



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

*Propuestas para promover una mejor administración del agua y
el uso eficiente de la energía en torres de enfriamiento en un
centro procesador de gas natural.*

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



MÉXICO, D. F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente	Prof. José Antonio Ortiz Ramírez
Vocal	Prof. Alfonso Durán Moreno
Secretario	Prof. Humberto Rangel Dávalos
1er. Suplente	Prof. José Agustín Texta Mena
2º. Suplente	Prof. Ezequiel Millán Velasco

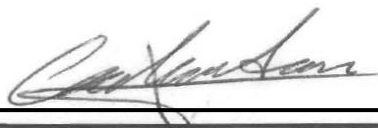
Torre de Ingeniería, tercer piso ala sur. Ciudad Universitaria.
Facultad de Química, UNAM

Asesor del tema:



Dr. Alfonso Durán Moreno

Supervisor Técnico:



Ing. Carlos Alberto Ibarra Aguilar

Sustentante:



Víctor Oropeza Moreno

Agradecimientos



A mis padres... por darme los medios y mucho más!! para lograrlo, por el respaldo siempre cálido, por la impresionante paciencia que han tenido, por la constancia para inculcarme amabilidad y consideración para los demás aunque a veces parezca una causa perdida ☺ pero sobre todo... por inspirarme.

A mi asesor... Dr. Alfonso Durán Moreno por la oportunidad, por la confianza en todo este tiempo, por la atención, por lo que aprendí, por los buenos ejemplos.

Al Ing. Carlos Ibarra... por la experiencia compartida, por el tiempo dedicado, por la paciencia ante respuestas carentes de tacto, por el respaldo en las ausencias inevitables, por las revisiones, pero sobre todo por el compromiso y constancia que por momentos consideré extremadamente exagerados!! debo admitir que fue esa actitud parte importante para este trabajo.

A mi Abue Tere... por acogerme en su hogar más de la mitad de mi carrera y aún así responder amable y cariñosa siempre, por el cariño que nunca mermó. Agradezco también a mi tía Clau por compartir conmigo parte de ese hogar, por su tiempo, y por su cariño.

A mi Abue Marcelina... por ser tan linda conmigo, por las comidas riquísimas, por las anécdotas que parecen interminables al contarlas con tanta ternura y detalle, por la atención que me da, por el compromiso con la familia

A mi Abuelo Manuel... por los cálidos abrazos, por cocinar así, por los consejos, por el cariño, por estar siempre atento de mi familia, pero sobre todo por tal ejemplo de disciplina.

A mi Abuelo Elías... porque seguro nos cuida desde el cielo.

A mis abuelos... por la mamá y por el papá que tengo.

Agradecimientos



A mis hermanas... por las risas, los abrazos, los regalos, el cariño, los buenos ratos, por hacer mi vida más feliz, por completar mi familia...las adoro!!!

A mis tías y tíos...por ser muy buenas metas a superar, por los consejos, los viajes, visitas, la atención y bueno por mis primos tan simpáticos ellos hehehe.

A mis amigos de la facultad...Gaby, César, Aline, Ana Luz, Isabel, Diana R., Lázaro, Sandra, Mariana, Alicia, Flor, Claudia, Itzel, Blanca, Yessica, Oscar, Cecilia, Mitchell, Julio Cesar (vaquero), Daniel (don), Ana Luisa, Raúl, Kikin, Oscar, Cano,

A Gaby... por lo agradablemente ligera que resultó la facultad a tu lado, por tu amistad que parece interminable, por la paciencia, por el graaaaaaan apoyo, por estar... ahí.

A los "becarios la torre"...Jair, Hector, Eber, Manuel, Miguel, Barush, Diana G, Rubén, Samanta y Jesús.

A mis compañeros de la "torre"... Por el apoyo: Ingenieros Abril, Dulce, Joel, "Deivid", Juan Pablo, Saúl, Trino...Por hacerlo más agradable: Todos los anteriores y Ara, Mariel Ingenieros Mariana, Fer, Frantz, Yamileth, Rafa, Paco, Julio, Javi, Marco, Sergio, Erick, "Constantine", Nayeli, Rocío, Efren, Daphne, Evelyn, Vianey.

*"...¿Te acuerdas del primero...? Indefinible;
cubrió tu faz de cárdenos sonrojos..
...en los espasmos de emoción terrible..."*

*Gracias...Sandra Liz...
Coincidir en tiempo y espacio ha sido hermoso.*

Agradecimientos



A la Universidad Nacional Autónoma de México y a todas las personas que hacen de ésta una excelente y bellísima institución.

A la Facultad de Química, que es para mí el mejor espacio para formar Ingenieros Químicos.

Dedicatoria



*“...la historia tañe sonora
su lección como campana
para gozar el mañana
hay que pelear el ahora
con ‘mi’ puedo y con mi quiero
vamos juntos compañero...”*

A mi papá... Víctor Manuel Oropeza Hernández

*“...dulce como la tímida frescura
del sol en las regiones tempestuosas...
...mi boca tiembla para definirte,
porque apenas
abrí el entendimiento
vi la bondad vestida...
...la santidad más útil...”*

A mi mamá... Guadalupe Moreno López



ÍNDICE

1. Introducción	14
1.1 Problemática	17
1.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivo	19
1.4 Objetivos específicos	19
2. Fundamentos	20
2.1 Torre de enfriamiento	20
2.2 Principio de enfriamiento.....	20
2.3 Conceptos básicos en torres de enfriamiento	20
2.3.1 Balance de materia.....	20
2.3.2 Evaluación térmica y disipación de calor	23
2.3.3 Capacidad de enfriamiento y eficiencia térmica.....	26
2.4 Tipos de torres de enfriamiento.....	27
2.5 Torres de flujo cruzado.....	28
2.6 Torres a contra flujo	29
2.7 Principales componentes de las torres de enfriamiento	31
2.8 Impacto ambiental: Ecoeficiencia y Ecodiseño.....	33
2.8.1 Impacto ambiental	33
2.8.2 Ciclo de vida	34
2.8.3 Ecoeficiencia	36
2.8.4 Ecodiseño.....	37
3. Metodología	38
3.1 Caso de estudio	41
3.1.1 Torres de enfriamiento	41



3.2	Problemas frecuentes en los componentes principales de una torre de enfriamiento.....	43
3.2.1	Ventiladores.....	43
3.2.2	Relleno	44
3.2.3	Eliminadores de arrastre	44
3.3	Curvas de comportamiento	45
3.3.1	Cálculo de la capacidad de enfriamiento	50
3.4	Evaluación económica	51
4.	Resultados.....	55
4.1	Capacidad de enfriamiento	55
4.2	Áreas de oportunidad.....	55
4.3	Desarrollos tecnológicos: nuevas soluciones.....	59
4.3.1	Eliminador de arrastre	61
4.3.2	Motor del ventilador.....	75
4.3.3	Tratamiento del agua de purgas	86
4.3.4	Tratamiento del agua de repuesto	95
4.3.5	Ecodiseño en una torre de enfriamiento	102
4.4	Propuestas	110
4.4.1	Mantenimiento preventivo y limpieza	111
4.4.2	Cambio del tipo de eliminador de arrastre	112
4.4.3	Instalación de nuevos motores para ventiladores.....	113
4.4.4	Tratamiento del agua de purgas	114
4.5	Operación actual y propuesta integral.....	115
4.6	Evaluación económica	117
5.	Conclusiones	129
6.	Bibliografía.....	136

Índice



6.1	Artículos	136	
6.2	Libros	137	
6.3	Sitios web	138	
7.	Anexos	139	
	A 1	Inspección física TORRE TE-1	139
	A 2	Inspección física TORRE TE-2	141
	A 3	Inspección física TORRE TE-3	143
	A 4	Curvas de comportamiento TE-2	145
	A 5	Curvas de comportamiento TE-3	148
	A 6	Impacto de la T_{AF} sobre la capacidad de enfriamiento	152



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Componentes de una torre de enfriamiento.....	32
Tabla 2.	Torres de enfriamiento, caso de estudio.....	41
Tabla 3.	Corrientes de agua en las torres de enfriamiento	42
Tabla 4.	Capacidad actual de operación.....	42
Tabla 5.	Temperaturas de las torres de enfriamiento	43
Tabla 6.	Temperaturas de agua fría a diferentes flujos de agua.....	48
Tabla 7.	Capacidad de enfriamiento de las torres del C.P.G.....	55
Tabla 8.	Desarrollos tecnológicos para la torre de enfriamiento	57
Tabla 9.	Nuevas mejoras para torres de enfriamiento	59
Tabla 10.	Eliminadores de arrastre analizados por el CTI	63
Tabla 11.	Consideraciones en la selección de un eliminador de arrastre..	68
Tabla 12.	Comparativo del rendimiento de los eliminadores	69
Tabla 13.	XF-150 MAX de Brentwood Industries.....	71
Tabla 14.	Primer corrida de resultados.....	79
Tabla 15.	Segunda corrida de resultados	79
Tabla 16.	Calidad del agua de purga de las torres	86
Tabla 17.	Capacidad de flujo de cada unidad de tratamiento	88
Tabla 18.	SDT descargados por las torres de enfriamiento.....	100
Tabla 19.	Tratamiento químico vs Química del sílice	100
Tabla 20.	Torre de enfriamiento de estudio	102
Tabla 21.	Inversión requerida para la limpieza de T.E.....	112
Tabla 22.	Inversión para sustituir los eliminadores de arrastre.....	112
Tabla 23.	Inversión para la instalación de nuevos motores	113
Tabla 24.	Inversión requerida para el tratamiento del agua de purgas....	114



Tabla 25. Costo anual.....	115
Tabla 26. Ahorro anual	115
Tabla 27. Consumo anual.....	115
Tabla 28. Ahorro anual	115
Tabla 29. Resumen de la inversión requerida por propuesta	117
Tabla 30. Costos involucrados.....	117
Tabla 31. Ahorro económico por implementar las propuestas.....	118
Tabla 32. Ahorro anual de agua	119
Tabla 33. Ahorro anual de energía	119
Tabla 34. Costos variables por llevar a cabo la limpieza	120
Tabla 35. Costos fijos por llevar a cabo la limpieza	120
Tabla 36. Flujos de efectivo e índices económicos para la limpieza.....	120
Tabla 37. Costos variables al cambiar eliminadores de arrastre	121
Tabla 38. Costos fijos al cambiar eliminadores de arrastre	122
Tabla 39. Índices económicos para cambio de eliminadores.....	122
Tabla 40. Costos variables por instalación de motores magnéticos	123
Tabla 41. Costos fijos por instalación de motores magnéticos	123
Tabla 42. Índices económicos por el cambio de motores	123
Tabla 43. Costos variables por tratamiento del agua.....	124
Tabla 44. Costos fijos por tratamiento del agua.....	124
Tabla 45. Flujos de efectivo por tratamiento de agua	125
Tabla 46. Costos variables por implementar las propuestas	126
Tabla 47. Costos fijos por llevar a cabo la limpieza	126
Tabla 48. Flujos de efectivo e índices económicos para la limpieza.....	127



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Torre tiro natural	27
Figura 2	Torre de tiro inducido	27
Figura 3	Torre de flujo cruzado	28
Figura 4	Torre a contra flujo.....	30
Figura 5	Principales componentes en una torre de enfriamiento	32
Figura 6	Metodología	38
Figura 7	Punto de diseño de la torre TE-1	46
Figura 8	90% del flujo de diseño.....	47
Figura 9	100% Flujo de diseño	47
Figura 10	110% flujo de diseño.....	48
Figura 11	T_{AF} a diferentes flujos de agua.....	49
Figura 12	Obtención del flujo de agua esperado	50
Figura 13	Porcentaje respecto al agua de repuesto de cada corriente	56
Figura 14	Porcentaje de arrastre respecto al flujo de recirculación.	61
Figura 15	Eliminadores de arrastre tipo hojas.....	62
Figura 16	Eliminadores de arrastre tipo celular.....	63
Figura 17	Curvas de caída de presión. (--húmedo, --seco).....	65
Figura 18	Curvas en la trayectoria de los eliminadores de arrastre	67
Figura 19	Curva para el eliminador Y5 comparado con Y1.....	70
Figura 20	XF-150 MAX de Brentwood Industries.....	71
Figura 21	Caída de presión XF-150 MAX de Brentwood Industries.....	72
Figura 22	Variador de frecuencia.....	76
Figura 23	Comparativo de eficiencias de motores	76



Figura 24 Marco lamido para el motor magnético	77
Figura 25 Aletas en láminas del marco del motor	78
Figura 26 Ventilador convencional	78
Figura 27 Ventilador con motor magnético	78
Figura 28 Consumo de energía en ambos ventiladores.....	80
Figura 29 VS1CTD de Baldor Electric Company	82
Figura 30 Tren de tratamiento y balance de masa para agua de purga	89
Figura 31 Índice de sedimentación a lo largo del 2008	91
Figura 32 Remoción de sales a lo largo del 2008	92
Figura 33 DQO _{Mn} durante el año 2008.....	93
Figura 34 Remoción de sílice en 2008.....	93
Figura 35 Intervalo de aplicación del sílice (SiO ₂).....	97
Figura 36 Efecto de la corrosión por amoníaco sin TTA	98
Figura 37 Efecto de la corrosión por amoníaco al aplicar TTA.....	98
Figura 38 Metodología empleada para el ecodiseño	104
Figura 39 Impacto del ciclo de vida.....	106
Figura 40 Reducción del consumo energético	107
Figura 41 Cambio del material del relleno.....	107
Figura 42 Efecto por reducir la incrustación en el relleno	108
Figura 43 Cubierta de hojas de acero recubierto	109
Figura 44 Ventilador de polipropileno	109
Figura 45 Esquema actual de operación y propuesta integral	116



1. Introducción

Durante los últimos años, en el ámbito industrial se ha integrado la premisa de promover el mejor aprovechamiento de los recursos naturales utilizados en los procesos, el más común es el agua, por lo que al mismo tiempo se convierte en uno de los principales debido a su contribución para el desarrollo productivo y por ende social, en nuestro país y en el mundo.

Otro aspecto con igual relevancia es la energía, por ello a partir del 2008¹, en México se hace oficial la promoción de un uso eficiente al crearse la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). Por lo tanto el sector industrial deberá efectuar acciones que conlleven a una reducción de la cantidad de energía utilizada, esto debido a las nuevas normas ambientales pero sobre todo a la rentabilidad económica que resulta por incrementar la eficiencia energética de los procesos de producción.

Las torres de enfriamiento son equipos indispensables en las plantas industriales debido a que son los mejores² para enfriar el agua, sin embargo utilizan un volumen muy grande, esta cantidad puede reducirse cuando los componentes internos como eliminadores de arrastre y relleno tienen una buena eficiencia de operación y evitan desperdiciar agua además de incrementar la transferencia de calor para facilitar el enfriamiento. Otro aspecto básico para la operación son los ventiladores cuyo desempeño y confiabilidad es fundamental para alcanzar el objetivo de estos sistemas de enfriamiento; su operación representa el 60% del consumo energético total de una torre de enfriamiento por lo que una reducción refleja un gran impacto sobre los costos operativos.

¹ Fuente: www.conuee.gob.mx

² Sovocool Kent, Maximizing Cooling Tower Water Efficiency



Por esta razón, en este trabajo de tesis se lleva a cabo un análisis sobre nuevos desarrollos tecnológicos y estudios recientes sobre torres de enfriamiento que propongan alternativas con el objetivo de hacer más eficiente su operación al reducir las pérdidas de agua, incrementar la eficiencia energética y aumentar la capacidad de enfriamiento de las torres.

Además, con la intención de obtener un perfil de las condiciones operativas actuales de las torres de enfriamiento, se evalúan los datos históricos sobre la operación de estos equipos, así es posible obtener las curvas de comportamiento de las torres y estimar su capacidad de enfriamiento; los datos que se analizan son:

- Flujo para cada corriente de agua (recirculación, evaporación, arrastre, repuesto y purgas) en la torre de enfriamiento.
- Revisar la inspección física de las torres de enfriamiento.
- Consumo histórico de energía eléctrica para las torres de enfriamiento
- Realizar la simulación con ayuda del CTI Toolkit para evaluar la capacidad de enfriamiento, a partir de los datos de temperatura del agua.

Al analizar estos parámetros y las curvas de comportamiento se obtiene un diagnóstico sobre las torres de enfriamiento, éste, más el estudio con la inspección física generan un panorama que permite definir las propuestas adecuadas que buscan una mejor administración del agua y el uso eficiente de la energía durante la operación estos equipos.

Introducción



El caso de estudio real lo conforman tres torres de enfriamiento de doble flujo cruzado con tiro inducido, se encuentran dentro de un centro procesador de gas natural; dos de estas torres cuentan con una capacidad de 150,000 GPM la otra tiene una capacidad de 60,000 GPM.



1.1 Problemática

Cuando los componentes internos, la estructura y el equipo mecánico (ventiladores y bombas principalmente) presentan deterioro ó su operación no es la mejor, se generan consumos innecesarios de agua y energía, lo que provoca un aumento en los costos por disposición de agua, descarga de purgas, consumo de químicos y una mayor programación del mantenimiento de las torres de enfriamiento, además la seguridad de la operación se vuelve cuestionable.

Los problemas más comunes por una mala administración del agua y la ineficiente operación energética de las torres de enfriamiento son:

- Disminución en la capacidad de enfriamiento.
- Incremento en el agua de repuesto utilizada.
- Incremento en el consumo de energía.
- Aumento en los costos de operación de la torre.
- Disminución en los ciclos de concentración
- Aumento en los costos por consumo de químicos para el tratamiento del agua.
- Mayor agua descargada a drenajes por lo tanto mayor impacto ambiental.



1.2 Justificación

El enfriamiento evaporativo, es decir, el principio con el que las torres realizan su función, tiene una eficiencia nominal de 0.2 kW/ton es decir cada tonelada de agua a enfriar requiere 0.2kW de energía³ por ello es el método más efectivo en cuanto a costo y aprovechamiento energético. Sin embargo, en el desempeño real de estos sistemas de enfriamiento esa premisa no siempre se cumple, ya que las condiciones operativas de las torres no lo permiten. De aquí se desprende el interés personal respecto al tema, considero adecuado aportar opciones orientadas hacia una mejor administración del agua y hacia el uso eficiente de la energía; influenciado por mi compromiso con la preservación del ambiente y la disposición de tomar acciones para mejorar el entorno en el que nos desarrollamos como seres humanos.

Debe recordarse que el propósito que justifica la aplicación de las torres de enfriamiento en todos los centros industriales es la conservación del agua, y no solo la disminución de su temperatura; en el mundo, mucha de esa agua satisface las necesidades de los procesos productivos por ello este estudio resultó mucho más atractivo ya que cae dentro del enfoque de la Ingeniería Química y del grupo de trabajo: Ingeniería Ambiental con el que comencé mi incursión al ámbito profesional concentrando mi apoyo en el área dedicada a la evaluación de las torres de enfriamiento.

³ Sovocool Kent, Maximizing Cooling-Tower Water Efficiency



1.3 Objetivo

Presentar propuestas para mejorar la operación de las torres de enfriamiento y lograr una mejor administración del agua y uso eficiente de la energía. Se busca reducir las pérdidas de agua y aumentar el desempeño energético de las torres de enfriamiento a través de alternativas aplicables a los componentes internos, ventiladores e incluso al tratamiento de agua de repuesto y/o purga.

Como base se consideran los nuevos desarrollos tecnológicos para estos equipos y se presentan los beneficios obtenidos por llevar a cabo acciones enfocadas a la reducción en el consumo de agua y energía así como los ahorros económicos implicados.

1.4 Objetivos específicos

- Revisión de la inspección física de las torres de enfriamiento (condiciones actuales) para identificar las áreas de oportunidad.
- Aplicar el método de curvas de comportamiento para determinar la capacidad de enfriamiento de las torres.
- Revisión de alternativas y nuevos desarrollos tecnológicos para la modernización de las torres de enfriamiento, de preferencia estudios de casos reales que estén actualmente en operación.
- Destacar los beneficios operativos y económicos sobre el uso eficiente del agua y energía.



2. Fundamentos

2.1 Torre de enfriamiento

El Cooling Technology Institute (CTI) define a las torres de enfriamiento como equipos que remueven el calor, lo extraen de una corriente de agua y lo dirigen hacia la atmósfera de esta manera disminuyen la temperatura y permiten el enfriamiento. Las torres de enfriamiento de este centro procesador de gas natural (C.P.G.) se consideran equipos de circuito abierto debido a su directa interacción con el ambiente, por ejemplo la entrada del aire a través de las persianas ó su salida por la chimenea que cubre el ventilador.

Los componentes internos de las torres de enfriamiento se encargan de distribuir el agua en pequeñas gotas para que al interaccionar con el aire se beneficie la transferencia de calor y sea posible un adecuado enfriamiento.

2.2 Principio de enfriamiento

El enfriamiento evaporativo es el proceso con el cual las torres disminuyen la temperatura del agua de proceso, consiste en tomar la misma energía que porta el agua caliente para permitir que el agua pase de líquido a vapor, este cambio de estado físico provoca que el agua se enfríe; el aire colabora con el enfriamiento al absorber la humedad (y energía) en forma de vapor pero tal capacidad está limitada a la saturación que tenga el aire; esta saturación depende de las condiciones atmosféricas de la locación de las torres de enfriamiento.

2.3 Conceptos básicos en torres de enfriamiento

2.3.1 Balance de materia

El agua podría considerarse como la principal materia prima de las torres de enfriamiento, hay seis corrientes principales en estos equipos: el retorno y



suministro de agua de enfriamiento, el arrastre, la evaporación, el repuesto y la purga; estas corrientes conforman el balance de materia en una torre de enfriamiento, sin embargo cuando estos equipos se encuentran en mal estado existen fugas de agua que en algunas ocasiones conforman una corriente más debido a su extensa cantidad.

- El retorno de agua de enfriamiento (R), es la cantidad de agua que ingresa a las torres para ser enfriada y proviene de las plantas a las que la torre da servicio, en este trabajo de tesis también se denomina agua caliente cuando se refiere al agua de retorno.

- El suministro, se refiere al flujo de agua que sale de las torres para atender las necesidades de enfriamiento de las plantas a las que se les da servicio, otro término común para esta corriente es agua fría.

Es importante mencionar que el suministro y el retorno de agua de enfriamiento pueden considerarse como una sola corriente: la recirculación, este término es aplicable ya que es una cantidad de agua que fluye en un circuito, es decir va a plantas y regresa a torres, así sucesivamente. Teóricamente el suministro debe ser igual al retorno (R) de agua de enfriamiento para cumplir el balance de materia.

- Se le llama arrastre a las pequeñas gotas de agua que el aire lleva consigo cuando circula a través de los componentes internos de la torre como el relleno y los eliminadores (de arrastre). Este término puede ser calculado a partir del 0.02% del suministro a torres, la bibliografía consultada considera este porcentaje tomando como base la experiencia de la operación y la permisividad de los eliminadores de arrastre; sin embargo existe una ecuación para su determinación teórica ésta se muestra en la sección 4.3.1 y es la Ecuación 4-4.



- La evaporación conforma la cantidad de agua que cambió de estado físico al efectuarse el enfriamiento evaporativo de la corriente. Se estima su flujo como el 0.1% de la corriente de retorno (R) multiplicado por el ΔT en $^{\circ}F$:

$$E = 0.001(R)(T_{\text{Agua caliente}} - T_{\text{Agua fría}})$$

Ecuación 2-1

- Repuesto (R_p) es el flujo que reemplaza la cantidad de agua que se pierde en la evaporación, el arrastre y la purga; tiene una gran influencia sobre la calidad del agua que maneja la torre.
- La purga es la corriente que se extrae de la torre de enfriamiento y su función es controlar la calidad del agua por ejemplo evitar la concentración de los sólidos suspendidos u otros componentes en el agua que provocan problemas como incrustación, corrosión y el crecimiento biológico. Existe un concepto llamado ciclos de concentración (C.C.) que tiene relación directa con la purga de las torres de enfriamiento. La ecuación que determina la cantidad de purgas se muestra en la Ecuación 2-2:

$$P = \left(\frac{E}{C.C. - 1} \right) - \text{Retorno}$$

Ecuación 2-2

El término ciclos de concentración (C.C.) es el cociente de la cantidad de sólidos disueltos (SD) en el agua de recirculación sobre la cantidad de sólidos disueltos en el agua de repuesto (ver Ecuación 2-3). Esta relación es un indicador de la calidad del agua, además determina la frecuencia con la que debe purgarse la torre de enfriamiento, por lo tanto uno de los principales objetivos para mejorar la



operación de estos equipos es aumentar el valor de ciclos de concentración ya que esto significa menos purga, es decir ahorro de agua, disminución en el consumo de químicos, disminución en la descarga a drenaje, y en conjunto una gran oportunidad de ahorros económicos.

$$C.C. = \frac{SD_{\text{recirculación}}}{SD_{\text{repuesto}}}$$

Ecuación 2-3

Por el contrario si se tienen valores bajos de C.C. (menor a 5 en este tipo de torres) aumenta la tendencia al crecimiento biológico y a la incrustación, estos problemas provocan que la eficiencia de la torre disminuya.

Respecto al balance de materia, en teoría, siempre se tiene que cumplir la siguiente relación: el repuesto será igual a la suma de la evaporación, el arrastre y la purga:

$$R_p = E + A + P$$

Ecuación 2-4

Al tener las ecuaciones para estimar estos tres parámetros podemos sustituirlas en la Ecuación 2-5 y obtener una estimación del repuesto de la siguiente manera:

$$R_p = \frac{[(0.001)(R)(\Delta T)] \times [C.C.]}{[C.C. - 1]}$$

Ecuación 2-5

2.3.2 Evaluación térmica y disipación de calor

La evaluación térmica de las torres de enfriamiento consiste en analizar las temperaturas involucradas en la operación y formar la base para determinar la



capacidad de enfriamiento de las torres. Para ello deben comprenderse algunos conceptos básicos, en esta sección se describen y se explica su papel durante la operación de las torres.

- Rango, es la diferencia de entre la temperatura del agua de entrada a la torre (agua caliente) y la temperatura de salida (agua fría). El rango está determinado por el proceso al que la torre da servicio y no por la torre debido a que es una función de la carga térmica que se disipa y el flujo de agua que circula por el equipo:

$$\text{Rango } [^{\circ}\text{F}] = T_{AC} - T_{AF}$$

Ecuación 2-6

- Aproximación, es la diferencia de entre la temperatura del agua fría y la temperatura de bulbo húmedo del ambiente (T_{BH}). Este ΔT es el parámetro que determina el desempeño de torre de enfriamiento.

Algunos autores concuerdan en evaluar la eficacia de la torre tomando como base la aproximación y el rango, utilizando la Ecuación 2-7, este valor se expresa en porcentaje:

$$\text{Eficacia } [\%] = \frac{\text{Rango}}{(\text{Rango} + \text{Aproximación})} \times 100$$

Ecuación 2-7

- Relación L/G, es el cociente del flujo másico del agua y el flujo másico del aire. Cuando se involucra la termodinámica, esta relación considera que la cantidad de calor removido del agua es la misma cantidad de calor que absorbe la corriente de aire:

$$L (T_C - T_F) = G (h_2 - h_1)$$

Ecuación 2-8



Donde T_C y T_F son las temperaturas de agua caliente y fría respectivamente, h_2 representa la entalpía de la mezcla aire-agua a la salida de la torre mientras que h_1 es la entalpía de la mezcla aire-agua a la entrada.

- Carga térmica; es la cantidad de calor (energía) que debe disipar la torre para llevar a cabo el enfriamiento del agua, este parámetro determina la eficiencia de la torre y es proporcional al tamaño y costo de la misma.

La carga térmica está determinada por el proceso al que se le da servicio y puede calcularse con la Ecuación 2-9:

$$Q_P = (\text{Retorno})(\text{Rango}) (Cp_{\text{agua}})$$

Ecuación 2-9

La especificación de las torres de enfriamiento se hace en función de estos parámetros y en la determinación del tamaño de las torres el más importante es la aproximación, le sigue el flujo de agua, a continuación el rango y por último la temperatura de bulbo húmedo.

Estos parámetros se relacionan entre sí por lo que la variación de alguno afecta el valor de los demás; sin embargo si uno de ellos se mantiene constante el tamaño de la torre se ve afectada de la siguiente manera:

- La carga térmica será directamente proporcional al tamaño de la torre.
- El rango será inversamente proporcional al tamaño de la torre.
- La aproximación es inversamente proporcional al tamaño de la torre.
- La temperatura bulbo húmedo es inversamente proporcional al tamaño de la torre.



2.3.3 Capacidad de enfriamiento y eficiencia térmica

Son dos términos relacionados entre sí y muy importantes para estos equipos; la capacidad de enfriamiento es una relación entre la recirculación (flujo de agua) de diseño y la recirculación que maneja la torre durante su operación; su evaluación no depende de un solo factor si no que considera las curvas de comportamiento de la torre, la relación L/G, las condiciones climáticas (presión, altura, temperatura ambiente, de bulbo seco y húmedo), el rango, las temperaturas del agua fría y caliente, la potencia del ventilador y la densidad del aire. El CTI es la institución que certifica lo relacionado a torres de enfriamiento desarrolla un software que evalúa la capacidad de enfriamiento mediante el método de Merkel y/o el método de curvas de comportamiento, en ambos se incluyen todos los parámetros mencionados.

La eficiencia térmica se refiere a la disipación del calor, es la relación entre la disipación para la que fue diseñada la torre de enfriamiento y la disipación real cuando comienza la operación. Este concepto es resultado del comportamiento de la torre al operar normalmente, es un indicador del desempeño de los componentes internos, del ventilador, e incluso de la calidad del agua. Y por ello tiene una relación directa con la capacidad de enfriamiento. La eficiencia térmica se calcula como:

$$\text{Eficiencia}_{\text{Térmica}} = \frac{Q_P}{Q_D} \times 100$$

Ecuación 2-10

Donde Q_P es la disipación del calor de prueba, y Q_D la disipación de calor de diseño.



2.4 Tipos de torres de enfriamiento

En el mundo existen dos tipos principales, las torres de tiro natural (Figura 1) y las de tiro inducido (Figura 2), las primeras parecen largas chimeneas fabricadas de concreto y en ellas el aire entra por la parte inferior de manera natural, es decir no lo impulsa ningún dispositivo mecánico; a diferencia de las torres de tiro inducido donde los ventiladores son necesarios para hacer circular el aire a través de la torre. Debe resaltarse la posición del ventilador en la torre de enfriamiento, es decir si el ventilador está en la parte superior se considera tiro inducido, por el contrario si el ventilador proyecta el aire a través de la torre de enfriamiento desde la parte inferior entonces se considera tiro forzado.

En México no se utilizan las torres de tiro natural ya que la mayoría de los lugares donde se ubican los centros industriales son regiones de clima cálido; las torres de tiro natural necesitan una diferencia de temperaturas para establecer un ΔP y así crear el flujo natural de aire a través de la torre, algunas ventajas de estas torres son: escaso mantenimiento y el bajo consumo energía eléctrica.

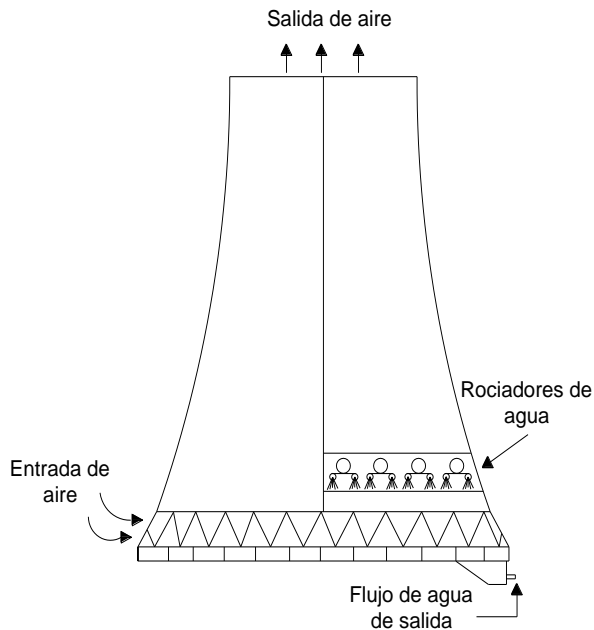


Figura 1 Torre tiro natural

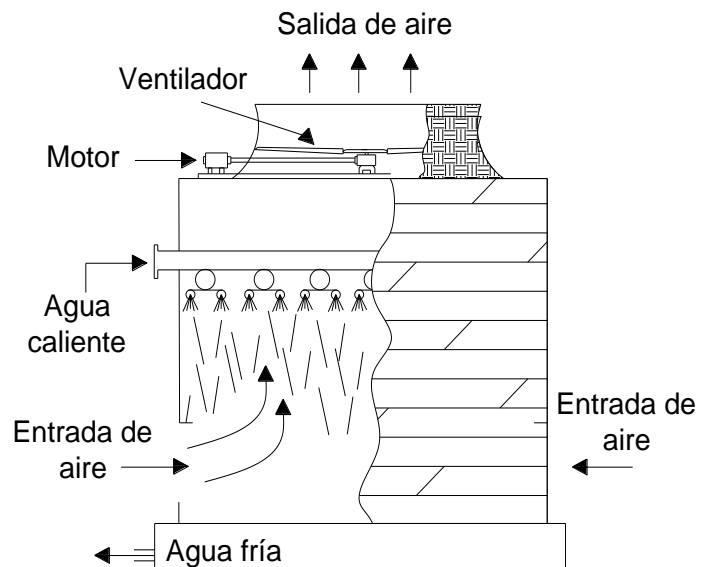


Figura 2 Torre de tiro inducido



2.5 Torres de flujo cruzado

En nuestro país, el principal factor que diferencia los tipos de torres de enfriamiento es la interacción entre el agua y la corriente de aire.

En las torres de flujo cruzado el aire tiene una interacción perpendicular al flujo de agua que desciende de la parte superior de la torre; la entrada de aire se lleva a cabo por toda el área lateral de la pared (Figura 3).

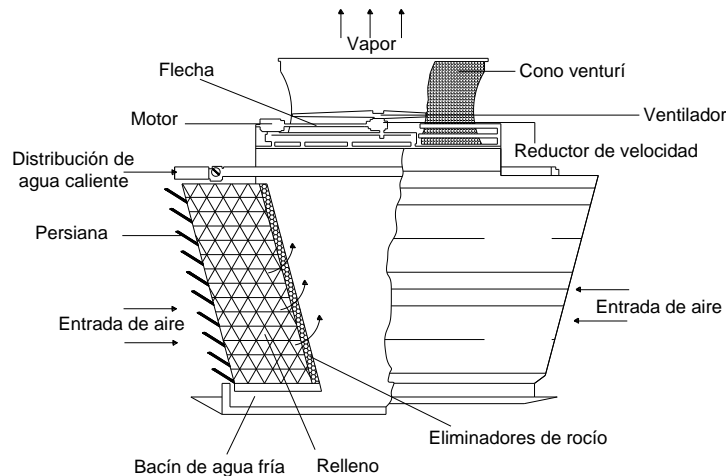


Figura 3 Torre de flujo cruzado

La distribución del agua caliente en estas torres es por gravedad, es decir del bacín de agua caliente cae a través de las boquillas hacia el relleno, esta característica le permite tener ciertas ventajas:

- Menor cabeza de bombeado.
- Menor costo inicial del sistema de bombeo.
- Menores costos anuales por consumo de energía y operativos.
- Mayor posibilidad en la variación del flujo de agua sin tener efectos adversos a la operación.



- Fácil acceso para llevar a cabo el mantenimiento de las boquillas.

Sin embargo el hecho de no requerir presión para distribuir el agua puede provocar que los orificios se tapen y por tanto se tenga una mala distribución. También la exposición del bacín de agua caliente al ambiente puede acelerar el crecimiento biológico.

Otro factor que beneficia a este tipo de torres es la interacción horizontal del aire con la corriente de agua caliente, he aquí algunas ventajas más:

- Baja caída de presión
- Se reduce el arrastre
- Mayor aire por cada HP del ventilador.
- Puede utilizarse un ventilador de mayor diámetro por lo que la capacidad de la celda crece.
- Menores costos de operación y de energía consumida.

Una desventaja de este tipo de torres en lugares con climas muy fríos puede ser que las persianas tiene un área de contacto muy grande, por lo que la presencia de hielo en estos componentes es difícil de controlar.

2.6 Torres a contra flujo

En las torres a contraflujo el agua desciende y el aire fluye solamente desde la parte inferior en sentido opuesto al agua (Figura 4).

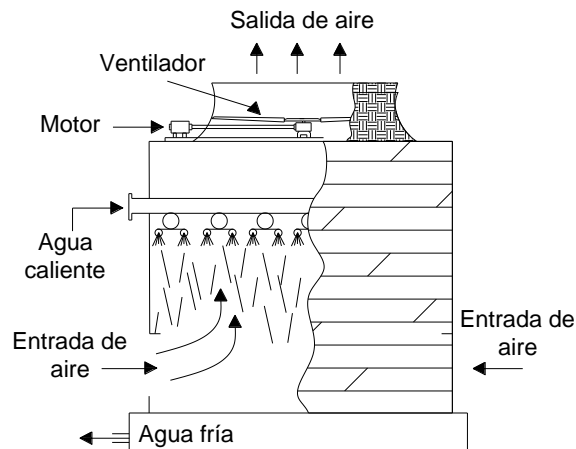


Figura 4 Torre a contra flujo

Estos equipos tienen un sistema de distribución de agua caliente presurizado (spray) y algunas ventajas que trae consigo esta característica son:

- Al aumentar la altura de la torre es posible obtener un mayor rango y una aproximación más cercana. Siempre y cuando se tenga el mismo flujo de agua ya que teóricamente se aumentaría el área de contacto entre el aire y el agua y por tanto se beneficia el enfriamiento.
- Mayor aprovechamiento del contacto con el aire al garantizar que las gotas que salen de los aspersores son más pequeñas.
- El desempeño de la torre es mayor debido a que este arreglo garantiza que la gota más fría se ponga en contacto con el aire más seco.

Dentro de las desventajas por requerir presión para distribuir el agua son:

- Incrementar la cabeza del sistema bombeo
- Incremento en los costos de operación y consumo de energía
- Los aspersores son más difíciles de limpiar y de dar mantenimiento
- Requiere tubería individual por cada celda, por lo tanto los costos aumentan.



Las desventajas de la interacción con el aire son:

- Mayor caída de presión y mayor requerimiento de potencia por parte del ventilador.
- Puede tenerse una distribución del aire desigual debido a la mala circulación del mismo por las paredes y centro de la torre.
- La gran velocidad del aire de entrada puede permitir que ingrese basura a la torre.

Se presentan las ventajas y desventajas para cada configuración de las torres de enfriamiento y sin embargo no puede afirmarse que un tipo de torre sea mejor al otro, cada una provee servicios dependiendo de las necesidades de enfriamiento, de la locación, de la disponibilidad de equipo, la cantidad de flujo, el espacio disponible para instalar la torre y demás variables que cada centro industrial tiene; es por ello que para recomendar la selección del tipo de torre debe realizarse un estudio que permita resaltar las necesidades que cubrirá el equipo para entonces obtener la evaluación que diga cuál es la opción más conveniente.

Cabe resaltar que hay una restricción: no existe flexibilidad en la especificación de una torre de enfriamiento, es decir si para cierto proceso se determinó utilizar una torre de flujo cruzado no debe reemplazarse por una torre a contraflujo o viceversa; para ello se requiere un estudio de ingeniería que identifique las correctas modificaciones que deberán ser efectuadas.

2.7 Principales componentes de las torres de enfriamiento

Las torres de enfriamiento que se utilizan en el centro procesador de gas natural (C.P.G.) que conforma el caso de estudio son de doble flujo cruzado con tiro inducido, la Figura 5 representa un esquema sobre este tipo de torres, se ubican los principales componentes de una torre de enfriamiento de flujo cruzado.

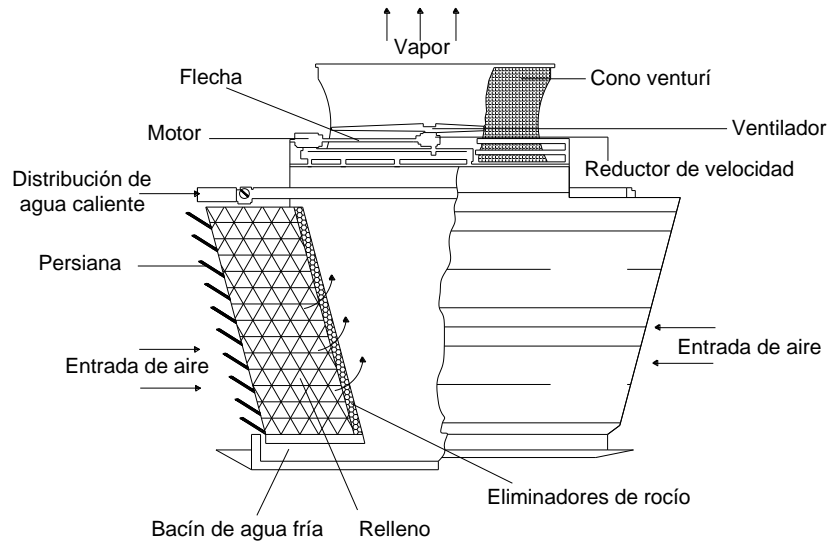


Figura 5 Principales componentes en una torre de enfriamiento

En la Tabla 1 se hace una breve descripción sobre los principales componentes de las torres de enfriamiento que muestra la Figura 5.

Tabla 1. Componentes de una torre de enfriamiento

Elemento	Características
Chimenea ó cono venturí	Cono, generalmente de fibra de vidrio reforzado (FRP) que rodea las aspas del ventilador, su función es dirigir el vapor que sale de la torre y ganar un poco de distancia en la trayectoria para evitar que ese vapor reingrese al interior.
Ventilador	Componente mecánico que induce el viaje del aire a través de la torre de enfriamiento.
Flecha	Encargada de transmitir la potencia del motor hacia las aspas del ventilador y generar el movimiento de las mismas.
Reductor de velocidad	Equipo que resguarda el juego de engranes que hacen girar las aspas y controlan la velocidad de las mismas.
Motor	Encargado de impulsar al ventilador al proporcionar la potencia necesaria para mover las aspas. Generalmente es un motor eléctrico de inducción.
Distribución del	Tubería que alimenta de agua caliente a la torre de



Elemento	Características
agua caliente	enfriamiento, el agua desciende por las boquillas aspersoras.
Persianas	Generalmente fabricadas de concreto, y su propósito es mantener el mismo flujo de aire de entrada y evitar que el agua salga de la torre de enfriamiento.
Relleno	Considerado el corazón del equipo, su función es romper las gotas de agua y aumentar el área de contacto entre el aire y el agua para favorecer la transferencia de energía.
Eliminadores de rocío	Encargados de reducir al mínimo la cantidad de agua que el aire arrastra consigo durante su trayecto por la torre de enfriamiento.
Bacín de agua fría	Contenedor que recibe el agua fría que cae verticalmente desde el sistema de distribución, también representa el paso previo a recircular el agua hacia las plantas que se les da servicio; el bacín de agua fría es de donde se purga la torre.

2.8 Impacto ambiental: Ecoeficiencia y Ecodiseño

Una de las alternativas sobre los nuevos desarrollos tecnológicos para las torres de enfriamiento es el caso de estudio para el ecodiseño aplicado a estos equipos, sin embargo es recomendable revisar conceptos previos para facilitar su entendimiento, esta sección pretende desarrollar dichos términos.

2.8.1 Impacto ambiental

De acuerdo a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)⁴ el impacto ambiental se define como: la modificación al ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza. El término se enfoca en las consecuencias para la salud humana y los recursos naturales a su alrededor,

⁴ www.semarnat.go.mx



debidas a la ejecución de un proyecto o actividad, la industria energética es una de las principales causas del deterioro en el ambiente⁵ a través de tres aspectos principales:

- Ser consumidora de recursos naturales.
- Una fuente de contaminación (emisiones, residuos, líquidos vertidos).
- Debido a su ocupación territorial.

Para evaluar el impacto ambiental de estas actividades se crea un instrumento denominado Estudio de Impacto Ambiental (EIA), las bases, condiciones y normas con las que debe cumplir dicho estudio pueden consultarse en la página web de la SEMARNAT.

2.8.2 Ciclo de vida

El ciclo de vida es el papel que desempeña un producto en el entorno, abarca todas las fases involucradas, desde la generación hasta la disposición del producto incluye todo el periodo en el que se mantiene activo, entre esas fases se encuentran:

- Extracción de materia prima,
- Su transportación a la planta.
- La producción.
- El empaque.
- Distribución del producto.
- Uso o consumo del producto.
- La disposición, y si es posible
- El reciclaje.

⁵ www.forumambiental.org



Para la evaluación del impacto ambiental de un producto durante las fases de su ciclo de vida existe un procedimiento llamado Evaluación del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés), la normatividad que rige esta evaluación se encuentra en la ISO 14040 del año 2006, esta norma especifica el concepto, el alcance, las metas y el análisis de la Evaluación del Ciclo de vida.

Se ha desarrollado software como herramienta para llevar a cabo esta evaluación, un ejemplo del cual se hace referencia en la sección 4.3.5 es el programa llamado Sima Pro 7.1⁶, este software contiene una base de datos con diversos procesos y los productos generados, en esa librería se encuentran los parámetros ambientales y el impacto que provoca cierta actividad productiva o producto obtenido, incluso tiene una clasificación por sector o por flujo económico. El inventario de procesos que utiliza este programa los clasifica en grupos:

- Material
- Energía
- Transporte
- Procesado
- Uso
- Escenario de residuos
- Tratamiento de residuos

Y para realizar la evaluación es posible elegir entre diferentes métodos, por ejemplo, el que se menciona en la sección 4.3.5 es el CML-2 base 2000⁷ éste es solo uno de los métodos que vienen cargados en el software. Dicho método fue desarrollado por el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden, en Holanda; utiliza la aproximación del “problema-orientado” y para aplicarla es necesario definir un objetivo que incluye los principales criterios para la evaluación, esto hace posible una interpretación para identificar los puntos clave

⁶ www.pre.nl

⁷ cml.leiden.edu



que deben tener prioridad; la segunda fase consiste en incorporar el ambiente que rodea al “problema” para saber cómo puede modificarse la respuesta por los factores externos. De esta forma esta aproximación se vuelve un método de evaluación sólido ya que no sólo es un modelo sino que incorpora factores reales que afectan la solución.

El CML-2 2000 incluye una lista de impactos evaluados que clasifica en los siguientes grupos:

- Impactos obligatorios
- Impactos adicionales
- Otros impactos

En el caso que se tengan diferentes maneras de evaluar uno o más impactos obligatorios se elige solo un indicador como base cuyo fundamento son las mejores prácticas disponibles para ese proceso o producto. Contiene además, una base de datos sobre los impactos ambientales y desarrollan métodos de caracterización y normalización para poder evaluar el proceso o producto.

2.8.3 Ecoeficiencia

Este término se crea a partir de la concepción global de los diferentes impactos ambientales que genera un producto a lo largo de su ciclo de vida, con el objetivo de disminuir los efectos ambientales negativos.

El concepto de ecoeficiencia se presenta por primera vez en 1992 en la Cumbre sobre la Tierra efectuada en Brasil, el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) dice que: “La ecoeficiencia se alcanza cuando se proporcionan bienes y servicios a un precio competitivo, que satisfaga las necesidades humanas y la calidad de vida, al tiempo que se reducen progresivamente el impacto ambiental y la intensidad de utilizar recursos a lo largo del ciclo de vida, hasta un nivel aceptable para la capacidad de carga estimada del



planeta". En general quiere decir: producir más generando menor impacto ambiental.

Otra manera de expresar la ecoeficiencia es por medio de una relación⁸ entre el valor del producto y la suma de los impactos ambientales a lo largo de su ciclo de vida:

$$\text{Ecoeficiencia} = \frac{\text{Valor del producto}}{\text{Impacto Ambiental}}$$

Este concepto es muy importante para las plantas productivas porque las dirige hacia un desarrollo sustentable al mismo tiempo que se vuelven más competitivas. Tener una producción ecoeficiente equivale a optimar tres objetivos fundamentales:

- El crecimiento económico.
- La equidad social.
- El valor ecológico.

2.8.4 Ecodiseño

El ecodiseño visto desde este enfoque es una acción operativa con la que se pretende alcanzar la ecoeficiencia, involucra solo el producto y significa: la incorporación de factores ambientales en la fase de diseño de dicho producto para así reducir la carga ambiental asociada al ciclo de vida, su objetivo es integrar las acciones de prevención y minimizar los impactos ambientales asociados a la etapa de diseño sin dejar de lado la satisfacción de necesidades del consumidor pero al hacerlo deberá utilizarse la menor carga de materia y energía.

⁸ www.wbcsd.org



3. Metodología

En la Figura 6 se presenta el diagrama de flujo que se utilizó para el desarrollo de este trabajo de tesis, a continuación se explica cada etapa.

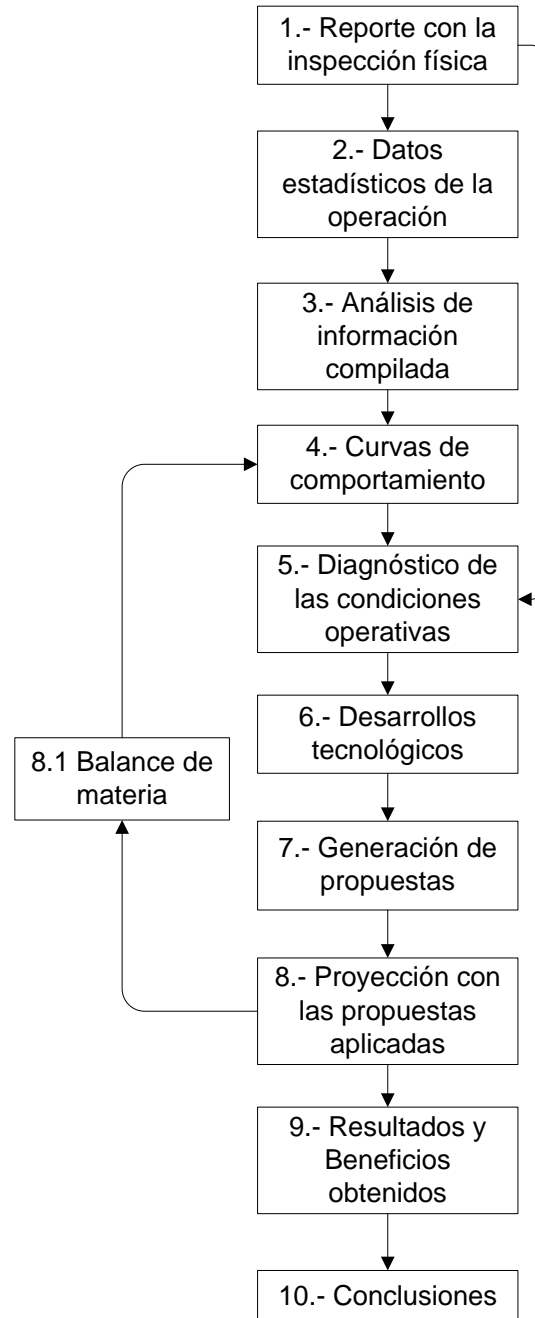


Figura 6 Metodología



1. Consiste en analizar el reporte sobre la inspección física realizada a las torres de enfriamiento para conocer las condiciones actuales de operación, identificar los componentes dañados, existencia de fugas, y la estructura general de las torres. El registro lo llevan a cabo ingenieros que visitan el centro procesador de gas natural. A partir del anexo A 1 y hasta el anexo A 3 se muestran las características físicas que se encontraron durante la inspección de las torres.
2. El centro de trabajo proporciona información estadística (registros), que describe el comportamiento de los principales parámetros operativos de las torres como son: temperaturas del agua fría (T_{AF}) y caliente (T_{AC}), temperatura de bulbo húmedo (T_{BH}), de bulbo seco (T_{BS}), flujos de las corrientes involucradas: evaporación (E), arrastre (A), purga (P), repuesto (Rp), agua de retorno (R), ciclos de concentración (C.C.), consumo de químicos y energía eléctrica.
3. Análisis de la información; en esta etapa se generan los valores promedio para todos los datos anteriores, se utilizan datos de cinco años a la fecha para obtener una descripción más cercana a la operación que predomina a lo largo de ese periodo de tiempo.
4. El método de curvas de comportamiento se aplica para determinar la capacidad de enfriamiento de las torres, como apoyo se utiliza el software CTI Toolkit para generar las curvas de las torres y permitir la aplicación de dicho método, por supuesto también se requieren los principales parámetros que se analizaron en la etapa 2.
5. Al contar con la capacidad de enfriamiento y el estudio de inspección física es posible obtener un diagnóstico de la operación actual que actúa como base para proponer las alternativas adecuadas y generar propuestas.



6. Desarrollos tecnológicos; el objetivo de esta etapa es conocer las nuevas estrategias para mejorar la operación de las torres de enfriamiento, se realizó una búsqueda en la red con los nuevos desarrollos tecnológicos considerando solo aquellos que tuvieran una publicación respaldada por centros de investigación, agencias especialistas en torres de enfriamiento como el CTI (Cooling Technology Institute), universidades o tecnologías que están aplicadas y cuentan con estudios publicados sobre su desempeño.
7. Se generan las propuestas para promover una mejor administración del agua y el uso eficiente de la energía con base en cálculos de ecuaciones teóricas de literatura especializada, curvas de comportamiento, revisión bibliográfica y análisis de los registros sobre inspección física.
8. En esta etapa se realiza una estimación de la operación considerando las modificaciones hechas a las torres de enfriamiento, el objetivo es generar una base para cuantificar los beneficios logrados.
9. Se cuantifican los ahorros de agua y energía generados así como los beneficios económicos que se obtienen, se analizan los resultados generales sobre las propuestas.
10. Finaliza todo el análisis realizado. Y se generan las respectivas conclusiones del trabajo de tesis.



3.1 Caso de estudio

3.1.1 Torres de enfriamiento

Se consideran tres torres de enfriamiento, en conjunto conforman el sistema utilizado para enfriar el agua del centro procesador de gas natural; las características operativas de las torres se muestran en la Tabla 2; estos datos son de diseño.

Tabla 2. Torres de enfriamiento, caso de estudio

Características	TE-1	TE-2	TE-3
Planta que da servicio	Criogénica I y Endulzaduras I a VI	Endulzaduras VII y VIII, líquidos I y II separadora de Gas Amargo	Fraccionadoras 4,5 y 6, Modulares IV; V y VI, Endulzaduras IX a XII
Capacidad en GPM [m ³ /día]	150,000 [817,649]	60,000 [327,060]	150,000 [817,649]
Tipo	Tiro inducido, flujo cruzado	Tiro inducido, flujo cruzado	Tiro inducido, flujo cruzado
Número de celdas	15	6	15
Flujo por celda en GPM [m ³ /día]	10,000 [54,510]	10,000 [54,510]	10,000 [54,510]
Estructura	Concreto	Concreto	Concreto
Carga térmica [Btu/min]	27,137,500	12,525,000	31,312,500
T _{AC} °F [°C]	115 [46]	115 [46]	115 [46]
T _{AF} °F [°C]	90 [32]	90 [32]	90 [32]
T _{BH} °F [°C]	82 [28]	82 [28]	82 [28]
T _{BS} °F [°C]	87 [30]	87 [30]	87 [30]
L/G DISEÑO	0.917	1.111	0.853
KaV/L	1.40	1.50	1.36



Características	TE-1	TE-2	TE-3
C.C.	5	5	5

Estos parámetros representan los valores de diseño para las tres torres de enfriamiento, sin embargo para realizar las curvas de comportamiento se requiere tener antecedentes (registros) de los datos de operación, es decir temperaturas, flujos, ciclos de concentración y carga térmica.

Se trataron datos de los últimos cinco años y se obtuvo el promedio para llevar a cabo la evaluación de las torres de enfriamiento, en la Tabla 3 se muestra el flujo de agua en las corrientes de estos equipos.

Tabla 3. Corrientes de agua en las torres de enfriamiento

Torre	Retorno [GPM]	Repuesto [GPM]	Evaporación [GPM]	Arrastre [GPM]	Purga [GPM]	C.C.
TE-1	84,990	1,911	1,572	17	322	5.6
TE-2	29,430	513	403	6	104	4.7
TE-3	87,723	1,834	1,476	18	340	5.1

Al contar con el flujo de retorno y el flujo para el que fueron diseñadas las torres de enfriamiento es posible hacer una comparación para estimar la capacidad actual de operación en cada uno de los equipos. Tal estimación se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Capacidad actual de operación

Torre	Retorno Diseño [GPM]	Retorno Registros [GPM]	Operación actual [%]
TE-1	150,000	84,990	57
TE-2	60,000	29,430	49
TE-3	150,000	87,723	58



En la Tabla 5 se encuentra el promedio de las temperaturas registradas a lo largo de cinco años, así como el rango y aproximación respectiva.

Tabla 5. Temperaturas de las torres de enfriamiento

Torre	T _{AC}		T _{AF}		T _{BH}		T _{BS}		Rango		Aproximación	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F
TE-1	39.4	103.0	29.1	84.5	25.8	78.4	33.0	91.4	10.3	18.5	3.4	6.0
TE-2	36.2	97.1	28.6	83.4	26.0	78.8	34.2	93.5	7.6	13.7	2.6	4.6
TE-3	37.2	99.0	27.9	82.1	25.1	77.2	31.0	87.8	9.4	16.8	2.7	4.9

Donde T_{AC} se refiere a la temperatura de agua caliente, T_{AF} a temperatura de agua fría, T_{BH} es la temperatura de bulbo húmedo y T_{BS} la de bulbo seco.

3.2 Problemas frecuentes en los componentes principales de una torre de enfriamiento

3.2.1 Ventiladores

A lo largo de los años se ha demostrado que la mayor parte de los problemas relacionados con el mantenimiento de una torre de enfriamiento son provocados por las fallas que se presentan en la operación de los ventiladores⁹.

Las condiciones a las que se someten estos equipos son severas, deben soportar una alta humedad, rayos del sol, frecuente vibración, cambios de temperatura y demás factores que implica una exposición a la intemperie. Los siguientes son los inconvenientes operativos más comunes:

- Fallas en el reductor de velocidad.
- Fugas de aceite.

⁹ Mcelveen Robbie, Recent developments in motor technology allow direct low speed cooling tower fans, CTI 2009.



- Contaminación de la torre por el aceite derramado.
- Incorrecta alineación de la flecha.
- Exceso de vibración.
- Corrección del ángulo en el reductor de velocidad.
- Daño a la chimenea provocado por las aspas.

3.2.2 Relleno

Considerado como la parte central de la torre de enfriamiento, es el medio por el cual se lleva a cabo el intercambio de calor y por lo tanto la disminución de la temperatura del agua. Existen diferentes tipos, arreglos y materiales que conforman el relleno para atender las necesidades de cada proceso, por ejemplo el tipo de flujo, la carga térmica, la disposición de aire y la locación de la torre entre otros factores; a pesar del avance en el desarrollo tecnológico aún existen problemas por resolver, sobre todo cuando no se aplican acciones para una adecuada operación, los más comunes son:

- Rompimiento del relleno.
- Baja eficiencia.
- Incrustación.
- Crecimiento biológico.
- Altas caídas de presión.

3.2.3 Eliminadores de arrastre

La remoción del arrastre de agua por medio del abatimiento en la corriente de salida del aire se ha modificado a lo largo de los años, conforme los desarrollos tecnológicos avanzan también lo hacen las mejoras en este proceso y en la manera de hacerlo, en el siguiente capítulo se ahondará en las modificaciones



más recientes hechas a estos equipos para mejorar su función. Los problemas más frecuentes de los eliminadores de rocío son:

- Disminución en la eficiencia.
- Altas caídas de presión.
- Incrustación.
- Crecimiento biológico.
- Disminución del área de impacto de las gotas.

3.3 Curvas de comportamiento¹⁰

Este es un análisis que estima la capacidad de enfriamiento de las torres, además describe el comportamiento de las torres de enfriamiento al modificar el flujo de agua y evalúa la variación de las temperaturas (T_{AF} y T_{BH} principalmente). Se obtendrán las curvas de las torres con apoyo del simulador CTI Toolkit que sirven como base en la aplicación de este método.

El procedimiento consiste en utilizar curvas de las torres tomando como base al menos tres rangos del flujo de agua de diseño: 90%, 100% y 110%. El simulador requiere de parámetros de diseño para generar la curva, éstos son:

- Flujo de agua [GPM]
- Temperatura agua caliente T_{AC} [°F]
- Temperatura agua fría T_{AF} [°F]
- Temperatura bulbo húmedo T_{BH} [°F]
- Temperatura bulbo seco T_{BS} [°F]
- Rango ($T_{AC} - T_{AF}$) expresado en °F
- Presión barométrica [in Hg]
- Potencia del ventilador [HP]
- L/G

¹⁰ Acceptance test code for water cooling towers (CTI Code ATC_105)



A partir de estos datos es posible generar la curva de comportamiento de la torre y ubicar su punto de diseño, en las abscisas (eje X) se ubica la temperatura de bulbo húmedo [°F], en las ordenadas (eje Y) la temperatura de agua fría [°F] y como parámetro se utilizan diferentes rangos, es importante mencionar que el simulador genera las curvas con los rangos más cercanos a la operación de la torre, y depende de los datos que se hayan introducido. El punto de diseño se observa en la Figura 7.

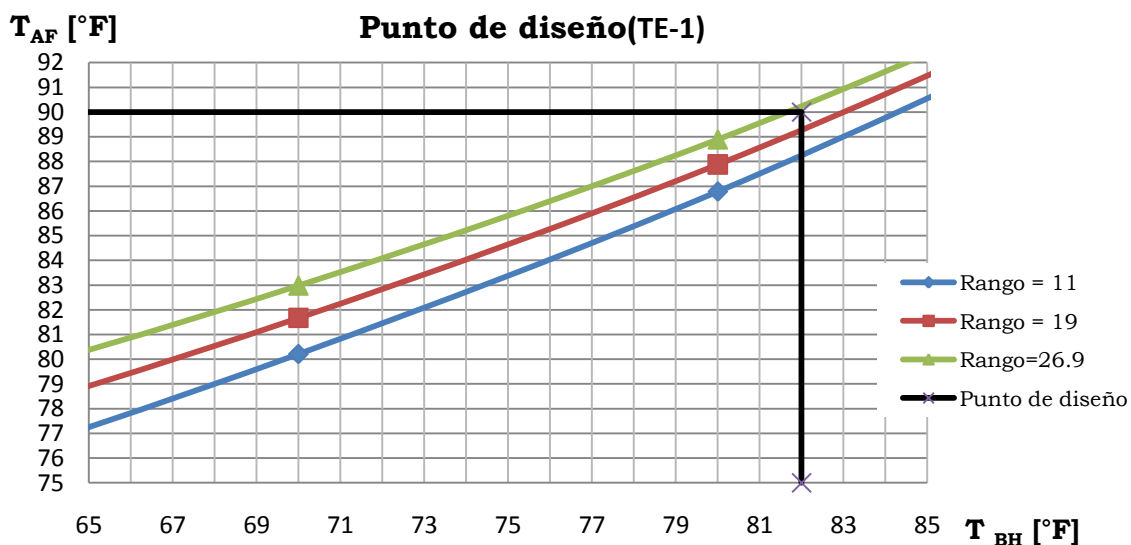


Figura 7 Punto de diseño de la torre TE-1

Esta gráfica nos indica que la temperatura de bulbo húmedo y de agua fría bajo condiciones de diseño son 82°F y 90°F respectivamente, lo cual coincide con los datos de la Tabla 2.

El siguiente paso es construir gráficas similares pero con la variación del flujo de diseño (90%, 100% y 110%) en ellas se observan las curvas a diferentes rangos y se traza una línea vertical a partir del valor de T_{BH} de los registros, es decir la temperatura de bulbo húmedo bajo la operación actual. Esta línea cruzará cada una de las curvas de los rangos; y a partir de cada intersección se desplaza una línea horizontal hacia el eje de las ordenadas (T_{AF}) hasta tocarlo para identificar el valor que corresponde.

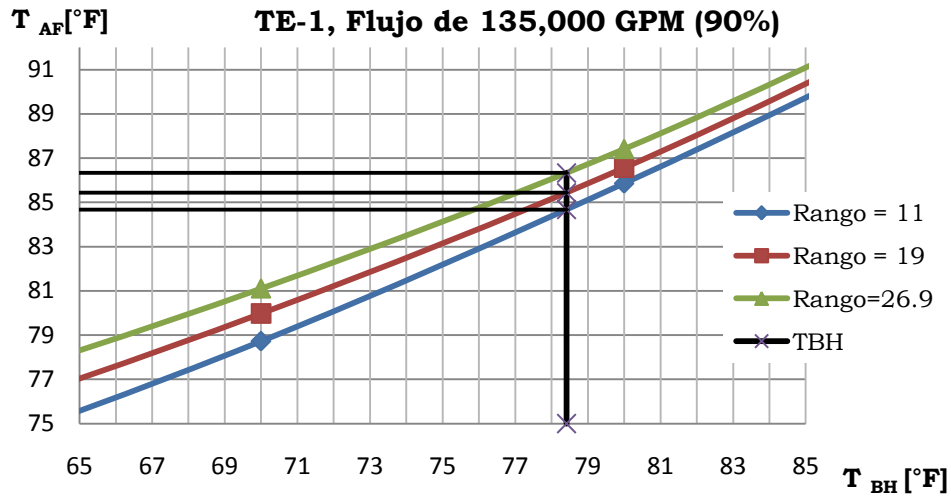


Figura 8 90% del flujo de diseño

La Figura 8 muestra las temperaturas de agua fría obtenidas a un flujo de 90% con los respectivos rangos; la Figura 9 se refiere al flujo de diseño (100%) y la variación de la temperatura de agua fría bajo el 110% de flujo se observa en la Figura 10.

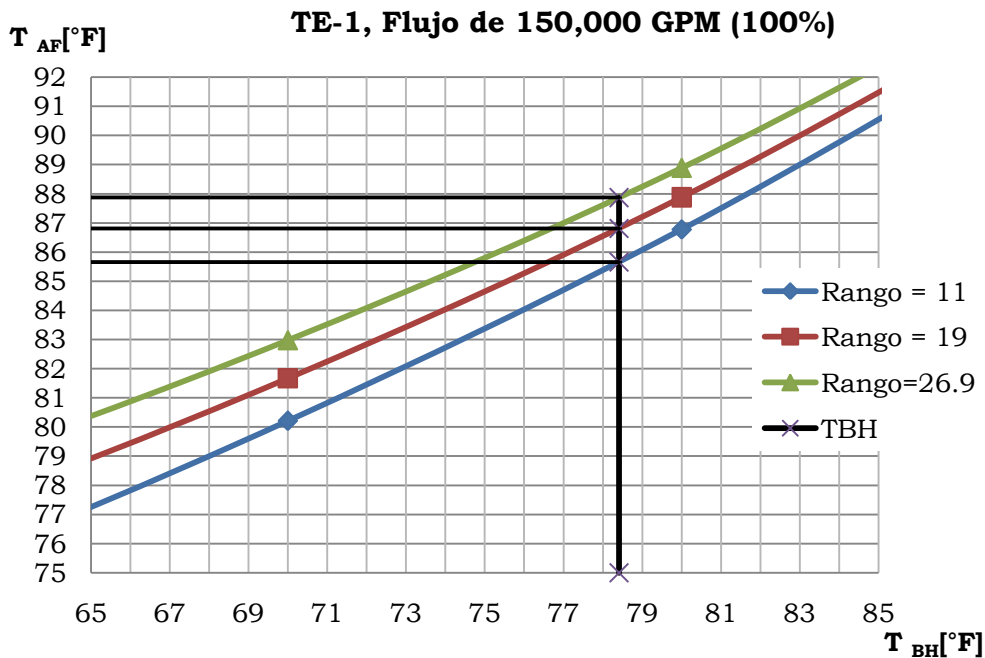


Figura 9 100% Flujo de diseño

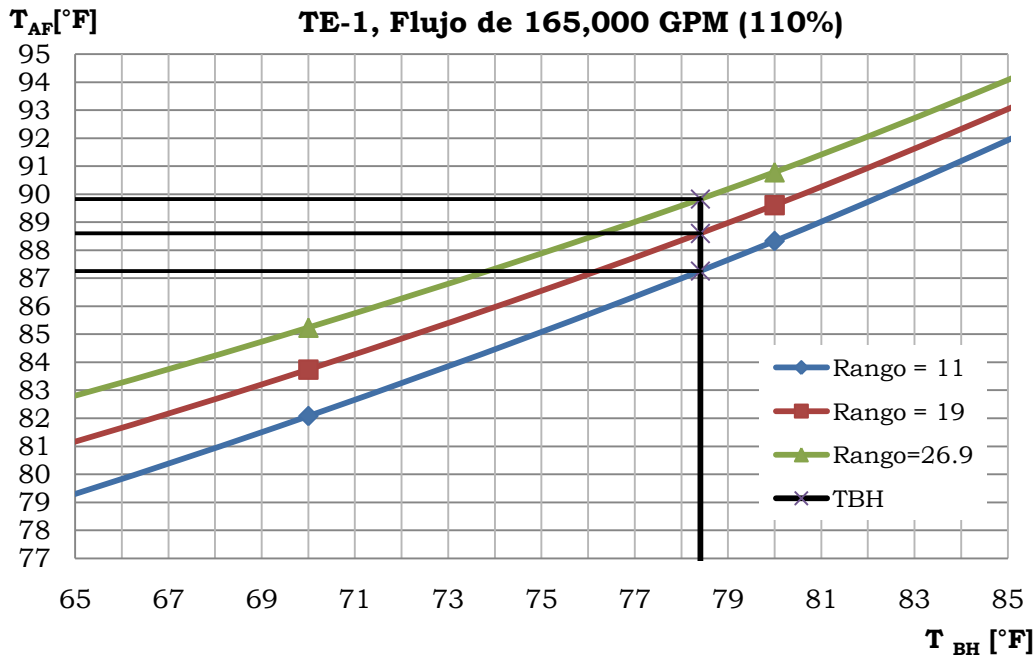


Figura 10 110% flujo de diseño

Con estas gráficas es posible predecir la temperatura de agua fría aun cuando se modifican condiciones operativas como el flujo de agua, la T_{BH} y el rango; la T_{AF} es un parámetro que puede indicar la capacidad de enfriamiento de la torre, de aquí lo interesante de esta evaluación.

Para continuar, se obtienen las temperaturas de agua fría a diferentes rangos de flujo, los resultados se observan en la Tabla 6; con ellos se construye la siguiente gráfica T_{AF} vs Rango y como parámetro se tienen los tres porcentajes del flujo de agua, ver Figura 11.

Tabla 6. Temperaturas de agua fría a diferentes flujos de agua

Rango [°F]	Flujo de agua de diseño		
	90%	100%	110%
11	84.67	85.66	87.26
19	85.44	86.81	88.60
26.9	86.33	87.87	89.93



A partir del rango de la operación actual se traza una línea vertical que cruzará las curvas, lo siguiente es desplazarse horizontalmente en cada una de las intersecciones hasta tocar el eje de las ordenadas, este movimiento nos proporciona la temperatura de agua fría que corresponde a cada flujo de agua que se estima; ver Figura 11.

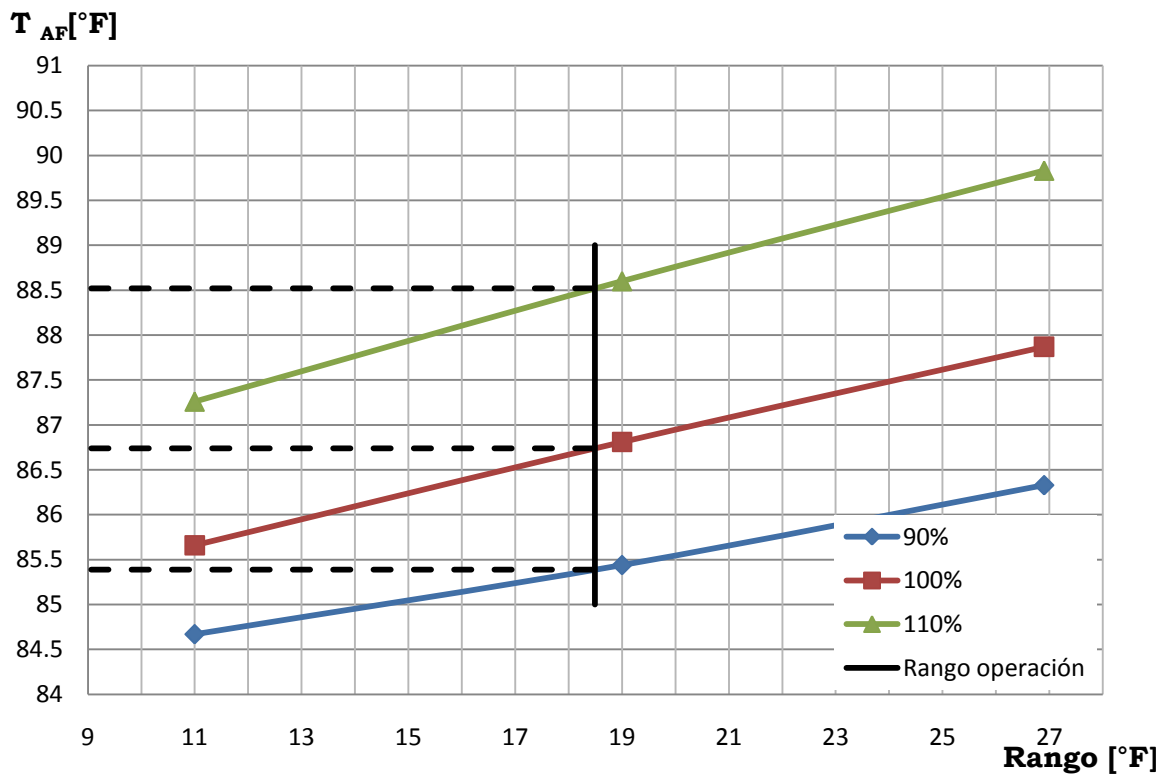


Figura 11 T_{AF} a diferentes flujos de agua

La Figura 11 permite tener temperaturas de agua fría en función del flujo de agua, con esto se crea la última gráfica T_{AF} vs Flujo de agua (Figura 12), ésta nos proporciona el flujo de agua esperado, este valor es necesario en el cálculo de la capacidad de enfriamiento de la torre.

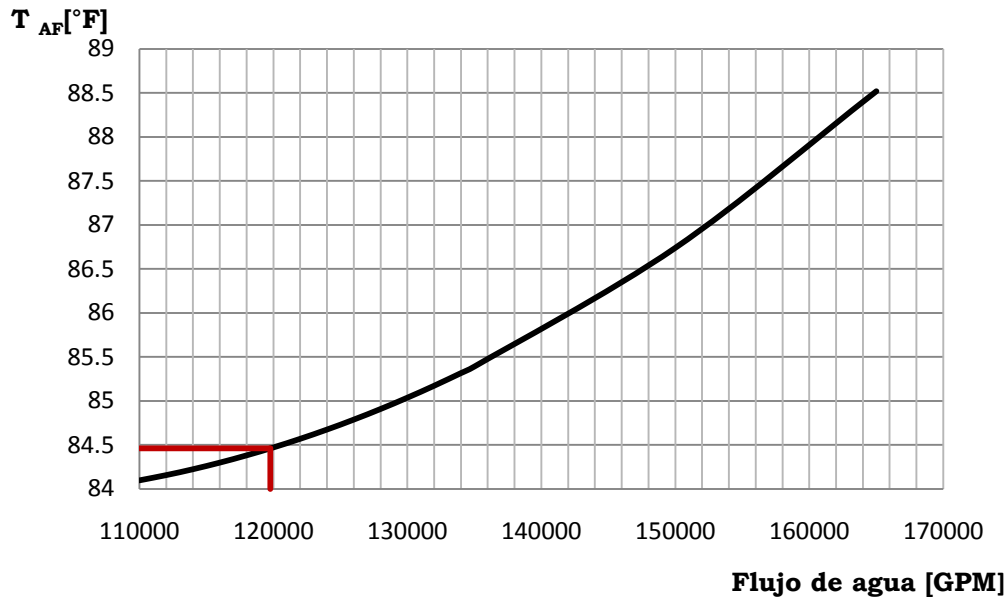


Figura 12 Obtención del flujo de agua esperado

Lo que se hace es utilizar la T_{AF} de la operación real y trazar una línea horizontal hasta tocar la curva, en ese punto se hace un desplazamiento vertical hacia el eje de las abscisas para determinar el flujo de agua esperado, con la regresión lineal cuyo factor $R=1$ se obtiene un $Q_E = 119,776.36$ GPM.

3.3.1 Cálculo de la capacidad de enfriamiento

La capacidad de enfriamiento se obtiene a partir del flujo de agua ajustado (Q_A) y del flujo de agua esperado (Q_E); el primero se calcula con la Ecuación 3-1 mientras que el segundo se obtiene al aplicar el método de curva de comportamiento.

$$Q_A = Q_R \left(\frac{P_d}{P_p} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_p}{\rho_d} \right)^{1/3}$$

Ecuación 3-1

Donde Q_A es el flujo de agua esperado, Q_R es el promedio del flujo de agua de retorno (de datos históricos), P_d y P_p representan la potencia del ventilador de



diseño y prueba respectivamente y ρ_d y ρ_p son la densidad del aire de diseño y prueba respectivamente.

Sustituyendo valores queda como:

$$Q_A = (84990 \text{ GPM}) (1) \left(\frac{0.07125 \text{ lb/ft}^3}{0.06922 \text{ b/ft}^3} \right)^{1/3}$$

$$Q_A = 85,812.83 \text{ GPM}$$

La Ecuación 3-2 es la que determina la capacidad de enfriamiento de las torres:

$$\text{Capacidad enfriamiento [\%]} = \frac{Q_A}{Q_E} \times 100$$

Ecuación 3-2

Una vez encontrados los dos valores que se requieren es posible sustituirlos y obtener el respectivo porcentaje:

$$\text{Capacidad enfriamiento [\%]} = \frac{85,812.83 \text{ GPM}}{119,776.36 \text{ GPM}} \times 100$$

El resultado de aplicar este desarrollo a las torres de enfriamiento es la obtención de la capacidad de enfriamiento, los valores se observan en la Tabla 7 de la sección 4.1.

3.4 Evaluación económica

Para realizar una comparación entre las alternativas aplicables a las torres de enfriamiento, se aplica un análisis económico, el cuál complementa el respaldo de



las propuestas en este trabajo de tesis. Parámetros como el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación interna (PRI) se utilizan para llevar a cabo esta evaluación económica.

Para comenzar deben identificarse las variables principales para la evaluación económica de cualquier proyecto:

- Calcular la inversión inicial de cada propuesta.
- Identificar los costos involucrados (fijos y variables).
- Calcular los ahorros y/o ingresos obtenidos por implementar las propuestas.
- Al contar con el valor de los costos y ahorros es posible determinar los flujos de efectivo para un periodo de 20 años; se considera una reinversión del monto inicial en el año 5, 10 y 15 de acuerdo a la rehabilitación que requieren los equipos.
- De acuerdo a la fluctuación económica de nuestro país la SHCP determina el valor de TREMA, este parámetro se utiliza para realizar el cálculo del valor presente neto, por lo tanto $TREMA = 12\%$.
- El VPN es el resultado de restar los costos netos a los beneficios netos de un proyecto: $VPN = Beneficios_{netos} - Costos_{netos}$ tal relación involucra varios factores económicos por lo tanto la ecuación que calcula el valor presente neto es:

$$VPN = -F_0 + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+i)^j}$$

Ecuación 3-3



Donde: F_0 es la inversión inicial, n representa el número de periodos, la letra i representa el índice de tiempo y F_j son los flujos de efectivo, éstos consideran costos, ingresos, utilidades, depreciación, e incluso impuestos si así se decide, a continuación se presenta la metodología para obtener los flujos de efectivo: Se obtiene el Costo Total Efectivo de Operación (CTEO), este es un parámetro que petróleos mexicanos define para llevar a cabo su evaluación económica y se calcula con la Ecuación 3-4.

$$\text{CTEO} = \text{Costo Fijo Directo}_{\text{TOTAL}} + \text{Costo Variable de Producción}_{\text{TOTAL}}$$

Ecuación 3-4

Continúa con la obtención del Costo Total de Operación (CTO) que se calcula como:

$$\text{CTO} = \text{Costo Fijo Indirecto}_{\text{Con depreciación}} + \text{CTEO}$$

Ecuación 3-5

El siguiente paso es calcular las Utilidades Antes de Impuestos (UAI) con la siguiente relación:

$$\text{UAI} = \text{Ingreso Total Anual} - \text{CTO}$$

Ecuación 3-6

También es necesario conocer las Utilidades Después de Impuestos, para ello se considera una tasa del 30% que establece la SHCP para el año 2009.

$$\text{UAD} = \text{UAI} - \text{Impuestos}$$

Ecuación 3-7



Una vez calculados estos parámetros es posible determinar el flujo de efectivo anual (F_j) que se utiliza para calcular el VPN:

$$F_j = (\text{UAD}) - \text{Inversión total y/o Capital de trabajo} + \text{Depreciación}$$

Ecuación 3-8

- Se realiza el cálculo de TIR conforme lo expresa la siguiente ecuación:

$$0 = -F_0 + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+\text{TIR})^j}$$

Ecuación 3-9

Donde: F_0 es la inversión inicial, n representa el número de periodos, F_j son los flujos de efectivo, y la TIR será el valor que haga cero a la ecuación.

- El último paso es el cálculo del PRI, para ello se realiza una interpolación que considera el VPN negativo y el primer valor positivo de VPN.



4. Resultados

4.1 Capacidad de enfriamiento

El método desarrollado en la sección 3.3 se aplicó a las torres TE-1, TE-2 y TE-3, para determinar su capacidad de enfriamiento. Los resultados se muestran en la Tabla 7; mientras que las respectivas gráficas se pueden consultar en la sección 3.3 para la torre TE-1, en el anexo A 4 para la torre TE-2 y en el anexo A 5 para la torre TE-3.

Tabla 7. Capacidad de enfriamiento de las torres del C.P.G.

Torre	Capacidad de enfriamiento
TE-1	71.6 %
TE-2	64.4 %
TE-3	76.9 %

4.2 Áreas de oportunidad

Al C.P.G. de este caso de estudio se alimentan 5,812 GPM (31,681m³/día) de agua para satisfacer las necesidades operativas, de esta cantidad 4,258 GPM (23,210 m³/día) se destinan como repuesto a torres de enfriamiento, es decir poco más del 70% del agua que entra al centro de trabajo se concentra en la operación de estos equipos, de aquí la gran importancia de las torres de enfriamiento y de enfocar los esfuerzos para el ahorro de agua en esta área.

El repuesto en una torre de enfriamiento es una corriente empleada para recuperar el agua que se pierde por la evaporación, el arrastre y la corriente de purgas. Por ello las oportunidades para una mejor administración del agua se



deben concentrar en reducir al mínimo las pérdidas de este líquido y así lograr un impacto directo sobre el repuesto, a su vez implica importantes ahorros para el centro de trabajo en: agua utilizada, factores económicos y consumo de químicos; más adelante se discutirán a detalle los beneficios por una reducción en las pérdidas de agua. La Figura 13 muestra el porcentaje que representa cada una de las corrientes mencionadas respecto al agua de repuesto de acuerdo a los datos históricos del centro procesador de gas natural.

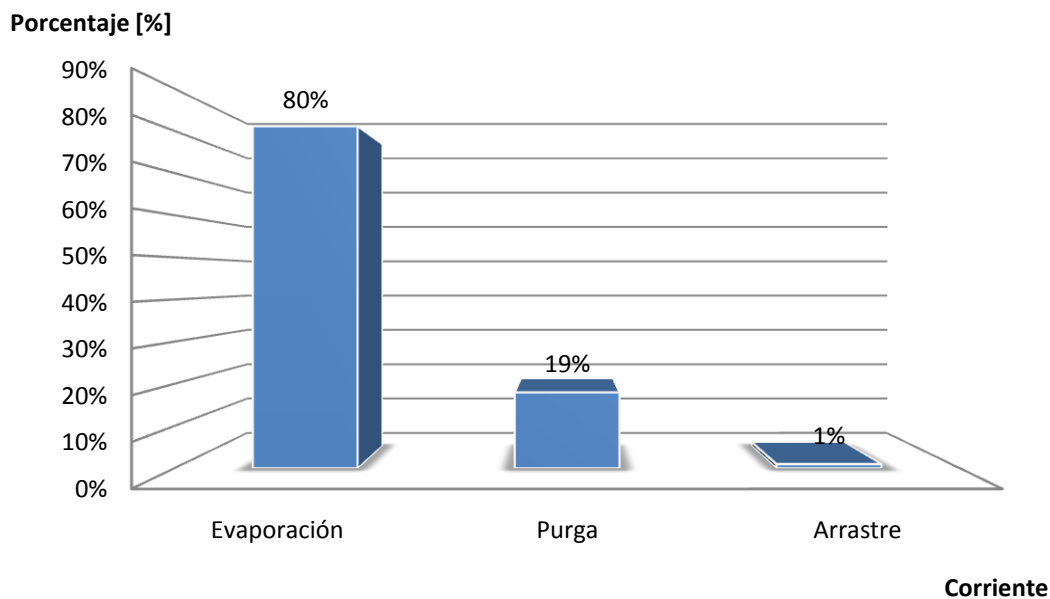


Figura 13 Porcentaje respecto al agua de repuesto de cada corriente

Uno de los puntos que permite identificar áreas de oportunidad en las torres de enfriamiento son los de estudios de inspección física, con éstos se encontró que la estructura y sus componentes internos presentan problemas como: mala distribución del agua caliente, boquillas tapadas, cascadas de agua, relleno dañado, crecimiento biológico, incrustación; entre otras. Estos factores afectan el desempeño de los equipos e incrementan las pérdidas de agua, por ello las actividades para promover una mejor administración del agua se concentran en limpiar y rehabilitar las torres de enfriamiento y sus componentes; al aplicar estas acciones se reducen, o en algunos casos, se eliminan los problemas arriba



mencionados, así, teóricamente hacen posible la disminución en la temperatura del agua fría y se promueve un incremento de la capacidad de enfriamiento. Para más detalles sobre los estudios de inspección física se recomienda consultar los anexos A 1, A 2 y A 3.

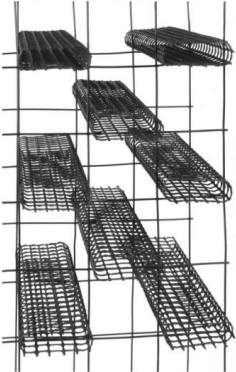



El análisis de los nuevos desarrollos tecnológicos en materia de torres de enfriamiento permite ampliar el panorama sobre las áreas de oportunidad en estos equipos, ya que se exploran alternativas para el tratamiento y reutilización del agua y es aquí donde se incluye el otro factor importante en este trabajo de tesis: el uso eficiente de la energía en la operación de las torres. En el desempeño energético de estos equipos solo se pueden atacar dos puntos, las bombas, y los ventiladores involucrados en la operación; proponer equipos más eficientes y/o tomar medidas operativas que promuevan el uso eficiente de la energía es uno de los objetivos de dicho análisis. Los componentes propuestos con el que se persigue un ahorro de agua y energía se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Desarrollos tecnológicos para la torre de enfriamiento

Componente	Tipo	Muestra
Eliminador de arrastre	XF150Max de Brentwood Industries.	

Resultados



Componente	Tipo	Muestra
Relleno	Opti-bar de Tower Components Inc	
Motor del ventilador	VS1CTD de Baldor Electric Company	
Tratamiento de purgas	Ultrafiltración por Dow Technology	
Reutilizar agua reciclada como agua de repuesto.	Suavizado de alta eficiencia para torres con tecnología ZBD de WCTI (Water Conservation Techonlogy International)	



4.3 Desarrollos tecnológicos: nuevas soluciones

El desarrollo de la ingeniería para optimar los procesos productivos tiene un avance continuo, y nuevos aspectos son considerados en ese progreso como: la protección ambiental, la eficiencia energética, un mejor aprovechamiento de los recursos naturales y procesos más limpios; sin embargo tal desarrollo no deja de lado los factores ya establecidos como: procesos más rápidos y a menor costo, mayor seguridad durante la operación, menor programación en el mantenimiento de los equipos; entre otras.

Esta fue la razón para llevar a cabo una búsqueda con los últimos avances sobre torres de enfriamiento, el objetivo es presentar alternativas aplicables a los centros y plantas industriales para resaltar la viabilidad de alcanzar nuevas metas en los procesos y reforzar el desarrollo de la ingeniería ambiental en nuestro país; la directriz es el ahorro de agua y energía.

Este análisis pretende respaldar las propuestas para mejorar la operación y desempeño de estos equipos; se incorpora como un apoyo para orientar las recomendaciones hacia nuevos componentes que presentan mayores beneficios operativos.

En la Tabla 9 se muestran las recientes publicaciones que sustentan las afirmaciones hechas sobre mejoras al sistema de una torre de enfriamiento. Al avanzar en esta sección se amplían los detalles sobre la información recopilada.

Tabla 9. Nuevas mejoras para torres de enfriamiento

Título	Generalidades	País	Año
Recent developments in motor technology allow direct drive of low speed cooling	Nuevo desarrollo tecnológico sobre la operación de los ventiladores. Describe la operación de motores de baja velocidad con imán permanente que puede usarse directamente al ventilador con el objetivo de reemplazar la flecha de transmisión y el reductor de velocidad.	EUA	2009

Resultados



Título	Generalidades	País	Año
towers fans			
Effective use of recycled water in cooling towers with new green technology	Un pretratamiento patentado del agua de repuesto por medio de la filtración por intercambio de iones (suavizado de agua). que aplica un “inhibidor químico de corrosión de sílice” a sistemas que utilizan la tecnología de “cero descargas de purgas” (ZBD, Zero Blowdown Discharge)	EUA	2009
Ecodesign of the cooling tower Thailand	Identificar puntos clave de una torre de enfriamiento a contraflujo de 400 toneladas que permitan generar datos para los nuevos diseños de torres y se logre un producto más amigable con el ambiente	Tailandia	2009
A review of drift eliminator performance	Se analizan los puntos claves que deberán considerarse para hacer una adecuada selección de estos componentes, se presentan curvas de caída de presión en seco y bajo condiciones húmedas	EUA	2006
DOW Blowdown Ultrafiltration	Reutilizar el agua de las purgas de las torres de enfriamiento y alimentar 8 calderas con ella. A través de: Filtro multimedia-Ultrafiltración-OI-Desgasificador-OI ₂ -EDI	Japón	2006



4.3.1 Eliminador de arrastre

Conforme las mejoras en estos equipos avanzaron, la permisividad de agua de arrastre fue disminuyendo, con ello se obtuvo una mayor eficiencia en las torres de enfriamiento y por tanto una menor cantidad de agua en la corriente de arrastre. La Figura 14 muestra la disminución de esta corriente respecto al porcentaje de agua de recirculación a lo largo de los últimas tres décadas.

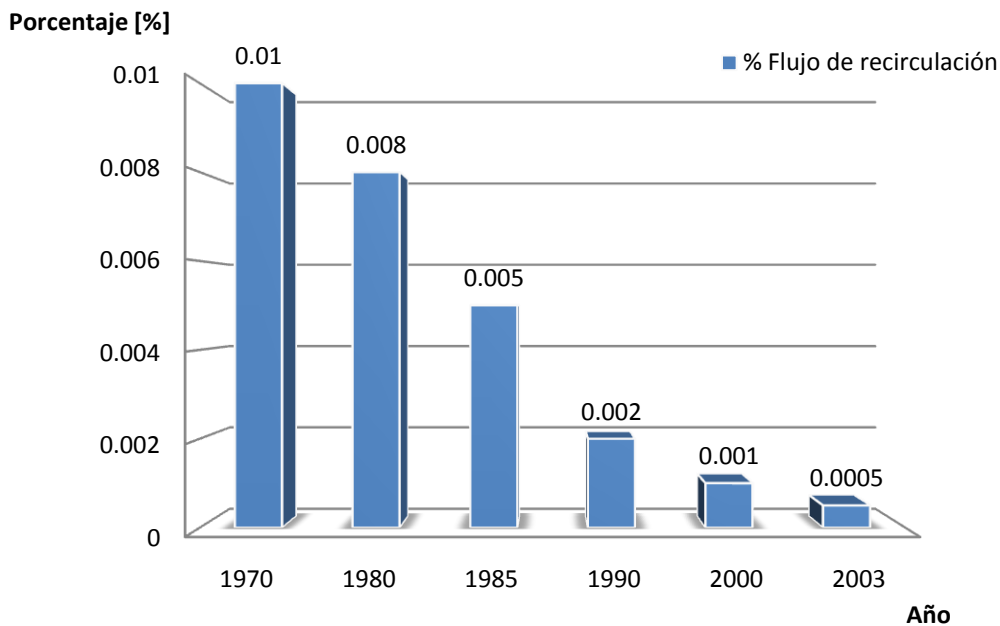


Figura 14 Porcentaje de arrastre respecto al flujo de recirculación.

Una mayor cantidad de agua de arrastre significa una mala obstrucción por parte de los eliminadores, esto implica un aumento en la caída de presión dentro de la torre y dicho aspecto no beneficia la operación porque se exige demasiado a los ventiladores, por ello a lo largo de los años el desarrollo tecnológico ha cambiado su enfoque y ahora no solo importa reducir la corriente de arrastre sino hacerlo con la menor caída de presión posible.



❖ Tipos de eliminadores

Actualmente existen dos tipos de eliminadores de arrastre: los de hojas y los celulares. Los primeros se forman por hojas generalmente de PVC en forma de ondas, colocadas muy cerca una de la otra para provocar cambios en la dirección del flujo de aire, estas ondas deberán tener una curva de forma sinusoidal, la Figura 15 muestra un esquema general de este tipo de componentes.

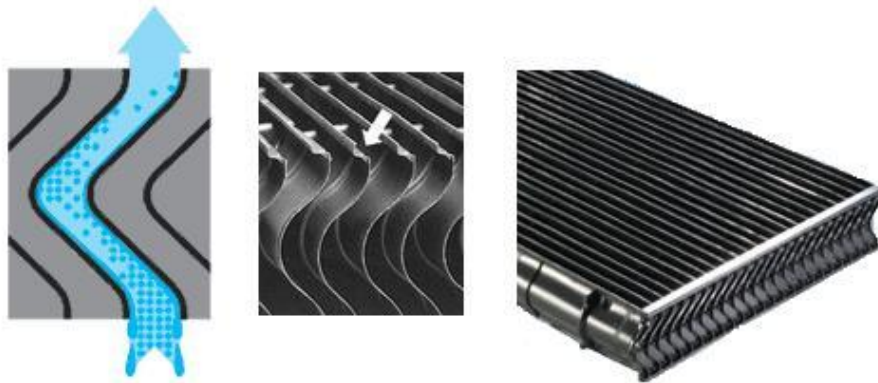


Figura 15 Eliminadores de arrastre tipo hojas.

Respecto a los eliminadores tipo celular se basan en la estructura de los de hojas sin embargo cuentan con una mayor área de contacto para la incidencia de las gotas e incorporan puntas redondeadas en su estructura para una mejor distribución del agua y el aire, la Figura 16 muestra las características de los eliminadores de arrastre tipo celular.



Figura 16 Eliminadores de arrastre tipo celular.

Ambos diseños de eliminadores (hojas y celulares) pueden aplicarse para torres de enfriamiento de flujo cruzado y de contraflujo debido a los arreglos que presentan, sin embargo esto no significa que un mismo eliminador funcione en los dos tipos de torres.

❖ Eliminadores analizados

El análisis del estudio del CTI realiza una evaluación de los siguientes tipos de eliminadores (Tabla 10).

Tabla 10. Eliminadores de arrastre analizados por el CTI

Clave	Tipo	Espaciamiento	Uso	Tipo de trayectoria	Tipo de punta
X1	Hojas	1.2"/30.5mm	CF/FC	Redondeada	Sin punta
X2	Hojas	0.80"/20.3mm	CF/FC	Redondeada	Sin punta
X3	Hojas	0.97"/24.6mm	TI/CF	Redondeada	Sin punta
Y1	Celular	0.80"/20.3mm	CF/FC	Angular	Sin punta



Clave	Tipo	Espaciamiento	Uso	Tipo de trayectoria	Tipo de punta
Y2	Celular 2	1.5"/38.1mm	CF/FC	Redondeada	Sin punta
Y3	Celular 2	0.87"/22.1mm	CF/FC	Redondeada	Sin punta
Y4	Celular 2	1.5"/38.1mm	CF/FC	Redondeada	Sin punta
Y5	Celular 3	0.87"/22.1mm	CF/FC	Redondeada	Punta alternada
Y6	Celular 3	0.87"/22.1mm	CF/FC	Redondeada	Sin punta
Y7	Celular 2	1.2"/30.5mm	FC	Angular	Sin punta
Y8	Celular 2	1.5"/38.1mm	FC	Angular	Sin punta
Y9	Celular 2	1.5"/38.1mm	FC	Redondeada	Sin punta
Y10	Celular 3	0.87"/22.1mm	FC	Redondeada	Sin punta

Celular= Tipo celular 1era generación, Celular 2 = 2da generación, Celular 3= Celular con modificaciones, CF= Contraflujo, FC= Flujo Cruzado, TI= Tiro inducido.

❖ Desempeño

Para llevar a cabo una correcta selección del tipo de eliminador deben considerarse puntos que promueven un adecuado desempeño operativo, existen dos principales:

- El porcentaje respecto al flujo de recirculación (cantidad de agua perdida por arrastre) y
- Aún más importante, la caída de presión que provoca cada eliminador.



La caída de presión generalmente depende entre otros factores de: el espaciamiento de las hojas, el radio de las curvas a lo largo del recorrido por el eliminador, el número de curvas (cambios de dirección en el flujo de aire y agua) del eliminador. Estos factores incrementan el ΔP porque la trayectoria del aire a lo largo de la torre encuentra obstáculos y se generan turbulencias que impiden un flujo de aire libre, este fenómeno incrementa el diferencial de presión. Para evaluar la caída de presión de estos equipos se realizan pruebas con las que se generan curvas de caída de presión, éstas son proporcionadas por los proveedores de los equipos y sirven como apoyo en el diseño de la torre de enfriamiento. En la publicación que se analizó, las mediciones corresponden a presión estática y se realizan 38 cm por arriba y 13 cm por debajo del eliminador de arrastre (se grafica ΔP vs Vel. Aire).

Las curvas pueden arrojar dos tipos de datos, en seco y en condiciones húmedas.

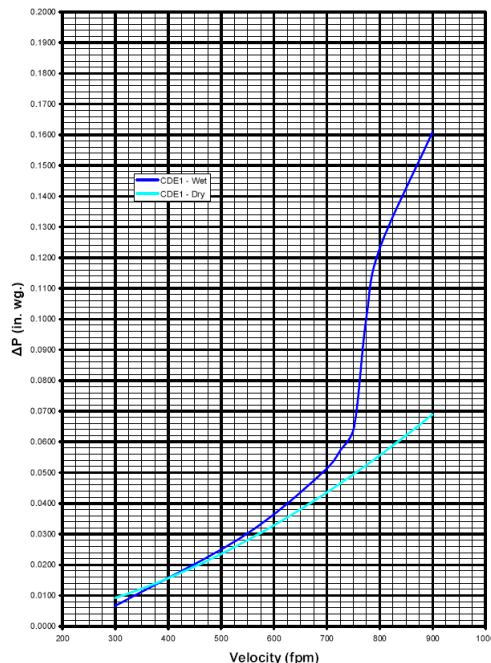


Figura 17 Curvas de caída de presión. (—húmedo, --seco)

En “seco” se refiere a la evaluación donde solo actúa el flujo de aire y “húmedo” cuando las mediciones se realizan mientras circulan el flujo de aire y de agua al



mismo tiempo; por ello es importante realizar un diseño en base a los datos en húmedo ya que es una aproximación más cercana a la operación real de los eliminadores de rocío. Además como se muestra en la Figura 17 en algunos casos la desviación entre los datos es considerable lo que puede provocar un mal diseño que a la larga resulta bastante costoso para el centro de trabajo.

❖ Resultados

Los resultados señalan que los eliminadores considerados de alta eficiencia y con el espaciamiento más angosto presentan los mayores incrementos de caída de presión al aumentar la velocidad del aire debido a que una gran cantidad de agua queda atrapada en el eliminador, tanto que al apagar el ventilador de la torre piloto salió toda esa agua, el eliminador X1 refleja este resultado. Esta retención de agua genera una muy alta caída de presión que se refleja en el ventilador al exigirle más potencia para generar la salida de aire provocando un aumento en el consumo de energía.

Se evaluaron dos tipos de eliminadores (Y5 y Y6) muy similares cuya única diferencia es la adición de puntas alternadas en uno de ellos, lo que se encontró fue que al aumentar la velocidad del aire el incremento en la caída de presión del eliminador sin las puntas (Y6) alternadas es 20% mayor. Estas puntas proveen un canal que dirige el agua en una sola corriente facilitando su drenado hacia el bacín de agua fría, así no se acumula en la entrada del eliminador y evita un incremento en la caída de presión por obstruir el flujo de aire.

Otro factor es el ángulo de las curvas en la trayectoria del eliminador, la Figura 18 muestra las dos principales, eliminadores de arrastre con trayectoria angular o redondeada.

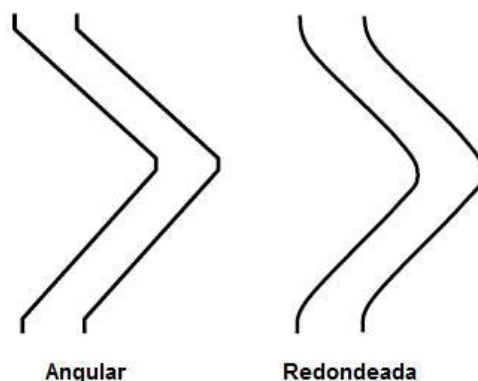


Figura 18 Curvas en la trayectoria de los eliminadores de arrastre

El motivo por el que se hicieron eliminadores de forma angular es lograr una separación del flujo y una turbulencia alta de las corrientes, sin embargo también implica altas caídas de presión y mayor arrastre de gotas; en el estudio se comparan dos eliminadores (Y8 y Y9) para torres de contraflujo con ambos arreglos de trayectoria, los resultados arrojan que la caída de presión aumenta 25% más en una trayectoria angular, es decir el eliminador Y8.

Al respecto de las diferentes configuraciones para la interacción del agua y el flujo de aire el desarrollo de los eliminadores ha propuesto utilizar diseños para cada tipo de torre. Los eliminadores para flujo cruzado incorporan un ángulo de descarga a lo largo de su estructura lo cual contribuye a dirigir la salida del aire hacia el ventilador, el efecto se nota en la disminución de la caída de presión; por lo tanto el estudio demostró que no deben utilizarse eliminadores diseñados para flujo cruzado en torres a contraflujo debido a que en todas las velocidades de prueba la caída de presión resultó alta.

La Tabla 11 resume los aspectos que deben considerarse al momento de elegir un eliminador de arrastre.



Tabla 11. Consideraciones en la selección de un eliminador de arrastre

Elemento	Consideración
Caída de presión	Principal factor a cuidar, debe ser el mínimo valor posible que proporcione el eliminador de arrastre. Se verifica con la curva del equipo que deberá ser con datos en “húmedo”.
Arreglo	Celular o de hojas, y los hay tanto para torres a flujo cruzado como para contraflujo. Le elección dependerá de la facilidad de proporcionar el mantenimiento adecuado y de colocarlo dentro de la torre.
Espaciamiento	Tiene que ser angosto (20 y 38 mm) pero no lo suficiente para propiciar retención de agua en el eliminador.
Curvas en la trayectoria	El último desarrollo son las puntas redondeadas (no angulares) se demuestra una reducción 25% la caída de presión.
Ángulo de descarga	Se encuentra a lo largo de la trayectoria de este equipo así se dirige el flujo de aire hacia los ventiladores. Contribuye a menor caída de presión. Solo aplica a torres de flujo cruzado.
Puntas	Mejores resultados (20%) respecto a la caída de presión en equipos con puntas alternadas, se proporciona un mejor drenado del agua hacia el bacín. Solo aplica a torres de contraflujo.
Tipo de flujo	No deben aplicarse diseños para flujo cruzado en torres de contraflujo, y viceversa. De lo contrario la caída de presión es muy alta.

Una vez descritos los puntos importantes para la función de un eliminador de arrastre y con base en el análisis presentado, se puede concluir que los agentes responsables de un buen desempeño operativo son:

- Trayectoria redondeada a lo largo del eliminador.



- Espaciamiento que genere la mayor área para el contacto inercial de las gotas.
- Adecuada orientación de la descarga de aire

Tales características persiguen un solo objetivo: la reducción de pérdidas de presión. El parámetro que evalúa el desempeño de los eliminadores de arrastre, es la temperatura de agua fría, dejando el resto de los componentes sin cambios y solo modificando el tipo de eliminador puede tenerse un resultado comparativo, el cual se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Comparativo del rendimiento de los eliminadores

Eliminador	T _{AF} [°C]
Y1	-0.03
Y5	-0.03
Y7	+0.36
Y8	+0.36

Se tomo como base el eliminador Y4, y como se observa los eliminadores Y1 y Y5 presentan los mejores resultados conforme al desempeño (Figura 19), sin embargo como lo más relevante es evitar pérdidas de presión la alternativa más conveniente es el eliminador Y5.

Este componente puede aplicarse a torres de flujo cruzado y también a contraflujo, el eliminador es de tipo celular de segunda generación con modificaciones, tiene un espaciamiento de 22.1 mm, presenta una trayectoria redondeada para la dirección del flujo de aire y es el único que incorpora las puntas alternadas para el mejor drenado del agua lo que contribuye a una menor caída de presión. La Figura 19 muestra la curva de pérdidas de presión del eliminador Y5 y su comparación con otros tipos, dichas curvas contienen los datos en seco y en húmedo.

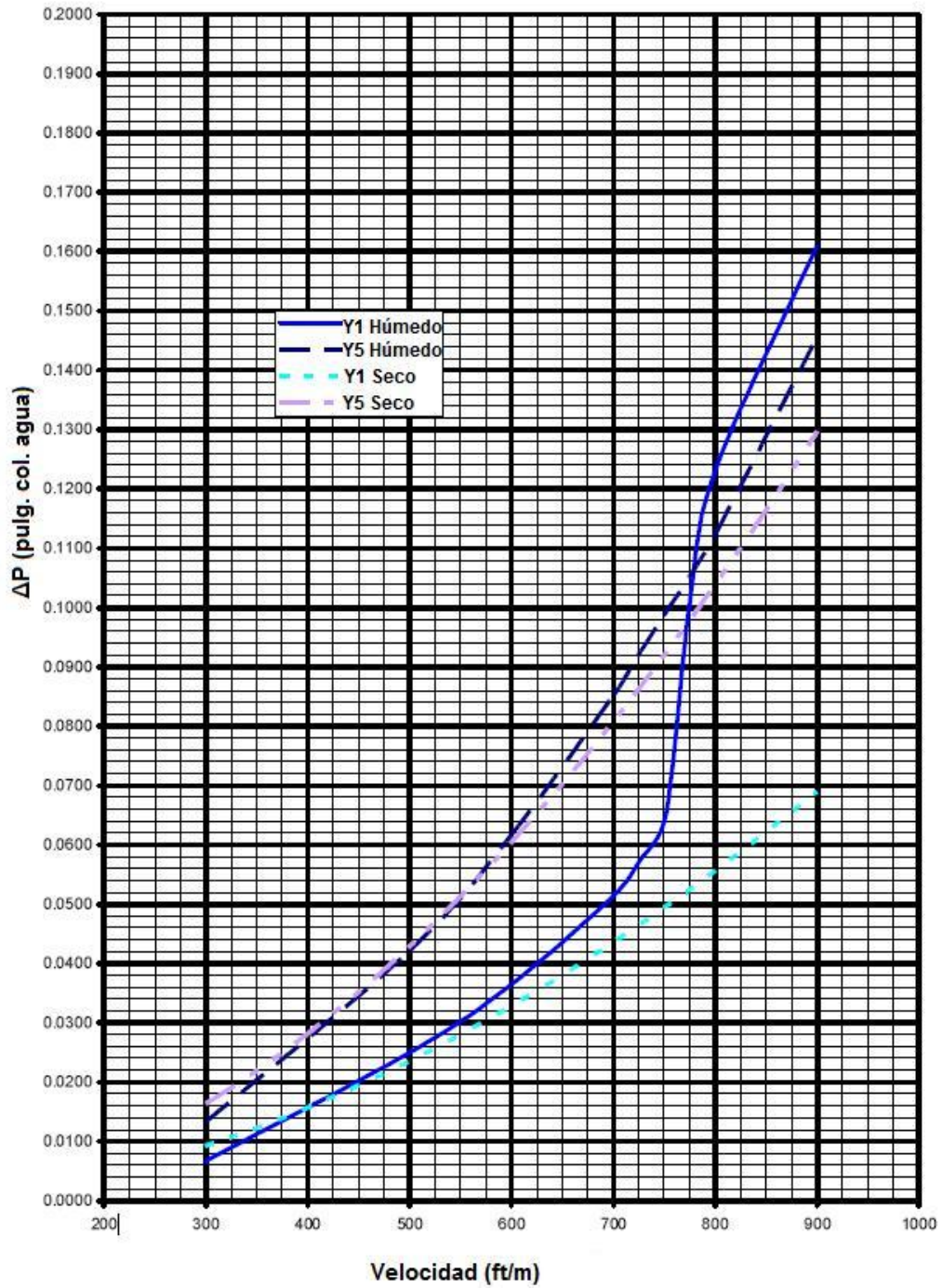


Figura 19 Curva para el eliminador Y5 comparado con Y1

En el mercado, el eliminador que cumple con las especificaciones del componente Y5 es el XF-150 MAX de Brentwood Industries.



Figura 20 XF-150 MAX de Brentwood Industries

Se ha escogido este modelo ya que es el diseño que aplica a torres de flujo cruzado y el caso de estudio para este trabajo de tesis es una torre de ese tipo. En la Tabla 13 se muestran las especificaciones técnicas del eliminador XF-150 MAX.

Tabla 13. XF-150 MAX de Brentwood Industries

Eliminador	
Nombre	XF-150 MAX
Material	Hojas corrugadas de manera sinusoidal cumplen con la norma CTI STD-136 PVC.
Diseño	Máximo desempeño con la mínima caída de presión. Mecánicamente ensamblados tecnología patentada (MA, por sus siglas en inglés). Arrastre de 0.001% de recirculación (probada con el método CTI-HBIK STD-140). Inhibidores para rayos UV. Propagación de fuego de 25 o menos según la norma E84 de la ASTM.
Torre	Flujo cruzado

Así mismo el proveedor también proporciona la curva con la caída de presión para este eliminador, la cual se muestra en la Figura 21, en ella se observa una relación directamente proporcional entre la variación del ΔP y los diferentes valores de flujo de aire.

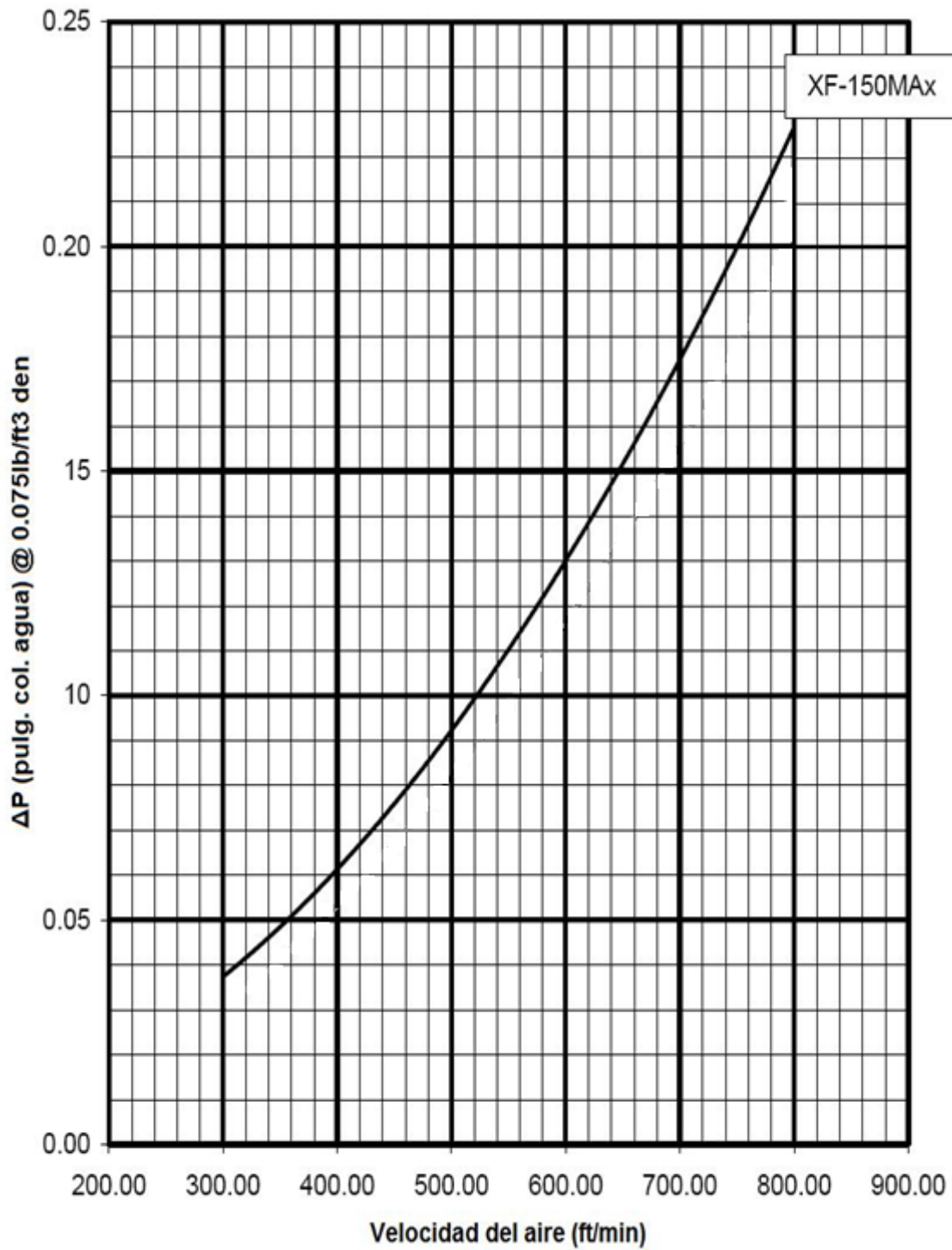


Figura 21 Caída de presión XF-150 MAX de Brentwood Industries



❖ Ecuaciones para calcular caídas de presión y velocidad del aire.

Como se mencionó en la sección anterior los puntos clave en la elección de un eliminador son: el porcentaje de arrastre y la caída de presión que provoca. Las bases teóricas en las que recae la evaluación de ambos parámetros se describen en esta sección haciendo referencia a las ecuaciones para calcularlos.

Para el total de pérdidas de presión se utiliza la Ecuación 4-1:

$$\Delta P_T = \left(P_1 + \rho g h_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} \right) - \left(P_2 + \rho g h_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} \right)$$

Ecuación 4-1

Donde P es la presión medida a la entrada (2) o salida (1) de la torre, ρ es la densidad del aire, g representa la constante universal de gravedad, y h es la presión estática, v representa la velocidad del aire.

Algunos autores generan factores para hacer posible una comparación entre los tipos de eliminadores de arrastre, en este caso la constante K considera la turbulencia del aire y se expresa como:

$$K = \frac{2\Delta P_T}{\rho V^2}$$

Ecuación 4-2

Donde ΔP_T es el total de pérdidas de presión, V es el diferencial de velocidad del aire, y ρ la densidad del aire a condiciones de operación.

Para aplicar estas soluciones teóricas debe considerarse lo siguiente:

- Se considera un flujo bidimensional incompresible.
- El flujo de aire es laminar.
- La densidad de las gotas de agua es muy pequeña, alrededor del 10% menos que la densidad del aire.
- No hay interacción alguna entre las gotas.



- Se ignora el efecto de la película del líquido sobre la superficie de la pared.
- El flujo de aire no se ve afectado por la presencia de las gotas.

Para el porcentaje de agua que sale de la torre de enfriamiento como arrastre debe conocerse la velocidad del aire a través de la torre y se mide en el exterior de la chimenea del ventilador, pero se utiliza la Ecuación 4-3 para establecer un valor a condiciones estándar:

$$V_E = \left(V_P \frac{P_{BAR}}{29.92} \right) \left(\frac{T_a + 459.7}{T_s + 459.7} \right)$$

Ecuación 4-3

V_P es la velocidad (en ft/min) que se mide con el anemómetro, P_{BAR} es la presión barométrica (en mm Hg) del ambiente, T_a es la temperatura ambiente, T_s es la temperatura promedio de las muestras de aire; ambas se expresan en °F.

Una vez que tenemos esta velocidad es posible calcular el porcentaje de arrastre del eliminador con ayuda de la Ecuación 4-4:

$$A = \left[\left(\frac{(V_{STD})(A_N)(T_M)(M_S)}{(V_M + V_W)} \right) \left(\frac{1}{(T_S)(CF)(T_M)(Q)} \right) \right] \times 100$$

Ecuación 4-4

A_N es el área de la celda expresada en ft², T_M es la cantidad de minutos que duró la prueba, M_S es el total de partículas recuperadas en la muestra de aire expresada en mg, V_M y V_W es el volumen en litros de aire seco y húmedo respectivamente, T_S es la calidad en promedio del agua (mg/l), CF es un factor de conversión 3.7854 L/galón y Q representa el flujo de agua promedio en GPM.



4.3.2 Motor del ventilador

El ventilador y sus componentes forman en conjunto una gran área de oportunidad para el ahorro de energía, el incremento en la eficiencia de la torre, y una menor programación del mantenimiento que requiere.

El desarrollo de la tecnología se enfoca en obtener mayor poder y un aumento en la eficiencia del motor; la diferencia es que ahora es posible considerar una disminución en el ruido y un control efectivo para ajustar la velocidad y fomentar una operación eficiente sobre el uso de la energía.

❖ Ventiladores con dos velocidades

Una de las soluciones más prácticas para reducir el consumo de energía fue instalar ventiladores con dos velocidades, una para la operación normal y otra para situaciones en las que la carga térmica disminuye por lo que no se requiere operar al máximo de potencia, sin embargo estos equipos deben ciclarse para encendido o apagado y así obtener la temperatura deseada, este ciclo provoca altos amperajes y un esfuerzo innecesario de los componentes mecánicos, por ello cuando se trata de maximizar el ahorro de energía no resulta tan efectiva esta solución; cabe mencionar que esta es la manera en la que actualmente operan la mayoría de las torres de enfriamiento, como también las torres en este caso de estudio.

❖ Variable Frequency Drives

Otra tendencia para el ahorro de energía que ha obtenidos mejores resultados, es el uso de Variadores de Frecuencia (VFDs, por sus siglas en inglés), su instalación en torres se ha incrementado y tienen la ventaja de un arranque suave en lugar del largo encendido, lo más relevante es la posibilidad de operar el ventilador a cualquier velocidad requerida en todo el intervalo, es decir desde cero hasta la máxima potencia.



Figura 22 Variador de frecuencia

❖ Motor magnético

El más reciente desarrollo tecnológico es un motor magnético que proporciona mayor eficiencia en comparación con los motores de inducción, como se observa en la Figura 23 al 50% de la carga en los tres tipos de motores quien obtiene una mayor eficiencia es el motor magnético. Además se persigue un ahorro energético por medio de los controladores incorporados, además propone acoplar el motor directo a las aspas del ventilador con lo que se eliminan dos equipos tradicionales: el reductor de velocidad y la flecha de acoplamiento; los beneficios de este sistema se describen a lo largo de esta sección.

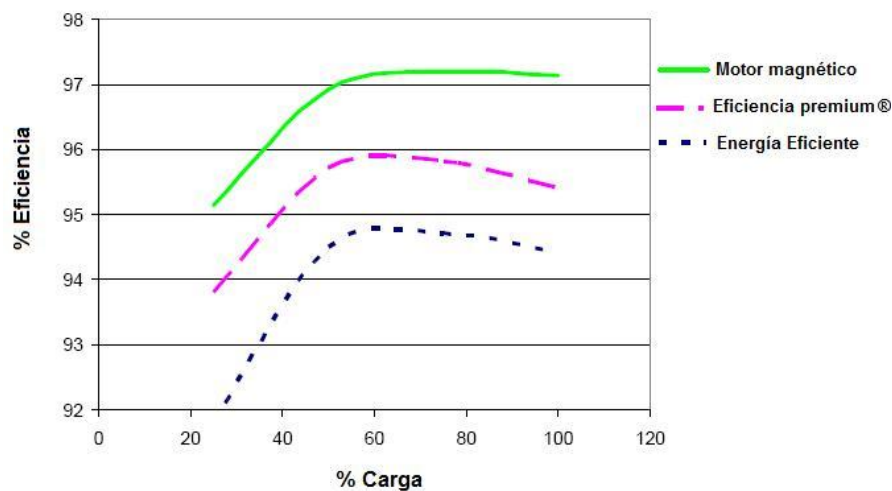


Figura 23 Comparativo de eficiencias de motores



Este diseño retira el tradicional marco de acero que cubren a los motores de inducción y en su lugar utiliza un marco laminado (Figura 24) con el que se obtiene más espacio para el material magnético, es decir quién genera el torque, cada una de las láminas son remachadas entre sí bajo presión.

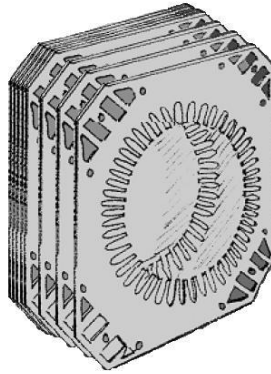


Figura 24 Marco laminado para el motor magnético

El enfriamiento del motor también se favorece ya que no hay resistencia térmica por parte del metal que solía recubrirlo, con este diseño el aire entra en contacto directo con el motor por lo que la transferencia de calor ya no depende del tamaño del marco y su ajuste al rotor. Otro factor que contribuye a mejorar la transferencia de calor son las aletas, estas aletas se incorporan dentro y fuera de las láminas que integran el marco del motor como lo muestra la Figura 25; con ello se logra un incremento de hasta 25% en el enfriamiento del motor y por tanto en la potencia del mismo.

El aire no es el único método para enfriar el motor, cuando la potencia es de 100 HP o más puede utilizarse un cilindro que recubre el rotor, y en la parte exterior de ese cilindro circula agua, fluido con el cual se realiza el intercambio de calor y permite el enfriamiento, generalmente se requiere un flujo de 10 GPM (55 m³/día) y puede tomarse del agua de repuesto para la torre.

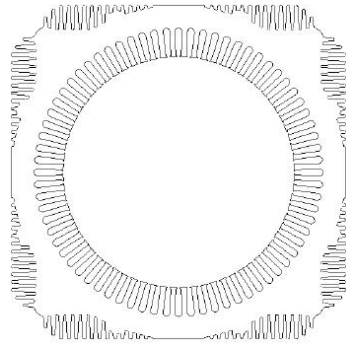


Figura 25 Aletas en láminas del marco del motor

La alta eficiencia del motor magnético permite que su tamaño se reduzca, así se crea la posibilidad de sustituir el reductor de velocidad por este motor que pesa y mide aproximadamente lo mismo. La evaluación que realiza el CTI a este motor magnético considera una torre de enfriamiento con dos celdas y características operativas iguales, la diferencia es que en una de las celdas está instalado un ventilador convencional (Figura 26), es decir con la flecha y el reductor de velocidad y en la otra se instala el motor magnético directamente acoplado a las aspas (Figura 27).

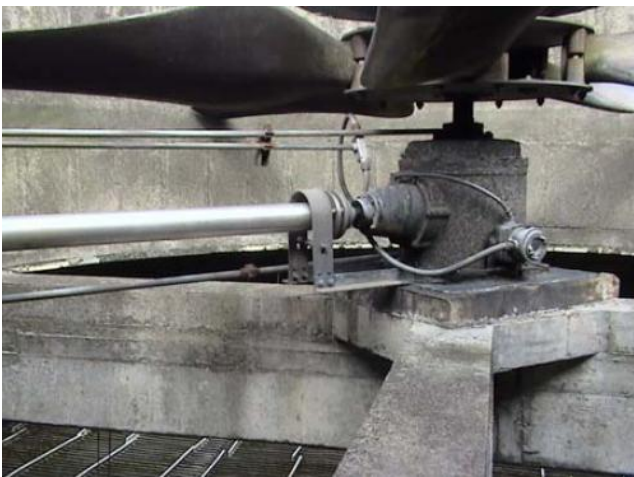


Figura 26 Ventilador convencional



Figura 27 Ventilador con motor magnético



El objetivo del experimento es comparar la operación y verificar los beneficios que se obtienen al implementar un motor magnético de alta eficiencia. Por medio de un amperímetro y un medidor de potencia se verificó que ambas celdas operan bajo un mismo régimen para garantizar una operación equivalente; el siguiente paso fue realizar las mediciones de potencia de entrada y analizar los resultados, los cuales se muestran en la Tabla 14.

Se realizó una segunda corrida en la que se aumentó la inclinación de las aspas en 12°, con ello los ventiladores proyectan un mayor flujo de aire y por tanto la carga aumenta para estos equipos; los resultados se muestran en la Tabla 15.

Tabla 14. Primer corrida de resultados

	Voltaje[V]	Amperaje[A]	Entrada [kW]	Factor de potencia [%]
Motor de inducción	477	46.7	31.5	81.7
Entrada al VFD	477	44.5	28.5	77.6
Motor magnético	459	40.9	28	86.1

Tabla 15. Segunda corrida de resultados

	Voltaje[V]	Amperaje[A]	Entrada [kW]	Factor de potencia [%]
Motor de inducción	478	54.3	37.9	100
Entrada al VFD y el motor magnético	477	49.8	33.0	100

La Tabla 14 muestra que el motor magnético operó con un menor consumo de energía: 3 kW menos que el motor de inducción y aun así logró obtener un mayor factor de potencia 4.4% por arriba del motor convencional; en la Tabla 15 el consumo energético es menor al utilizar el motor magnético, aun con los ventiladores trabajando a máxima potencia se obtuvo un disminución de 4.9 kW comparado con el motor de inducción convencional; a partir de los resultados del experimento fue posible generar una curva con el comportamiento de los



ventiladores a diferentes intervalos de potencia, la gráfica se muestra en la Figura 28.

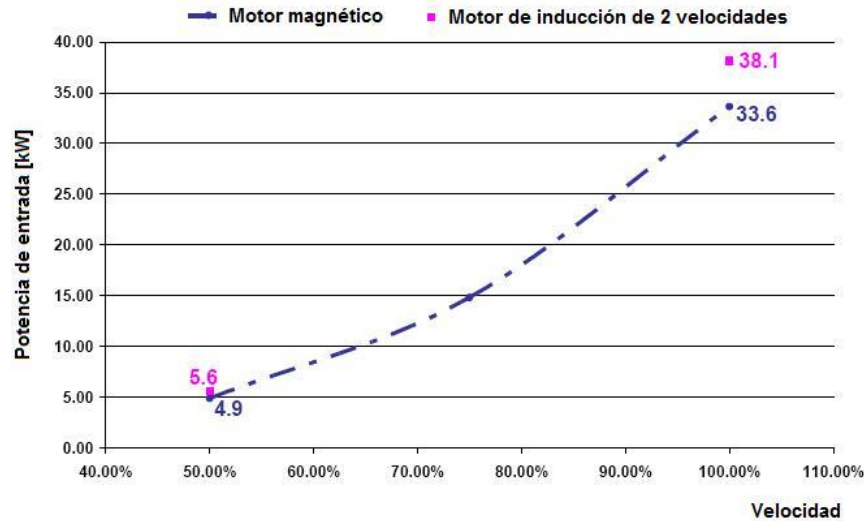


Figura 28 Consumo de energía en ambos ventiladores.

Estos resultados solo consideran la operación del motor, se pueden incrementar aún más los ahorros de energía al implementar el variador de frecuencia (VFD), este controlador modifica automáticamente la velocidad del ventilador al haber un cambio en la temperatura del agua, es decir depende de la demanda de calor del sistema; otra de las ventajas de este control es la incorporación de una ligera corriente hacia las bobinas del motor que se aplica como freno durante un paro y evita que las aspas giren mientras el motor este apagado sin embargo no significa que al realizar el mantenimiento pueda prescindirse de un freno mecánico; este goteo también se utiliza para incrementar la temperatura del motor y evitar la condensación.

El ventilador de una torre de enfriamiento se expone a severas condiciones operativas, por ello el motor debe estar preparado para resistirlas, las siguientes son acciones para reducir los problemas que puedan presentarse por operar el ventilador en una torre de enfriamiento:



- Para lidiar con la humedad se aísla el motor con un compuesto epóxido que se impregna bajo presión de vacío, este sistema de aislamiento ha sido exitosamente probado en motores abiertos que se aplican en condiciones extremas, por ejemplo en plataformas petroleras.
- Se aplica un sello metálico al final del eje del motor que incorpora un anillo para bloquear la entrada de vapor con ello se evita la humedad, el anillo cumple la norma IEEE-841¹¹ sobre motores expuestos a condiciones severas.
- Al sustituir el reductor de velocidad directamente por el motor magnético se crea la posibilidad de ampliar el ciclo de lubricación hasta dos años. Ya no son necesarias las frecuentes inspecciones visuales para ubicar fugas de aceite
- Al no contar con la flecha de transmisión ni el reductor de velocidad, la vibración solo depende de la velocidad de las aspas, con el sistema del motor magnético se reduce el número de cojines de 6 hasta 2 en un reductor de velocidad sencillo, así disminuyen las frecuencias forzadas en el sistema.
- El estudio del CTI también aplicó pruebas para comparar la producción de ruido los resultados muestran que el motor magnético reduce 4.6 dBA en la mínima velocidad y 5.4 dBA operando a la máxima potencia.

En el mercado el motor magnético que cumple con todas las características antes mencionadas es producido por la empresa estadounidense Baldor Electric Company cuyo modelo es VS1CTD, en la Figura 29 se muestra el motor y el controlador de frecuencia que ofrece esta compañía.

¹¹ IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)



Figura 29 VS1CTD de Baldor Electric Company

❖ Ecuaciones generales para la operación de los ventiladores.

La operación de los ventiladores se rige por cuatro reglas que aplican en general, a partir de su entendimiento y manipulación estas reglas pueden proporcionar oportunidades para ahorrar energía al modificar factores como la inclinación de las aspas y la velocidad del ventilador que dependen del cambio de temperatura en el agua de enfriamiento. Las cuatro reglas son:

- El flujo de aire es directamente proporcional a la velocidad y al ángulo de las aspas en el plano de rotación:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{RPM_1}{RPM_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

Ecuación 4-5

- La presión estática es directamente proporcional al cuadrado del flujo de aire, por lo tanto también al cuadrado de la velocidad.

$$\frac{P_{S2}}{P_{S1}} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 = \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right)^2$$

Ecuación 4-6



- La potencia del ventilador, expresada en HP varía directamente con el flujo de aire al cubo.

$$\frac{HP_2}{HP_1} = \frac{(Q_2)^3}{(Q_1)^3} = \frac{(RPM_2)^3}{(RPM_1)^3}$$

Ecuación 4-7

- Cuando se tiene un flujo constante de aire ($Q_1 = Q_2$), la presión estática del ventilador así como la potencia son directamente proporcionales a la densidad del aire.

$$\frac{P_{S2}}{P_{S1}} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad \text{y} \quad \frac{HP_2}{HP_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Ecuación 4-8

Se hace mención de la presión estática que se presenta a través del sistema sin embargo también existe la presión de velocidad, ambas conforman el término que se conoce como diferencia total de presión (P_T).

$$P_T = P_S + P_V$$

Ecuación 4-9

La presión de velocidad se calcula con la Ecuación 4-10 que se muestra a continuación:

$$P_V = \frac{(V)^2(\rho_A)}{(2)(g)(\rho_L)}$$

Ecuación 4-10

El trabajo realizado por el ventilador también conocido como potencia de salida se expresa en HP y se calcula como

$$HP_{\text{aire de salida}} = \frac{(Q_A)(P_T)(\rho_L)(g)}{745.7}$$

Ecuación 4-11



También se puede evaluar la potencia considerando la presión estática:

$$\text{HP}_{\text{aire estático}} = \frac{(Q_A)(P_s)(\rho_L)(g)}{745.7}$$

Ecuación 4-12

Existe una relación que resulta esencial para el diseño y operación de cualquier ventilador y en ella se analiza la energía que se imparte a la corriente de aire respecto a la potencia entregada por el motor:

$$\text{Eficiencia total} = \frac{(P_T)(F_A)}{(\text{BHP})(6,362)}$$

Ecuación 4-13

Donde P_T es la presión total expresada en pulgadas de agua, F_A representa el flujo de aire en ft^3/min y BHP es la potencia al freno en HP.

Una manera diferente de expresar la eficiencia total del ventilador es con la Ecuación 4-14:

$$\text{Eficiencia total} = \frac{\text{HP}_{\text{aire de salida}}}{\text{HP}_{\text{Entrada}}}$$

Ecuación 4-14

Otro factor muy importante para el adecuado desempeño del ventilador es el ΔP que debe vencer el equipo y se calcula por medio de la Ecuación 4-15.

$$\Delta P = C \left(\frac{V}{1,097} \right)^2 \rho$$

Ecuación 4-15

Resultados



Donde ΔP está en pulgadas de agua, C es un coeficiente de pérdidas de presión, V se refiere a la velocidad del aire en ft/min y ρ es la densidad de la corriente de aire que bajo condiciones estándar es 0.075 lb/ft^3 .

Con esta ecuación es posible obtener la curva del sistema, esta gráfica expresa la presión y energía que requiere el ventilador para impulsar cierta cantidad de aire.



4.3.3 Tratamiento del agua de purgas

El agua de purgas forma una de las corrientes más importantes para las torres de enfriamiento puesto que representa una gran área de oportunidad para el ahorro de agua de un centro de trabajo. Muchas de las recientes investigaciones sobre tratamientos de agua se enfocan en aplicaciones para la purga de las torres de enfriamiento debido a los diversos beneficios económicos y operativos que se obtienen por reutilizar esta corriente, la purga constituye alrededor del 18% del agua que se repone a la torre.

En esta sección se describe uno de los desarrollos tecnológicos más recientes en esta área, lo relevante es la evaluación de un caso aplicado a una planta productora de electricidad; y por el tipo de torre y la calidad del agua permite generar datos más cercanos sobre una posible aplicación en los centros de trabajo de México.

El objetivo de la planta es implementar un sistema para reutilizar el agua de la purga de las torres de enfriamiento y obtener una calidad tal que permita alimentar ocho calderas con esa agua. Los valores promedio (2007-2008) de la calidad de agua de las purgas se muestran en la Tabla 16. Es importante mencionar que el agua que se utiliza como repuesto a torres de enfriamiento es agua residual que proviene de la planta de tratamiento de aguas de la comunidad.

Tabla 16. Calidad del agua de purga de las torres

Parámetro	Promedio
pH	8.65 – 8.86
SS [mg/L]	8.8 – 25.4
Conductividad [μ S/cm]	1620 – 2790
DQO _{Mn} [mg/L]	5.18 – 12.14
Dureza Total [mg/L]	1025 – 1601
Cl ⁻ [mg/L]	182 – 336
Alcalinidad M [mmol/L]	4.86 – 7.2



Parámetro	Promedio
SO ₄ ²⁻ [mg/L]	186.33 – 407.88
SiO ₂ [mg/L]	11.8 – 33.4

❖ Tren de tratamiento

El sistema consiste en un filtro multimedia con el que se reduce la turbidez de 20 NTU a valores entre 4 y 8 NTU, más adelante se encuentra la unidad de UF (ultrafiltración) que disminuye la turbidez hasta 0.4 NTU, con esta disminución y al agregar agentes reductores, agentes anti-incrustantes y ácido se protege la consiguiente unidad de ósmosis inversa (OI) de elementos como: coloides, sólidos suspendidos, bacterias y moléculas orgánicas con alto peso molecular. Con la OI se remueven la mayoría de los sólidos disueltos y SiO₂, el permeado de este primer paso de OI se desgasifica, entonces el pH aumenta a 9.5 por dosificación de NaOH y se ingresa al segundo paso de OI. Al final se encuentra el equipo de electrodeionización (EDI) para desmineralizar el agua y alcanzar los requerimientos de calidad para ingresar a calderas.

La Figura 30 muestra un esquema del proceso con su respectivo balance de masa por cada equipo del tren de tratamiento, este balance se estimó en función de los porcentajes de recuperación de agua que corresponde a cada elemento del tren: del filtro multimedia se espera una recuperación del 85%, de la unidad de ultrafiltración se utiliza todo el flujo de agua, mientras que del primer paso de OI el porcentaje es 75% y de la segunda fase de OI se recupera el 90% del flujo, por último el efluente total de la unidad desmineralizadora se destina como alimentación a las calderas.

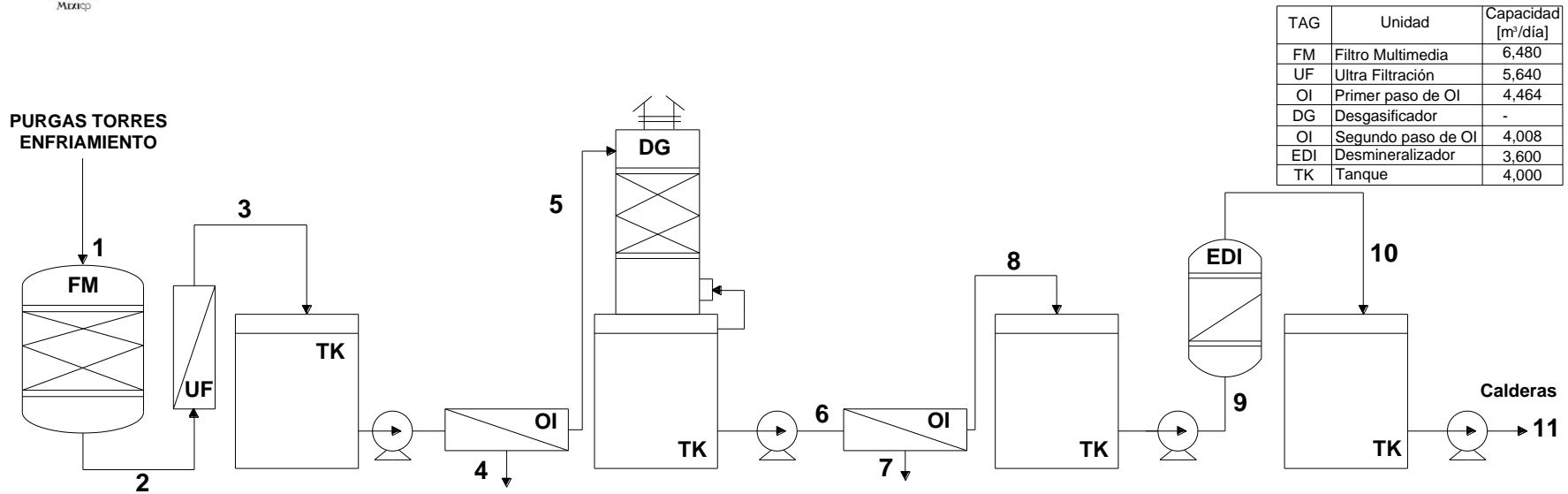
Los TAG y la capacidad para cada equipo del tratamiento de agua de purgas que se muestra en la Figura 30 pueden consultarse en la Tabla 17.



Tabla 17. Capacidad de flujo de cada unidad de tratamiento

Unidad	Capacidad [m ³ /día]	Capacidad por tren [m ³ /día]	No. de trenes
Filtro Multimedia	6,480	6,480	1
Ultra Filtración	5,640	2,820	2
Primer paso OI	4,464	2,232	2
Desgasificador	-	-	1
Segundo paso OI	4,008	2,004	2
Unidad desmineralizadora	3,600	1,800	2
Tanque	4,000	2,000	4

Resultados



TAG	Unidad	Capacidad [m ³ /día]
FM	Filtro Multimedia	6,480
UF	Ultra Filtración	5,640
OI	Primer paso de OI	4,464
DG	Desgasificador	-
OI	Segundo paso de OI	4,008
EDI	Desmineralizador	3,600
TK	Tanque	4,000

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Descripción	Influente	Entrada UF	Entrada 1 ^{era} OI	Purga 1 ^{era} OI	Efluente 1 ^{era} OI	Entrada 2 ^{da} OI	Purga 2 ^{da} OI	Efluente 2 ^{da} OI	Entrada EDI	Tanque almacén	Entrada Calderas
Flujo [m ³ /día]	6,264	5,328	5,328	1,320	4,008	4,008	408	3,600	3,600	3,600	3,600
Flujo [GPM]	1,149	977	977	242	735	735	75	660	660	660	660
pH	8.65 – 8.86	6-9	8-10	-	9.5	9.5	-	4-11	4-11	8.8-9.6	8.8-9.6
Turbidez [NTU]	20	6	0.4	≈0.36	0.04	0.04	≈0.03	0.01	0.01	0.001	0.001
Conductividad [μS/cm]	1,620-2,790	972-1,634	194-335	-	140-160	140-160	-	150-160	150-160	<150	<150
SiO ₂ [mg/L]	11.8-33.4	8.26-23.4	1.6-4.7	0.5-357	1.13	1.13	≈1.07	0.056	0.056	0.003	0.0001
Dureza total [mg/L]	1,025-1,601	830-997	600-700	≈500	65.7	65.7	≈60	3.3	3.3	0.16	0.008
Cl ⁻ [mg/L]	182-136	<0.5	<0.5	≈0.4	0.05	0.05	≈0.04	0.005	0.005	<0.005	<0.005

Figura 30 Tren de tratamiento y balance de masa para agua de purga



❖ Calidad de agua y resultados

Se monitorean los parámetros que describen la calidad del agua a lo largo del tren de tratamiento, el flujo de agua se realiza en dos pasos y el respectivo análisis permite comparar los valores entre las dos últimas fases del tratamiento, con ello se puede inferir sobre la química del agua y sobre todo verificar el desempeño de los equipos en cada fase. Los parámetros monitoreados son:

- Índice de sedimentación (SDI), con este valor se conoce la tendencia de “ensuciamiento” de las membranas por parte del agua.
- Remoción de sales, con la que se estime la conductividad en el agua que sirve como una buena referencia sobre la calidad de la misma.
- DQO_{Mn} funciona como un valor que refleja la cantidad de materia orgánica presente en el agua.
- Remoción de sílice, para verificar si la calidad del agua ya es adecuada para utilizarla como influente a calderas.

En la Figura 31 se observa el comportamiento del SDI a lo largo del 2008 las muestras se toman del permeado de la ultrafiltración y se compara el segundo y tercer paso del flujo de agua; en el segundo paso los valores oscilan entre 3 y 4 puntos se infiere que se debe a la turbidez del influente del equipo de ultrafiltración, para el tercer paso los resultados deben mostrarse mejores y así lo indica la gráfica donde se observa un comportamiento más constante y con menor rango alrededor de 2.5 puntos, con estos valores es posible hablar sobre una estable y adecuada operación de las membranas de la ultrafiltración.

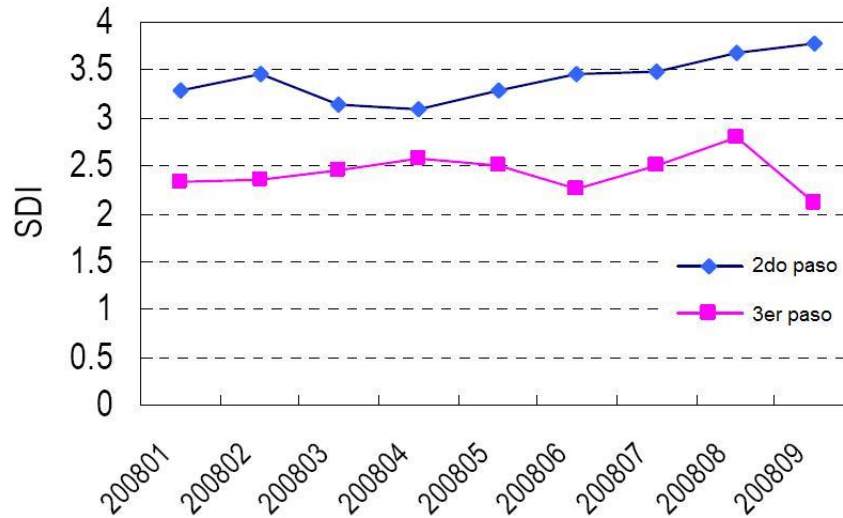


Figura 31 Índice de sedimentación a lo largo del 2008

En el primer paso de ósmosis inversa la remoción de sal se mantuvo marcadamente estable el intervalo de oscilación fue entre 97 y 98% como se observa en la Figura 32, también se indica que la conductividad en el segundo paso de ósmosis inversa se mantiene en valores bajos, entre 40 y 80 $\mu\text{s}/\text{cm}$ este factor provoca que el valor de remoción de sales oscile entre 71 y 93%; este rango la conductividad, en algunos casos, se considera el parámetro que describe la calidad del agua: cuando se tienen valores altos se revela presencia de CO_2 ya que este gas reacciona con el agua formando ácido carbónico el cuál incrementa notablemente su conductividad. Es sabido que este gas no se remueve con las membranas por lo que debe elevarse el pH alrededor de 8.2 para hacer reaccionar el gas hacia carbonato de hidrógeno (HCO_3^-), este ión ya puede retenerlo la membrana. La recuperación de agua del primer y segundo paso fue de 75 y 90% respectivamente. Otra posibilidad para eliminar el CO_2 sin aumentar el pH del agua es por medio de un desgasificador.

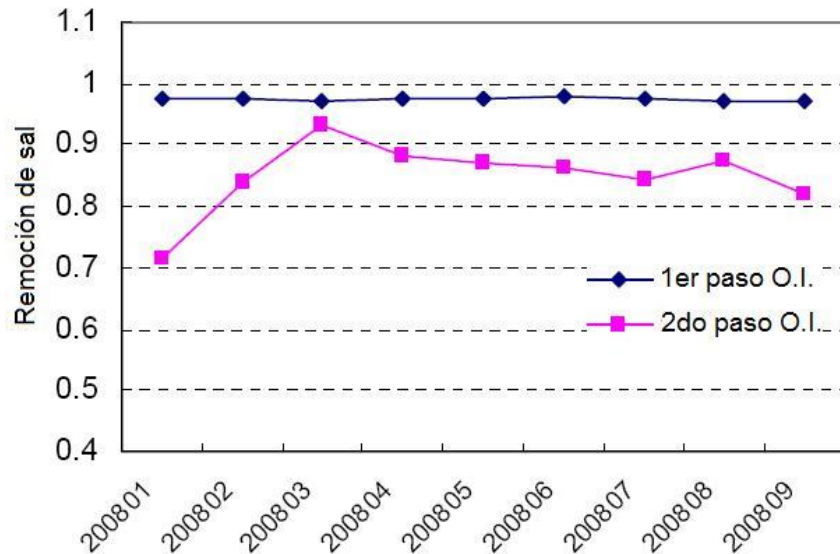


Figura 32 Remoción de sales a lo largo del 2008

Las membranas de ultrafiltración no resultan muy eficaces para remover compuestos orgánicos así lo indican los valores de DQO_{Mn} cuyo rango del efluente es de 4 a 8 mg/L al entrar a los equipos de ósmosis inversa; sin embargo después de la OI se reduce a valores menores a 2mg/L, con el segundo paso de OI el rango de remoción no varía mucho (ver Figura 33) y se infiere que los compuestos orgánicos que logran pasar el primer paso de ósmosis inversa tienen un peso molecular menor que los compuestos que salen como permeado.

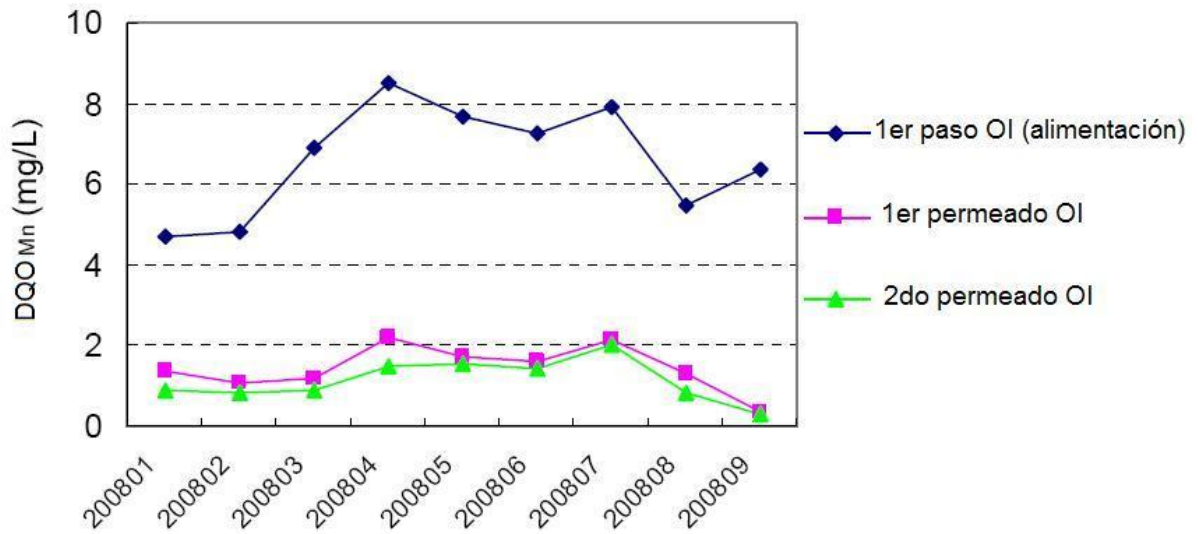


Figura 33 DQO_{Mn} durante el año 2008

Cuando el agua sale del primer sistema de ósmosis inversa pasa al desgasificador donde se agrega hidróxido de sodio (NaOH) para aumentar el pH, esto permite el acceso como influente del segundo paso de OI, con ello se busca incrementar la remoción de sílice y se obtiene un nivel de 10 ppb en el permeado de este segundo paso. Como última etapa se aplica el equipo de electrodeinización (EDI) para disminuir el sílice a menos de 3 ppb, entonces es posible dirigir el agua hacia las calderas y cumplir con el objetivo. El comportamiento se puede observar en la Figura 34.

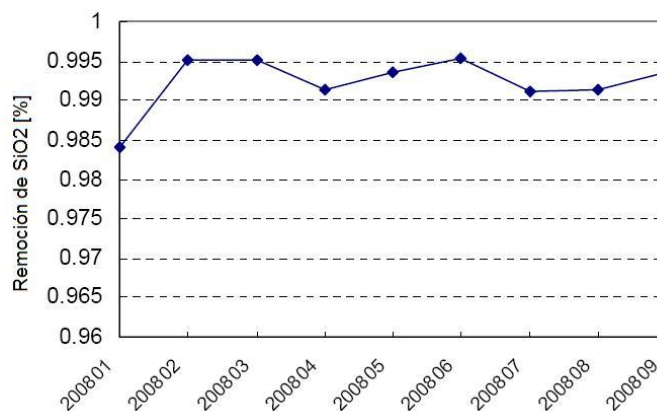


Figura 34 Remoción de sílice en 2008



Después de mostrar estos resultados puede afirmarse que el tren de tratamiento es efectivo y que su posible aplicación en los centros de trabajo de nuestro país resultará adecuada para obtener una gran cantidad de agua a reutilizar, la disminución en los costos por este ahorro de agua es muy significativa con lo cual se pretende ponderar el costo de un tratamiento así. El artículo de referencia menciona que con la aplicación de las membranas de la compañía DOW y con la correcta dosificación de químicos pueden reutilizarse hasta el 70% de la purga de las torres de enfriamiento, este porcentaje resulta bastante atractivo por los beneficios económicos y operativos que se obtienen a largo plazo. Los beneficios se especifican en la sección 4.4.4; por lo tanto solo resta mencionar las sugerencias hechas sobre la dosificación de químicos:

- Se agrega oxidante en el influente de UF y al agua de retrolavado para prevenir crecimiento biológico.
- Aplicación de un agente reductor dosificado en la alimentación a OI para proteger de la oxidación, se recomienda la dosificación por medio de un control monitoreado en línea (ORP).
- Anti incrustante en la alimentación de OI para evitar incrustación por CaCO_3 y CaSO_4 .
- Ajuste de pH entre el primer y segundo paso de la ósmosis inversa (OI).
- La unidad de UF se retrolava cada 30 minutos y con aire cada 5 horas; con una limpieza en sitio cada 3 meses. La unidad de OI se limpia a pH de 12 y después se baja el pH=2 a 30°C.



4.3.4 Tratamiento del agua de repuesto

Otra alternativa para al ahorro de agua en torres de enfriamiento es tratar el agua que ingresa como repuesto, esta premisa ha resultado atractiva para los nuevos desarrollos tecnológicos ya que es una manera de controlar la calidad del agua desde el inicio del proceso.

Esta sección analiza un caso en E.U.A. de una compañía de automóviles cuyas torres de enfriamiento utilizan agua de repuesto que proviene de la planta de tratamiento de aguas residuales; a primera instancia resulta extraño utilizar agua tratada debido a que su calidad trae consigo diversos problemas para las torres de enfriamiento como:

- Menores ciclos de concentración
- Incremento en el tratamiento químico hasta de 4 veces
- Mayor descarga de purgas
- Incremento en la DQO
- Menor capacidad de enfriamiento por el crecimiento biológico
- Mayor costo del mantenimiento de la torre

Sin embargo, el artículo que se analiza propone un tratamiento innovador que no solo evita los problemas mencionados sino que obtiene ventajas por utilizar el agua tratada de la localidad. Se denomina tecnología “verde” y utiliza un pretratamiento para el agua de repuesto por medio de una filtración simple y un intercambio de iones llamado suavizado de alta eficiencia (HES, por sus siglas en inglés). Este proceso aumenta la eficiencia de las torres de enfriamiento, reduce las descargas de agua al drenaje, reduce dramáticamente la corrosión e incrustaciones pero sobretodo reduce el consumo de agua al incrementar los ciclos de concentración más de 50 veces.



❖ Tecnología verde

Éste es un tratamiento patentado que promueve la conservación del agua al mitigar la necesidad de utilizar agua fresca como repuesto a torres, se le considera tecnología verde porque utiliza el control del pH, reacciones químicas y obtiene provecho de la calidad del agua tratada al utilizar los valores altos en sólidos disueltos totales (SDT) para evitar la corrosión, incrustaciones y el crecimiento biológico; así permite que las torres de enfriamiento operen bajo el régimen de cero purga (ZBD, Zero Blowdown Discharge) por ello se establece como una propuesta efectiva y económica para reutilizar agua tratada, se convierte en una opción muy relevante para la industria.

❖ Base del tratamiento

La corrosión del cobre en las torres de enfriamiento es muy común debido a la presencia de amonio en el agua, para lidiar con este problema se aplican inhibidores que contienen nitrógeno, a estos compuestos se le conoce como azoles, entre ellos se encuentra el tolnitriazol o TTA y el benzotriazol o BTA que son muy comunes en el tratamiento de agua. Otro de los componentes que protegen al cobre de la corrosión es el sílice; al establecer un control sobre el agua saturada de sílice soluble en equilibrio con el sílice amorfo se promueve la formación de una película no porosa sobre las superficies del metal.

La base de este procedimiento es demostrar un mayor nivel de efectividad para inhibir la corrosión del cobre combinando la química del sílice con la química de los azoles bajo ciertas condiciones de pH y con niveles altos en SDT que trae consigo el agua tratada. En la Figura 35 se muestran los rangos de aplicación del sílice de algunos métodos ya patentados, debe resaltarse el intervalo de pH en el que este sistema opera (entre 9 y 10) de acuerdo a las investigaciones del WCTI (Water Conservation Technology Institute).

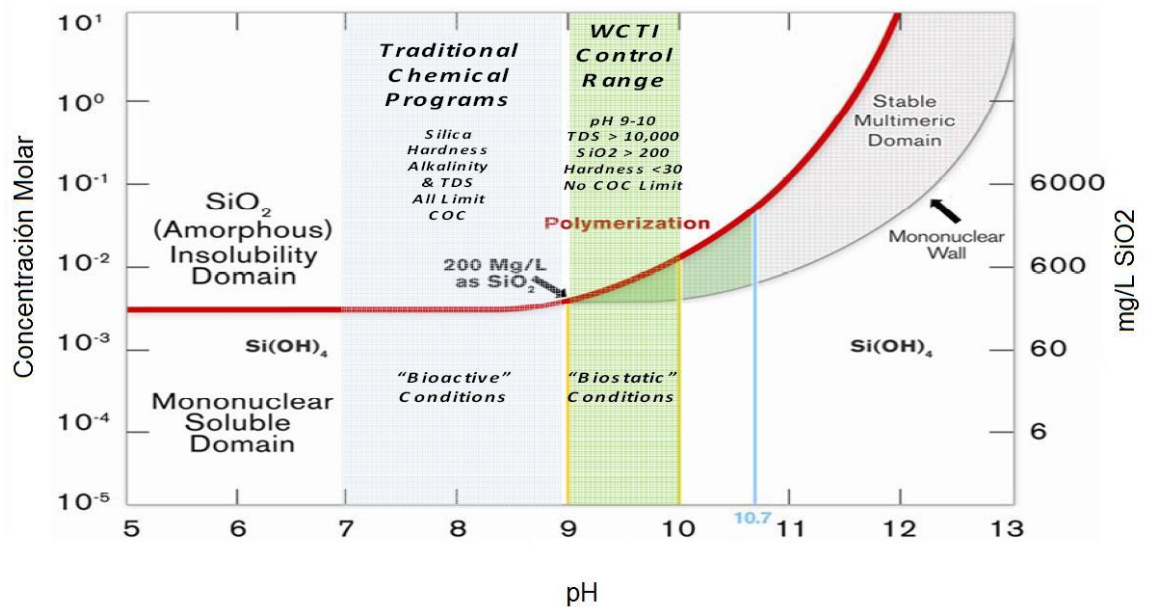


Figura 35 Intervalo de aplicación del sílice (SiO_2)

❖ Pruebas de laboratorio

Los metales: aluminio, cobre y zinc fueron expuestos a niveles muy altos de amoníaco bajo condiciones a temperatura ambiente para evitar la volatilización del mismo. La comparación se realiza con el tratamiento de sílice pero sin el azol TTA (Figura 36) y con el tratamiento incluyendo el TTA (Figura 37).

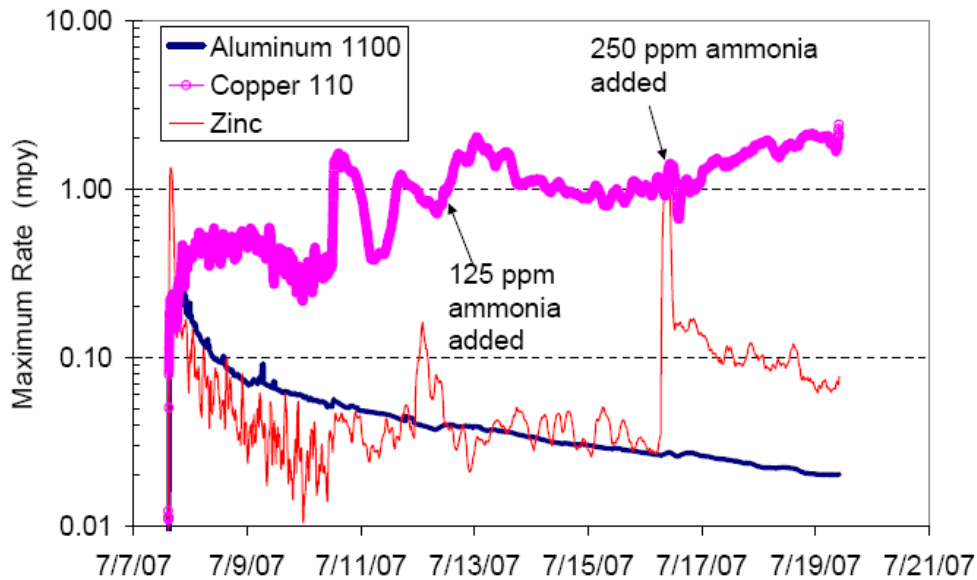


Figura 36 Efecto de la corrosión por amoniaco sin TTA

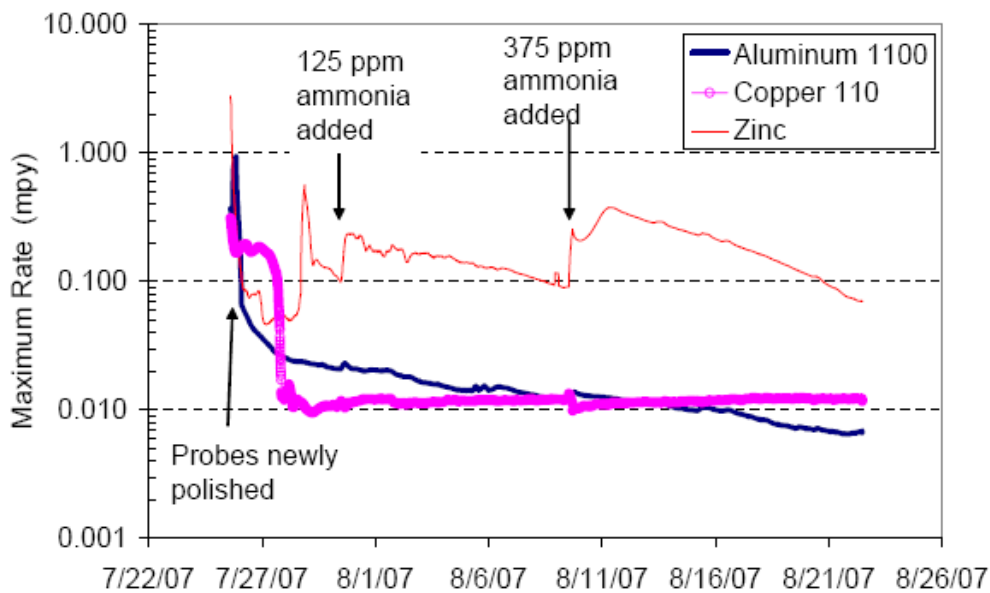


Figura 37 Efecto de la corrosión por amoniaco al aplicar TTA

Lo que podemos observar en la Figura 36 es que el sílice si protege al zinc y al aluminio del ataque del amoniaco, sin embargo con el cobre no ocurre lo mismo y por ello se observan los picos en la gráfica; respecto a la Figura 37, es decir



cuando ya se combina el tratamiento de sílice con los azoles, en este caso TTA (tolinitriazol) no hay un efecto notable del amoniaco sobre el cobre y los otros dos metales, así se observa en la disminución de la curva.

❖ Resultados

Al implementar un filtro multimedia, el suavizado HES y el sistema ZBD para cinco torres de enfriamiento se obtuvo una reducción de 25% en el consumo de agua de repuesto (potable) y el ahorro en el costo por dejar de aplicar el tratamiento químico convencional fue de 53%. Este sistema permitió, al utilizar agua tratada, reemplazar 25 millones de galones al año de agua potable que se destinaba como repuesto a las torres de enfriamiento.

❖ Beneficios obtenidos

El costo por remover la dureza del agua de repuesto utilizando suavizado de alta eficiencia (HES) se encuentra en \$ 0.07 USD y \$ 0.15 USD por mil galones, esta eficiencia en el costo proporciona un excelente incentivo para los operadores de las torres a conservar el agua, es decir, aumentar los ciclos de concentración, esto es posible debido a la eliminación de la corrosión, incrustación y crecimiento biológico.

La operación en ZBD junto con la suavización del agua utilizando la tecnología de suavizado de alta eficiencia (HES) ha permitido reducir la descarga de sales al drenaje hasta en un 50%, en Estados Unidos se cobran cuotas por descargar agua con altos niveles de SDT, por lo tanto con este sistema se presenta la oportunidad de ahorrar esas multas al disminuir la cantidad dirigida al drenaje. En la Tabla 18 pueden observarse los registros de las descargas de agua durante el 2007 y comparar una operación normal de las torres de enfriamiento contra la operación utilizando el sistema ZBD/HES.



Tabla 18. SDT descargados por las torres de enfriamiento

Unidad	C.C.	Descarga SDT	Descarga (gal/año)	Descarga a drenaje SDT/año
Operación normal	2.5	1,825	8,239,000	125,604
Operación ZBD/HES	75	54,750	0	0
Residuos HES	-	22,700	181,028	33,146
Limpieza del bacín (una/año)	-	54,750	10,000	4,566
Línea salmuera	-	-	191,028	0

El procedimiento también resulta efectivo al remover los depósitos de sílice e incrustaciones que existan en las torres, con ello se restaura la transferencia de energía y aumenta la capacidad de enfriamiento; debe resaltarse que no se requiere utilizar ácido que conllevan a una corrosión química los resultados se observan en la Tabla 19.

Tabla 19. Tratamiento químico vs Química del sílice

Unidad	Tratamiento químico	Química del sílice
Descarga agua de repuesto	70 %	1 %
Relleno/Intercambiador	Incrustación visible/Depósitos	Removida/Superficies limpias
Promedio de planctónicas	104-105 CFU/ml	100 CFU/ml
Uso de biocida	2.0-2.5 gpd	0.05 gpd
Carga de amperaje del intercambiador	34	25

Los beneficios obtenidos por la aplicación de este sistema de tratamiento son los siguientes:

- Elimina problemas por incrustación.
- Protege a los metales de la corrosión.
- No se requieren inhibidores de corrosión químicos.
- Evita el crecimiento biológico.



- No se requieren biocidas
- Ahorro de energía al eliminar la necesidad de bombear agua desde la fuente de agua potable.
- Incrementa los ciclos de concentración
- Reducción de descargas de sales a drenaje
- Elimina la descarga de químicos al drenaje
- Reduce costo de tratamiento químico
- Aumenta la capacidad de enfriamiento de las torres.
- Disminuyen los costos de mantenimiento
- Proporciona la oportunidad de promover la sustentabilidad del agua al reutilizarla.



4.3.5 Ecodiseño en una torre de enfriamiento

Esta idea es una muy reciente respecto al cuidado del ambiente, se incluye en este trabajo de tesis como una opción para el desarrollo de la tecnología de una manera amigable con el entorno; dicho estudio se basa en un caso desarrollado en Tailandia, y es que este país firmó el Protocolo de Kyoto en 1999, también acordó con la ONU la convención para el cambio climático en 2003 y aceptó la directiva EuP (Energy using Product) la cual establece el marco de especificaciones sobre el ecodiseño: utilizar productos que permitan un desarrollo sustentable durante la operación de algún proceso al promover el uso eficiente de la energía y así prevenir problemas ambientales.

El estudio es sobre una torre pequeña que permite el enfriamiento del sistema de aire acondicionado en un edificio; aún no es posible extender el ecodiseño a las torres de enfriamiento de las plantas industriales debido a la inviabilidad en varios aspectos como el personal, el presupuesto y el desarrollo de los productos empleados; sin embargo me parece importante incluirlo porque representa una rama diferente al realizar procesos industriales considerando acuerdos y directrices internacionales sobre ingeniería ambiental.

La torre de enfriamiento de estudio cumple con las siguientes características:

Tabla 20. Torre de enfriamiento de estudio

Elemento	Materia prima	Peso [kg]	Cantidad durante ciclo de vida
Estructura	Acero galvanizado	1 000	1
Cubierta	Plástico fino reforzado	800	1
Aspersores	Aluminio	20	1
Motor	Acero galvanizado	130	1
Ventilador	Aluminio	80	3
Relleno	PVC	675	3

El material utilizado actualmente en los sistemas de aire acondicionado así como la cantidad de energía empleada contribuyen al calentamiento global ya que los



equipos tienen una baja eficiencia energética y los materiales utilizados no son ambientalmente amigables; por ello esta empresa opta por realizar un estudio que permita aplicar el ecodiseño a sus torres de enfriamiento.

Esta investigación aplica dos teorías: la primera es la “evaluación del ciclo de vida” en una versión más simple (S-LCA, simplified life cycle assesment, por sus siglas en inglés) y la segunda es el ecodiseño; con el propósito de identificar los puntos clave de un proceso para que la producción sea ambientalmente más amigable. La metodología del ciclo de vida (LCA) se deriva de las fases que señala la ISO-14040 del año 2006, esta norma especifica el concepto, el alcance, las metas y el análisis de la evaluación del ciclo de vida, sin embargo debido a que consume muchos recursos y tiempo se eligió una evaluación más simple (S-LCA) que es una variación de el detallado estudio LCA. En la Figura 38 se muestra un esquema con la metodología empleada para proponer el ecodiseño de la torre de enfriamiento.

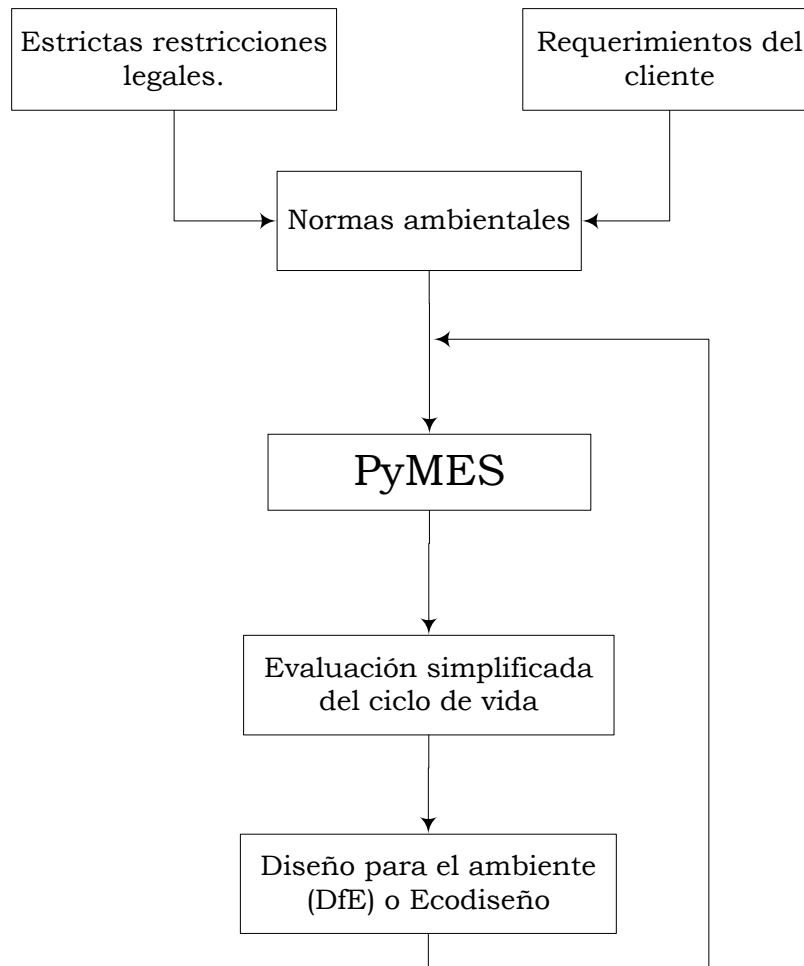


Figura 38 Metodología empleada para el ecodiseño

❖ Fases del ecodiseño

El ecodiseño es el diseño sistemático de métodos que incorporen aspectos ambientales para desarrollar mejoras en las características de un producto. Puede dividirse en 4 fases principales:

- Planeación del producto, que incluye la descripción de sus límites e identifica todas las regulaciones ambientales involucradas y atiende la voz de los consumidores.



- Diseño conceptual, en el que se analiza las funciones del producto generando soluciones factibles y evaluando las posibles alternativas.
- Diseño del plan, en el que se define y dimensiona la alternativa y su evaluación durante de todo el ciclo de vida.
- Pruebas y prototipo, la fase en la que se desarrollan los posibles modelos aplicables.

Para identificar cual de los factores involucrados en la operación de una torre de enfriamiento tiene el mayor impacto sobre el ambiente es necesario realizar una evaluación que te identifique el punto clave que debe enfrentarse, la metodología que se empleó es la evaluación del impacto del ciclo de vida (LCA).

❖ Evaluación del ciclo de vida (LCA)

Esta teoría examina el producto desde una perspectiva ambiental, al realizar una categoría de los impactos y utilizar indicadores relacionados con una colección de resultados generados por otros estudios. Esta etapa solo se enfocó en el impacto sobre el calentamiento global; como apoyo se utilizó el software SimaPro 7.1 y como método el CML 2000, los resultados se muestran en la Figura 39.

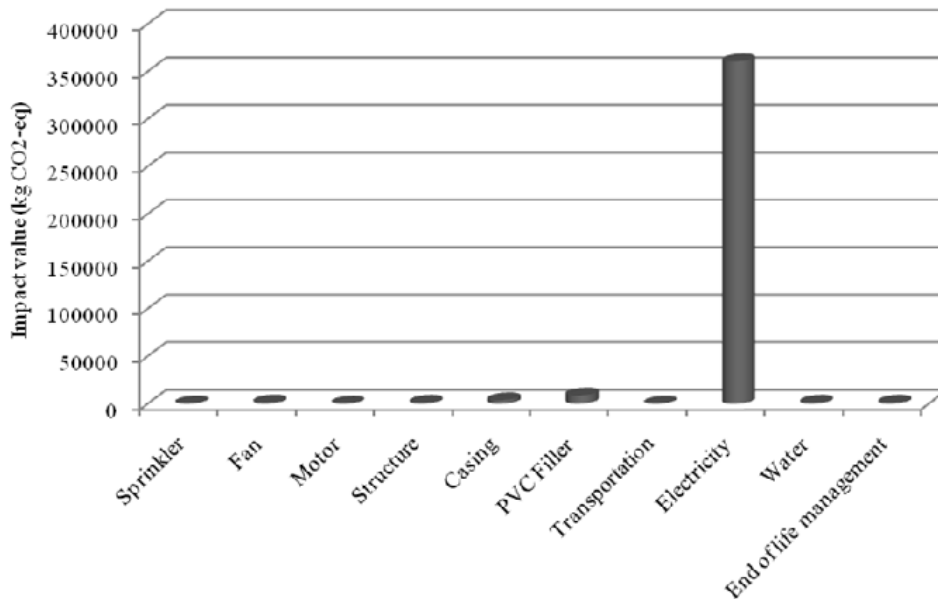


Figura 39 Impacto del ciclo de vida

Como lo indica la Figura 39 la evaluación demuestra que la energía eléctrica es el factor que más influye sobre el calentamiento global ya que genera 378, 277 kg eq CO₂. El segundo lugar se encuentra el relleno de PVC cuyo impacto es 41 veces menor respecto al de la energía eléctrica, le sigue el uso de componentes FRP (fibra de vidrio reforzada) con 98 veces menor impacto respecto a la energía eléctrica; y el último lugar se encuentra el ventilador con 276 veces menor el impacto respecto al del uso de energía eléctrica. Este análisis nos permite ubicar los puntos que deben atacarse para reducir el impacto ambiental por la operación de las torres de enfriamiento los siguientes párrafos muestran las acciones tomadas y los resultados obtenidos por tal aplicación.

El motor que actualmente hace funcionar al ventilador consume 1,041 MW/h a lo largo de todo su ciclo de vida, y para tener una reducción en el consumo energético se opta por instalar un motor de alta eficiencia los resultados por esta acción se observan en la Figura 40.

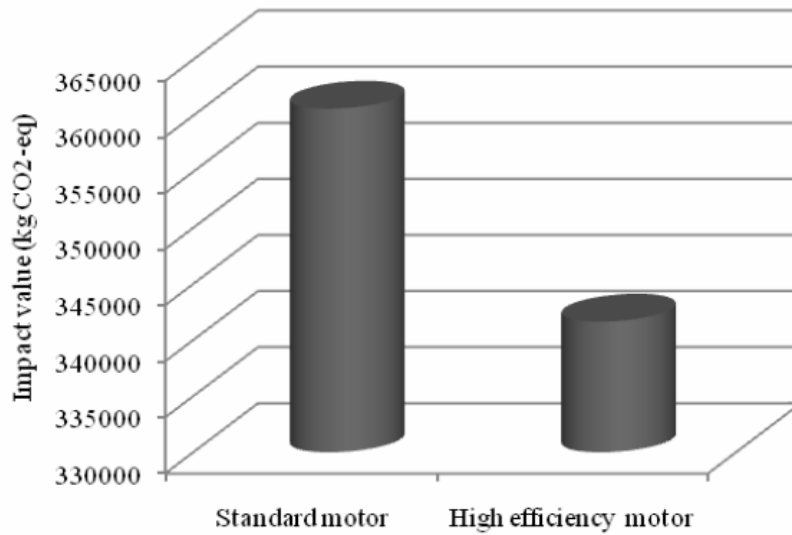


Figura 40 Reducción del consumo energético

El siguiente aspecto se refiere al cambio del relleno de PVC por uno hecho de PP (polipropileno) o de papel Kraft. Además el PVC de desecho deberá destinarse hacia un vertedero (relleno sanitario) para su adecuada disposición. En la Figura 41 se observa la disminución en la producción de eq de CO₂.

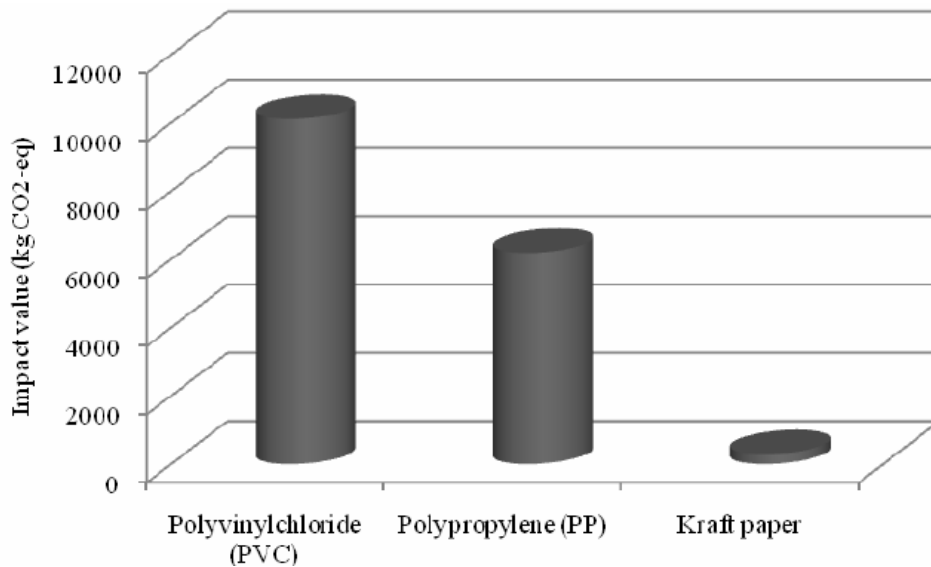


Figura 41 Cambio del material del relleno



La vida útil del relleno disminuye cuando se presentan incrustaciones en su estructura ya que disminuye su eficiencia al impedir una adecuada transferencia de calor, cuando la incrustación es grave debe cambiarse el relleno de la torre hasta 3 veces a lo largo del ciclo de vida de la torre de enfriamiento; el estudio propone agregar 0.1 ppm de ozono al agua para reducir el problema, con ello se puede prolongar la vida útil del relleno y solo fue necesario un cambio a lo largo de todo el ciclo de vida, la reducción del impacto al calentamiento global por disminuir la incrustación en el relleno se observa en la Figura 42.

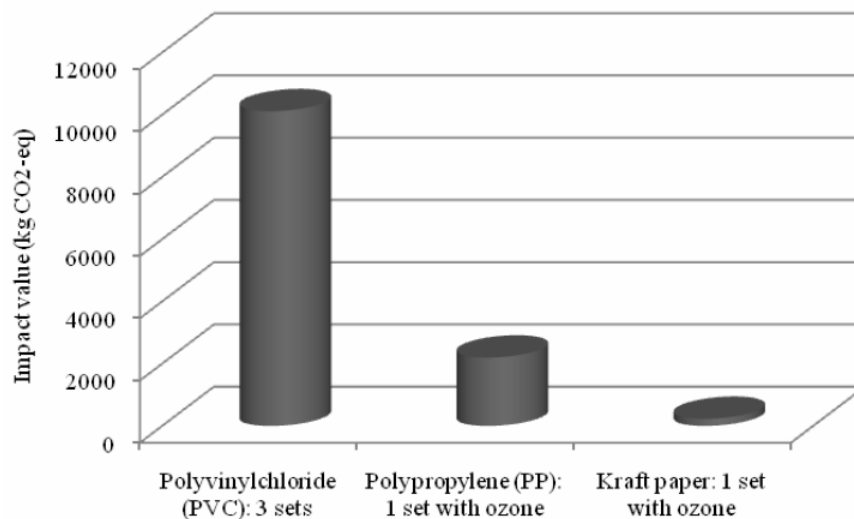


Figura 42 Efecto por reducir la incrustación en el relleno

Otra de las medidas que ayuda a disminuir la producción de CO₂ es cambiar la cubierta de la torre de enfriamiento hecha de FRB por una cubierta fabricada con hojas de acero recubierto, la reducción en el impacto ambiental se describe en la Figura 43.

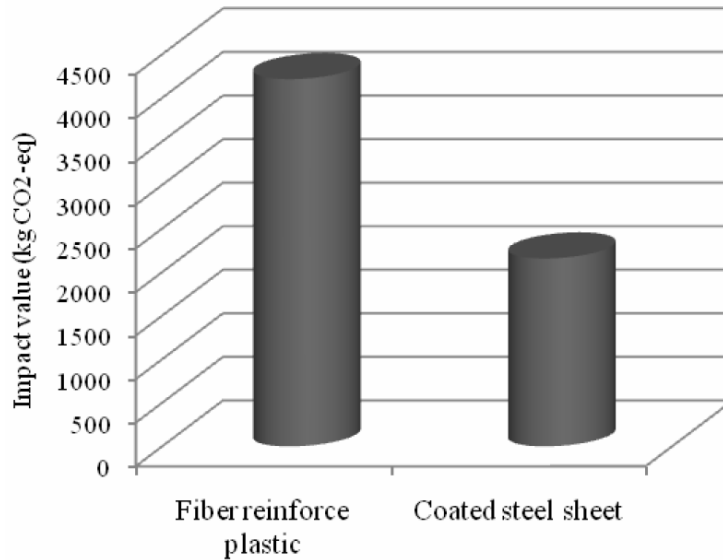


Figura 43 Cubierta de hojas de acero recubierto

El ventilador esta hecho de aleaciones de aluminio, éste no es un material muy amigable con el ambiente por lo que se buscaron alternativas que permitieran cambiar dicho material, según el estudio el más apropiado resulta ser polipropileno (PP), así se reduce el peso del ventilador, la carga de trabajo del motor y por tanto disminuye el consumo de energía eléctrica, los resultados de la evaluación se expresan en la Figura 44.

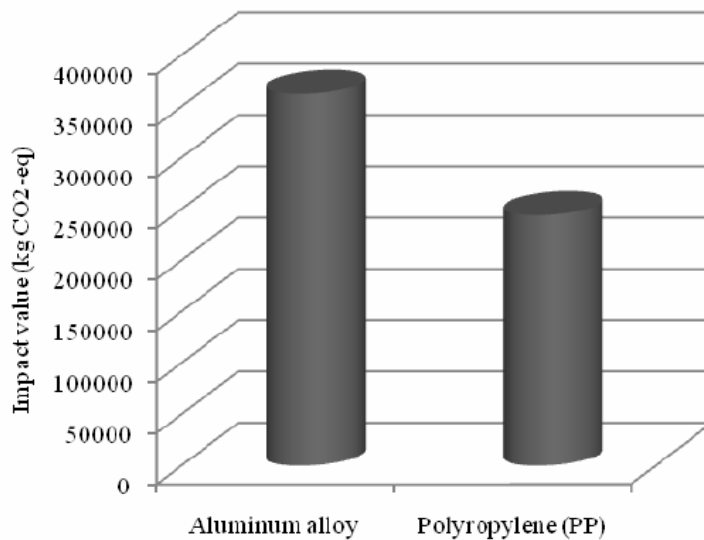


Figura 44 Ventilador de polipropileno



Lo que aquí se presentan son alternativas que pueden aplicarse a torres de enfriamiento que no son de uso industrial, dichas opciones no siempre podrán emplearse en todos los sistemas por las diversas variables que existen en su operación, sin embargo el objetivo del estudio es demostrar que si hay manera de contribuir a mejorar el ambiente y depende de la empresa evaluar la factibilidad de llevar cabo algunas de estas acciones o en el mejor de los casos aplicar todas.

La producción de CO_2 eq disminuye una vez aplicadas las propuestas de este estudio con el siguiente rango:

- Cambiar la materia prima del ventilador puede reducir 118,160 kg la producción de CO_2 eq
- Utilizar un motor de alta eficiencia reduce el CO_2 eq en 18,979 kg.
- El uso de relleno fabricado con papel Kraft en combinación con reducir la incrustación del mismo evita que se produzcan 9,825 kg de CO_2 eq.
- Y el cambio en la cubierta de la torre de enfriamiento permite que 2,059 kg de CO_2 eq afecten el ambiente de la atmósfera.

4.4 Propuestas

A partir de las curvas de comportamiento se obtiene un diagnóstico con el desempeño de las torres ya que determinan la capacidad de enfriamiento de estos equipos (sección 4.1), por otro lado los registros sobre la inspección física permitieron identificar áreas de oportunidad (sección 4.2) para tener una operación más eficiente, mientras que el análisis sobre los nuevos desarrollos amplía las alternativas aplicables (sección 4.3); estas actividades previas consolidan el respaldo necesario para poder conjuntar las propuestas que promueven una mejor administración del agua y el uso eficiente de la energía. Adicional a todo este análisis se realizó la consulta de textos especializados en torres de enfriamiento,



asesoría de ingenieros con experiencia en el área, y la participación dentro de un proyecto que desarrolla la ingeniería conceptual para el ahorro de agua en torres de enfriamiento. De esta manera fue posible presentar las siguientes propuestas para las torres de enfriamiento:

- Mantenimiento preventivo y limpieza de las torres de enfriamiento.
- Cambio del tipo de eliminador de arrastre.
- Instalación de un motor acoplado directamente al ventilador.
- Tren de tratamiento del agua de purgas.

4.4.1 Mantenimiento preventivo y limpieza

En lo referente al mantenimiento preventivo y limpieza se plantean los siguientes alcances:

- Limpieza de las boquillas distribuidoras de agua caliente, bacines de agua fría, y eliminadores de rocío.
- Mantenimiento menor del equipo mecánico principal y secundario, que involucra la realización de acciones rutinarias orientadas a mantener los equipos en óptimas condiciones de funcionamiento y prevenir desperfectos de mayor costo. Entre estas actividades están las siguientes: lubricación, ajustes, limpieza, reemplazo de pequeñas partes y pintura; así como, la calibración de la instrumentación asociada y remozamiento de las secciones dañadas en la estructura de concreto.
- Calibración y reparación de instrumentación que corresponda al sistema de dosificación de reactivos químicos en las torres de enfriamiento.

Esta propuesta permite una disminución de la corriente de arrastre en 4 GPM (22 m³/día) debido al incremento en la eficiencia de los eliminadores de arrastre por la



limpieza y el buen mantenimiento general; esta cantidad equivale al 10% de la corriente de arrastre. Se realizó un estimado de inversión que se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21. Inversión requerida para la limpieza de T.E.

Componente	Descripción	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
TE-1	Mantenimiento menor	\$ 211,000	\$ 211,000
TE-2	Mantenimiento menor	\$ 74,900	\$ 74,900
TE-3	Mantenimiento menor	\$ 209,350	\$ 209,350
Sistema de dosificación de químicos TE-1	Mantenimiento menor	\$ 93	\$ 93
Sistema de dosificación de químicos TE-2	Mantenimiento menor	\$ 93	\$ 93
Sistema de dosificación de químicos TE-3	Mantenimiento menor	\$ 93	\$ 93
Inversión total:			\$ 495,529

4.4.2 Cambio del tipo de eliminador de arrastre

De acuerdo a la evaluación realizada en la sección 4.3.1 se concluye que existe una opción más adecuada para sustituir los eliminadores de arrastre que actualmente operan las torres de enfriamiento. Se propone utilizar un eliminador para flujo cruzado con puntas alternadas con el objetivo de disminuir la caída de presión y así favorecer la reducción del consumo energético. La inversión estimada para estos equipos se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Inversión para sustituir los eliminadores de arrastre.

Componente	Descripción	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
TE-1	Cambio de eliminador de arrastre	\$ 2,371	\$ 35,571



Componente	Descripción	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
TE-2	Cambio de eliminador de arrastre	\$ 2,371	\$ 14,229
TE-3	Cambio de eliminador de arrastre	\$ 2,371	\$ 35,571
Inversión total:			\$ 85, 371

4.4.3 Instalación de nuevos motores para ventiladores

En la sección 4.3.2 se explica un nuevo desarrollo tecnológico para las torres de enfriamiento, es un motor de alta eficiencia diferente a los motores de inducción comunes, ya que este funciona con un imán permanente y su principal característica es la posibilidad de sustituir el reductor de velocidad, la fecha de transmisión y al motor actual; su diseño y peso le permiten esta sustitución. La inversión se observa en la Tabla 23.

Tabla 23. Inversión para la instalación de nuevos motores

Componente	Descripción	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
TE-1	Motor RPM Baldor y variador de frecuencia VS1CTD	\$9,045	\$135,676
TE-2	Motor RPM Baldor y variador de frecuencia VS1CTD	\$9,045	\$54,271
TE-3	Motor RPM Baldor y variador de frecuencia VS1CTD	\$9,045	\$135,676
Inversión total:			\$ 325,624



4.4.4 Tratamiento del agua de purgas

Para el agua de purgas se propone la instalación de un tren de tratamiento, el cual se explica en la sección 4.3.3. El tren incluye equipos de ultrafiltración, ósmosis inversa y una unidad desmineralizadora, en conjunto dicha planta tendrá una capacidad de 3,600 m³/día (660 GPM), con esto es posible reutilizar hasta el 60% del agua de purgas. La inversión estimada que se requiere, se puede observar en la Tabla 24.

Tabla 24. Inversión requerida para el tratamiento del agua de purgas

Componente	Descripción	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
Sistema de tratamiento de purgas	Nuevo	1	\$ 4,582,419	\$ 4,582,419
Tubería	Nuevo	1	\$ 219,350	\$ 219,350
Válvula	Nuevo	9	\$ 3,134	\$ 28,208
Válvula	Nuevo	9	\$ 3,738	\$ 33,639
Bomba recuperadora de purgas	Nuevo	8	\$ 50,393	\$ 403,147
Cárcamo de concreto	Nuevo	1	\$ 63,884	\$ 63,884
Inversión total:				\$ 5,330,647

Se ha considerado además, la combinación de las cuatro propuestas para una aplicación en conjunto, a esta combinación se le llama propuesta integral, la comparación entre la situación actual de las torres de enfriamiento y la propuesta integral se muestra a continuación, donde se observa los ahorros económicos así como los de agua y energía.



4.5 Operación actual y propuesta integral

La reducción en el consumo de agua y energía tiene un impacto económico en la operación de las torres de enfriamiento, en la Tabla 25 puede observarse la comparación económica entre la situación actual y el escenario con la propuesta integral, en la Tabla 26 se muestra el ahorro anual.

Tabla 25. Costo anual

Costo anual [USD/año]		
Corriente	Actual	Propuesta Integral
Repuesto	\$ 1,863,763	\$ 1,629,046
Arrastre	\$ 17,907	\$ 3,614
Purga	\$ 624,789	\$ 187,362
Energía	\$ 5,649,282	\$ 4,519,426

Tabla 26. Ahorro anual

Corriente	Ahorro anual [USD/año]
Repuesto	\$ 234,717
Arrastre	\$ 14, 293
Purga	\$ 437,427
Energía	\$ 1,129,856
TOTAL	\$ 1,802,000

La cantidad de agua y energía que se consume anualmente puede observarse en la Tabla 27, mientras que el ahorro anual se muestra en la Tabla 28.

Tabla 27. Consumo anual

Consumo anual [m ³ /año]		
Corriente	Actual	Propuesta Integral
Repuesto	8,471,770	7,404,875
Arrastre	81,574	16,604
Purga	1,524,043	457,148
Consumo anual [kWh/año]		
Energía	70,881,835	56,705,468

Tabla 28. Ahorro anual

Corriente	Ahorro anual [m ³ /año]
Repuesto	1,066,895
Arrastre	64,970
Purga	1,066,895
TOTAL	2,198,760
Ahorro anual [kWh/año]	
Energía	14,176,367



La Figura 45 presenta las condiciones de operación actual y la reducción en el consumo de agua y energía obtenida por implementar la propuesta integral. En color rojo se muestra el ahorro generado por día de operación.

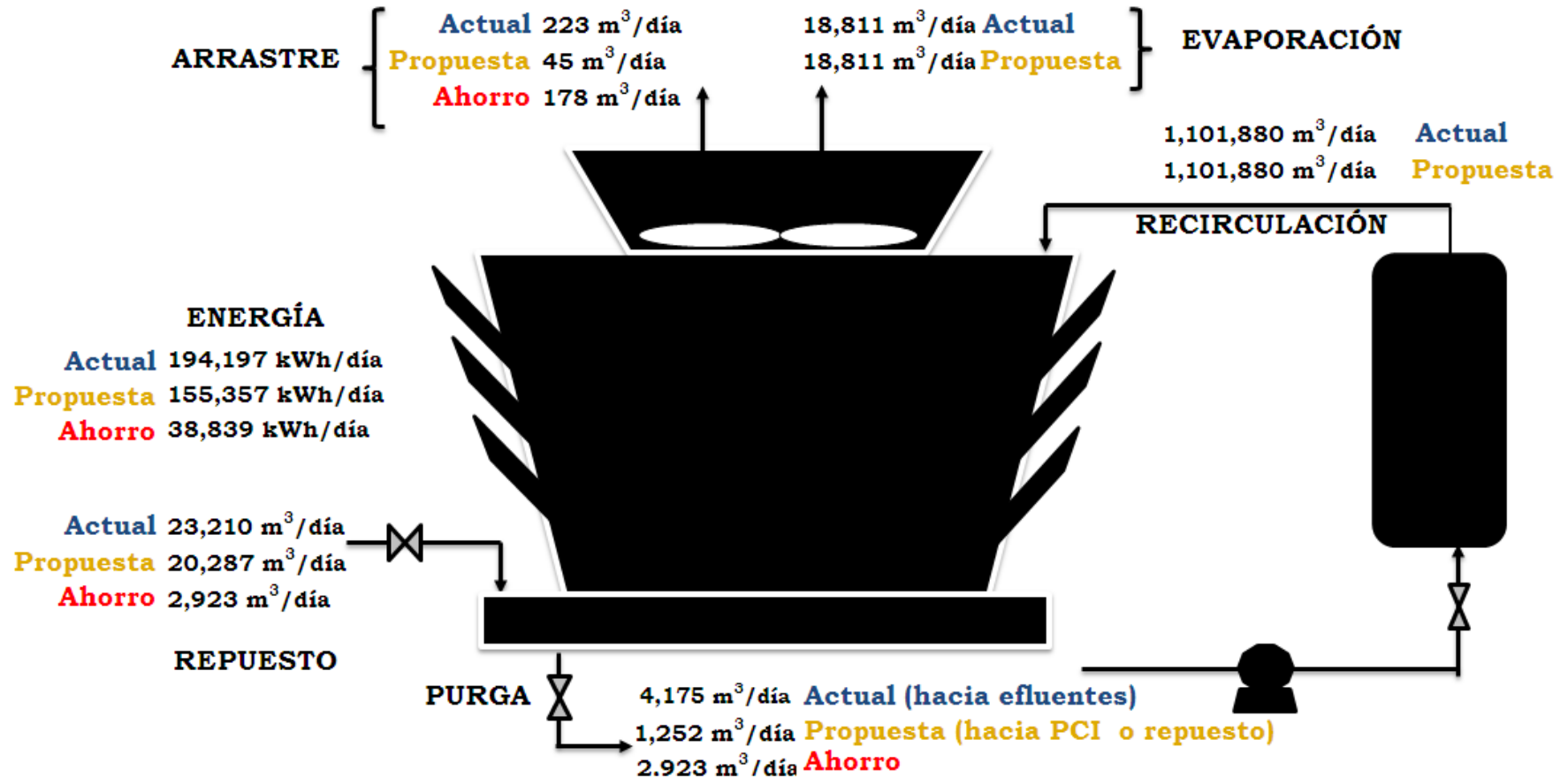


Figura 45 Esquema actual de operación y propuesta integral



4.6 Evaluación económica

Según la metodología que se explica en la sección 3.4 el primer paso es calcular la inversión inicial para cada propuesta; además de esta cantidad, se considera un porcentaje de la inversión inicial (5%) para el arranque de la propuesta y la ingeniería que por motivos ajenos sea requerida, con ello se obtiene un subtotal, el 10% de este subtotal corresponde al porcentaje que cubrirá posibles contingencias durante la ejecución del proyecto, por lo tanto se tiene una inversión final que incluye estos dos factores, en la Tabla 29 se muestran los resultados para cada una de las propuestas realizadas.

Tabla 29. Resumen de la inversión requerida por propuesta

Propuesta	Inversión [USD]	Ingeniería y Arranque [5%]	Subtotal [USD]	Contingencias [10%]	Inversión TOTAL [USD]
Mtto. y Limpieza	\$ 495,529	\$ 24,776	\$ 520,305	\$ 52,031	\$ 572,336
Cambio de eliminadores de arrastre.	\$ 85,371	\$ 4,269	\$ 89,640	\$ 8,964	\$ 98,604
Instalación de motores.	\$ 325,624	\$ 16,281	\$ 341,905	\$ 34,191	\$ 376,096
Tratamiento del agua de purgas	\$ 5,330,647	\$ 266,532	\$ 5,597,179	\$ 559,718	\$ 6,156,897
TOTAL=					\$ 7,203,933

Lo siguiente es identificar los costos involucrados en la operación de las torres de enfriamiento, la Tabla 30 muestra los costos que se consideran en esta evaluación económica.

Tabla 30. Costos involucrados

Concepto	Costo unitario [USD/m ³]
Agua de repuesto	\$ 0.22
Consumo de químicos	\$ 0.17
Descarga a efluentes	\$ 0.41



Concepto	Costo unitario [USD/m ³]
Tratamiento de purgas	\$ 0.30
Bombeo de purgas	\$ 0.12
Energía eléctrica	\$ 0.0797

Entonces se determinan los ahorros que implican las propuestas planteadas en la sección 4.4: al realizar la limpieza se tiene una reducción de 22 m³/día (4 GPM) en el agua que se va como corriente de arrastre, su efecto se refleja en dejar de utilizar 22 m³/día (4 GPM) de agua de repuesto, y en el costo asociado por el tratamiento químico para esta cantidad de agua.

Con el cambio de los eliminadores de arrastre se estima reducir el consumo de agua de repuesto en 178 m³/día (33 GPM). Y al aplicar el tren de tratamiento para el agua de purgas es posible reutilizar el 60%, es decir 2,923 m³/día (536 GPM) que no serán descargados al área de efluentes y por lo tanto se obtiene un ahorro al no tratar esa agua, además si esta cantidad se reutiliza como agua de repuesto entonces se tiene una posibilidad adicional de ahorro. Respecto a la energía, el motor magnético proporciona una reducción del 10% en el consumo, que representa dejar de utilizar 19,420 kWh/día al considerar el las tres torres de enfriamiento. Si además del cambio por motores magnéticos se realiza un cambio en los eliminadores de arrastre, entonces la reducción en el consumo energético se puede incrementar hasta un 20%, por lo tanto si se consideran las tres torres de enfriamiento este porcentaje significa dejar de utilizar 38,839 kWh/día. En la Tabla 31 se observa los ahorros económicos por implementar las propuestas que se presentan.

Tabla 31. Ahorro económico por implementar las propuestas

Propuesta	Concepto	Cantidad [m ³ /día]	Costo unitario [USD/m ³]	Ahorro total [USD/día]
Mtto. y Limpieza	Agua de repuesto	22	\$ 0.22	\$ 5
	Consumo de químicos	22	\$ 0.17	\$ 4
Cambio de	Agua de repuesto	178	\$ 0.22	\$ 39

Resultados



Propuesta	Concepto	Cantidad [m ³ /día]	Costo unitario [USD/m ³]	Ahorro total [USD/día]
eliminadores de arrastre	Consumo de químicos	178	\$ 0.17	\$ 30
Tratamiento del agua de purga	Agua de repuesto	2,923	\$ 0.22	\$ 643
	Consumo de químicos	2,923	\$ 0.17	\$ 497
	Descarga a efluentes	2,923	\$ 0.41	\$ 1,198
Propuesta	Concepto	Cantidad [kWh/día]	Costo unitario [USD/[kWh]	Ahorro total [USD/día]
Instalación de motores	Consumo energético	19,429	\$ 0.0797	\$ 1,548
Cambio eliminadores de arrastre	Consumo energético	38,839	\$ 0.0797	\$ 3,095

En la Tabla 32 se muestra un resumen con los metros cúbicos de agua que las propuestas permiten ahorrar cada año.

Tabla 32. Ahorro anual de agua

Propuesta	Concepto	Cantidad [m ³ /año]
Mtto. y Limpieza	Agua de repuesto	8,030
Cambio de eliminadores	Agua de repuesto	64,970
Tratamiento del agua de purga	Agua de repuesto	1,066,895

En la Tabla 33 se muestra el ahorro energético anual que se obtiene al implementar las propuestas planteadas en la sección 4.4.2 y 4.4.3.

Tabla 33. Ahorro anual de energía

Propuesta	Concepto	Cantidad [kWh/año]
Instalación de nuevos motores.	Energía eléctrica	7,088,184
Cambio de eliminadores	Energía eléctrica	14,176,367



Propuesta	Concepto	Cantidad [kWh/año]
con la instalación de nuevos motores.		

❖ Mantenimiento preventivo y limpieza

En la Tabla 34 se muestran los ingresos que esta propuesta genera para las torres de enfriamiento, mientras que la Tabla 35 muestra los costos fijos por llevar a cabo el mantenimiento preventivo y la limpieza.

Tabla 34. Costos variables por llevar a cabo la limpieza

	Precio unitario [USD/m ³]	Ingreso anual [USD/año]
Ingreso por el agua de repuesto	\$ 0.22	\$ 1,767
Ingreso por consumo de químicos	\$ 0.17	\$ 1,365

Tabla 35. Costos fijos por llevar a cabo la limpieza

	Tipo de costo	Costo anual [USD/año]
Mantenimiento	Directo	\$ 24
Depreciación	Indirecto	\$ 41

Los flujos de efectivo y los índices económicos para el mantenimiento preventivo y la limpieza de las torres de enfriamiento se observan en la Tabla 36.

Tabla 36. Flujos de efectivo e índices económicos para la limpieza

Año	Flujo de efectivo [USD]	Año	Flujo de efectivo [USD]
0	- \$ 572,537	11	\$ 637
1	\$ 1,978	12	\$ 569



Año	Flujo de efectivo [USD]	Año	Flujo de efectivo [USD]
2	\$ 1,766	13	\$ 508
3	\$ 1,577	14	\$ 453
4	\$ 1,408	15	\$ 405
5	\$ 1,257	16	\$ 361
6	\$ 1,122	17	\$ 323
7	\$ 1,002	18	\$ 288
8	\$ 895	19	\$ 257
9	\$ 799	20	\$ 230
10	\$ 713	21	-
Índice		Valor	
Tasa de descuento		12%	
VPN		-\$ 555,992	
TIR		-17.42 %	
PRI		No recupera	

❖ Cambio de los eliminadores de arrastre

En la se Tabla 37 muestran los ingresos para esta propuesta de torres de enfriamiento, mientras que la Tabla 38 muestra los costos fijos por llevar a cabo el cambio de los eliminadores de arrastre de las torres de enfriamiento.

Tabla 37. Costos variables al cambiar eliminadores de arrastre

	Precio unitario [USD/m ³]	Costo anual [USD/año]
Agua de repuesto	\$ 0.22	\$ 14,293
Consumo de químicos	\$ 0.17	\$ 11,045



Tabla 38. Costos fijos al cambiar eliminadores de arrastre

	Tipo de costo	Costo anual [USD/año]
Mantenimiento preventivo (3 torres)	Directo	\$ 2,561
Depreciación (3 torres)	Indirecto	\$ 4,268

Los flujos de efectivo y los índices económicos por llevar a cabo el cambio de los eliminadores de arrastre en las tres torres de enfriamiento se observan en la Tabla 39.

Tabla 39. Índices económicos para cambio de eliminadores

Año	Flujo de efectivo [USD]	Año	Flujo de efectivo [USD]
0	-\$ 98,604	11	\$ 5,321
1	\$ 16,527	12	\$ 4,751
2	\$ 14,756	13	\$ 4,242
3	\$ 13,175	14	\$ 3,787
4	\$ 11,763	15	\$ 3,382
5	\$ 10,503	16	\$ 3,019
6	\$ 9,378	17	\$ 2,696
7	\$ 8,373	18	\$ 2,407
8	\$ 7,476	19	\$ 2,149
9	\$ 6,675	20	\$ 1,919
10	\$ 5,960	21	-
Índice		Valor	
Tasa de descuento		12%	
VPN		\$ 39,654	
TIR		18 %	
PRI		9 años	



❖ Instalación de motores magnéticos

En la Tabla 40 se muestran los ingresos por la instalación de motores magnéticos para las torres de enfriamiento, mientras que la Tabla 41 muestra los costos fijos por llevar a cabo esta propuesta.

Tabla 40. Costos variables por instalación de motores magnéticos

	Precio unitario [USD/m ³]	Costo anual [USD/año]
Energía eléctrica	\$ 0.08	\$ 564,928

Tabla 41. Costos fijos por instalación de motores magnéticos

	Tipo de costo	Costo anual [USD/año]
Mantenimiento preventivo	Directo	\$ 271
Depreciación	Indirecto	\$ 452

Los flujos de efectivo y los índices económicos para la instalación de motores magnéticos se observan en la Tabla 42.

Tabla 42. Índices económicos por el cambio de motores

Año	Flujo de efectivo [USD]	Año	Flujo de efectivo [USD]
0	-\$ 376,096	11	\$ 162,196
1	\$ 503,755	12	\$ 144,817
2	\$ 449,781	13	\$ 129,301
3	\$ 401,590	14	\$ 115,448
4	\$ 358,563	15	\$ 103,078
5	\$ 320,145	16	\$ 92,034



Año	Flujo de efectivo [USD]	Año	Flujo de efectivo [USD]
6	\$ 285,844	17	\$ 82,173
7	\$ 255,218	18	\$ 73,369
8	\$ 227,873	19	\$ 65,508
9	\$ 203,458	20	\$ 58,489
10	\$ 181,659	21	-
Índice		Valor	
Tasa de descuento		12%	
VPN		3,838,203	
TIR		150%	
PRI		Menos de 1 año	

❖ Tratamiento del agua de purga

En la Tabla 43 se muestran los ingresos para esta propuesta de torres de enfriamiento, mientras que la Tabla 44 muestra los costos fijos debido a la aplicación de un tren de tratamiento de agua.

Tabla 43. Costos variables por tratamiento del agua

	Precio unitario [USD/m ³]	Costo anual [USD/año]
Agua de repuesto	\$ 0.22	\$ 235,784
Consumo de químicos	\$ 0.17	\$ 185,533
Descarga a efluentes	\$ 0.41	\$ 437,427

Tabla 44. Costos fijos por tratamiento del agua

	Tipo de costo	Costo anual [USD/año]
Mantenimiento preventivo	Directo	\$ 151,259

Resultados



	Tipo de costo	Costo anual [USD/año]
Depreciación	Indirecto	\$ 252,098

Los flujos de efectivo y los índices económicos para el tratamiento del agua de purga se observan en la Tabla 45.

Tabla 45. Flujos de efectivo por tratamiento de agua

Año	Flujo de efectivo [USD]	Año	Flujo de efectivo [USD]
0	-\$ 6,156,897	11	\$ 162,196
1	\$ 503,755	12	\$ 144,817
2	\$ 449,781	13	\$ 129,301
3	\$ 401,590	14	\$ 115,448
4	\$ 358,563	15	\$ 103,078
5	\$ 320,145	16	\$ 92,034
6	\$ 285,844	17	\$ 82,173
7	\$ 503,755	18	\$ 73,369
8	\$ 227,873	19	\$ 65,508
9	\$ 203,458	20	\$ 58,489
10	\$ 181,659	21	-
Índice		Valor	
Tasa de descuento		12%	
VPN		-3,566,337	
TIR		1.2%	
PRI		No recupera	



❖ Propuesta Integral

Una vez que se realizó el análisis económico para cada una de las propuestas, se desarrolla la evaluación económica para un proyecto que considera la aplicación, en conjunto de las cuatro propuestas anteriores. En la Tabla 46 se muestran los costos variables que implica la aplicación de las cuatro propuestas en conjunto, mientras que la Tabla 47 muestra los costos fijos por llevar a cabo las diferentes propuestas.

Tabla 46. Costos variables por implementar las propuestas

	Precio unitario [USD/m ³]	Costo anual [USD/año]
Agua de repuesto	\$ 0.22	\$249,010
Consumo de químicos	\$ 0.17	\$192,417
Descarga a efluentes	\$ 0.41	\$437,427
Consumo de energía	\$ 0.08	\$1,129,856

Tabla 47. Costos fijos por llevar a cabo la limpieza

	Tipo de costo	Propuesta	Costo anual [USD/año]
Mantenimiento	Directo	Mtto. y Limpieza	\$24
		Cambio eliminadores	\$2,561
		Cambio de motores	\$271
		Tratamiento de agua	\$151,259
Depreciación	Indirecto	Mtto. y Limpieza	\$41
		Cambio eliminadores	\$4,268
		Cambio de motores	\$452
		Tratamiento de agua	\$252,098



Para obtener el costo anual del mantenimiento (Tabla 47) se considera el 3% y para la depreciación el 5%, ambos porcentajes respecto a la inversión inicial de los equipos requeridos para implementar las propuestas.

Una vez que se tienen los costos y beneficios involucrados es posible determinar los flujos de efectivo para un periodo de 20 años; en algunos equipos se considera una reinversión en el año 5, 10 y 15 de acuerdo al mantenimiento que sea requerido. Los flujos de efectivo y los índices económicos para la limpieza de las torres de enfriamiento se observan en la Tabla 48.

Tabla 48. Flujos de efectivo e índices económicos para la limpieza

Año	Flujo de efectivo [USD]
0	- \$ 7,203,933
1	\$ 998,585
2	\$ 891,594
3	\$ 796,066
4	\$ 710,773
5	\$ 634,619
6	\$ 566,624
7	\$ 505,914
8	\$ 451,709
9	\$ 403,312
10	\$ 360,100
11	\$ 321,518
12	\$ 287,069
13	\$ 256,312
14	\$ 228,850
15	\$ 204,330
16	\$ 182,438
17	\$ 162,891



Año	Flujo de efectivo [USD]
18	\$ 145,438
19	\$ 129,856
20	\$ 115,942

Índice	Valor
Tasa de descuento	12%
VPN	\$ 1,150,007
TIR	14 %
PRI	12 años 4 meses

Se ha llevado a cabo la evaluación económica para cada propuesta así como una evaluación integral que considera la aplicación en conjunto de las cuatro, los resultados para el mantenimiento preventivo y la limpieza de las torres de enfriamiento y la propuesta con el tren de tratamiento de agua, arrojan valores de VPN negativos, debido a que la inversión inicial es muy grande y los beneficios que pueden obtenerse no compensan dicha cantidad, además esta evaluación abarca aspectos generales y se enfoca en un sistema de estudio definido, quiere decir que es solo un reflejo puntual de la operación individual del equipo. Esta explicación también aplica para el cambio de eliminadores de arrastre y la sustitución de los motores, es decir el sistema de estudio solo es la operación por separado de los equipos y en estos casos los beneficios obtenidos son mucho mayores que la inversión requerida, por ello se obtienen valores de VPN muy positivos. Por lo tanto cuando se aplica el análisis que considera la aplicación de las cuatro propuestas, el proyecto se vuelve rentable, estas alternativas son técnicamente eficientes pero para una aplicación real se vuelven dependientes de las necesidades del C.P.G. por ejemplo la disposición del efectivo, los efectos en el proceso de las plantas a las que se da servicio, el factor ambiental, y las prioridades operativas del centro de trabajo.



5. Conclusiones

Con base en la investigación bibliográfica, solicitud de información técnica a proveedores y a los datos obtenidos en campo por el equipo de trabajo del que formé parte durante la realización del presente estudio; se plantean propuestas para mejorar la operación de las torres de enfriamiento seleccionadas para este trabajo de tesis, buscando disminuir el consumo de agua y de energía.

Como resultado de la inspección física de las torres de enfriamiento se concluyó que las principales áreas de oportunidad para mejorar el estado físico de éstos equipos y sus componentes internos se concentran en evitar y corregir lo siguiente:

- El ensuciamiento biológico.
- La incrustación.
- El daño físico del relleno.
- Mala distribución del agua caliente.
- Obstrucción en las boquillas aspersoras.
- En algunos casos desnivel del bacín de agua caliente.
- Contaminación del agua por goteo de aceite en los reductores.

Se analizaron datos históricos de los últimos 5 años sobre el funcionamiento de las torres de enfriamiento, concluyendo que los flujos de operación actuales son considerablemente menores a los flujos de diseño, lo que significa que las torres de enfriamiento tienen disponibilidad para remover una mayor carga térmica con respecto a la disipada actualmente; estas torres pueden recibir casi 40% más del flujo de recirculación actual. Los resultados obtenidos son los siguientes: la torre TE-1 opera al 57% de su capacidad de diseño con 84,990 GPM (463,280 m³/día); la torre TE-2 opera al 49% de la capacidad de diseño con 29,430 GPM (160,423 m³/día), mientras que la torre TE-3 opera al 58% de su capacidad de diseño con

Conclusiones



87,723 GPM (478,177 m³/día). Por lo tanto se concluye que la torre que opera de forma más eficiente es la torre TE-3.

El análisis de los datos históricos con el que se realizó el balance de agua para las torres de enfriamiento, indica que las de pérdidas de agua por evaporación y arrastre son comparables a los valores convencionales: en promedio, el 80% de la corriente de repuesto se pierde como evaporación, el 19% se descarga como purgas y el 1% restante se pierde como arrastre.

Los resultados demostraron que la entrada de agua necesaria para satisfacer las necesidades del C.P.G. es de 5,812 GPM (31,681 m³/día), de esta cantidad el 70% se destina como agua de repuesto para las torres de enfriamiento lo cual significa 4,258 GPM (23,210 m³/día); la distribución de esta agua de repuesto es: 1,911 GPM (10,417 m³/día) para la torre TE-1, 513 GPM (2,796 m³/día) para torre TE-2 y 1,834 GPM (9,997 m³/día) para la torre TE-3. Respecto a los ciclos de concentración los resultados fueron 5.6, 4.7 y 5.1 para las torres TE-1, TE-2 y TE-3 respectivamente, estos valores son aceptables ya que se encuentran cercanos a 5 que es el valor de diseño. De lo anterior se concluye que las áreas de oportunidad para el ahorro de agua en las torres de enfriamiento se concentran en tratar las purgas y reutilizar esa cantidad de agua, además que la torre TE-2 tiene la posibilidad de incrementar el valor de los ciclos de concentración y con ello disminuir la frecuencia con la que se purga esa torre.

Se aplicó el método de curvas de comportamiento, como resultado se obtuvo que la capacidad de enfriamiento de las torres es: 72% para la torre TE-1, 64% para la torre TE-2 mientras que para la torre TE-3 el resultado fue 77%, en promedio la capacidad de enfriamiento de las tres torres es 70% valor aceptable para este tipo de torres.

La búsqueda de información sobre nuevos desarrollos tecnológicos permitió definir alternativas aplicables a las torres de enfriamiento en este centro de trabajo para



ahorrar agua y energía. Con base en esta revisión se obtuvieron cuatro propuestas:

- Mantenimiento preventivo y limpieza de las torres de enfriamiento y sus componentes internos cada 12 meses.
- Sustitución del motor actual del ventilador, la flecha de transmisión y el reductor de velocidad, por un motor magnético directamente acoplado al ventilador; este moderno motor cuenta con variador de frecuencia lo que permitiría disminuir la potencia requerida y ahorrar energía.
- El cambio de los eliminadores de arrastre actuales que son de tipo Hi-V o “ala de murciélago”, por eliminadores de tipo celular de segunda generación con trayectoria redondeada y puntas alternadas.
- Instalación de un tren de tratamiento para el agua de purgas de las torres de enfriamiento, tiene la capacidad para obtener 600 m³/día (660 GPM) como producto final. El tratamiento consta de un filtro multimedia, ultrafiltración, ósmosis inversa, desgasificador, y una desmineralizadora.

Como parte del cálculo de los costos involucrados en la operación de las torres de enfriamiento se obtuvieron los siguientes valores: \$ 0.22 USD/m³ para el agua de repuesto, \$0.17 USD/m³ para el consumo de químicos, \$ 0.41 USD/m³ por descargar hacia efluentes, \$ 0.30 USD/m³ por el tratamiento del agua de purgas, \$ 0.12 USD/m³ por el bombeo de la corriente de purgas y \$ 0.08 USD/ kWh para la energía eléctrica. Al cuantificar los beneficios económicos y considerar los beneficios operativos de las propuestas se encontró que:

- El mantenimiento preventivo y la limpieza de las torres de enfriamiento permite una reducción de 4 GPM (22 m³/día) en el agua que se va como



corriente de arrastre, su efecto se refleja en dejar de utilizar 4 GPM (22 m³/día) de agua de repuesto. El ahorro de agua debido a esta alternativa representa \$ 9 USD/día en la operación de las torres, pero puede significar ahorros potenciales al evitar paros inesperados de las torres por fallas técnicas.

- Con la instalación de un motor magnético directamente acoplado al ventilador es posible reducir el consumo de energía en 10% es decir dejar de utilizar 19,420 kWh/día lo que significa un ahorro económico de \$ 1,548 USD/día.
- El cambio de los eliminadores de arrastre reduce el consumo de agua de repuesto en 33 GPM (178 m³/día), y permite un ahorro de \$ 69 USD/día en la operación de las torres de enfriamiento. Si este cambio se aplica en conjunto con el de los motores de los ventiladores, entonces la reducción en el consumo energético se puede incrementar hasta un 20%, es decir ahorrar 38,839 kWh/día y \$ 3,095 USD/día en la operación de las torres de enfriamiento.
- El tren de tratamiento permitiría reutilizar poco más del 60% del agua de purgas y lograr un ahorro de \$ 2,338 USD/día.

Con base en estos resultados se determinó que el tratamiento de las purgas es la opción con la mayor posibilidad de ahorro de agua, permite disminuir el consumo actual de químicos en \$ 497 USD/día, y si el agua tratada se reutiliza para otros servicios (por ejemplo repuesto ó red contraincendios) se obtiene una mayor disponibilidad del líquido. Es importante mencionar que esta propuesta debe tener como base una rehabilitación de las torres de enfriamiento que mejore la infraestructura actual para que la recolección de las purgas sea una operación adecuada dentro de los estándares industriales de seguridad.



Al realizar la evaluación económica se obtuvo que la inversión total por aplicar las cuatro propuestas a las torres de enfriamiento es de \$ 7, 203, 933 USD, distribuidos de la siguiente manera:

- El cambio del tipo de eliminadores de arrastre requiere \$ 98, 604 USD como inversión inicial, es decir el 1% de la inversión total.
- La instalación de los nuevos motores acoplados directamente a los ventiladores cuesta \$ 376,096 USD lo que significa el 5% de la inversión total.
- La limpieza de las torres de enfriamiento tiene una inversión de \$ 572, 336 USD, que representa el 8% de la inversión total.
- Y la instalación del tren de tratamiento requiere un inversión inicial de \$ 6, 156, 897 USD, que abarca el 85% de la inversión total.

Para la propuesta de mantenimiento preventivo y limpieza y la propuesta con el tren de tratamiento del agua de purgas los indicadores económicos reflejan que dichas alternativas no son rentables al implementar cada una de ellas por separado; ocurre lo contrario con el cambio de eliminadores de arrastre y la sustitución de los motores aplicados ya que por separado resultan propuestas rentables. Al combinar las cuatro propuestas, en una propuesta integral, se obtiene un proyecto rentable con los siguientes indicadores económicos:

VPN = \$ 1, 150, 007 USD

TIR = 14%

PRI = 12 años



CONSIDERACIONES FINALES

En algunos casos, las inversiones enfocadas en el ahorro de agua y energía no siempre representan una vasta ganancia económica, además no es el objetivo esencial ya que se incluyen otros aspectos como:

- El cuidado ambiental, que en los últimos años la conciencia ambiental ha tomado fuerza en la agenda del sector productivo
- El cumplimiento de las normas, que tiene relación con la calidad de la industria.
- La imagen de la instalación industrial ante la sociedad, que no deja de ser un punto prescindible.
- El pago de impuestos por la descarga de contaminantes.
- Un proceso más eficiente.

En los primeros capítulos de este trabajo de tesis se ha resaltado la importancia de las torres de enfriamiento para la industria, y no es necesario remarcar la del agua; por lo tanto un buen proceso de enfriamiento, una adecuada operación de las torres y la reducción de las pérdidas de agua en ellas trae consigo beneficios que impactan a todo el centro de trabajo ya que dichos equipos son fundamentales para la operación de cualquier planta de proceso, ésta es la base que justifica la implementación de las propuestas.

La evaluación económica de la sección 4.6 es un reflejo puntual que abarca la operación individual de las torres por lo tanto antes de una aplicación real, se recomienda ampliar el sistema de estudio, por ejemplo considerar las plantas a las que se da servicio o los productos obtenidos, (entre otras variables) para obtener resultados más cercanos a una evaluación económica total.

Esta tesis presenta opciones aplicables, y cada una de las propuestas genera un ahorro de agua o energía, tiene un costo asociado y parámetros económicos

Conclusiones



positivos o negativos de acuerdo a la alternativa; por lo tanto depende de los alcances, prioridades, disponibilidad operativa y presupuestal del C.P.G. para elegir la opción más conveniente.

Incorporarme a un grupo de trabajo de Ingeniería Ambiental a cargo del Dr. Alfonso Durán Moreno permitió el desarrollo de mi tesis, este equipo realiza proyectos para diferentes áreas en materia ambiental, y poder apoyar a ese grupo de ingenieros fue un factor muy importante, porque complementa mi formación y me brinda la oportunidad de saber cómo se lleva a cabo un proyecto real de ingeniería, identificar los detalles involucrados, las contingencias que se presentan, la planeación previa, la asignación de actividades, el avance programado y la división del trabajo en áreas más específicas para mejorar los resultados. Por su puesto fue una gran fuente de información colaborar con este grupo de trabajo, aquí comenzó mi aprendizaje sobre torres de enfriamiento desde la parte teórica pero también en la práctica ya que fue posible visitar un centro de trabajo y apoyar en la inspección física de las torres de enfriamiento, éste es otro punto que debo resaltar porque agregé un soporte visual al análisis teórico. Me otorga un panorama más amplio de las condiciones operativas en una instalación industrial además de presenciar la estricta seguridad del centro de trabajo. Pero lo más relevante es que me acerca a la verdadera influencia de mi carrera (Ingeniería Química) en el desarrollo económico, social y tecnológico de mi país.



6. Bibliografía

6.1 Artículos

Bureau of Energy of India. (2009). Energy Efficiency in Electrical Utilities. *Book III* (Ch. 5 Fans & Blowers).

Bureau of Energy of India. (2009). Energy Efficiency in Electrical Utilities. *Book III* (Ch.6, Pumps & PUMping System).

Bureau of Energy of India. (2009). Energy Efficiency in Electrical Utilities. *Book III* (Ch. 7 Cooling Tower).

CTI Executive Board. (2005). Acceptance test code por water cooling towers. *ATC-105*.

Desjardins, R. J. (2007). Cooling Towers Work as a System.

Dow Water & Process Solution. (Agosto de 2009). Cooling Tower Blowdown Reuse in Gaojing Power Plant.

Gallina, C. (2009). Investigation on fan noise generation.

Harfst, W. F. (Febrero de 2009). Conserve water by improving cooling tower efficiency.



Likhittvorakul, S., & Phunggrassami, H. (2009). Ecodesign of the Cooling Tower: Case of study of SMEs in Thailand.

Mcelveen, R., & Martin, B. (Febrero de 2009). Recent developments in motor technology allow direct drive of low speed cooling tower fans. *Cooling Technology Institute* .

Miller, W. C., & Krell, T. E. (2006). A review of drift eliminator performance.

Sovocool, K. (Febrero de 2008). Maximaizing Cooling-Tower Water Efficiency.

Walters, J., & Duke, D. (2009). Effective use of recycled water in cooling towers with new green technology.

6.2 Libros

Baca, G. U. (2003). *Fundamentos de Ingeniería Económica*. México: Mc Graw Hill.

Cruz, M. J. (2007). *Guía para la evaluación técnica de torres de enfriamiento*. Distrito Federal: Facultad de Química, UNAM.

Ibarra Aguilar, C. A. (2008). *Diagnóstico y propuestas de mejora del funcionamiento de una torres de enfriamiento y su red de distribución de agua en una refinería*. Distrito Federal, México: Facultad de Química, UNAM.

Sovocool, K. (Febrero de 2008). Maximaizing Cooling-Tower Water Efficiency.

Villanueva López, R. I. (2007). *Uso eficiente de la energía en torres de enfriamiento*. Distrito Federal, México: Facultad de Ingeniería, UNAM.



6.3 Sitios web

Cooling Tower Institute. (Marzo de 2010). *CTI Home*. Obtenido de <http://www.cti.org>

Institute of Industrial Electronics Engineering. (2010). Obtenido de <http://iiee.edu.pk/>

Ministry of Power, Government of India. (2010). *Bureau of Energy Efficiency*. Obtenido de <http://www.bee-india.nic.in/>

Secretaría de Energía. (Octubre de 2009). *Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía*. (SENER) Recuperado el Marzo de 2010, de <http://www.conuee.gob.mx/wb/>



7. Anexos

A 1 Inspección física TORRE TE-1

- Estructura general

La estructura es de concreto, las columnas y trabes de la torre se encuentran en regulares condiciones, al igual que las paredes divisorias de cada celda. La torre en su lado oriente presenta varias varillas expuestas que además muestran corrosión. Las puertas de acceso se encuentran en mal estado (no están fijadas) y presentan la tornillería oxidada, lo mismo ocurre con las puertas divisorias de cada celda. La escalera es de concreto en algunos escalones existe un desprendimiento de concreto, el barandal se encuentra en muy mal estado debido a la corrosión.

- Relleno o empaque

11 celdas cuentan con relleno tipo barra “V” de PVC de 4”, y dos celdas tienen relleno de tabletas lisas de PVC de 1-1/2” de ancho. El relleno de la mayoría de las celdas se encuentra dañado debido a objetos pesados que caen sobre él, se recomienda cambiar el 100 % del relleno de todas las torres.

- Eliminadores de arrastre

Son de la marca Ecodyne del tipo Hi – V “ala de murciélago”, los eliminadores de la celda BV-19 presentan daños severos que pudieron ser ocasionados por la caída de algún objeto del equipo mecánico o desprendimiento del concreto de la estructura. En cuanto al resto de las celdas, en general el estado físico de los eliminadores es bueno, a excepción de algunas secciones que requieren limpieza, debido al crecimiento biológico.



- Bacín de agua caliente y/sistema de distribución

Se encontró que las celdas tienen los siguientes problemas: La celda BV-14 presenta mala distribución de agua debido a la obstrucción de boquillas aspersoras por crecimiento biológico. La celda BV-16 presenta derrames en la caja de salpiqueo y mala distribución debido al taponamiento de boquillas. En la celda BV-17 existe corrosión en la válvula de distribución, por lo cual ha quedado inservible. La celda BV-20 tiene una mala distribución de agua y presencia de algas. La mayoría de las boquillas de distribución de las torres están tapadas por lo cual se recomienda el cambio del 100% de las boquillas en todas las celdas, las válvulas de control de flujo se encuentran en un estado de regular a mal estado se recomienda su cambio por válvulas de acero galvanizado.

- Persianas

Las persianas son de concreto al igual sus soportes, en algunas existe la presencia de crecimiento biológico, además de mostrar desprendimientos de concreto y varillas descubiertas las cuales son susceptibles a la corrosión. Se recomienda eliminar una de cada tres persianas con el objeto de permitir un mayor flujo de aire y reparar o cambiar las dañadas.

- Ventiladores

Los ventiladores son de la marca Hudson Tuflite II con un diámetro de 8.53m y 8 aspas. Su motor es de 460 V, 147 Amp. y 125 Hp., en algunas celdas se detectaron problemas con los sistemas mecánicos de ventilación, tales como los encontrados en las celdas BV-18 y BV-23 donde los ventiladores no operan, al encontrarse los motores desacoplados, mientras los equipos reductores y soportes de los motores presentan corrosión, por lo cual se recomienda la aplicación de recubrimientos anticorrosivos.



- Chimenea o cono Venturí

Todas las chimeneas son de concreto, algunas en su estructura presentan desprendimiento de hormigón, varillas descubiertas y oxidadas. Algunas puertas de las chimeneas no existen, por lo que se recomienda la instalación de las faltantes, para evitar cambios de presión en la zona de los conos.

A 2 Inspección física TORRE TE-2

- Estructura general

La estructura es de concreto, las columnas y trabes de la torre se encuentran en regulares condiciones, al igual que las paredes divisorias de cada celda. La torre en su lado oriente presenta varias varillas expuestas que además muestran corrosión. Las puertas de acceso se encuentran en mal estado (no están fijadas) y presentan la tornillería oxidada, lo mismo ocurre con las puertas divisorias de cada celda. La escalera es de concreto en algunos escalones existe un desprendimiento de concreto, el barandal se encuentra en muy mal estado debido a la corrosión.

- Relleno o empaque

Los rellenos de la torre son de PVC y de 1-1/2" de ancho, la mayoría del relleno de la torre se encuentra dañado en algunas celdas tal daño es considerable, esto por la caída de cascadas de agua. Además, la eficiencia de este tipo de relleno es menor comparada con otros modelos. Se recomienda cambiar el 100% del relleno de la torre por empaque de tipo Opti-Bar.

- Eliminadores de arrastre

Los eliminadores de rocío en la torre TE-2 son del tipo Hi – V “ala de murciélago”, en las celdas BV-26 y BV-27 los eliminadores presentan flexiones y daño estructural; por lo que se recomienda su reemplazo.



- Bacín de agua caliente y/sistema de distribución

En lo que respecta a los depósitos de agua caliente, algunas celdas presentan desbordamiento de agua, debido al mal estado de las boquillas. La mayoría de las boquillas presentan taponamientos o se encuentran estropeadas. También se observó presencia de algas y basura, las cuales propician el taponamiento de las boquillas.

- Persianas

Las persianas son de concreto al igual sus soportes, en algunas persianas existe la presencia de crecimiento biológico, existen algunas persianas “semi – nuevas”, en general el estado se puede considerar bueno. Una de las recomendaciones especiales es eliminar una de cada tres persianas y reparar o acabar de cambiar las dañadas.

- Ventiladores

Los ventiladores son de la marca Hudson Tuflite II con un diámetro de 8.53 m y 8 aspas. Su motor es de 460 V, 147 Amp. y 100 Hp. En general los ventiladores funcionaban adecuadamente con un nivel de vibración aceptable, y las aspas se encontraban en buen estado. Los equipos reductores y soportes de los motores presentan corrosión,. Lo mismo sucede con los motores, la carcasa de algunos motores presenta oxido por lo cual se recomienda mantenimiento correctivo.

- Chimenea o cono Venturí

Todas las chimeneas son de concreto, algunas en su estructura presentan desprendimiento de hormigón y varillas descubiertas susceptibles a la corrosión, algunos sellos y puertas de chimeneas se encuentran dañados. Se recomienda la sustitución.



A 3 Inspección física TORRE TE-3

- Estructura general

La estructura principal de la torre de enfriamiento es de concreto, las columnas y trabes de la torre se encuentran en buenas condiciones al igual que las paredes divisorias de cada celda. Las puertas divisorias de cada celda se encuentran en mal estado, ya que algunas se encuentran desmontadas y la estructura principal se encuentra oxidada. La escalera es de concreto, el barandal se encuentra en muy mal estado debido a la corrosión, también el barandal perimetral, por lo cual se recomienda cambiarlos.

- Relleno o empaque

En general el relleno de la torre se encuentra muy dañado, en algunas celdas existe relleno destruido, esto por la caída de de objetos o caída de agua en forma de cascada. Además este tipo de relleno presenta menor eficiencia comparado con otros que existen en el mercado, por lo que se recomienda cambiar el 100 %.

- Eliminadores de arrastre

Los eliminadores de rocío son del tipo Hi-V “ala de murciélago”, algunas celdas presentan daño en los eliminadores, debido a la ruptura en algunas secciones, por lo que se recomienda la sustitución de las partes dañadas.

- Bacín de agua caliente y/sistema de distribución

En algunos bacines de agua caliente se observó desbordamiento de agua, se debe principalmente a que las boquillas se encuentran en malas condiciones, obstruidas o rotas. Algunos depósitos presentan piso desnivelado, con presencia de algas y basura. Los vástagos de las válvulas de distribución se encuentran dañados.



- Persianas

Las persianas son de concreto al igual sus soportes, en algunas existe la presencia de crecimiento biológico, además de mostrar desprendimientos de concreto y varillas descubiertas las cuales son susceptibles a la corrosión. Se recomienda eliminar una de cada tres persianas con el objeto de permitir un mayor flujo de aire y reparar o cambiar las dañadas.

- Ventiladores

Los ventiladores son de la marca HUDSON TUFLITE I con un diámetro de 8.53 m y 8 aspas. Su motor es de 460 V, 147 Amp. y 100 Hp. Algunos ventiladores presentaban problemas: vibración, mal estado de las aspas y carencia de platos niveladores. Los equipos reductores o soportes de los motores presentan corrosión por lo que se recomienda contrarrestar el problema con la aplicación de algún recubrimiento anticorrosivo.

- Chimenea o cono Venturí

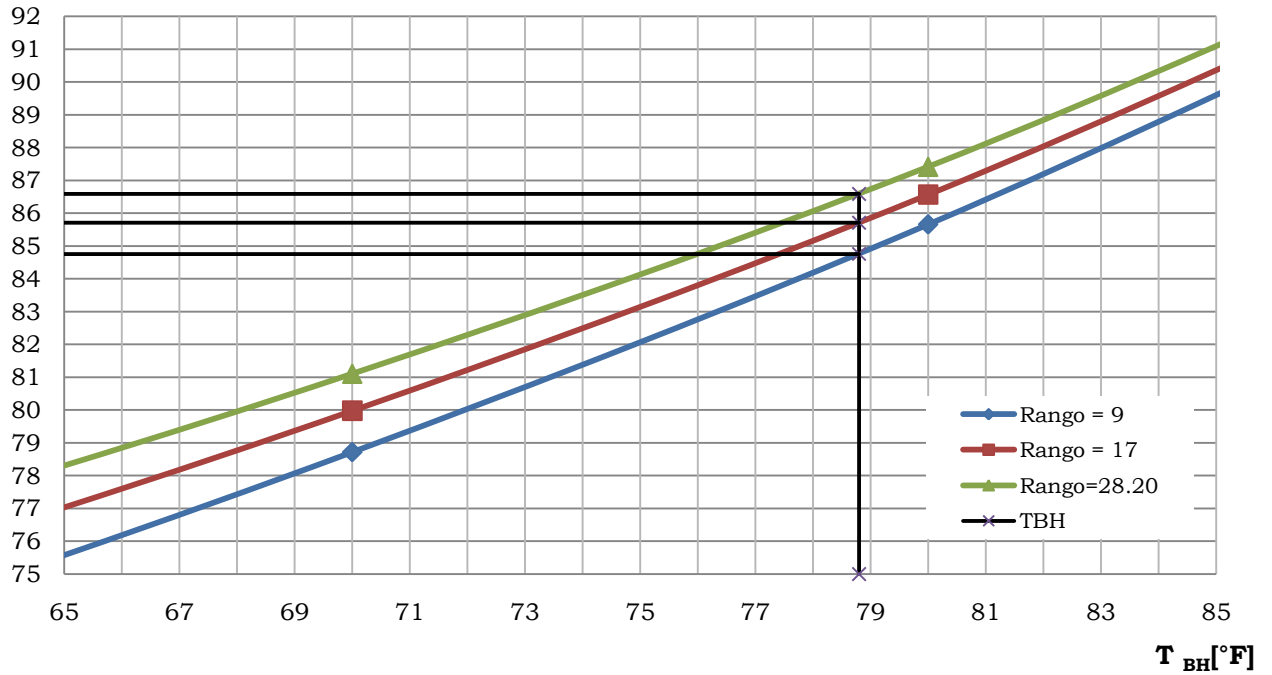
Todas las chimeneas son de concreto, algunas en su estructura presentan desprendimiento de hormigón, varillas descubiertas y oxidadas. Algunas puertas de las chimeneas no existen, por lo que se recomienda la instalación de las faltantes, para evitar cambios de presión en la zona de los conos.



A 4 Curvas de comportamiento TE-2

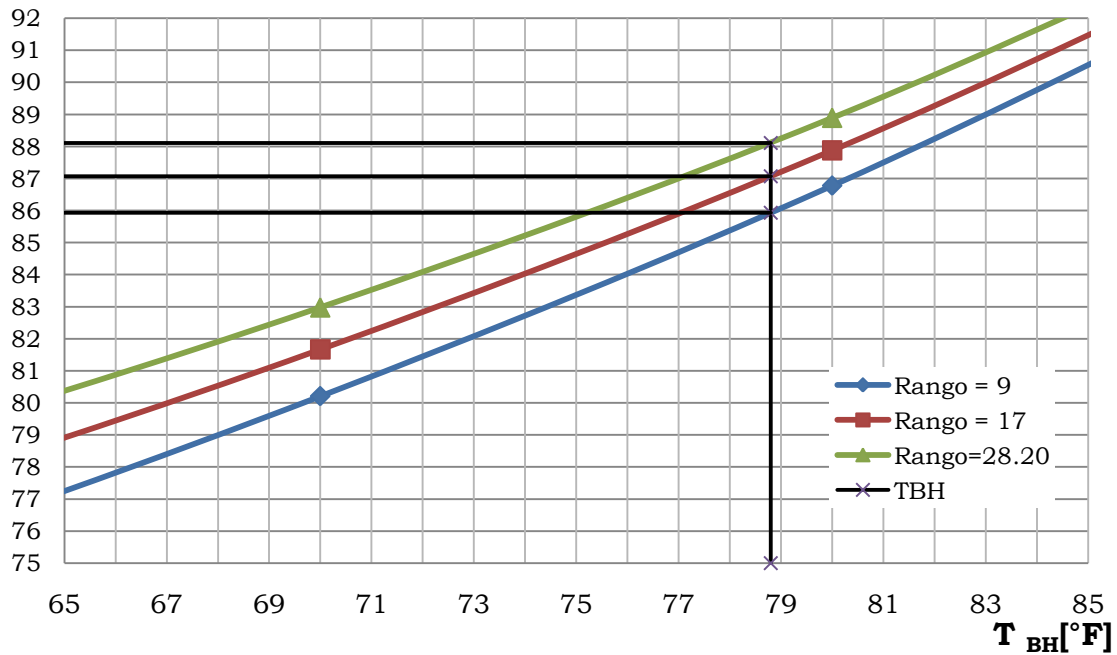
$T_{AF} [^{\circ}F]$

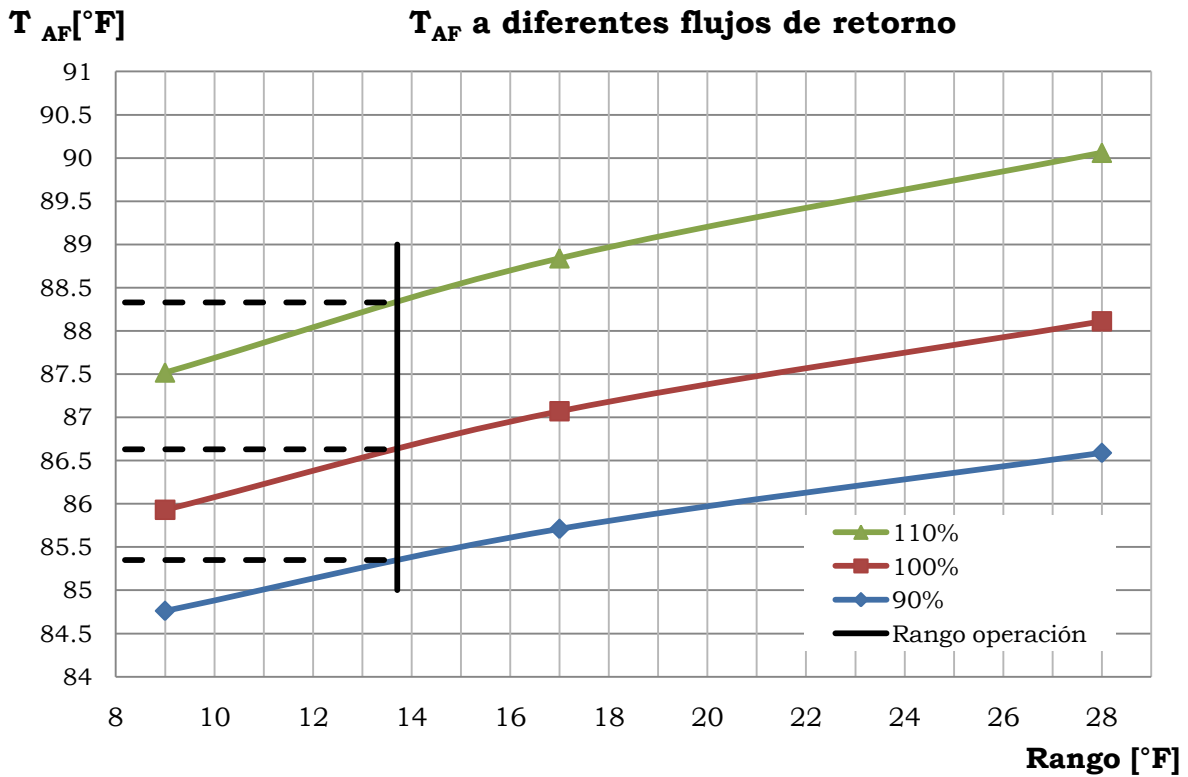
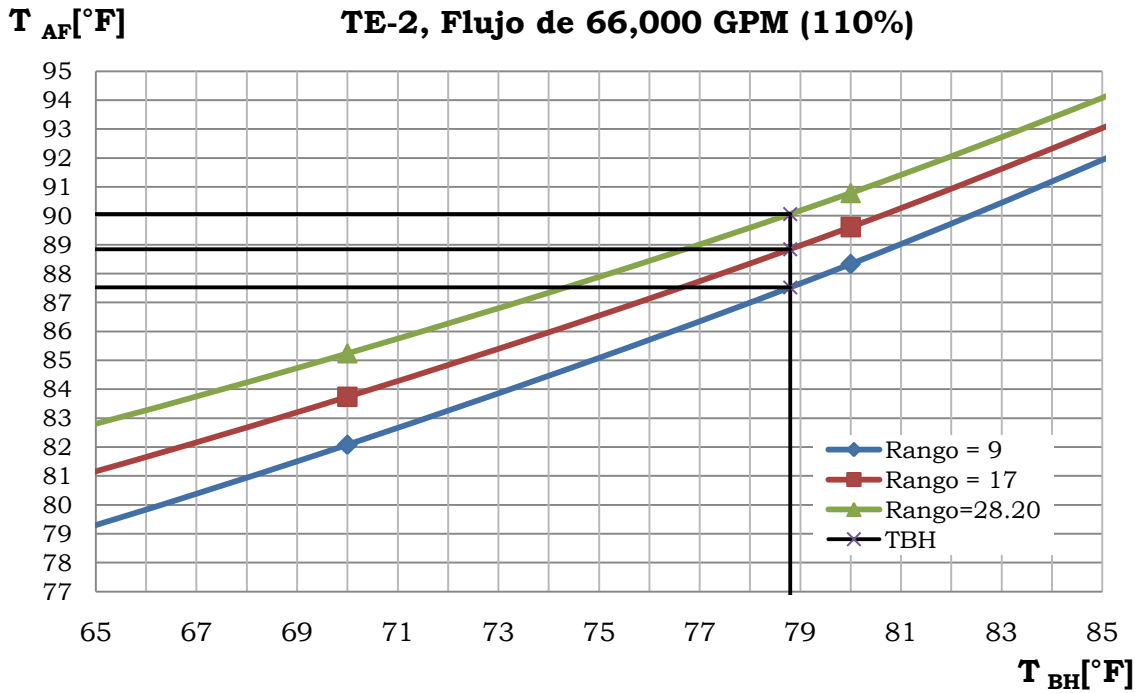
TE-2 Flujo de 54,000 GPM (90%)

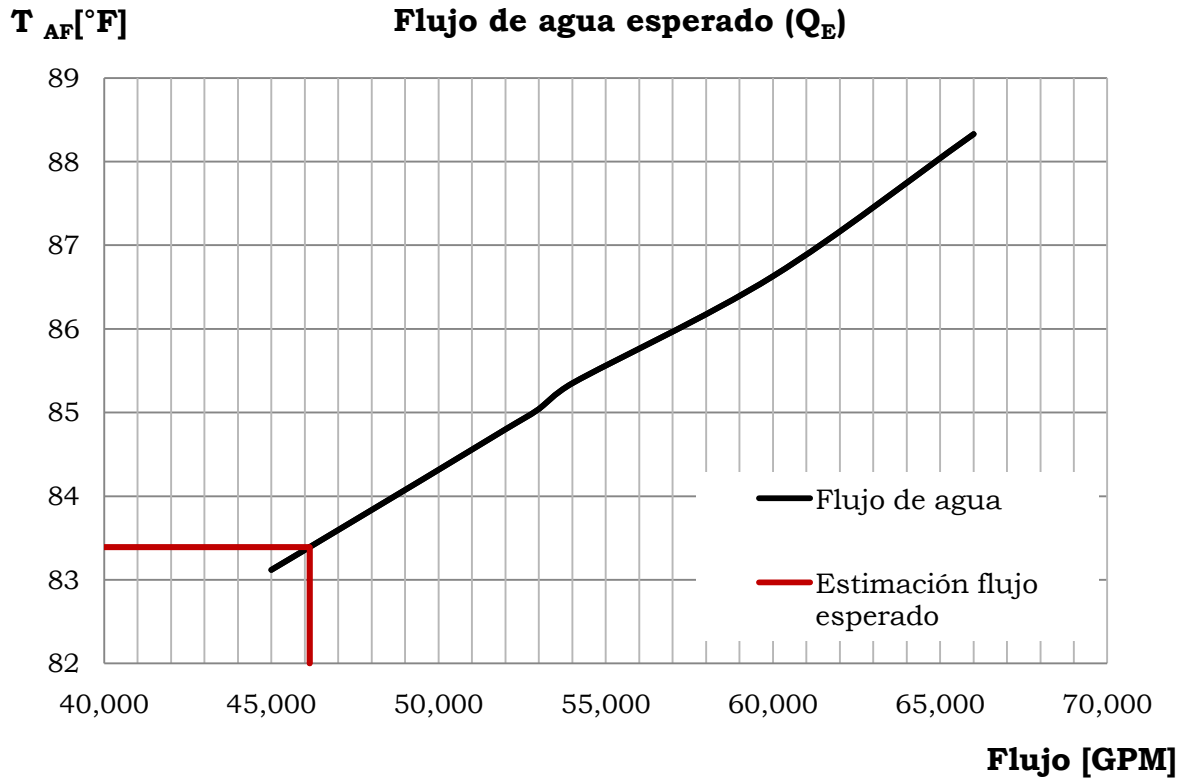


$T_{AF} [^{\circ}F]$

TE-2 Flujo de 60,000 GPM (100%)



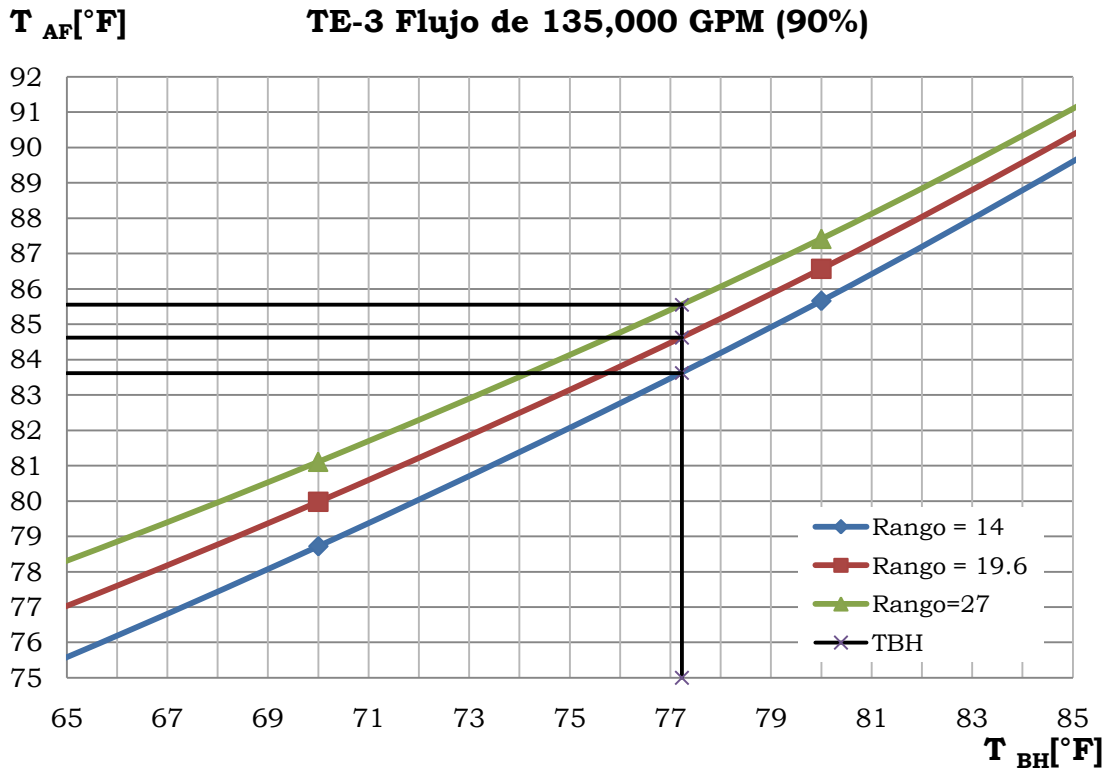


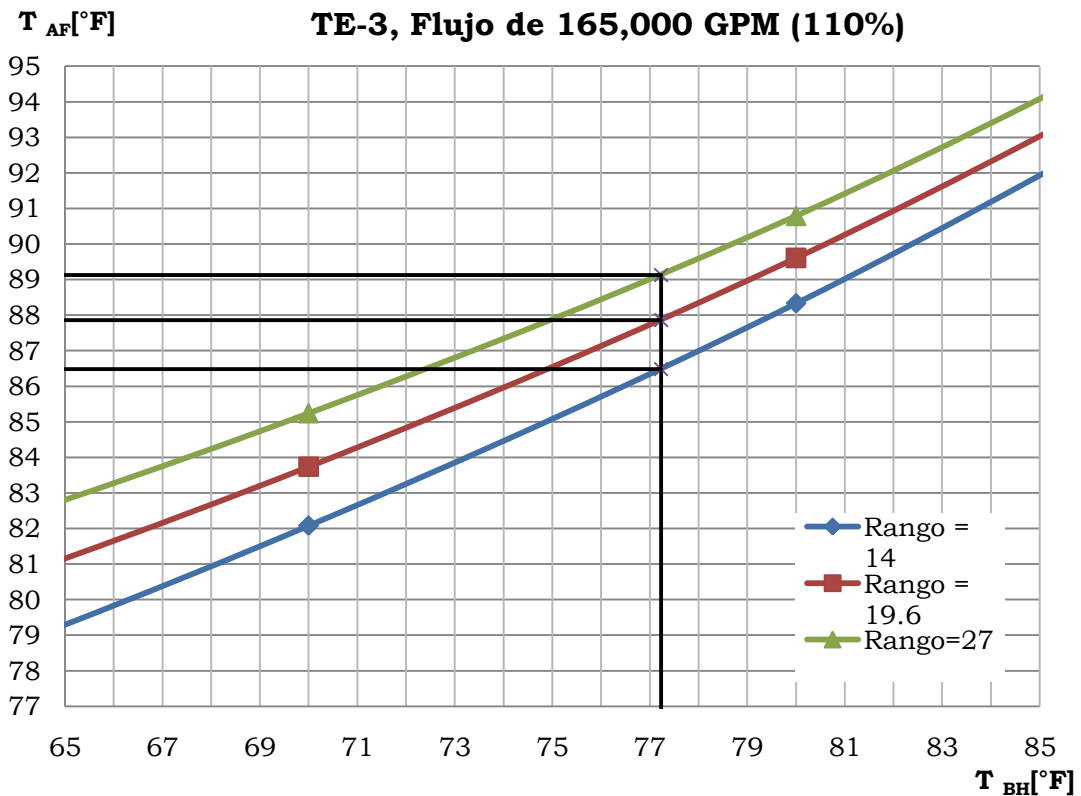
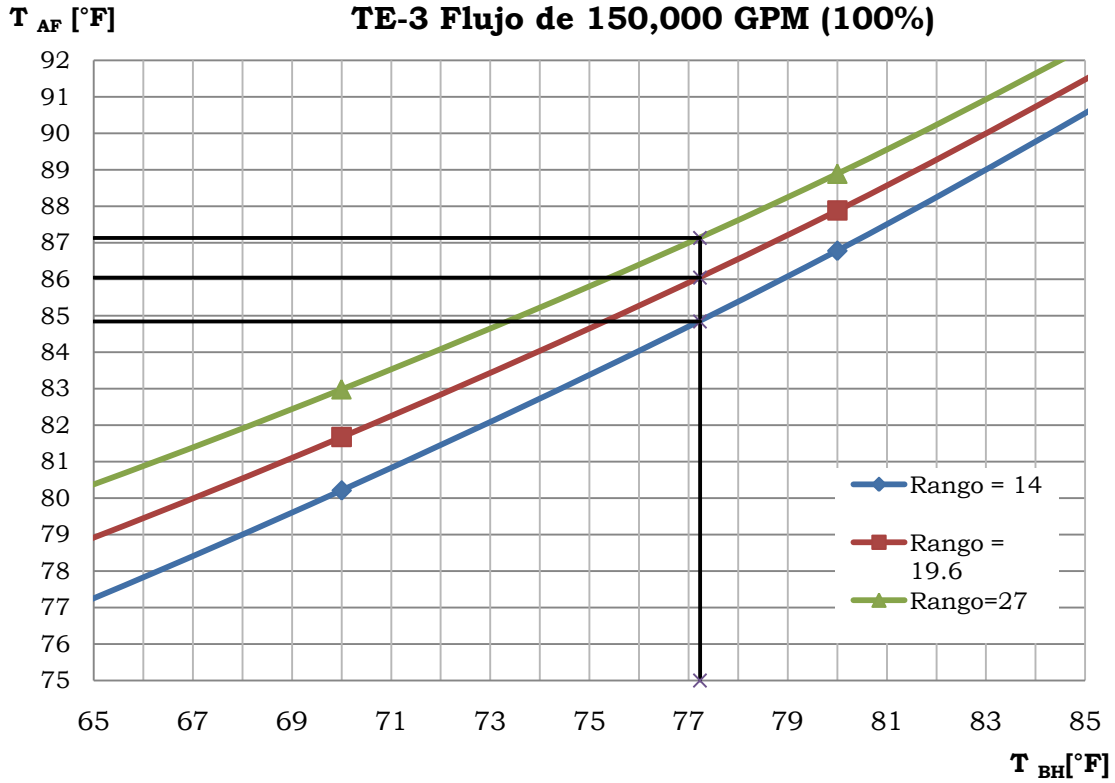


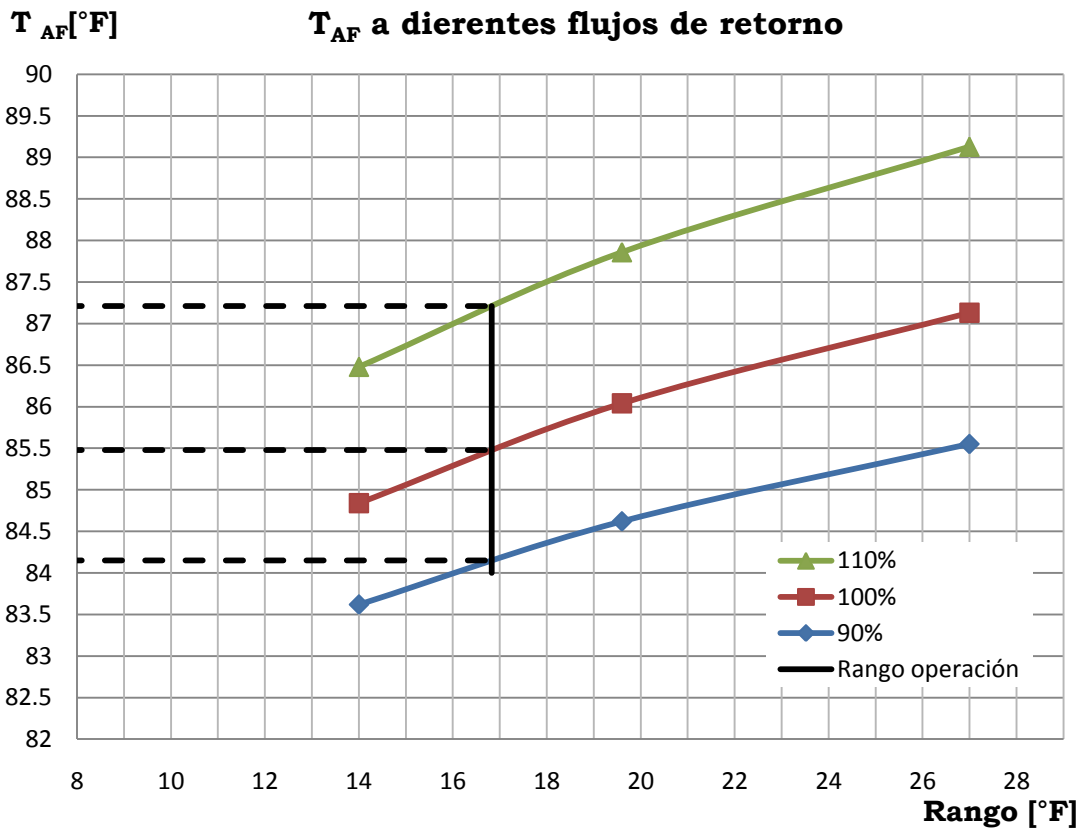
Parámetro	Flujo de agua de diseño		
	90%	100%	110%
T _{AF} [°F]	85.35	86.63	88.33
Q _E [GPM]	46,141		
Capacidad de enfriamiento [%]	64.40		

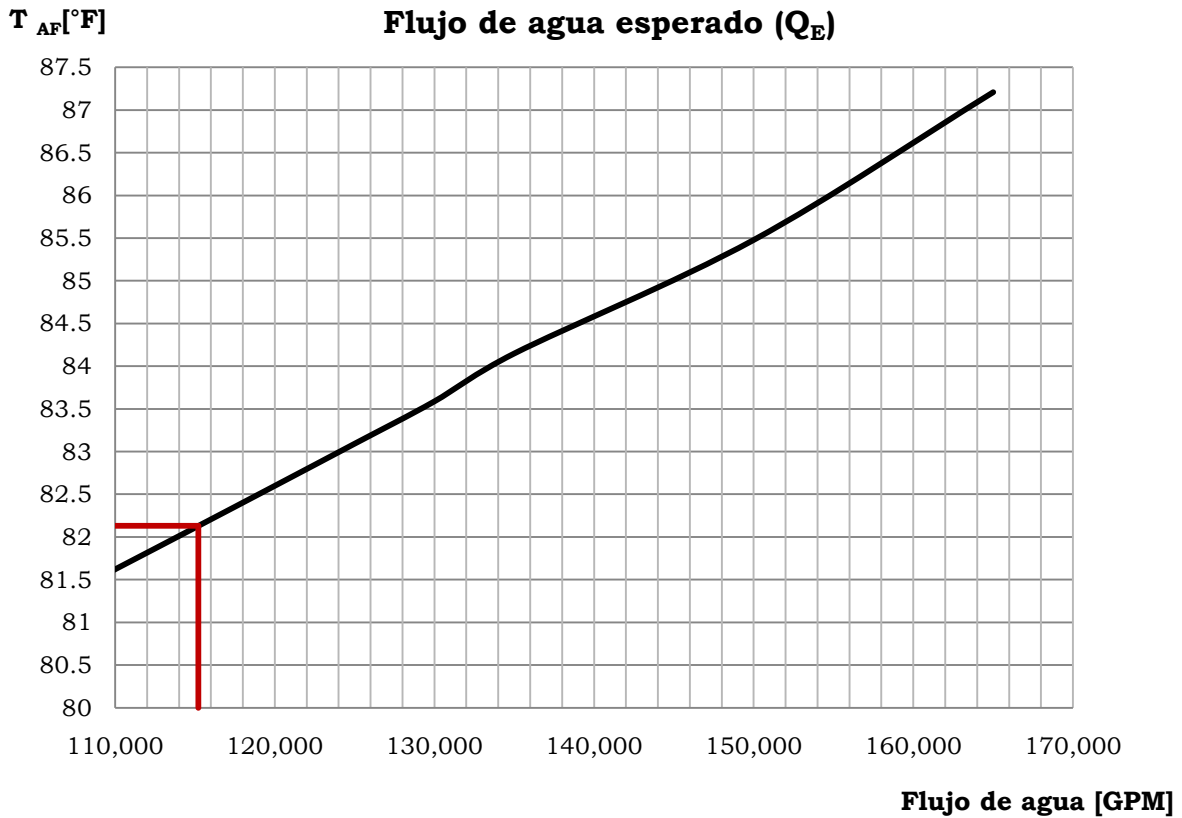


A 5 Curvas de comportamiento TE-3









Parámetro	Flujo de agua de diseño		
	90%	100%	110%
T _{AF} [°F]	84.15	85.48	87.21
Q _E [GPM]	115,208		
Capacidad de enfriamiento [%]	76.88		



A 6 Impacto de la T_{AF} sobre la capacidad de enfriamiento

La capacidad de enfriamiento actual de la torre TE-1 es 71.64%, a partir de este valor se calculó el impacto en la capacidad de enfriamiento con respecto a la disminución de temperatura de agua fría en 0.1°C.

En las tablas siguientes se muestra el incremento en la capacidad por intervalo y acumulado, el primero de ellos, denota el efecto directo de variar 0.1°C, mientras el segundo, predice el efecto neto al disminuir la temperatura en un valor mayor a 0.1°C.

TE-01

Disminución	T_{AF}		Capacidad de enfriamiento	Incremento por intervalo	Incremento acumulado
	°C	°F			
	29.14	84.46	71.64 %		
0.1	29.04	84.27	72.89 %	1.25 %	1.25 %
0.2	28.94	84.09	74.12 %	1.23 %	2.48 %
0.3	28.84	83.91	75.39 %	1.27 %	2.50 %
0.4	28.74	83.73	76.69 %	1.30 %	2.57 %
0.5	28.64	83.55	78.03 %	1.34 %	2.64 %
0.6	28.54	83.37	79.41 %	1.38 %	2.72 %
0.7	28.44	83.19	80.84 %	1.43 %	2.81 %
0.8	28.34	83.01	82.31 %	1.47 %	2.90 %
0.9	28.24	82.83	83.82 %	1.51 %	2.98 %
1.0	28.14	82.65	85.39 %	1.57 %	3.08 %
1.1	28.04	82.47	87.01 %	1.62 %	3.19 %
1.2	27.94	82.29	88.69 %	1.68 %	3.30 %
1.3	27.84	82.11	90.42 %	1.73 %	3.41 %
1.4	27.74	81.93	92.22 %	1.80 %	3.53 %
1.5	27.64	81.75	96.03 %	3.81 %	5.61 %



**Impacto de la TAF sobre la capacidad de enfriamiento
TE-02**

Disminución	T _{AF}		Capacidad de enfriamiento	Incremento por intervalo	Incremento acumulado
	°C	°F			
	28.55	83.39	64.40 %		
0.1	28.45	83.21	65.77 %	1.37 %	1.25 %
0.2	28.35	83.03	67.19 %	1.42 %	2.79 %
0.3	28.25	82.85	68.65 %	1.46 %	2.88 %
0.4	28.15	82.67	70.17 %	1.52 %	2.98 %
0.5	28.05	82.49	71.75 %	1.58 %	3.10 %
0.6	27.95	82.31	73.38 %	1.63 %	3.21 %
0.7	27.85	82.13	75.08 %	1.70 %	3.33 %
0.8	27.75	81.95	76.84 %	1.76 %	3.46 %
0.9	27.65	81.77	78.67 %	1.83 %	3.59 %
1.0	27.55	81.59	80.58 %	1.91 %	3.74 %
1.1	27.45	81.41	82.57 %	1.99 %	3.90 %
1.2	27.35	81.23	84.64 %	2.07 %	4.06 %
1.3	27.25	81.05	86.81 %	2.17 %	4.24 %
1.4	27.15	80.87	89.07 %	2.26 %	4.43 %
1.5	27.05	80.69	91.43 %	2.36 %	4.62 %



**Impacto de la TAF sobre la capacidad de enfriamiento
TE-03**

Disminución	T _{AF}		Capacidad de enfriamiento	Incremento por intervalo	Incremento acumulado
	°C	°F			
	27.85	82.13			
0.1	27.75	81.95	78.52 %	1.64 %	1.25 %
0.2	27.65	81.77	80.21 %	1.69 %	3.33 %
0.3	27.55	81.59	81.96 %	1.75 %	3.44 %
0.4	27.45	81.41	83.76 %	1.80 %	3.55 %
0.5	27.35	81.23	85.63 %	1.87 %	3.67 %
0.6	27.25	81.05	87.55 %	1.92 %	3.79 %
0.7	27.15	80.87	89.55 %	2.00 %	3.92 %
0.8	27.05	80.69	91.62 %	2.07 %	4.07 %
0.9	26.95	80.51	93.76 %	2.14 %	4.21 %
1.0	26.85	80.33	95.98 %	2.22 %	4.36 %
1.1	26.75	80.15	98.28 %	2.30 %	4.52 %
1.2	26.65	79.97	100.68 %	2.40 %	4.70 %