 2 de 3.266 m, en línea 3 de 3.536 m y en servicios de 3.446 m. Por tal motivo, solo se requieren cuatro bombas de 40 H.P. con impulsores de 11.50 pulgadas que ofrecen un NPSH disponible superior al requerido, lo cual permite, además de asegurar un adecuado suministro de agua de torre a sus diversos usuarios, tener un sistema capaz de dar servicio a futuros equipos usuarios de agua de torre que requieran ser conectados a cada línea de producción. Adicionalmente, se planteó la instalación de una bomba de respaldo de 40 H.P. y un impulsor de 11.50 pulgadas para facilitar las labores de mantenimiento y evitar paros no programados.

Al poner en marcha el sistema de control con válvulas modulantes para cada usuario y la reconfiguración de variadores de velocidad para los motores de las bombas y los ventiladores de la torre, es posible ordenar el suministro de agua a los diversos usuarios, además de generar ahorros de energía, agua y económicos que no han sido cuantificados.

Para verificar los ahorros propuestos, se debe integrar la instalación de un sistema automatizado para monitorear el consumo de energía.

Es necesario hacer a detalle una ingeniería mecánica, eléctrica y de control, para todos los cambios propuestos.

Con la propuesta de modificación del sistema de bombeo y la estrategia de control de motores, es posible garantizar un adecuado servicio de suministro de agua de torre de enfriamiento con un ahorro anual de 5, 490, 619.68 kWh en energía y 306,000 litros de agua.

La inversión inicial de éste proyecto es de \$4,586,958.00 y los ahorros económicos



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

anuales son de \$8,847,060.50

Es un proyecto rentable porque en el análisis económico del proyecto, evaluado en un periodo de cuatro años, se obtuvo un VPN positivo, lo cual indica que los beneficios son mayores que la inversión; la RBC calculada fue 5.29 y al ser superior a 1, es un proyecto factible; el PR simple calculado es 0.52 años y el PR descontado es 0.61 años, dado que la industria para este tipo de proyectos tiene asignado un periodo máximo de 2 años, los valores de PR obtenidos, lo hacen un proyecto viable en este aspecto; la TIR con un valor de 190.15% es mayor que la TIRM y al mismo tiempo, la TIRM DE 77.45% es muy superior a la TREMA de 17% planteada por la industria.

Es un proyecto que se alinea al master plan de la industria y resulta ser un proyecto técnicamente viable porque mejora las condiciones de operación de la industria, ambientalmente factible al disminuir la cantidad de agua y energía que se consume actualmente y económicamente rentable, porque la inversión permite mejorar la infraestructura actual y al mismo tiempo, genera beneficios económicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN, NUEVAS TECNOLOGÍAS Y DE R.S.U. S.A. DE C.V. **[Proyecto ejecutivo de un sistema de bombeo de agua potable]**. Documento vendido a una industria alimenticia. Edo.Méx.,Méx., pp. 1-89.
2. CONUEE.<>[http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/Que_es_conae][Fecha de consulta: 03 de Marzo de 2013].
3. TUTORIAL DE HIDRÁULICA EN LÍNEA EN LÍNEA.<>[http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial_10.htm] [Fecha de consulta: 14 de Abril de 2013].
4. PRONTUARIO DE PÉRDIDA DE CARGAS.<>[<http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>][Fecha de consulta: 21 de Abril de 2013].
5. TABLA AUTOMÁTICA DE CONVERSIÓN DE UNIDADES.<>[<http://www.alfabuceo.cl/conversiones.htm>] [Fecha de consulta: 21 de Abril de 2013].
6. DIAGRAMA DE MOODY .<>[http://www.unioviedo.es/Areas/Mecanica.Fluidos/investigacion/_publicaciones/Libros/LibroSistemasdeBombeo/index.php?page=1] [Fecha de consulta: 07 de Julio de 2013].
7. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE BOMBAS ARMSTRONG.<>[http://www.armstrongpumps.com/present.asp?content=performancecurve&market_sectionID=02&classID=01&modelID=003] [Fecha de consulta: 24 de Julio de 2013].
8. APUNTES DE LA MATERIA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE



Proyecto de ahorro de energía en el sistema de bombeo de agua de una torre enfriamiento.

PROYECTOS, PROPORCIONADOS POR EL M. EN C. LUIS FERNÁNDEZ GONZÁLEZ. <> [Archivo digital "Curso Eval Proyectos - UNAM-nov 2010 Parte I.pptx"]
[Fecha de consulta: 02 de Agosto de 2013]. pp. 0-55.

9. NOTA: Se utilizó información recopilada directamente con personal de la industria.

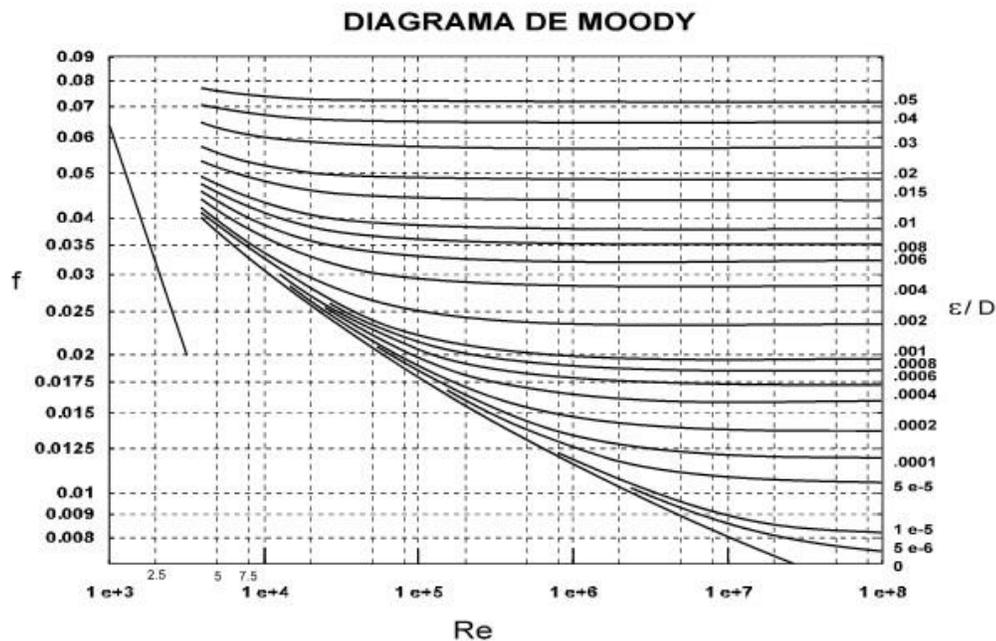
ANEXOS

Anexo A. Diagrama de Moody

El diagrama de Moody, permite determinar el valor del factor de fricción “ f ” a partir de “ Re ” y “ K/D ” de forma directa. Como se muestra en la figura A, es una representación logaritmo - logaritmo del factor de fricción “ f ” frente al “ Re ”, tomando como parámetro “ K/D ”. Se distinguen cinco zonas, correspondientes a los distintos regímenes hidráulicos, correspondiendo al coeficiente de fricción f valores diferentes en cada caso.

Dicho diagrama se puede aplicar a cualquier líquido y a cualquier tipo de flujo.

Fig. A. Diagrama de Moody.



Fuente:[http://www.unioviado.es/Areas/Mecanica.Fluidos/investigacion/_publicaciones/Libros/LibroSistemasdeBombeo/index.php?page=1]