



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Estrategias conceptuales para el ahorro de agua  
en torres de enfriamiento de refinerías de  
petróleo.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA QUÍMICA**

**P R E S E N T A:**

**EVELIN GLORIA ORTIZ SALCEDO**



**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 Agustín Texta Mena**  
Secretario: **Prof. Carlos Galdeano Bienzobas**  
Vocal: **Prof. Alfonso Durán Moreno**  
1er. Suplente: **Prof. Jorge Alejandro Avella Martínez**  
2do. Suplente: **Enedino Varela Montellano**

Sitio donde se desarrolló el tema:

Torre de ingeniería, tercer piso ala sur. Ciudad universitaria.

Facultad de Química, UNAM.

Asesor de tema:

---

**Dr. Alfonso Durán Moreno**

Supervisor técnico:

---

**Ing. Enedino Varela Montellano**

Sustentante:

---

**Evelin Gloria Ortiz Salcedo**

## AGRADECIMIENTOS

Con un profundo cariño y agradecimiento a cada una de las personas que de alguna manera han contribuido en mi vida y que siempre estarán en mi pensamiento, palabra y corazón.

A mis hermanos Monse Y Daniel por ser mis cómplices en todo momento y apoyarme a vencer los obstáculos que nos pone a veces la vida.

Al Dr. Alfonso Durán, gracias por brindarme la oportunidad de crecer a nivel profesional y personal con coraje y ética; además por apoyarme a finalizar un ciclo importante de mi vida con tú tiempo, consejos y amistad. "Muchas Gracias Doc".

Al Ing. Enedino Varela Montellano por tú motivación y apoyo para desarrollar el presente trabajo y ser un excelente amigo.

A mis padres Bety y Marcos por su cariño y apoyo incondicional, por enseñarme que se cumplen las metas y los sueños, a través del trabajo y responsabilidad día a día. Gracias por todo.

A mi familia en especial a mi Papá Enrique, Mary, Moni y Enrique por su apoyo, cariño y comprensión en todo momento.

A mis sinodales por dedicarle tiempo y consejos para la revisión del presente trabajo.

A mis amigos del CCH, Rosario, Jonathan, Julio Vilchis, Julio, Josymar, Diego, Oscar, Emanuel, Juan, David, por seguir estando cerca de mi vida. Los quiero

A mis amigos de la Facultad de Química, Viridiana, Víctor, Carlos, Lalo, Karina, Chío, Tetzin, Fernando, Marco, Hugo, Jorge, Rodrigo, Mary, Naye, Moni, Merarí, Gibran,, Emir, Maribel y a todos los por ser unas personas inolvidables y permitirme conocerlos

A la Universidad Nacional Autónoma de México en especial a la Facultad de química por darme todo, una excelente formación académica, y grandes amigos.

A mis tres mosqueteros: Miguel, Brandon e Israel que desde lejos siguieron apoyando todas mis decisiones. Gracias por todos los momentos que compartimos.

A mis amigos y compañeros de la Torre de Ingeniería, René "Oso Rana", "El maestro" Isra, Pavel, Viridiana, Angé, Ise, JC, Javi, Lulú, David, Ara, Carlitos, Frantz, Daph, Rafa, Pakito, Erick, Abuelito, Trino, Toño Odiosa, Sam, Vic, Jair, y a todos los integrantes de este equipo por compartir sus valiosos consejos y gratas experiencias. No crean que me olvide de ustedes "Magios" Jesús, Yami, Julio, gracias por su motivación e inolvidables consejos y momentos.



---

## ÍNDICE DE CONTENIDO

GLOSARIO .....	11
CAPITULO.1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1. Problemática .....	14
1.2. Objetivo general .....	15
1.3. Objetivos particulares.....	15
CAPITULO.2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. Torre de enfriamiento .....	16
2.2. Balance de materia y energía .....	29
2.3. Principios básicos de los tratamientos de agua .....	41
2.4. Proceso de toma de decisiones .....	47
CAPITULO.3. METODOLOGÍA.....	51
3.1. Caso de estudio .....	51
CAPITULO.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
4.1. Planteamiento de opciones de tratamiento .....	58
4.2. Evaluación técnica de las tecnologías .....	71
4.3. Evaluación económica .....	100
CAPITULO.5. CONCLUSIONES.....	108
BIBLIOGRAFÍA .....	110
ANEXOS .....	112
Anexo 1.Límites de calidad para el agua de purga en torres de enfriamiento.....	112
Anexo 2. Cálculo de las variables económicas para el horizonte de evaluación, de los flujos propuestos para la optimización del flujo. ....	114



---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación de las torres de enfriamiento .....	17
Tabla 2.	Componentes de una torre de enfriamiento .....	21
Tabla 3.	Ecuaciones de las variables de una torre de enfriamiento .....	34
Tabla 4.	Ahorro en agua de repuesto .....	40
Tabla 5.	Resultados del análisis estadístico en la torre .....	52
Tabla 6.	Valores de parámetros de calidad del agua de repuesto .....	58
Tabla 7.	Variables para el balance de materia en el tratamiento de agua de repuesto.....	60
Tabla 8.	Ahorro en agua de repuesto a 6.2 ciclos de concentración.....	62
Tabla 9.	Variables para el balance de materia en el tratamiento en el agua de purgas .....	64
Tabla 10.	Ahorro en agua de repuesto a 3 ciclos de concentración .....	66
Tabla 11.	Comparación de resultados obtenidos para las opciones de tratamiento en el agua de enfriamiento .....	67
Tabla 12.	Comparación de resultados del ahorro de agua.....	70
Tabla 13.	Tecnólogos de los procesos de tratamiento .....	71
Tabla 14.	Valores de calidad del agua tratada. Precipitación química .....	74
Tabla 15.	Eficiencia de remoción de los principales contaminantes. Precipitación química.....	74
Tabla 16.	Espacio estimado requerido para el sistema de acuerdo a la capacidad de tratamiento.....	75
Tabla 17.	Requerimiento de insumos para la operación. Tratamiento por precipitación química.....	76



---

Tabla 18.	Costos estimados para el tratamiento por precipitación química.....	77
Tabla 19.	Eficiencia de remoción de los principales contaminantes para el tratamiento por electrocoagulación con ozonación.....	80
Tabla 20.	Calidad máxima del agua tratada del tratamiento por electrocoagulación con ozonación.....	80
Tabla 21.	Condiciones de operación para el tratamiento por electrocoagulación con ozonación .....	81
Tabla 22.	Espacio estimado requerido para el sistema de acuerdo a la capacidad de tratamiento, para la Empresa 2 .....	82
Tabla 23.	Costos de venta del sistema de acuerdo a la capacidad de tratamiento..	84
Tabla 24.	Eficiencia de remoción de los principales contaminantes. Separación física por filtración con membranas .....	86
Tabla 25.	Tiempo estimado de reemplazo de accesorios. Separación física por filtración con membranas .....	87
Tabla 26.	Insumos requeridos para la operación. Separación física por filtración con membranas.....	88
Tabla 27.	Costos por consumo de productos químicos para el proceso. Separación física por filtración con membranas .....	89
Tabla 28.	Costos por consumo de productos químicos para el tratamiento de la corriente de rechazo de las membranas .....	90
Tabla 29.	Costos por consumo de energía. Separación física por filtración con membranas.....	90
Tabla 30.	Costos por mano de obra. Separación física por filtración con membranas.....	91
Tabla 31.	Costos estimados para el tratamiento .....	91

---



---

Tabla 32.	Características principales de las tecnologías para el tratamiento de agua de torres de enfriamiento de una refinería.....	93
Tabla 33.	Escala de calificación de premisas.....	94
Tabla 34.	Resultados de la evaluación tecnológica para el tratamiento de purgas de torres de enfriamiento.....	95
Tabla 35.	Selección de la tecnológica para tratamiento de purgas de torres de enfriamiento.....	95
Tabla 36.	Características principales ventajas y desventajas de las tecnologías para el tratamiento de purgas de torres de enfriamiento .....	97
Tabla 37.	Estructura de costos fijos del tratamiento del agua de purga con la separación física con filtración con membranas .....	100
Tabla 38.	Estructura de costos variables del tratamiento del agua de purga con la separación física con filtración con membranas .....	101
Tabla 39.	Consideraciones porcentuales de parámetros económicos .....	102
Tabla 40.	Costo de las fuentes de ahorro.....	102
Tabla 41.	Costos para el tratamiento en la purga de la torre de enfriamiento mediante la separación física por filtración con membranas .....	103
Tabla 42.	Ahorros para el tratamiento en la purga de la torre de enfriamiento mediante la separación física por filtración con membranas .....	104
Tabla 43.	Cálculo de VPN, TIR y PRI para el tratamiento en la purga de la torre de enfriamiento mediante la separación física por filtración con membranas.....	105
Tabla 44.	Cálculo de VPN, TIR y PRI para diferentes flujos con el tratamiento en la purga de la torre de enfriamiento mediante la separación física por filtración con membranas .....	106
Tabla 45.	Límites de calidad recomendados para agua de enfriamiento .....	112

---



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1	Torre de tiro inducido en contracorriente.....	19
Figura. 2	Torre de flujo cruzado.....	20
Figura. 4	Sistema de una torre de enfriamiento.....	31
Figura. 5	Sistema de la torre de enfriamiento para el balance de energía. ....	35
Figura. 6	Diagrama entalpia respecto a la temperatura del agua (González, 2006). ....	38
Figura. 7	Requerimientos de agua de repuesto vs. ciclos de concentración. (C-TOWER,2000). ....	39
Figura. 8	Torre de enfriamiento multicelda de tiro inducido y flujo cruzado. ....	51
Figura. 9	Torre de enfriamiento del caso de estudio: tiro inducido a contraflujo.....	52
Figura. 10	Esquema del balance de agua actual de la torre de enfriamiento.....	53
Figura. 11	Ciclos de concentración reportados por la refinería. ....	54
Figura. 12	Diagrama de flujo de la metodología de trabajo. ....	57
Figura. 13	Esquema de la opción de tratamiento en el agua de repuesto de la torre de enfriamiento. ....	60
Figura. 14	Ahorro en agua de repuesto con 6.2 ciclos de concentración para la primera opción.....	62
Figura. 15	Esquema de la opción del tratamiento del agua de purga en la torre de enfriamiento.....	63
Figura. 16	Ahorro en agua de repuesto con 3 ciclos de concentración para la segunda opción. ....	66
Figura. 17	Ahorro en agua de repuesto para las dos opciones de tratamiento en el agua de enfriamiento.....	68



---

Figura. 18	Diagrama de la distribución suministrada como agua de repuesto en la torre de enfriamiento. ....	69
Figura. 19	Esquema del proceso de tratamiento mediante precipitación química.....	73
Figura. 20	Esquema del proceso del tratamiento de purgas mediante la electrocoagulación con ozonación.....	79
Figura. 21	Esquema del sistema de tratamiento de purgas mediante separación física por filtración con membranas. ....	85
Figura. 22	Gráfica de la optimización del flujo de operación. ....	107



---

## GLOSARIO

- ⊕ Angstrom (Å): Unidad de longitud empleada para expresar longitudes de onda, distancia molecular y atómica. Su equivalencia es  $1 \text{ Å} = 1 \text{ m} \times 10^{-10} = 0.1 \text{ nm}$ .
- ⊕ Aproximación de temperaturas: Es la diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura del bulbo húmedo.
- ⊕ Arrastre en una torre de enfriamiento (D): Pérdidas de agua en forma de vapor que corresponde aproximadamente entre un 0.05% a 0.2% del flujo de recirculación.
- ⊕ Calor latente: Calor asociado al cambio de estado de un material sin modificar su temperatura.
- ⊕ Calor sensible: Energía calorífica que es aplicada a una sustancia para incrementar su temperatura.
- ⊕ Ciclos de concentración en una torre de enfriamiento (CC.). La relación entre la calidad de agua de recirculación y la calidad de agua de repuesto se puede expresar como una relación de concentración
- ⊕ Corrosión: Deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Se origina cuando existe un diferencial de potencial entre dos puntos y se establece una corriente de electrones.
- ⊕ Evaporación en una torre de enfriamiento (E): Mecanismo de enfriamiento principal de una torre, el calor perdido por evaporación (aproximadamente 1,000 BTU por libra de agua) baja la temperatura del agua restante.
- ⊕ Incrustación: Proceso químico que se origina cuando la concentración de las sales disueltas en el agua de enfriamiento de recirculación excede los límites de solubilidad y precipitan en forma de las superficies en contacto con el agua.



- 
- ⊕ Intervalo de temperaturas: Es la diferencia entre la temperatura del agua caliente y del agua fría.
  - ⊕ Purga en una torre de enfriamiento (B): Término para el agua que es extraída de la recirculación del agua de enfriamiento para reducir contaminantes en el agua de la torre. Con la purga y la adición de agua de repuesto el nivel de los sólidos disueltos puede mantenerse para reducir la acumulación mineral y otros contaminantes en la torre.
  - ⊕ Recirculación en una torre de enfriamiento. Término para definir el agua que cumple el ciclo continuo, en el cual el agua absorbe calor en el equipo de intercambio y posteriormente regresa a la torre a enfriarse.
  - ⊕ Temperatura de agua caliente: Temperatura del agua de recirculación al entrar a la torre de enfriamiento.
  - ⊕ Temperatura de agua fría: Temperatura del agua de recirculación al salir de la torre.
  - ⊕ Temperatura de bulbo húmedo: La temperatura de bulbo húmedo de una mezcla de aire-agua proporciona una medida de la humedad de la mezcla; entre menos sea la humedad mayor será la diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo con respecto al seco. Teóricamente, una torre de enfriamiento enfría el agua a la temperatura de bulbo húmedo (temperatura mínima a la cual el agua puede enfriarse)
  - ⊕ Torre de enfriamiento: Es un equipo de disipación de calor, que remueve el calor de una corriente de agua por medio de enfriamiento por el aire retirado hacia la atmósfera.



---

## Capítulo.1. INTRODUCCIÓN

Las torres de enfriamiento del Sistema Nacional de Refinación (SNR) son equipos que se encargan de enfriar el agua que circula en los intercambiadores de calor instalados en las plantas de proceso, por medio de la disipación de calor entre el agua caliente y el aire seco.

El consumo elevado de agua de enfriamiento en el SNR representa un problema que tiene repercusiones ambientales y económicas debido a que el agua cruda es un recurso no renovable y su sobre explotación ocasiona una escasez gradual en regiones del país en donde esto no era un problema hace años. El agua circulante se obtiene de pozos, presas, ríos aledaños (agua cruda) o de plantas de tratamiento de agua.

La operatividad de la torre de enfriamiento está sujeta al requerimiento de las plantas usuarias. Adicional a que se cumplan las condiciones de operación establecidas por el fabricante.

El problema existente para el abastecimiento del agua de repuesto (agua cruda o agua pretratada) a las torres de enfriamiento para la producción del agua de enfriamiento, es bajar el contenido de sales en el agua de repuesto o tratar las purgas; para lo cual existen diversos tratamientos químicos, físicos y fisicoquímicos para el tratamiento de estas aguas.

En este trabajo se realizó una evaluación técnica a las tecnologías más actuales para el tratamiento del agua de repuesto o el agua de purgas de las torres de enfriamiento, así como una evaluación económica para dictaminar la mejor opción de optimización.



---

## 1.1. Problemática

En el SNR se presentan problemas de operación en sus torres de enfriamiento que en mayor medida se reflejan en una baja eficiencia térmica, aunado a esto, sus redes de distribución de agua generalmente no cumplen con el requerimiento de las variables de proceso como la presión y flujo debido a un conjunto de situaciones que se pueden presentar de forma independiente o como una combinación de éstas:

- a) Tiempo de operación superior a la vida útil del equipo.
- b) Filosofía de operación incorrecta.
- c) Término de la vida útil de los equipos o accesorios.
- d) Mantenimiento inadecuado.

En las últimas décadas, tanto a nivel nacional como internacional, se observa, una creciente preocupación por la protección del ambiente, lo que ha repercutido a nivel industrial en la generación de nuevas técnicas de tratamiento y reducción de desechos así como de ahorro de agua y energía. En lo que se refiere al ahorro de agua, en la industria actualmente se busca reducir el consumo de este líquido incrementando el reciclaje y reúso del mismo reduciendo la descarga de aguas residuales. En el caso de las purgas de torres de enfriamiento, para favorecer el ahorro de agua, entre diversas opciones, se utilizan procesos fisicoquímicos avanzados para el reciclaje de las purgas.

En los procesos industriales el agua cruda suministrada se emplea alrededor del 56% de agua en sistemas de enfriamiento, un 19% en procesos de producción un 16% en calderas y el restante en los servicios auxiliares. Debido a la alta demanda de agua de enfriamiento se pretende seleccionar con el tratamiento el agua de repuesto o reutilizar el agua de purgas en las torres de enfriamiento de la industria, las cuales tienen o presentan altas concentraciones de sólidos disueltos totales, principalmente sílice, sólidos suspendidos, dureza, así como, microorganismos y otros contaminantes presentes en las mismas. Mediante la remoción de éstos se obtiene un agua que cumple



---

con parámetros de calidad dentro de especificación para su reúso como agua de repuesto en las torres de enfriamiento.

## **1.2. Objetivo general**

Seleccionar la opción más factible técnico-económica para el tratamiento ya sea del agua de repuesto o de purgas de torres de enfriamiento en refinerías que permitan disminuir la concentración de sólidos disueltos totales, en especial el sílice, a valores límites permisibles para aumentar los ciclos de concentración y su posible reúso en otras aplicaciones que no requieran agua de primer uso, proponiendo alternativas tecnológicas a nivel conceptual del sistema más adecuado.

## **1.3. Objetivos particulares**

- Revisar los fundamentos de los tratamientos fisicoquímicos y electroquímicos que se emplean para la eliminación de contaminantes presentes en el agua utilizada y/o desechada en las torres de enfriamiento.
- Proponer opciones tecnológicas para el tratamiento del agua de repuesto o agua de purgas de las torres de enfriamiento con base en la información bibliográfica obtenida y en la información proporcionada por tecnólogos nacionales e internacionales.
- Realizar el análisis económico de la mejor opción de tratamiento con la tecnología seleccionada.



---

## Capítulo.2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Torre de enfriamiento

El *Cooling Technology Institute (CTI)* especifica que una torre de enfriamiento es un equipo de disipación de calor, que remueve el calor de una corriente de agua por medio de enfriamiento por el aire retirado hacia la atmósfera (CTI,2009).

La disipación de calor del proceso de enfriamiento es regulada mediante la evaporación, la cual sucede cuando al entrar en contacto el aire con el agua, se forma una fina película de aire húmedo saturado sobre la lámina de agua que desciende por el relleno, esto es, debido a que la presión parcial de vapor de agua en la película de aire es superior a la del aire húmedo que circula por la torre, produciéndose una cesión de vapor de agua (evaporación), esta masa de agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del propio líquido, para cederlo al aire obteniéndose el aumento de la temperatura y humedad de éste y el enfriamiento del agua, para suministrarla a las plantas de proceso.

En una torre de enfriamiento se puede alcanzar alrededor de un 90% de enfriamiento por el proceso ya mencionado. La diferencia de temperaturas del agua a la salida y la temperatura húmeda del aire se conoce como “acercamiento” o “aproximación”, este dato es de gran importancia en el diseño de torres de enfriamiento ya que representa el límite termodinámico al que puede llegar el agua en el proceso de enfriamiento.

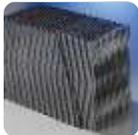
Para el diseño de una torre de enfriamiento el objetivo principal es que la gota de agua esté el mayor tiempo posible en contacto con el aire, esto se logra en gran parte por la altura de la torre además de la colocación de obstáculos como es el relleno o empaque de la torre, el cual detiene y al mismo tiempo fragmenta la gota de agua, obteniendo mayor área de contacto facilitando así el proceso de evaporación y mejorando entonces la capacidad de enfriamiento.



### 2.1.1. Clasificación de torres de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento se pueden clasificar dependiendo del tipo de operación, el flujo de aire que se mueve a través éstas, el tipo de empaque y el tipo de enfriamiento. Pero al momento de diseñarlas es con respecto a su aplicación de enfriamiento, ya que muchos tipos de torres presentan ventajas como limitaciones en el sistema a tratar. (SPX *Cooling Technologies*, 2010). La Tabla 1 muestra una forma usual de clasificar las torres de enfriamiento.

**Tabla 1.** Clasificación de las torres de enfriamiento

PRINCIPIO	TIPO	CLASIFICACIÓN	CARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES	IMAGEN
Torre de enfriamiento	Operación	Atmosféricas	Estanque de rocío	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flujo cruzado</li> <li>Contraflujo</li> </ul>	
			Hiperbólicas de tiro natural		
		Mecánico	Ventilador	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiro forzado</li> <li>Tiro inducido</li> </ul>	
	Flujo de aire	Flujo cruzado	Sencillo	Perpendicular	
			Doble	Paralelo	
		Contra flujo	Sencillo	Perpendicular	
			Doble	Paralelo	
	Características de empaque	Sin relleno			
		Con relleno	Salpiqueo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perpendicular al flujo de aire</li> <li>Paralelo al flujo de aire</li> </ul>	
			De película	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perpendicular al flujo de aire</li> <li>Paralelo al flujo de aire</li> </ul>	



PRINCIPIO	TIPO	CLASIFICACIÓN	CARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES	IMAGEN
Torre de enfriamiento	Enfriamiento	Evaporativas			
		Secas	Aire de circulación está libre de humedad		
		Húmedo secas			
	Forma	Rectangulares	Mecánica	▪ Tiro forzado ▪ Tiro inducido	
		Redondas	Mecánicas	▪ Tiro forzado ▪ Tiro inducido	
		Hiperbólicas	Atmosféricas		
		Octagonales			
	Estructura	Madera	Mecánica	▪ Tiro forzado ▪ Tiro inducido	
		Concreto	Mecánica	▪ Tiro forzado ▪ Tiro inducido	
		Fibra de vidrio	Mecánica	▪ Tiro forzado ▪ Tiro inducido	

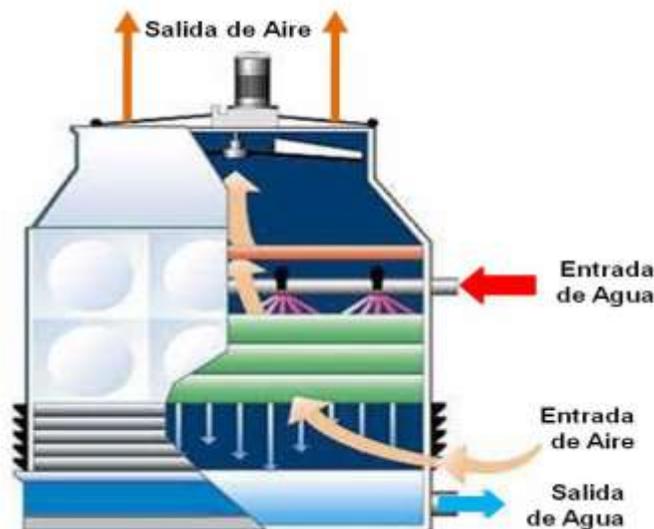
A continuación se describen más a detalle las principales torres de enfriamiento utilizadas en las refinerías que son las de tiro inducido en contracorriente y las de tiro inducido a flujo cruzado.



### ➤ **Torres de tiro inducido en contracorriente**

El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del relleno de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto (KATE, 2005).

En este tipo de torres el aire puede entrar en una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire. La elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. En la Figura. 1 se presenta un diagrama de una torre a contracorriente.



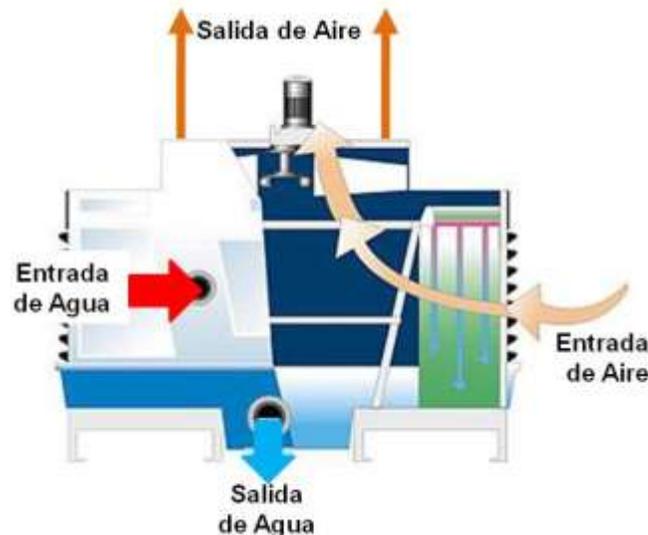
**Figura. 1** Torre de tiro inducido en contracorriente.

### ➤ **Torres de tiro inducido a flujo cruzado**

En las torres de enfriamiento de tiro inducido a flujo cruzado, el aire circula en dirección perpendicular respecto al agua que desciende (Figura. 2). Estas torres tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la de relleno. (HENSLEY, 2008). El mantenimiento de este tipo de torre es menos complicado que en el caso de las torres a contracorriente, debido a la



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



**Figura. 2** Torre de flujo cruzado.

### **2.1.2. Torres de enfriamiento comunes en el sistema nacional de refinación**

Debido al importante requerimiento de flujo de agua de enfriamiento, las torres de enfriamiento utilizadas en refinerías son de las más grandes que se pueden encontrar en la industria. En el SNR existen cincuenta y seis torres de enfriamiento, una de las características principales que tiene este sistema es el flujo de recirculación de 10,000 GPM por celda, otra característica importante es que son generalmente torres de tiro mecánico inducido. Se denominan así porque utilizan uno o múltiples ventiladores para proporcionar un flujo de un volumen conocido de aire que pasa a través de la torre, e inducido porque el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire.



### 2.1.3. Principales componentes de una torre de enfriamiento.

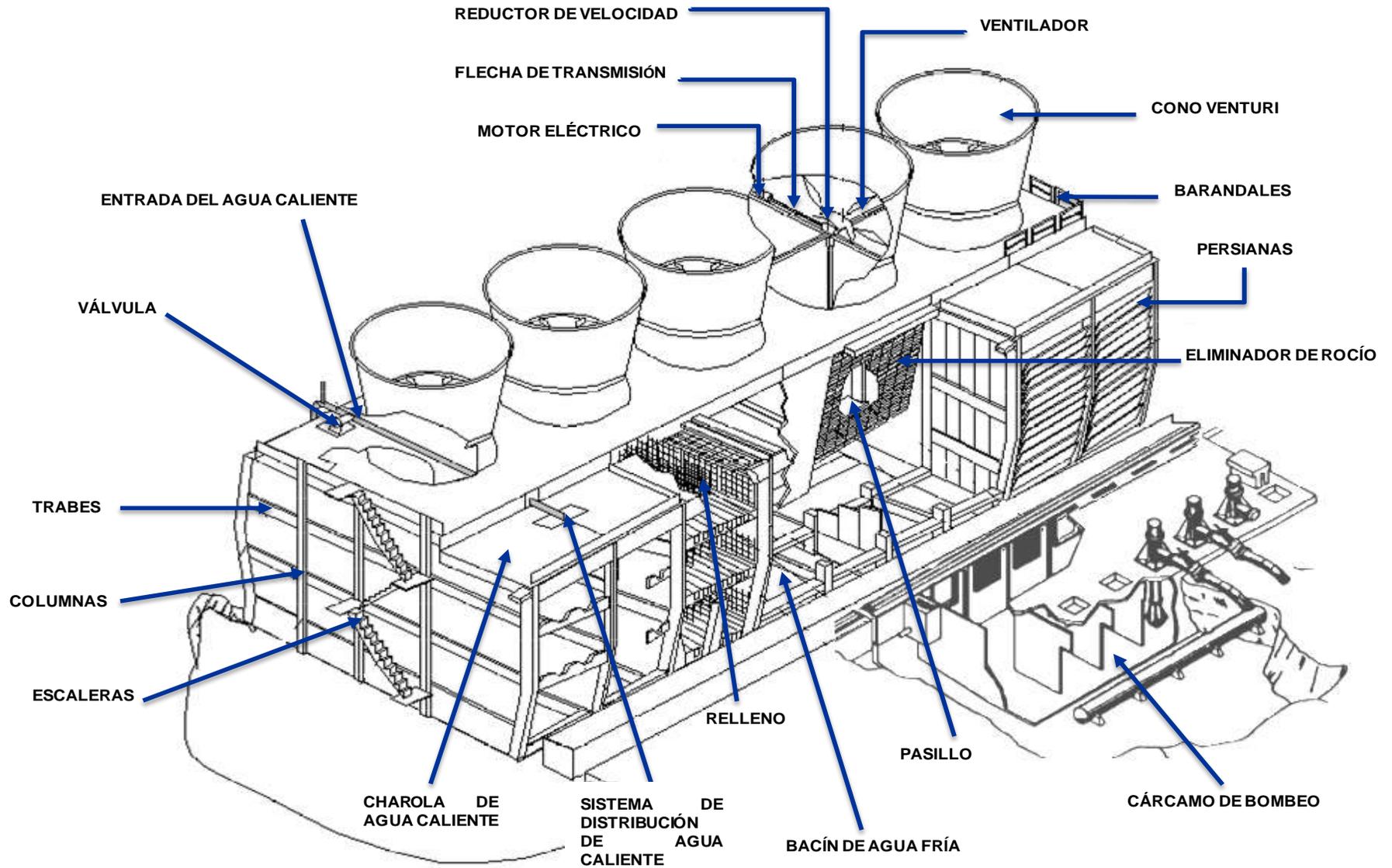
Para realizar un diagnóstico del estado y funcionamiento de una torre de enfriamiento es necesario conocer sus componentes principales, los cuales se dividen en tres grupos: estructurales, mecánicos y eléctricos.

Los componentes principales se muestran en el diagrama de la Tabla 2 (MARLEY, 2009).

**Tabla 2.** Componentes de una torre de enfriamiento

EQUIPO	COMPONENTE
Mecánico	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Motor eléctrico</li><li>▪ Turbina</li><li>▪ Flecha de transmisión</li><li>▪ Reductor de velocidad</li><li>▪ Ventilador</li><li>▪ Bombas</li></ul>
Estructural	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Columnas</li><li>▪ Trabes</li><li>▪ Bacín de agua fría</li><li>▪ Persianas</li><li>▪ Relleno o empaque</li><li>▪ Eliminadores de rocío</li><li>▪ Chimenea o cono venturi</li><li>▪ Charola de agua caliente</li><li>▪ Sistema de distribución de agua</li><li>▪ Escaleras</li></ul>

Los principales componentes de una torre de enfriamiento de tiro inducido a contracorriente son los que se describen y se muestran en la Figura. 3.



**Figura. 3** Principales componentes de una torre de enfriamiento de tiro inducido a contracorriente.



---

#### **2.1.4. Variables de calidad de agua en una torre de enfriamiento**

La calidad del agua que se utiliza en las torres de enfriamiento es un factor importante para lograr una operación adecuada de estos equipos; asimismo, manejar una buena calidad de agua de enfriamiento impacta directamente en un ahorro de la misma.

Los principales parámetros y variables que se deben de controlar respecto a la calidad de agua de repuesto y el agua de recirculación en la torre de enfriamiento son los que se describen a continuación:

a) Temperatura.

Se define como el grado que indica qué tan frío o qué tan caliente se encuentra un cuerpo o una propiedad de la materia que indica el nivel de calor de dicha materia.

b) Concentración.

Se puede definir en una disolución como la proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolvente. La concentración se puede reportar en: por ciento en peso, por ciento en volumen, por ciento en partes por millón.

c) pH (Potencial de Hidrógeno)

La definición de pH es el logaritmo negativo del recíproco de la concentración de los iones hidrógeno. Es también un número entre 0 y 14 indicando el grado de acidez o alcalinidad de un fluido.

El punto medio de la escala de pH es 7.0 y una solución con este pH es neutra. Los números debajo de 7.0 denotan Acidez y arriba de este denotan Alcalinidad. Como el pH es una función logarítmica las soluciones que tienen un pH de 6, 5, 4, son 10, 100, 1000, veces más ácidas que la de pH igual a 7.0.



d) Alcalinidad.

Esta determinación analítica expresa el contenido de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos en el agua. No necesariamente es siempre así, porque hay otras sustancias que pueden ser alcalinas pero se ha convenido que sólo exprese el contenido de los aniones mencionados al principio. Para los fines prácticos del acondicionamiento de aguas industriales el anterior acuerdo ha funcionado.

e) Conductividad.

La conductividad o conductancia específica expresa la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica. Exactamente definida es el recíproco de la resistencia en ohms de un cubo de agua de 1 cm a una temperatura dada.

La unidad de la conductividad es el recíproco del ohm o sea el mho por centímetro. Como la conductividad del agua es muy pequeña la unidad usada es el micromho por centímetro (es el millonésimo de un mho por centímetro).

f) Dureza.

La dureza de calcio expresa el contenido de los iones calcio en el agua y tiene los mismos objetivos que la dureza total. La dureza del magnesio expresa el contenido de los iones magnesio y se deduce restando a la dureza total la dureza al calcio. Tanto la dureza total, como la dureza al calcio y al magnesio se reportan en ppm como  $\text{CaCO}_3$ .

g) Sílice.

Esta prueba expresa el contenido de compuestos de silicio disueltos en el agua (Silicatos, ácido sílico) y se reportan en ppm como  $\text{SiO}_2$ .

Como el Silicio es un elemento muy abundante en la naturaleza casi todas las aguas naturales contienen compuestos de este elemento.



---

h) Turbidez.

La Turbidez es una prueba que expresa una reducción de la transparencia del agua debido a la presencia de partículas en suspensión.

i) Sólidos suspendidos

Son partículas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en el agua en suspensión, debido a su naturaleza coloidal que viene dada por las pequeñas cargas eléctricas que poseen estas partículas que las hacen tener una cierta afinidad por las moléculas de agua.

j) Sólidos Disueltos Totales:

Es la cantidad total de iones de sales minerales disueltas en el agua. Están relacionados con la conductividad eléctrica del agua ya que un aumento de estos iones aumenta la capacidad conductiva.

En las torres de enfriamiento la concentración de sólidos disueltos es la que produce la fuerza iónica del agua de recirculación y en algunas instancias, se usan tratamientos orgánicos; la resistencia del circuito interno de cualquier celda electroquímica es reducida permitiendo que la corriente de corrosión se incremente.

k) Sólidos Sedimentables

Son sólidos de mayor densidad que el agua, se encuentran dispersos debido a fuerzas de arrastre o turbulencias. Cuando estas fuerzas y velocidades cesan y el agua alcanza un estado de reposo, precipitan en el fondo de ésta.



---

### 2.1.5. Problemas comunes en una torre de enfriamiento

Las principales problemáticas que se presentan en una torre de enfriamiento originadas por una baja calidad de agua, son las siguientes:

- *Corrosión.* La corrosión es el deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Se origina cuando existe una diferencia de potenciales entre dos puntos que establece una corriente de electrones.

Una manera de disminuir este problema es controlar el pH del agua, si se mantiene el pH en valores altos (7-9) generalmente la corrosión tiende a disminuir.

Otro de los parámetros que favorece la corrosión es el incremento de las concentraciones de los sólidos disueltos totales, debido a que se incrementa la fuerza iónica en el agua de recirculación y los sólidos suspendidos, debido a la acumulación de depósitos por causa de la diferencial de concentración de oxígeno.

El incremento de la temperatura, aumenta la velocidad de corrosión, como regla general cada 15°F (8°C) se incrementa al doble la velocidad.

Para controlar el problema de la corrosión se realiza con el uso de inhibidores químicos, éstos son sustancias químicas que al momento de adicionarse al agua de la torre de enfriamiento reducen o detienen la reacción del metal con el medio expuesto.

- *Incrustación.* La incrustación se origina cuando la concentración de las sales disueltas en el agua de recirculación excede los límites de solubilidad por lo que precipitan sobre las superficies en contacto con el agua.

Los parámetros que favorecen la incrustación son los que describen a continuación:

*pH:* Un pH básico favorece la incrustación



---

*Dureza Ca:* La concentración de calcio en el agua de recirculación de la torre de enfriamiento debe estar limitada para evitar la precipitación de sales de calcio insolubles, que generan deposición en las tuberías.

*Alcalinidad M /Alcalinidad F:* Estos parámetros son indicadores de la presencia de la deposición de sales insolubles en las tuberías.

*Conductividad:* Una conductividad alta favorece la incrustación debido a que detecta la presencia de impurezas ionizadas disueltas en el agua, que posteriormente se depositarán en las tuberías.

*Sílice:* La concentración de sílice no debe exceder 150-175 mg/L en agua de enfriamiento para evitar la deposición de los silicatos.

*Turbidez:* La presencia de turbidez tiene como consecuencia la formación de lodo, provocan pérdida de transferencia de calor en los equipos.

*Sulfatos:* Altas concentraciones de sulfato causan la degradación del concreto en los bacines de concreto, lo que puede producir deposiciones insolubles de calcio.

*Nitratos:* La presencia de nitratos en el agua de repuesto favorece el crecimiento microbiano el cual afecta el funcionamiento de los equipos.

*Sólidos Disueltos Totales:* La concentración de sólidos disueltos produce fuerza iónica en el agua de recirculación

- *Crecimientos biológicos.* Principalmente este problema es generado por la aparición de hongos, bacterias y/o algas. Éste se monitorea con la concentración de los nitratos en el agua de repuesto, la cual indica el crecimiento microbiano que afecta el funcionamiento de los equipos.

En los sistemas de enfriamiento los microorganismos, comúnmente encontrados son: bacterias, hongos, y algas.



---

**Bacterias:** son microorganismos que se encuentran libres en el agua y que generalmente se reproducen por fisión binaria y carecen de clorofila, además es el grupo más grande de los organismos perjudiciales, por su requerimiento de oxígeno se pueden clasificar en aerobias y anaerobias.

**Hongos:** son plantas simples, sin diferenciación estructural como raíces, tallos y hojas están desprovistos de clorofila y en consecuencia desde el punto de vista de la nutrición obtienen su alimento de las materias muertas o se nutren como parásitos como huéspedes vivos.

**Algas:** Son organismos que carecen de raíz, tallo y hojas, muy activos y primitivos unicelulares que requieren tres elementos básicos para el crecimiento, aire, agua y luz solar, estos organismos contienen clorofila y caroteno como pigmentos.

En los sistemas de enfriamiento el crecimiento de algas es abundante en las áreas donde penetra la luz solar como en la pileta de los sistemas por aspersion y en las charolas de distribución y proximidad de persiana de la torre de enfriamiento, en estos lugares se presentan depósitos de limo originados por la presencia y características gelatinosa de las algas a las que se adhieren sustancias orgánicas e inorgánicas.

- *Ensuciamientos.* En general todo cuerpo que puede causar problemas en un sistema de agua de enfriamiento que no se debe a la incrustación, la corrosión o a la actividad biológica, se denomina ensuciamiento.

Los ensuciamientos son provocados principalmente por material suspendido en el agua de repuesto, éstos son generados por diversas causas como puede ser una fuga de aceite en un elemento mecánico.



---

## 2.2. Balance de materia y energía

### 2.2.1. Variables de operación

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

#### *Agua de Repuesto (Make-up water <sup>\*1</sup>)*

Agua adicionada a las torres de enfriamiento para reemplazar las pérdidas por arrastre, purga y evaporación. La cantidad de agua de repuesto adicionada afecta directamente la calidad de agua en el sistema. Es decir que con base en los ciclos de concentración se puede tener un mayor ahorro de agua pero se concentran las sales en el agua de recirculación incrementando los fenómenos fisicoquímicos (corrosión e incrustación) y se tiene que aplicar un mejor tratamiento químico.

#### *Arrastre (Drift <sup>\*1</sup>)*

El arrastre son las pérdidas de agua en forma de vapor que corresponde aproximadamente del 0.05 % al 0.02% del flujo de recirculación.

#### *Purga (Blowdown <sup>\*1</sup>)*

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

Debido a que el agua se colecta en el bacín de la torre tiende a evaporarse y los sólidos a concentrarse, donde éstos alcanzan un nivel alto de concentración y por lo tanto es

---

<sup>1</sup> Por significado en inglés.



necesario realizar una purga de agua para eliminarlos hasta un nivel aceptable para la operación de las torres de enfriamiento.

### *Evaporación (Evaporation\*<sup>1</sup>)*

Mecanismo de enfriamiento principal de una torre, el calor perdido por evaporación (aproximadamente 1,000 BTU por libra de agua) baja la temperatura del agua restante. La cantidad de evaporación es aproximadamente de 1.2 % de la cantidad de flujo de recirculación de agua que pasa a través de la torre por cada disminución de 10° F de la temperatura del agua alcanzada por la torre (NCDENR, 2008).

### *Ciclos de concentración*

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

El mayor ahorro de agua ocurre cuando se incrementan los ciclos de concentración y las purgas disminuyen (HUCHLER, 2006).

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

## **2.2.2. Relación de las variables de operación**

La Figura. 4 esquematiza el arrastre (D) y la cantidad de agua que continuamente se evapora (E). El agua de repuesto (M), debe ser adicionada continuamente para remplazar las pérdidas por evaporación y arrastre. A medida que estos fenómenos continúan, las sales en el agua de repuesto incrementan la concentración en el agua de recirculación (Mc COY, 2000).

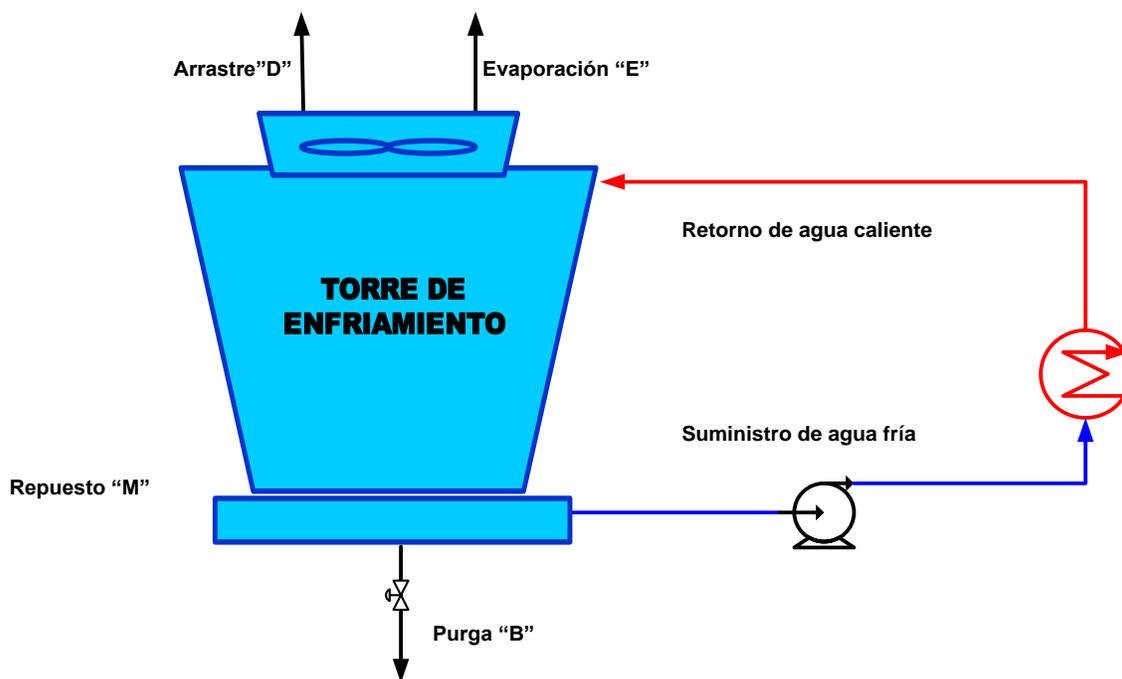
Cuando un valor máximo de concentración es alcanzado, se abre la línea de purga (B), para descargar al drenaje continuamente.



Así, para cualquier periodo de tiempo:

$$M = E + B + D$$

1



**Figura. 4** Sistema de una torre de enfriamiento.

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

Entonces:

$$M TS_m = D + B * TS_r \quad (2)$$



También:

$$CC. = \frac{TS_r}{TS_m} \quad (3)$$

Por lo tanto

$$M = D + B * CC. \quad (4)$$

Despejando los ciclos de concentración de la ecuación 4 y sustituyendo la ecuación 1

$$CC. = \frac{M}{D+B} = \frac{E+B+D}{D+B} \quad (5)$$

Reordenando los términos de la ecuación 5 se obtiene:

$$CC.*D + CC.*B = E + B + D \quad (6)$$

$$CC.*B - B = E - D*CC. + D \quad (7)$$

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

Despejando la purga (B) de la ecuación 8 como se muestra a continuación

$$B = \frac{[E - D * CC. - 1]}{CC. - 1} \quad (9)$$

La ecuación anterior expresa las pérdidas que están con base en purgas, arrastre y ciclos de concentración.

Desafortunadamente esta ecuación no es muy útil tomando en cuenta la poca certeza y confiabilidad que existe en valores de evaporación y arrastre ya que éstos son en muchos casos muy difíciles de medir.



El flujo de la evaporación ésta relacionado con el calor de evaporación que se representa como se muestra a continuación:

$$\Delta H_v * E = R * C_p * \Delta T \quad (10)$$

Donde:

$\Delta H_v$ = Entalpia del vapor a 25 °C es igual a 1000 BTU/lb

$C_p$ =Capacidad calorífica del agua es igual a 1 BTU/lb\*°F

R=La recirculación en unidades de galones por minutos

$\Delta T$ = Diferencia de temperaturas en °F

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

$$\%E = \frac{\Delta T}{10} \quad (11)$$

Despejando el porcentaje de la evaporación y considerando el término de la recirculación se obtiene la expresión de la evaporación:

$$E = \frac{R * \Delta T}{1000} \quad (12)$$

Donde el flujo de recirculación (R) en galones por minuto y  $\Delta T$  en ° F.

Para propósitos prácticos D puede ser incluida en B, la pérdida de agua por el viento (arrastre) contiene la misma concentración de sales que B, de acuerdo a esto, sustituyendo la ecuación 12 a las consideraciones de la ecuación 1.



$$M = E + B = \left( \frac{R * \Delta T}{1000} + B \right) \quad (13)$$

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

$$B = \frac{E}{CC. - 1} \quad (14)$$

Sustituyendo la ecuación 14 en 13

$$M = \left( \frac{R * \Delta T}{1000} \right) + \frac{E}{CC. - 1} \quad (15)$$

Simplificando la expresión anterior (15)

$$M = \left( \frac{R * \Delta T}{1000} \right) + \frac{CC.}{CC. - 1} \quad (16)$$

El resumen de las expresiones relacionadas en el balance de materia en una torre de enfriamiento se muestra en la Tabla 3.

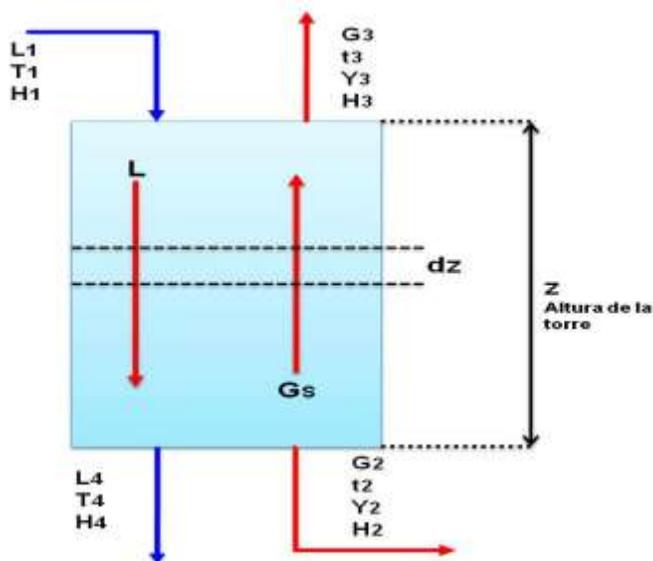
**Tabla 3.** Ecuaciones de las variables de una torre de enfriamiento

VARIABLE	SÍMBOLO	ECUACIÓN	ECUACIÓN SIMPLIFICADA
Evaporación	E	M-B	$\frac{R * \Delta T}{1000}$
Repuesto	M	B+E	$\frac{E * CC.}{CC. - 1}$
Purga	B	M-E	$\frac{E}{CC. - 1}$
Ciclos de Concentración	CC.	M	$\frac{TS_r}{TS_m}$



### 2.2.3. Balance de energía

Para el balance de energía se considera el siguiente diagrama (Figura. 5) como el sistema de transferencia de una torre de enfriamiento a contracorriente



**Figura. 5** Sistema de la torre de enfriamiento para el balance de energía.

Donde las variables del proceso significan:

- ⊕  $L_1$ : Flujo másico de agua en la entrada [kg agua/h]
- ⊕  $L_4$ : Flujo másico de agua en la salida [kg agua/h]
- ⊕  $G_2$ : Flujo másico de gas en la entrada [kg As /h]
- ⊕  $G_3$ : Flujo másico de gas en la salida [kg As/h]
- ⊕  $T_1$ : Temperatura del agua en la entrada
- ⊕  $T_4$ : Temperatura del agua en la salida.
- ⊕  $t_2$ : Temperatura del gas en la entrada.
- ⊕  $t_3$ : Temperatura del gas en la salida.
- ⊕  $H_1$  y  $H_4$ : Entalpía de entrada y salida del agua
- ⊕  $H_2$  y  $H_4$ : Entalpía de entrada y salida del aire.
- ⊕  $Y_2$  y  $Y_4$ : Humedad de entrada y salida del aire [kg agua/kg As]



Balance global y el balance de agua son expresados por las siguientes ecuaciones:

$$L_1 + G_2 = L_4 + G_3 \quad (17)$$

$$L_1 + G_2 * Y_2 = L_4 + G_3 \quad (18)$$

Considerando que el flujo másico del gas es  $G_s$  kilogramo de aire libre de vapor por metro cuadrado de sección de torre de enfriamiento se expresa como se muestra a continuación:

$$G_{S2} = G_{S3} = G_S \quad (19)$$

Sustituyendo la ecuación 18 en la 19 y factorizando el resultado:

$$L_1 - L_{21} = G_S * T_3 - G_2 * T_2 \quad (20)$$

$$L_1 - L_{21} = G_S Y_3 - Y_2 \quad (21)$$

La ecuación anterior (21) expresa que el agua evaporada es igual al agua que absorbe el aire.

Para el balance de energía se expresa a continuación:

$$L_1 H_1 + G_{S2} H_2 - G_S H_3 = L_4 H_4 \quad (22)$$

Sustituyendo la ecuación 19 en la 22 y simplificando la expresión 22 se obtiene:

$$L_1 H_1 + G_{S2} H_2 = G_S H_3 + L_4 H_4 \quad (23)$$

$$G_S H_2 - H_3 = L_4 H_4 - L_1 H_1 \quad (24)$$



Arreglando los términos de la ecuación 23 se obtiene:

$$L_1 H_1 + G_S H_2 - H_3 = L_4 H_4 \quad (25)$$

La ecuación anterior (25) expresa la igualdad entre el calor absorbido por el aire y el calor perdido por el agua.

La línea de operación de una torre de enfriamiento se encuentra en las condiciones correctas entre el flujo del líquido a la entrada de la torre es similar al flujo de agua a la salida, esta igualdad se expresa:

$$L_4 = L_4 = L \quad (26)$$

Sustituyendo la ecuación 26 en la ecuación 25 se obtiene:

$$G_S H_2 - H_3 = L H_4 - H_1 \quad (27)$$

Simplificando la ecuación 27 y sustituyendo los subíndices 2,3 y 1,4 por “g” de gas y “L” de líquido respectivamente se tiene:

$$G_S H_g = L H_L \quad (28)$$

Considerando  $H = C_{pL}(t_{L2} - t_{L1})$  para el líquido y sustituyendo en la ecuación 26 se obtiene:

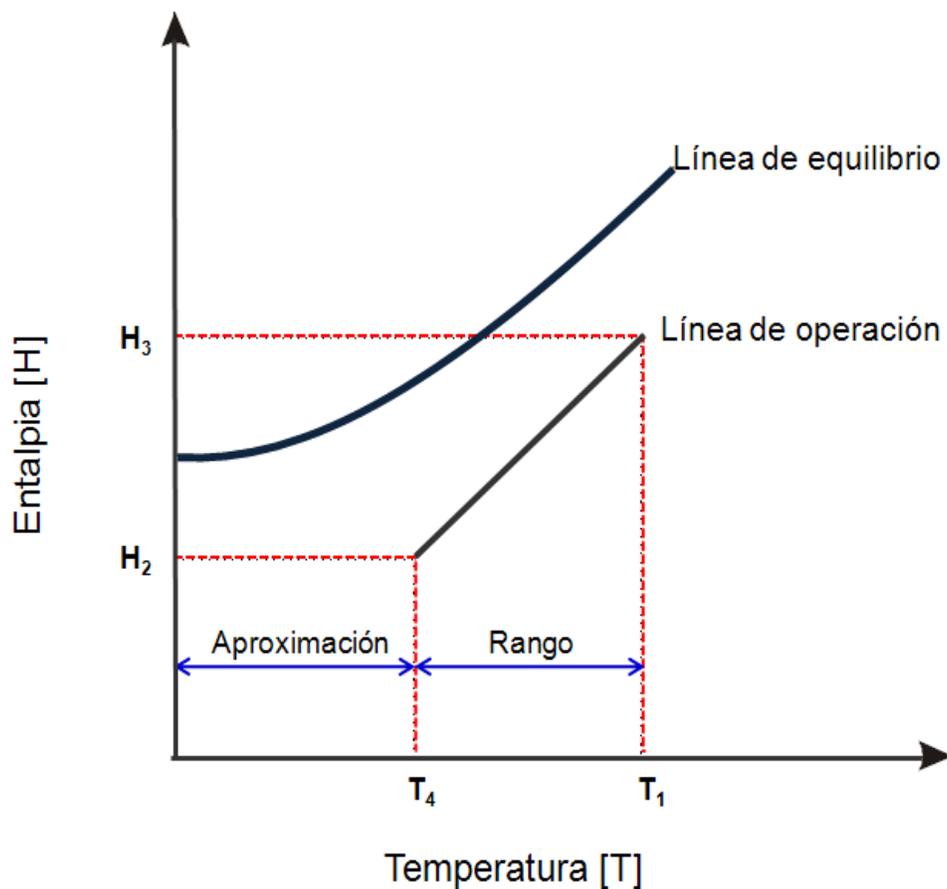
$$G_S H_g = C_{pL} t_{L2} - t_{L1} \quad (29)$$

La ecuación anterior (29) permite trazar una recta que relaciona las entalpías del aire y las temperaturas del agua a lo largo de la torre, esta recta se llama línea de operación y pasa por los puntos que representan las condiciones del “proceso” en la parte inferior ( $H_2, T_4$ ) y superior ( $H_3, T_1$ ) de la torre y la pendiente se expresa:

$$\frac{H_g}{t_L} = \frac{L C_{pL}}{G_S} \quad (30)$$



La línea de operación donde se encuentra la pendiente de la ecuación anterior (30), se traza junto con la curva de equilibrio entalpia respecto a la temperatura, la aproximación y el rango que ocurren en una torre de enfriamiento se observan a continuación (Figura. 6):



**Figura. 6** Diagrama entalpia respecto a la temperatura del agua (González, 2006).

#### 2.2.4. Ahorro de agua en las purgas de una torre de enfriamiento

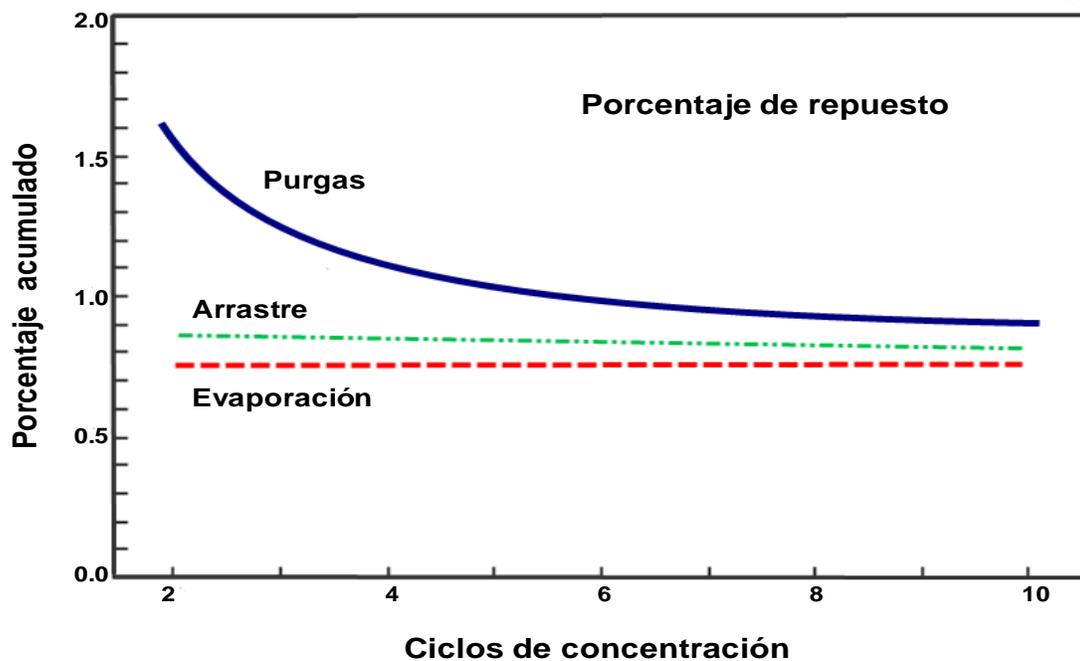
El principio de operación de las torres de enfriamiento es la transferencia simultánea de calor y masa. En el balance de materia refleja una relación llamada “Ciclos de



concentración”, ésta permite definir las variables en el sistema como son la cantidad de agua de repuesto que se suministra a la torre de enfriamiento y la disminución de purgas.

El consumo de agua en las torres de enfriamiento (agua de repuesto) puede ser reducido significativamente minimizando las purgas en coordinación con una operación adecuada además de un programa de mantenimiento adecuado.

La gráfica de la Figura. 7 muestra cómo disminuye el agua de repuesto que se suministra a la torre en la medida que aumentan los ciclos de concentración, a partir de ciertos niveles de ciclos de concentración, el agua de repuesto no reduce de manera importante, el arrastre y la evaporación se mantienen constantes debido a aspectos mencionados anteriormente.



**Figura. 7** Requerimientos de agua de repuesto vs. ciclos de concentración.  
(C-TOWER, 2000).



Las purgas pueden ser minimizadas cuando los ciclos de concentración aumentan. Generalmente los ciclos son de 2 a 3 en agua de enfriamiento y pueden incrementar a 6 ó más.

La Tabla 4 muestra el porcentaje de ahorro en el agua de repuesto al aumentar los ciclos de concentración, por ejemplo el aumentar los ciclos de concentración de 2 ( $C_i$ ) a 3 ( $C_f$ ) el porcentaje de ahorro es del 5 %, de igual forma se nota que aumentar los ciclos a 5 o más el % de ahorro es mínimo (SMREKAR, 2007).

**Tabla 4.** Ahorro en agua de repuesto

PORCENTAJE DE AHORRO EN AGUA DE REPUESTO (%)												
	$(C_f)$											
	2	2.5	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10	
$(C_i)$	1.5	33	44	50	53	56	58	60	61	62	63	64
2	---	17	25	30	33	38	40	42	43	44	45	
2.5	---	---	10	16	20	25	28	30	31	33	34	
3	---	---	---	7	11	17	20	22	24	25	26	
3.5	---	---	---	---	5	11	14	17	18	20	21	
4	---	---	---	---	---	6	10	13	14	16	17	
5	---	---	---	---	---	---	4	7	9	10	11	
6	---	---	---	---	---	---	---	3	5	6	7	



---

## **2.3. Principios básicos de los tratamientos de agua**

### **2.3.1. Precipitación química**

Es la separación de sustancias por asentamiento gravitacional, mediante el agregado de reactivos químicos que alteran su estado físico o su solubilidad (precipitantes, coagulantes, floculantes, etc.). La precipitación química es un proceso de tres pasos que consiste en: coagulación, floculación y sedimentación.

**Coagulación:** En esta etapa las fuerzas entre las partículas de los contaminantes se reducen o eliminan mediante la adición de productos químicos, lo que permite la interacción de partículas mediante el movimiento molecular y la agitación física. La mezcla rápida permite la dispersión en el agua residual del producto químico utilizado en el tratamiento y promueve el choque de partículas, lo que hace que las partículas se agrupen para formar otras de mayor tamaño, es decir, la coagulación. Los productos químicos añadidos para promover dicha agregación se denominan coagulantes y tienen dos propósitos básicos: El primero es desestabilizar las partículas, lo que permite la interacción, y el segundo es promover la agrupación de partículas reforzando así la floculación.

**Floculación:** Se produce después de un período de mezcla rápida ya que es necesario disminuir la velocidad de la mezcla para que se formen flóculos más grandes. (Si la velocidad de mezcla es alta, los flóculos continúan siendo destruidos por excesivo contacto físico).

**Sedimentación:** Debido al tamaño de las partículas sigue siendo necesario algo de mezcla para que exista contacto entre las masas de sólidos y promover así la formación de flóculos que se sedimentarán rápidamente. Durante la precipitación, los sólidos se separan del líquido normalmente por sedimentación. Lo que debe resultar en dos capas claramente visibles: una sólida y una líquida, que pueden separarse fácilmente.



La precipitación química se realiza la mayor parte de las veces utilizando hidróxido de sodio, compuestos de sulfato (alumbre o sulfato férrico) o sulfuros (sulfuro de sodio o sulfuro de hierro). La adición de estos compuestos a aguas residuales portadoras de metales forma hidróxidos de metal o sulfuros de metal respectivamente, y la solubilidad en el agua de éstos es limitada.

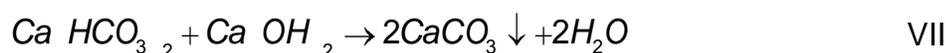
Durante este proceso, el radical hidroxilo es el componente reactivo de la cal que convierte  $\text{CO}_2$  y  $\text{HCO}_3^-$  en  $\text{CO}_3^{-2}$ , precipitándose  $\text{CaCO}_3$ , como se muestra en las siguientes reacciones:



o en forma iónica las reacciones I y II:



Los carbonatos que causan la dureza pueden ser precipitados como carbonatos de calcio o hidróxido de magnesio con la adición de hidróxido de calcio como se muestra en las reacciones (VI) a la (VIII):





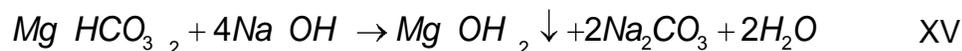
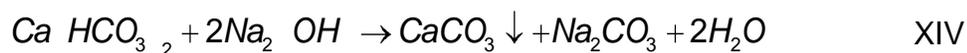
La dureza por no carbonatos de calcio puede precipitarse con la adición de carbonato de sodio:



Los no carbonatos de magnesio se precipitan como hidróxido de magnesio con la adición de hidróxido de calcio, produciendo sulfato de calcio, así mismo, éste reacciona con carbonato de sodio y se obtiene como precipitado carbonato de calcio.

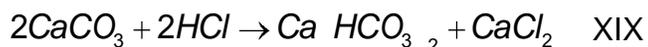
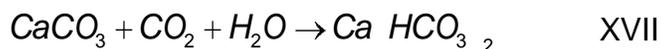


La dureza producida por carbonatos y no carbonatos puede ser removida con la adición de sosa cáustica



Cabe mencionar que el sulfato de calcio puede reaccionar con el carbonato de sodio formado y precipitarse como carbonato de calcio (ver reacción XV).

El ablandamiento de agua cruda es saturada regularmente con carbonato de calcio a valores de pH altos, posteriormente el agua debe estabilizarse antes de someterse a una filtración a la que se adiciona dióxido de carbono o ácido.



Las constantes de solubilidad de los productos  $\text{CaCO}_3(\text{s})$  y  $\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s})$  controlan el proceso de ablandamiento. Esto significa que cantidades estequiométricas de cal y de carbonato elevan el pH del agua de modo tal que el  $\text{CaCO}_3(\text{s})$  y el  $\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s})$  se encuentran en sus solubilidades mínimas.

### 2.3.2. Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso electroquímico que separa simultáneamente metales pesados, sólidos en suspensión, compuestos orgánicos emulsionados y otros muchos contaminantes del agua utilizando la electricidad en lugar de reactivos químicos. Los fangos producidos durante el tratamiento se separan posteriormente por filtración, decantación o flotación.

El proceso consiste en pasar el agua residual procedente de un proceso determinado de forma continua a través de los electrodos de un equipo especialmente diseñado para este fin que está conectado a una fuente de corriente continua. El agua residual debe poseer una cantidad suficiente de sales neutras para que puedan tener lugar las múltiples reacciones electroquímicas.

### 2.3.3. Filtración por membranas

Los procesos de membrana se usan por su capacidad de eliminar partículas de 0.01 a 10 micras de diámetro. Estos procesos se clasifican en ósmosis inversa (OI),



---

nanofiltración (NF), microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF). La ósmosis inversa es capaz de eliminar sustancias iónicas hasta de 1 a 15 Å de diámetro. En esencia esto se hace aplicando una presión mayor que la presión osmótica de la solución, forzando con ella el paso de agua a través de una membrana y dejando atrás una solución salmuera. Las membranas de NF son capaces de rechazar grandes cantidades de iones multivalentes y cationes divalentes, lo que permite el paso de iones monovalentes. Las membranas de UF y MF rechazan moléculas con base en el tamaño, reteniendo partículas mayores de unos 15 a 200 Å y 200 a 1000, respectivamente. (DAVIS, 2005).

#### **2.3.4. Ozonación**

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno con tres átomos, se encuentra en forma diluida con una mezcla de aire u oxígeno. Es más soluble en agua que el oxígeno, pero debido a su más baja presión parcial, es difícil obtener una concentración mayor que pocos miligramos por litro en condiciones normales de temperatura y presión. La reacción del ozono en el agua, se realiza bajo dos mecanismos: primero en forma directa debido a su triple valencia, es capaz de oxidar muchos compuestos orgánicos e inorgánicos en forma lenta; el segundo, en forma rápida, por la formación de ion hidroxilo, agente oxidante de mayor poder que el mismo ozono, por lo que se le utiliza para oxidar los constituyentes indeseables del agua y en la desinfección. Estos dos mecanismos lo hacen, 1.5 veces más oxidante que el cloro.

El proceso de ozonación es un proceso de oxidación avanzada. Los componentes del proceso de ozonación es el tratamiento del gas de origen, el generador del ozono, el contacto del agua con el ozono y la destrucción del ozono no usado. El proceso de ozonación sigue dos etapas, la primera es suministrar el ozono en una mezcla con aire u oxígeno al agua a tratar, dispersados de tal manera que el área de contacto con el agua donde se inyecte sea lo máximo posible. La segunda etapa del proceso se lleva a cabo en el contacto del ozono con los compuestos orgánicos e inorgánicos del agua para su oxidación. El ozono remanente en el agua, permanece como ozono residual y el ozono



no utilizado se libera del reactor. La desinfección ocurre en el momento en que daña y destruye componentes críticos de los microorganismos aún los recalcitrantes como los virus y ciertas formas de algas. La efectividad de la desinfección es directamente proporcional a la Concentración del Ozono (C) y al tiempo de contacto (t) (PARAZKEVA, 2005).

### **2.3.5. Ósmosis inversa**

En el tratamiento de las aguas residuales mediante ósmosis inversa, el afluente contaminado se pone en contacto con una membrana adecuada a una presión superior a la presión osmótica de la solución, bajo estas circunstancias, el agua con una cantidad muy pequeña de contaminantes pasa a través de la membrana. Los contaminantes disueltos se concentran en el compartimiento de agua residual, este concentrado, que posiblemente sea una fracción del volumen total de agua residual a tratar, se descarga (RAMALHO, 1983).

La ósmosis inversa está basada en la búsqueda fundamental del equilibrio. Los fluidos que contienen diferentes concentraciones de sólidos disueltos son puestos en contacto, estos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Cuando estos fluidos están separados por una membrana semi-permeable, uno de ellos (el de menor concentración) se moverá a través de la membrana hacia el fluido que tenga una mayor concentración de sólidos disueltos. Después de un tiempo el nivel de agua será mayor a uno de los lados de la membrana. La diferencia en altura se denomina presión osmótica; aplicando en la columna del fluido una presión superior a la presión osmótica, se obtiene un efecto inverso. Los fluidos son presionados de vuelta a través de la membrana mientras que los sólidos disueltos permanecen en la columna.



## 2.4. Proceso de toma de decisiones

Para la toma de decisión de la inversión correcta, es necesario determinar todos los costos e inversiones, flujos de efectivo esperados del proyecto y seleccionar adecuadamente la tasa de rendimiento que se desea ganar. Cuando no hay ingresos originados por una inversión, los beneficios se asocian a los posibles ahorros de costos entre la alternativa de seguir con la situación existente (sin proyecto) y la situación con proyecto (*SAPAG, 2007*).

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

La TREMA se puede estimar como:

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

Donde:

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

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

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

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

- ✓ Buscar la mayor ganancia.



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

#### 2.4.1. Parámetros de análisis

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

##### ◆ Valor Presente Neto (VPN)

El Valor Presente Neto (VPN), significa traer del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente. Para calcularlo, sólo se trasladan los flujos de los años futuros al tiempo presente y se le resta la inversión inicial, que ya está en tiempo presente. Los flujos se descuentan a una tasa correspondiente a la TREMA (BACA, 2003).

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

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

Donde:

VPN = Valor presente neto.

$S_0$  = Inversión inicial.

$S_t$  = Flujo de efectivo neto del periodo t.

n = Número de períodos de vida del proyecto.

i = Tasa de recuperación mínima atractiva.



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

#### ◆ Tasa Interna de Retorno (TIR)

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

$$\sum_{i=0}^x \frac{S_t}{1+i^*} = 0 \quad (b)$$

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

#### ◆ Periodo de Recuperación (PRI)

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

Para calcular el PRI se utiliza un método de interpolación entre los valores de VPN negativo y el VPN positivo. La desventaja que presenta este método es que sólo considera los flujos de efectivo hasta el periodo de recuperación.

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



---

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

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

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

*Costo de servicios auxiliares:* Considera principalmente el consumo de energía eléctrica.

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

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

*Depreciación:* Se debe a la pérdida del valor de los activos tangibles (equipo, vehículos, edificaciones y maquinaria), debido a la edad, uso y obsolescencia durante su vida útil. Aunque un activo puede estar en excelente condición de trabajo, el hecho de que valga menos a través del tiempo se considera en los estudios de evaluación económica (LELAND, 2006).



## Capítulo.3. METODOLOGÍA

### 3.1. Caso de estudio

#### 3.1.1. Descripción

El problema que se plantea estudiar en este trabajo es la optimización del uso de agua en las torres de enfriamiento de una refinería; lo cual no se logra simplemente tratando el agua de repuesto o el agua de purga para su reúso como agua de repuesto. El aumento de calidad en el agua de repuesto se traduce en el aumento de los ciclos de concentración. Las torres de enfriamiento de las refinerías en México emplean grandes volúmenes de agua para el suministro de enfriamiento a los equipos de las plantas de proceso, la Figura. 8 muestra una torre de enfriamiento de este tipo.



**Figura. 8** Torre de enfriamiento multicelda de tiro inducido y flujo cruzado.

El caso de estudio es el siguiente:

En la refinería de estudio, se tienen diez torres de enfriamiento; para el presente estudio se eligió una de éstas, la cual corresponde a una torre marca Marley Series 1000, de tiro mecánico inducido con operación a contraflujo (Figura. 9) con estructura de concreto; consta de 15 celdas con dos ventiladores cada una y tiene una capacidad total de 60,000 GPM.



**Figura. 9** Torre de enfriamiento del caso de estudio: tiro inducido a contraflujo.

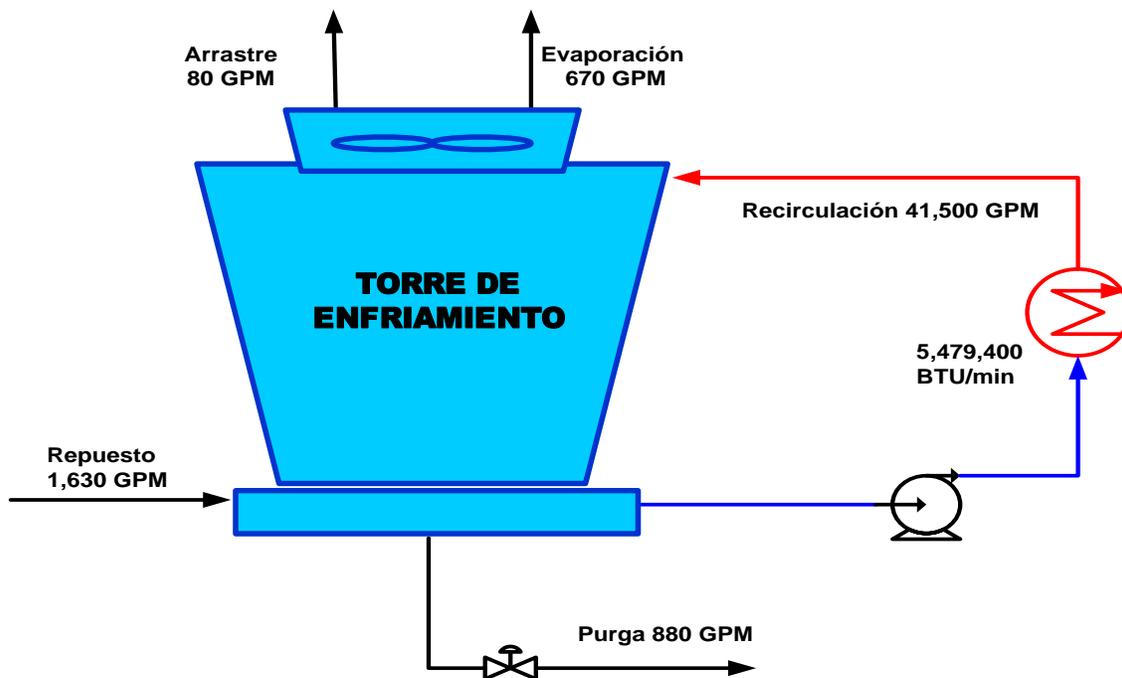
Se realizó un análisis estadístico con el último año acerca de las condiciones de operación en la torre de enfriamiento los resultados se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Resultados del análisis estadístico en la torre

PARÁMETRO	GPM	m <sup>3</sup> /d
Recirculación	41,500	226,216
Evaporación	670	3,652
Arrastre	80	436
Purga	880	4,797
Repuesto	1,630	8,885
Ciclos de concentración : 1.86		

\*1GPM=5.45 m<sup>3</sup>/d

Los flujos en la línea de agua de repuesto se tomaron con medidores de flujo montados en campo y las temperaturas, por parte de los reportes del personal que brinda tratamiento a la torre. Los resultados de estas mediciones se representan a continuación (Figura. 10):



**Figura. 10** Esquema del balance de agua actual de la torre de enfriamiento.

De acuerdo a estos datos, es posible trazar los ciclos de concentración y el flujo de agua de repuesto (mezcla de agua de pozo con agua de la planta de tratamiento de agua residual) que entra en la torre de acuerdo a las ecuaciones de la Tabla 3 desarrollando el gráfico (Figura. 11) de los ciclos de concentración contra la mezcla de agua para repuesto a la torre de enfriamiento observando el efecto del aumento de los ciclos de concentración y la disminución de agua de repuesto a la torre de enfriamiento.

Cabe mencionar que la mezcla de agua suministrada para el repuesto de la torre corresponde un 80% al agua de pozos y 20% al agua de la planta de tratamiento de aguas residuales, este porcentaje se retomará para el análisis de resultados de los balances de agua propuestos.

Considerando el flujo de recirculación y los ciclos de concentración constantes respecto a la situación actual, y el flujo del arrastre para el desarrollo de las ecuaciones de la Tabla 3, como se muestra a continuación:

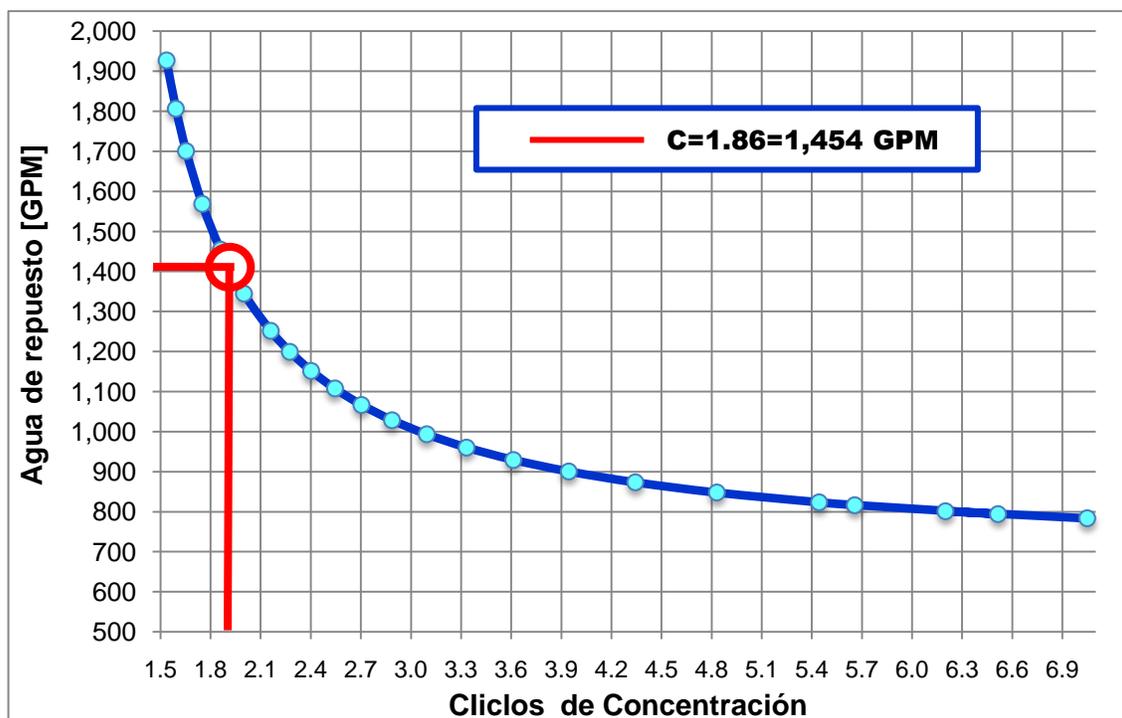


$$E = \frac{R * \Delta T}{1000} = \frac{41,500 * 16.20}{1000} = 672 \text{GPM}$$

$$D = 0.000025 * 41,500 = 1.00 \text{GPM}$$

$$B = \frac{E}{CC.-1} - D = \frac{672}{1.86-1} - 1 = 781 \text{GPM}$$

$$M = E + D + B = 672 + 1.00 + 781 = 1,454 \text{GPM}$$



**Figura. 11** Ciclos de concentración reportados por la refinería.

Como se puede observar en el gráfico anterior (Figura. 11) la torre de enfriamiento no está operando en las óptimas condiciones respecto a los ciclos de concentración por lo que se propone someter a un tratamiento químico para poder disminuir las cantidades de sales, principalmente sílice para poder incrementar los ciclos de concertación.



---

### 3.1.2. Metodología de solución

El diagnóstico del funcionamiento de una torre de enfriamiento en una refinería y su relación de los ciclos de concentración se realiza con la siguiente metodología, la cual se describe a continuación brevemente (ver Figura. 12).

#### *Recopilar y analizar información disponible.*

Se realiza la recopilación de información bibliográfica y los datos proporcionados por la refinería, como la hoja de datos de diseño de la torre de enfriamiento y los históricos de los flujos y la calidad del agua de repuesto y recirculación, para realizar la evaluación del caso de estudio seleccionado.

#### *Evaluación del estado actual de la torre de enfriamiento.*

Con la información obtenida se realiza el balance de materia actual de la torre de enfriamiento y se evalúan los ciclos de concentración respecto a la concentración de sílice.

#### *Opciones de tratamiento para el agua en la torre de enfriamiento.*

Consiste en proponer dos opciones de mejora, la primera es efectuar el tratamiento en el agua de repuesto, manteniendo la concentración de sílice de la recirculación, efectuando el balance de materia con las siguientes condiciones el flujo de la recirculación, evaporación y arrastre se mantendrán constantes. La segunda opción es efectuar el tratamiento en el agua de purga y recircularla como agua de repuesto, realizando el balance de materia manteniendo la concentración de sílice de la recirculación, el flujo de la recirculación, evaporación y arrastre constantes.

Existe una tercera opción que es el tratamiento del agua de recirculación la cual fue descartada debido a que el volumen es cuarenta veces mayor respecto al volumen del agua de repuesto y purga como se observa en la Tabla 5. De las dos opciones de



---

tratamiento se selecciona una de acuerdo a los balances de agua donde se obtenga el mayor ahorro de agua de repuesto y un aumento en los ciclos de concentración.

#### *Evaluación técnica de las tecnologías de tratamiento.*

Se solicitó la información a tres tecnólogos las características de tratamiento de agua para las opciones de mejora, especificando diferentes parámetros para realizar la evaluación técnica como son eficiencia del tratamiento, disponibilidad del tratamiento, requerimientos mínimos para operar, infraestructura, generación de subproductos e impacto al medio ambiente y costos de inversión.

#### *Selección de la tecnología.*

De la evaluación técnica de las tecnologías de tratamiento, se selecciona la mejor opción ponderando los parámetros evaluados y considerando la tecnología con la mejor calidad de agua tratada.

#### *Evaluación económica.*

Se efectuó un análisis económico de la posible inversión de la opción de tratamiento con la tecnología seleccionada, considerando los costos de inversión y de ahorro de agua de repuesto.

#### *Análisis de resultados y conclusiones*

Se efectuó el análisis de los resultados obtenidos en las opciones de tratamiento para el agua en la torre de enfriamiento, considerando el porcentaje de la distribución de agua suministrada como agua de repuesto del agua de pozos y de la planta de tratamiento de aguas residuales, igualmente analizando la evaluación técnica de las tecnologías para seleccionar la tecnología para el tratamiento del agua y la evaluación económica para encontrar el flujo óptimo de tratamiento. Realizado las conclusiones con base en el análisis de resultados y objetivos planteados al inicio del presente documento.

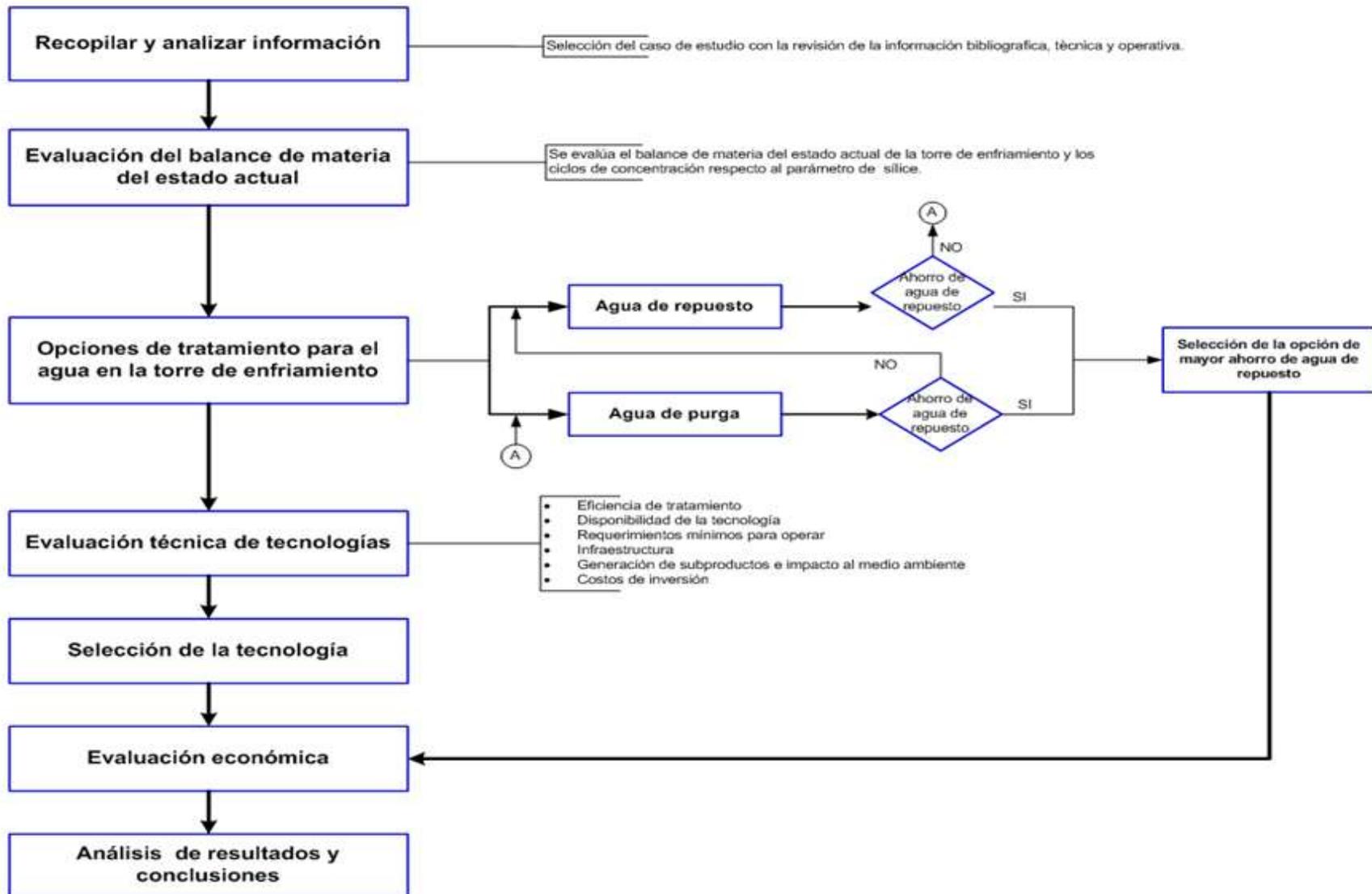


Figura. 12 Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.



## Capítulo.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Planteamiento de opciones de tratamiento

#### 4.1.1. Opción 1. Tratamiento en el agua de repuesto

El agua de repuesto que se utiliza en la torre de enfriamiento del caso de estudio es una mezcla del agua de la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) de la refinería y del agua de pozos; por lo que a esta mezcla de agua se le quitan los minerales y las sales, y se utiliza cuando se requiere agua con bajo contenido en sales o baja conductividad. Las concentraciones de la Tabla 6 representan los valores promedio del agua de repuesto reportados por la refinería.

**Tabla 6.** Valores de parámetros de calidad del agua de repuesto

PARÁMETRO	UNIDAD	AGUA RESIDUAL TRATADA (Promedio)	AGUA DE POZOS (Promedio)	RECOMENDACIONES EPRI <sup>2</sup>
Grasas y Aceite	mg/L	21	0.0	-
Fosfatos	mg/L	18	1.0	-
Sulfuros	mg/L	618	23	-
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	289	271	-
Dureza Total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	176	80	300
Cloruros	mg/L	203	34	600
Conductividad	μS/cm	2,574	650	3000
SDT	mg/L	2,000	486	1500

<sup>2</sup> Límites recomendados de calidad de agua de enfriamiento de acuerdo a EPRI, Electric Power Research Institute, "Use of Degraded Water Sources as Cooling Water in Power Plants", October 2003; y Kunz, R. G., A.F. Yen, and T. C. Hess. "Cooling Water Calculations." Chemical Engineering (August) 61-71. 1977.

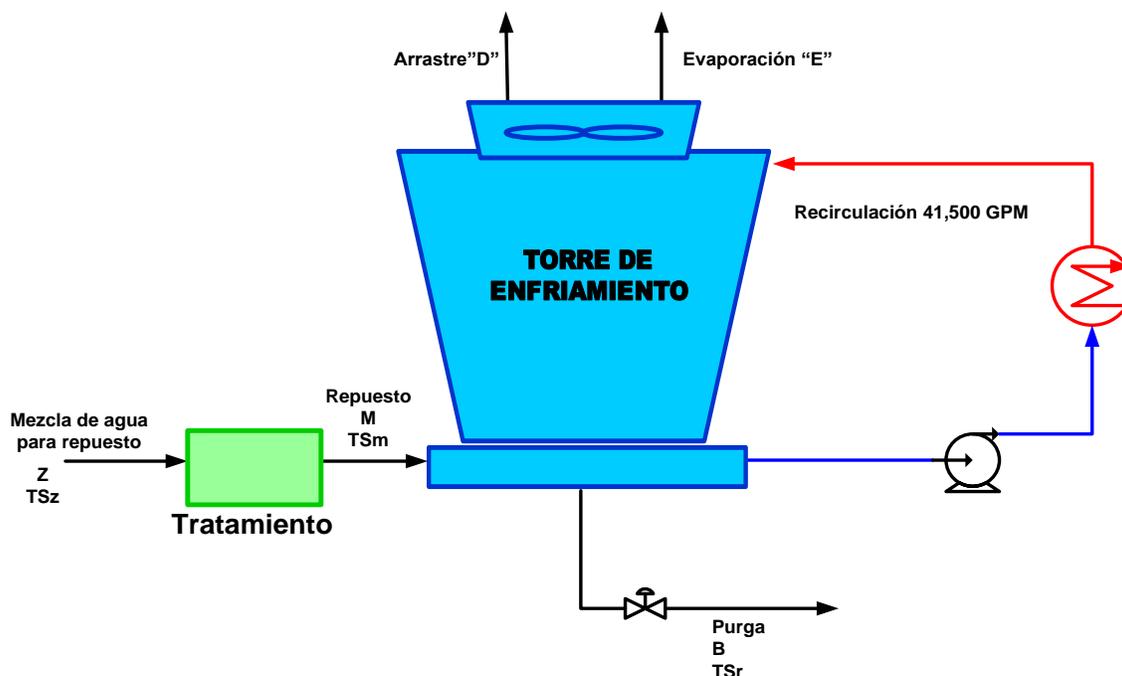


PARÁMETRO	UNIDAD	AGUA RESIDUAL TRATADA (Promedio)	AGUA DE POZOS (Promedio)	RECOMENDACIONES EPRI <sup>2</sup>
pH		7.3	7.9	7.8
Cloro Residual	mg/L	0.5	0.0	0.3
Sílice	mg/L	112	75.0	150
Turbidez	NTU	1.5	0.0	40
Fenoles	mg/L	0.0	0.0	-
Ciclos de concentración		1.86		<3

Se puede observar que la concentración de sales en el agua de repuesto es elevada, considerando que el agua de enfriamiento, es decir el agua que corresponde a la recirculación de la torre debe tener máximo 150 mg/L de SiO<sub>2</sub> como lo reportan los límites de calidad reportados en la Tabla 45 (ver Anexo 1.).

La torre de enfriamiento del caso de estudio, suponiendo que se desee aplicar el tratamiento respecto a las tecnologías del tratamiento del agua en las torres de enfriamiento para que con el tiempo se incrementen los ciclos de concentración reportados en la refinera de 1.86 con la concentración del agua de purga constante, las ecuaciones de la Tabla 3 del balance de materia en torres de enfriamiento son útiles para predecir el ahorro de agua considerando el flujo del arrastre generado por la torre de enfriamiento, como se muestra en la Figura. 13.

Cabe mencionar que los ciclos de concentración están en función de la concentración de sílice en el agua de repuesto y el agua de recirculación por lo tanto en medida que disminuya la concentración del repuesto, aumentarán los ciclos de concentración.



**Figura. 13** Esquema de la opción de tratamiento en el agua de repuesto de la torre de enfriamiento.

Las variables consideradas en la Figura. 13 son las que se describen en la Tabla 7 para el cálculo de los nuevos flujos después del tratamiento.

**Tabla 7.** Variables para el balance de materia en el tratamiento de agua de repuesto

VARIABLES	VALORES
Flujo de Recirculación (GPM)	41,500
Días de Operación (días/año)	365
Delta de Temperatura (°F)	16.20
Arrastre =% de Recirculación	0.000025
Flujo de Mezcla de agua para repuesto=105% de Repuesto	
Concentración de sílice en la mezcla de agua para repuesto "TSz" (mg SiO <sub>2</sub> /L)	116



VARIABLES	VALORES
Concentración de sílice después del tratamiento suministrada como agua repuesto "TS <sub>m</sub> "=30% de TS <sub>z</sub> (mg SiO <sub>2</sub> /L)	30% de TS <sub>z</sub>
Concentración de sílice en el agua de purga "TS <sub>r</sub> "= (mg SiO <sub>2</sub> /L)	215

\*1GPM=5.45 m<sup>3</sup>/d

La memoria de cálculo para el balance de materia para el tratamiento en el agua de repuesto en la torre de enfriamiento descrita anteriormente se muestra a continuación:

Por lo tanto sustituyendo en las ecuaciones de la Tabla 3 incluyendo el arrastre de la torre de enfriamiento y las consideraciones de la Tabla 7 se obtiene:

$$E = \frac{R * \Delta T}{1000} = \frac{41,500 * 16.20}{1000} = 672GPM$$

$$D = 0.000025 * 41,500 = 1.00GPM$$

$$TS_m = 0.3 * TS_z = 0.3 * 116 \frac{mgSiO_2}{L} = 35 \frac{mgSiO_2}{L}$$

$$CC. = \frac{TS_r}{TS_m} = \frac{215 mgSiO_2/L}{35 mgSiO_2/L} = 6.2$$

$$B = \frac{E}{CC. - 1} - D = \frac{672}{6.20 - 1} - 1 = 108GPM$$

$$M = E + D + B = 672 + 1.00 + 108 = 780GPM$$

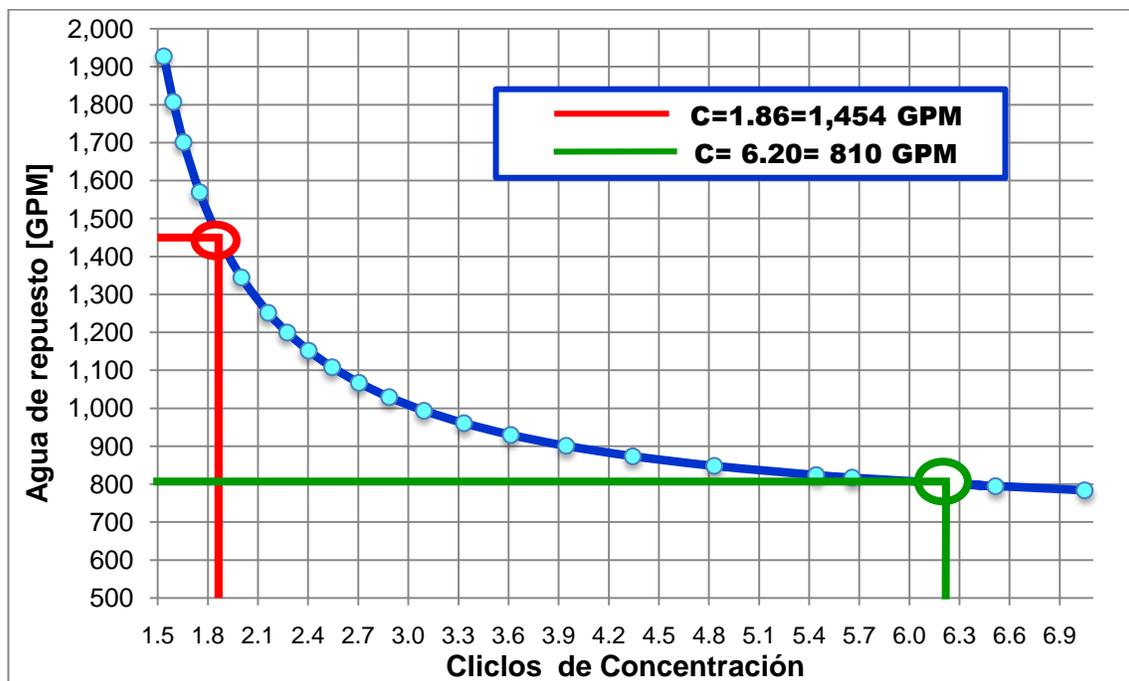
$$Z = 1.05 * 780 = 819GPM$$

La Tabla 8 muestra el aumento en los ciclos de concentración de 1.86 a 6.2 lo que representa un ahorro de 44 % (635 GPM) en el flujo del agua suministrada para el repuesto a la torre de enfriamiento, la Figura. 14 ilustra lo descrito.



**Tabla 8.** Ahorro en agua de repuesto a 6.2 ciclos de concentración

AGUA DE REPUESTO ACTUAL (m <sup>3</sup> /d)	AHORRO EN AGUA (m <sup>3</sup> /d)	%
7,926	4,464	44



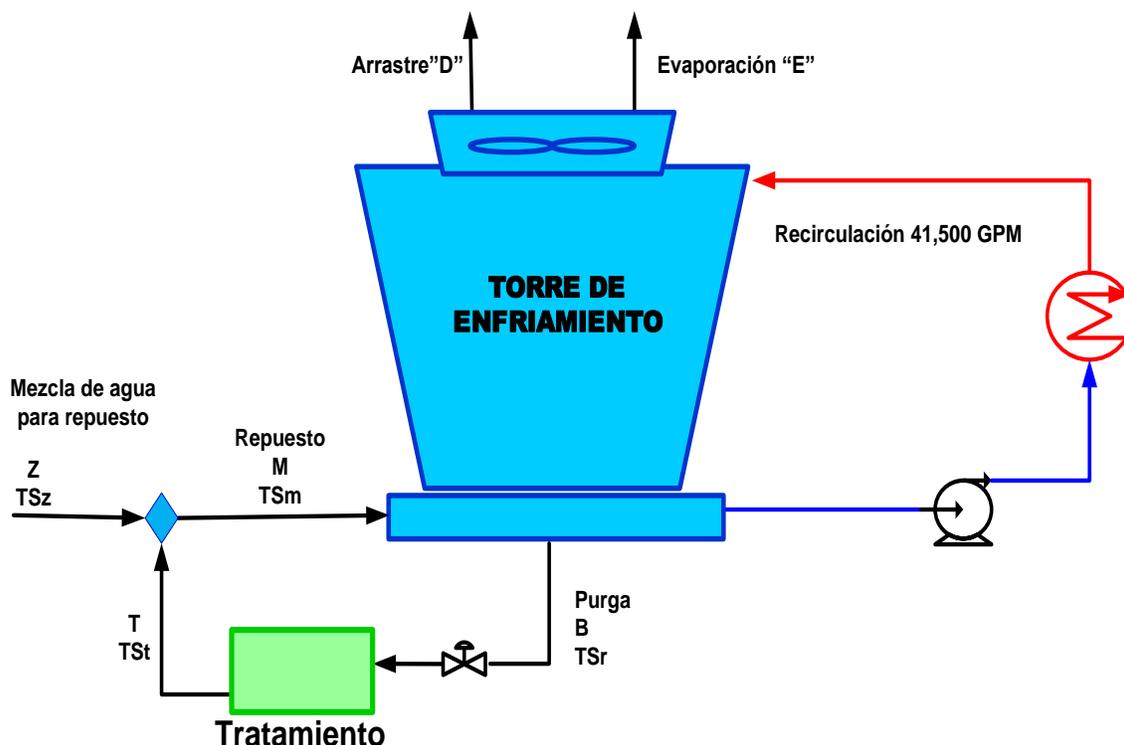
**Figura. 14** Ahorro en agua de repuesto con 6.2 ciclos de concentración para la primera opción.



#### 4.1.2. Opción 2. Tratamiento en el agua de purga

El agua de purga que se utiliza en la torre de enfriamiento del caso de estudio contiene una gran concentración de sales debido a la acumulación al realizarse los ciclos de concentración.

Las ecuaciones de la Tabla 3 del balance de materia en torres de enfriamiento son útiles para predecir el ahorro de agua que se tendrá en el caso de estudio suponiendo que se aplique un tratamiento de acuerdo a las tecnologías propuestas para incrementar los ciclos de concentración reportados en la refinería de 1.86 a 3 (Figura. 15).



**Figura. 15** Esquema de la opción del tratamiento del agua de purga en la torre de enfriamiento.

Considerando que los ciclos de concentración están en función de la concentración de sílice en el agua de reposición y el agua de recirculación por lo tanto en medida que



disminuya la concentración del repuesto aumentarán los ciclos de concentración. Pero la concentración del agua de repuesto está en función de la mezcla propuesta en el balance de materia.

Si se considera el flujo de la recirculación constante y los parámetros de la Tabla 9 para el cálculo de los nuevos flujos después del tratamiento, el balance de materia, para determinar la concentración de sílice en el agua de repuesto que se suministra a la torre de enfriamiento es:

$$MTS_m = ZTS_z + TTS_t \quad (31)$$

**Tabla 9.** Variables para el balance de materia en el tratamiento en el agua de purgas

VARIABLES	VALORES
Flujo de Recirculación (GPM)	41,500
Días de Operación (días/año)	365
Delta de Temperatura (°F)	16.20
Arrastre =% de Recirculación	0.000025
Flujo de Mezcla de agua para repuesto Z Z=M-T	-
Concentración de sílice en la mezcla de agua para repuesto "TSz" (mg SiO <sub>2</sub> /L)	116
Concentración de sílice suministrada como agua repuesto "TS <sub>m</sub> "	-
Concentración de sílice en el agua de purga "TS <sub>r</sub> "= (mg SiO <sub>2</sub> /L)	215
Flujo del agua tratada para repuesto "T" ; T=95%*B	-
Concentración de sílice después del tratamiento "TSt" (mg SiO <sub>2</sub> /L) = 10%*TSr	-

La ecuación anterior (31) tiene como incógnitas al flujo de repuesto (M), la concentración de sílice en el agua de repuesto (TSt), el flujo suministrado de la mezcla de agua para repuesto (Z) y el flujo de agua tratada para uso de repuesto (T), por lo que se supone la



concentración de sílice en el agua de repuesto para que se obtengan los ciclos de concentración recomendados en la Tabla 6:

Por lo tanto sustituyendo en las ecuaciones de la Tabla 3 incluyendo el arrastre de la torre de enfriamiento, las consideraciones de la Tabla 9 y suponiendo la concentración de sílice en el agua de repuesto se obtiene:

$$TS_m = 71.88 \frac{mgSiO_2}{L}$$

$$CC. = \frac{TS_r}{TS_m} = \frac{215 mgSiO_2/L}{72 mgSiO_2/L} = 3.00$$

$$E = \frac{R * \Delta T}{1000} = \frac{41,500 * 16.20}{1000} = 672 GPM$$

$$D = 0.000025 * 41,500 = 1.00 GPM$$

$$B = \frac{E}{CC. - 1} - D = \frac{672}{3.00 - 1} - 1 = 334 GPM$$

$$T = 0.95 * 334 GPM = 318 GPM$$

$$TS_t = 0.05 * TS_r = 0.05 * 215 \frac{mgSiO_2}{L} = 11 \frac{mgSiO_2}{L}$$

$$M = E + D + B = 672 + 1.00 + 334 = 1,007 GPM$$

$$Z = M - T = 1,007 - 318 = 689 GPM$$

Despejando la concentración de sílice en el repuesto y sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 31:

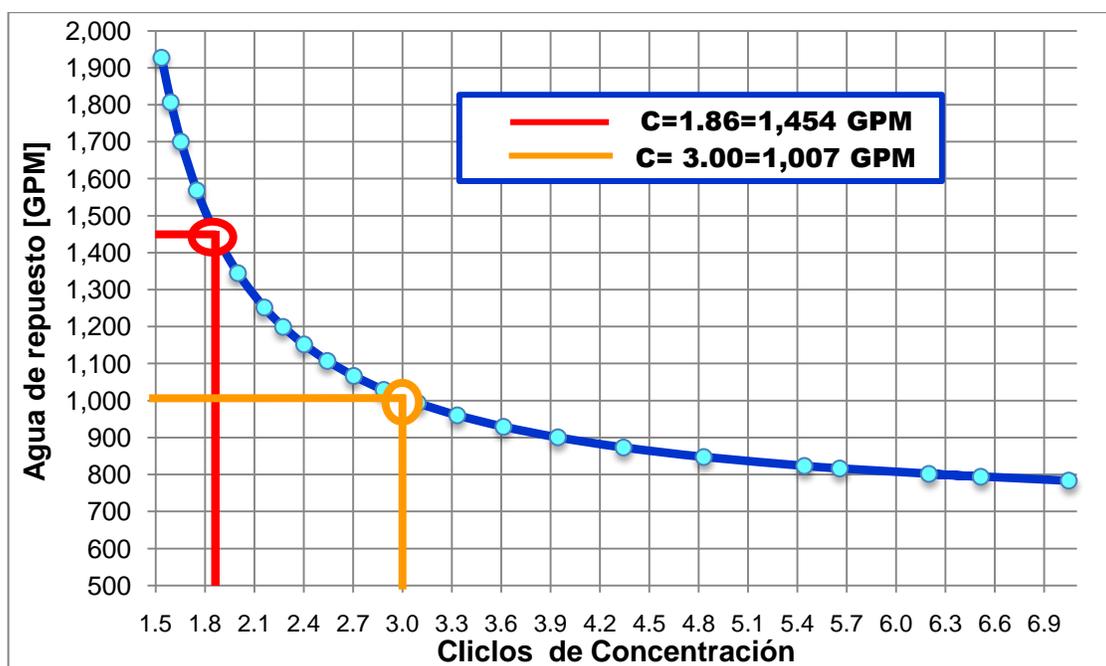
$$TS_m = \frac{ZTS_z + TTS_t}{M} = \frac{689 GPM * 116 mgSiO_2 / L + 318 GPM * 11 mgSiO_2 / L}{1,007 GPM} = 71.89 \frac{mgSiO_2}{L}$$



La Tabla 10 muestra el aumento en los ciclos de concentración de 1.86 a 3 lo que representa un ahorro de 53% (765 GPM) en el flujo de la mezcla de agua para repuesto a la torre de enfriamiento, la Figura. 16 ilustra el aumento de los ciclos de concentración respecto al agua de repuesto necesaria para la torre de enfriamiento.

**Tabla 10.** Ahorro en agua de repuesto a 3 ciclos de concentración

AGUA DE REPUESTO ACTUAL (m <sup>3</sup> /d)	AHORRO EN AGUA (m <sup>3</sup> /d)	AHORRO %
7,926	3,756	53



**Figura. 16** Ahorro en agua de repuesto con 3 ciclos de concentración para la segunda opción.

La ventaja que conlleva el tratamiento de este tipo de agua son dos de tipo ambiental, el reúso del agua descargada al drenaje pluvial y el ahorro de agua repuesto, suministrada de los pozos.



### 4.1.3. Análisis de las opciones de tratamiento de agua en la torre de enfriamiento

La comparación de los balances de materia para las diferentes opciones de tratamiento para el agua en la torre de enfriamiento, en la Tabla 11 y Figura. 17 muestran la comparación de los resultados obtenidos en estos balances de materia.

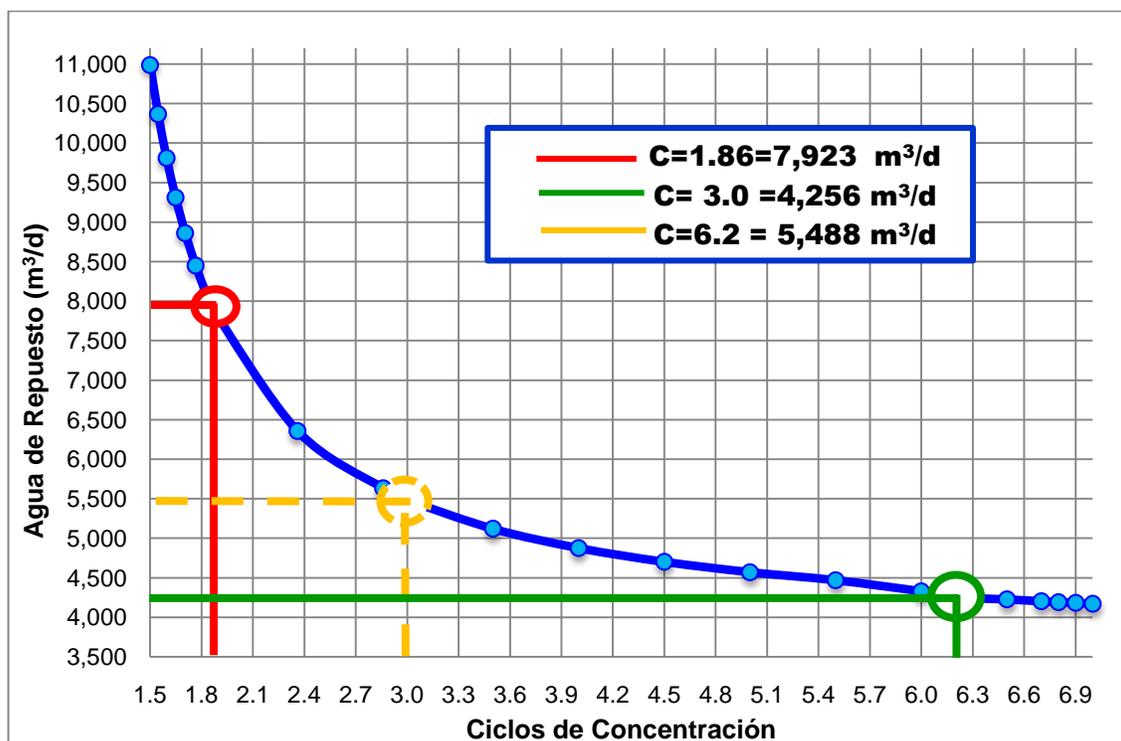
**Tabla 11.** Comparación de resultados obtenidos para las opciones de tratamiento en el agua de enfriamiento

VARIABLE	UNIDADES	SITUACIÓN ACTUAL	TRATAMIENTO AGUA DE REPUESTO	TRATAMIENTO AGUA DE PURGA
Evaporación	m <sup>3</sup> /d	3,662	3,662	3,662
Arrastre	m <sup>3</sup> /d	5	5	5
Purga	m <sup>3</sup> /d	4,256	589	1,821
Repuesto	m <sup>3</sup> /d	7,923	4,256	5,488
Reúso de agua tratada	m <sup>3</sup> /d	-	0	1,733
Ahorro de agua de repuesto	m <sup>3</sup> /d	-	3,461	4,168
Porcentaje de ahorro	%	-	44	53
Ventajas	-	-	✓ Mayor ahorro en agua de repuesto total	✓ Reúso de agua. ✓ Menor consumo de agua cruda (agua de pozos 63%*)
Desventajas	-	-	x Descarga del agua de purga al cuerpo emisor	x Infraestructura para la recolección del agua de la purga

\*El análisis del ahorro del agua de pozos se describe en la Tabla 12



En la Tabla 17 se observa que la opción de tratamiento en el agua de purga de la torre de enfriamiento es la mejor solución con el mayor ahorro de agua de repuesto, el reúso del agua tratada de purgas y la disminución de la descarga a un cuerpo receptor.



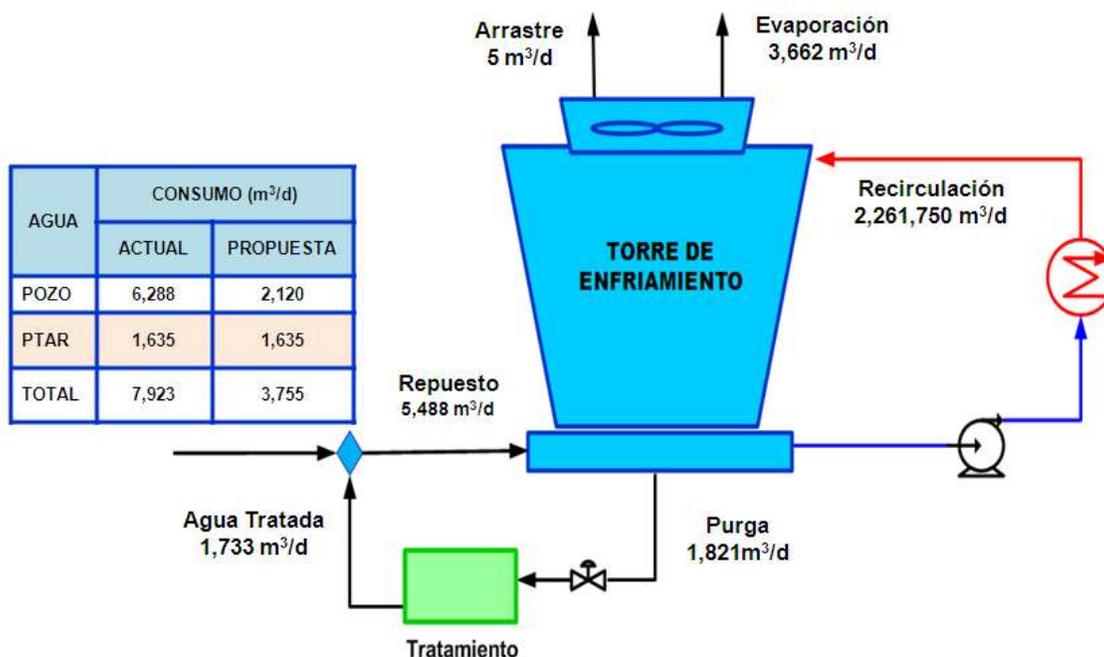
**Figura. 17** Ahorro en agua de repuesto para las dos opciones de tratamiento en el agua de enfriamiento.

La Figura. 17 representa la comparación del consumo total del agua de repuesto para cada una de las opciones de tratamiento, para la opción de tratamiento en el agua de purga (línea punteada) representa un mayor consumo de agua de repuesto pero el requerimiento del agua de la mezcla para repuesto es menor respecto al que se requiere para el tratamiento en el agua de repuesto, debido que la opción de tratamiento de purgas regresa el agua tratada como agua de repuesto a la torre de enfriamiento.

El ahorro del agua de repuesto es reflejado con el ahorro del agua de pozos debido a que esta agua tiene un mayor costo respecto al agua de la planta de tratamiento de aguas residuales. Retomando el capítulo 3 el porcentaje de distribución del agua de



repuesto es del 80% de agua de pozos y el 20% de la planta de tratamiento de aguas residuales. En la Figura. 18 se representa esta distribución de agua para el caso actual y la propuesta de tratamiento para la purga en la torre de enfriamiento.



**Figura. 18** Diagrama de la distribución suministrada como agua de repuesto en la torre de enfriamiento.

En el diagrama del agua suministrada como repuesto (Figura. 18) a la torre de enfriamiento del caso de estudio, se observa la disminución del consumo en el agua de pozos, el análisis de los ahorros de agua se describen en la Tabla 12.

La torre de enfriamiento de la caso de estudio operará a 3.0 ciclos de concentración con un consumo de 2,120 m<sup>3</sup>/d en agua de repuesto pozos, 16,635 m<sup>3</sup>/d en agua residual tratada y 1,733 m<sup>3</sup>/d de agua tratada de la purga. El ahorro del agua de pozos es de 66 % lo cual representa 4,168 m<sup>3</sup>/d.



Cabe mencionar que se dejará de enviar el agua de la purga de la torre de enfriamiento al drenaje pluvial dado que éste descarga directamente a un cuerpo emisor, se evitará la descarga de contaminantes al ambiente.

**Tabla 12.** Comparación de resultados del ahorro de agua

<b>VARIABLE</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>SITUACIÓN ACTUAL</b>	<b>TRATAMIENTO AGUA DE PURGA</b>
Agua de pozos	m <sup>3</sup> /d	6,288	2,120
Agua residual tratada	m <sup>3</sup> /d	1,635	1,635
Repuesto	m <sup>3</sup> /d	7,923	5,488
Reúso de agua tratada	m <sup>3</sup> /d	-	1,733
Ahorro de agua de pozos	m <sup>3</sup> /d	-	4,168
Porcentaje de ahorro	%	-	66



## 4.2. Evaluación técnica de las tecnologías

Uno de los objetivos de este trabajo es comparar tres alternativas tecnológicas, capaces de tratar el agua de repuesto o de purgas proveniente de las torres de enfriamiento de una refinería con el fin de obtener agua residual tratada que cumpla con los requerimientos para repuesto en estas mismas torres de enfriamiento.

Para poder realizar la comparación de las tecnologías se consideraron los siguientes factores y parámetros a evaluar:

1. Eficiencia de tratamiento
2. Disponibilidad de la tecnología
3. Requerimientos mínimos para operar
4. Infraestructura
5. Generación de subproductos e impacto en el ambiente
6. Costos

Para las siguientes tecnologías

- Precipitación química
- Electrocoagulación más ozonación
- Separación física por filtración con membranas.

Se solicitó información a los siguientes tecnólogos como se muestra en la Tabla 13:

**Tabla 13.** Tecnólogos de los procesos de tratamiento

PROCESO DE TRATAMIENTO	TECNÓLOGOS
Precipitación química	EMPRESA 1
Electroquímica con ozonación	EMPRESA 2
Separación física por filtración	EMPRESA 3



---

A continuación se describen a detalle cada una de las tecnologías de acuerdo a los factores y parámetros considerados.

#### **4.2.1. Precipitación química**

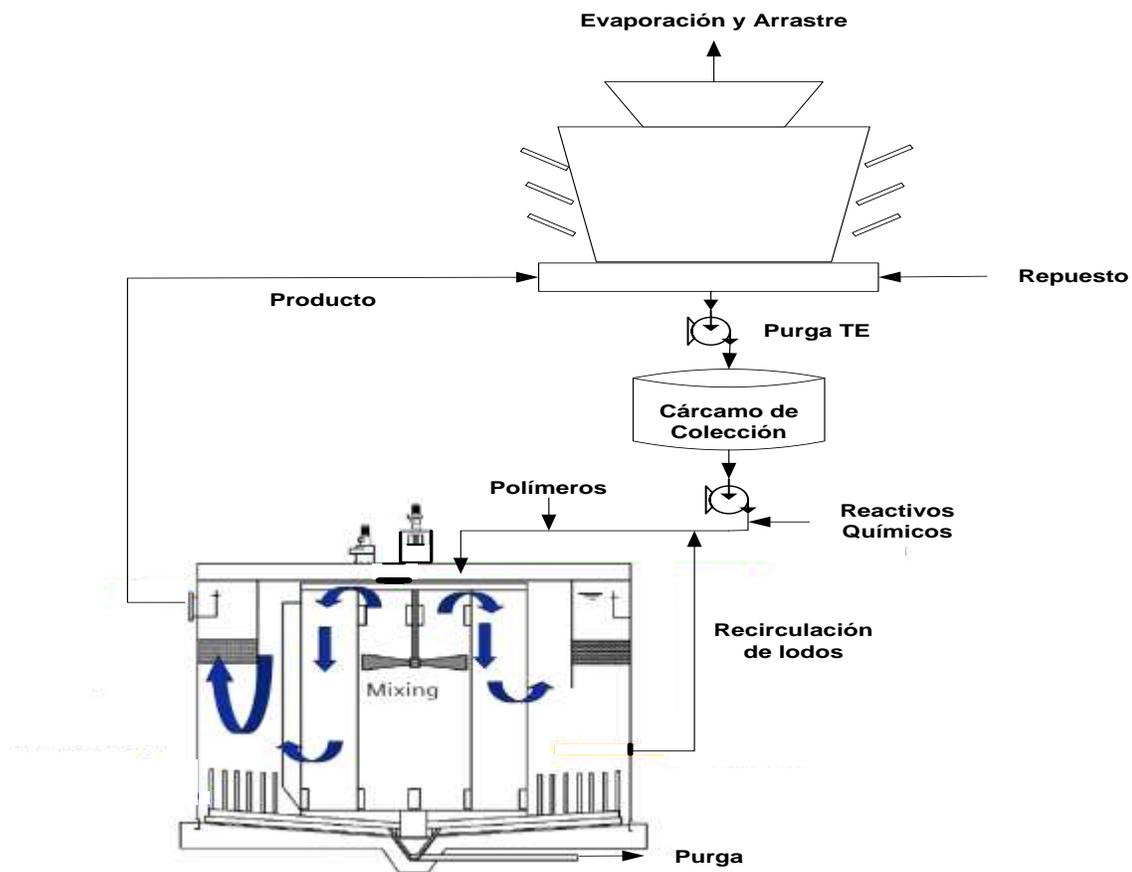
Uno de los procesos utilizados con mayor frecuencia para la reducción de dureza y sílice, es la precipitación con cal. Mediante la adición de cal hidratada al agua se precipita carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). Éste último forma flóculos más grandes que fácilmente adsorben o atrapan partículas de sílice presentes en el agua, de esta forma la sílice puede removerse con la precipitación del hidróxido de magnesio. La precipitación con cal se lleva a cabo en un reactor agitado (Figura. 19), en donde se adiciona el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y la soda ash ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ); en algunos casos se agrega hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) dependiendo de la dureza y la relación de alcalinidades. También se añade un coagulante y se recircula el lodo colectado en el clarificador. En otra cámara se añade el floculante. El tercer paso consiste en un clarificador por gravedad en el cual los flóculos que se han formado sedimentan y se envían al desaguado del lodo. La sílice precipitará con el magnesio en una relación estequiométrica de 1:1 de Mg con respecto a  $\text{SiO}_2$ , a pH 10.

El empleo de  $\text{CO}_2$  para la estabilización es muy común, de ahí el término "recarbonatación". La razón principal del uso preferencial de  $\text{CO}_2$  con respecto a los ácidos se debe a que estos incrementan la disolución de sólidos en el agua final, así mismo el  $\text{CO}_2$  logra llevar el pH a 9.5 aproximadamente, en este punto se presenta la máxima precipitación del carbonato de calcio.

El proceso de ablandamiento de agua mediante la adición de cal produce grandes cantidades de lodos, el volumen de éstos es aproximadamente 2.5 veces mayor a la cantidad de cal empleada inicialmente, debido a la combinación de cal con el calcio y magnesio contenidos en el agua y aunado a la formación de lodos en la etapa de coagulación posterior al ablandamiento. La disposición de estos lodos generalmente se realiza en lagunas, este método constituye la técnica más económica.



Es necesario deshidratar los lodos de cal carbonatos resultantes para lograr su adecuada disposición, mientras menor sea el volumen de lodos, menor será el costo. Estos lodos secan en tiempos razonables en lechos al sol, dichos lechos contienen membranas impermeables para proteger el suelo y evitar que se infiltre a los mantos freáticos. Cuando los lodos se secan, se remueven como finas capas que se llevan a un tratamiento posterior.



**Figura. 19** Esquema del proceso de tratamiento mediante precipitación química.

## 1. Eficiencia de tratamiento

La calidad que se alcanza mediante el proceso de precipitación química se muestra en la Tabla 14 y la eficiencia de remoción en la Tabla 15 En caso de existir



contaminación por presencia de hidrocarburos es necesario un tratamiento adicional para su remoción.

**Tabla 14.** Valores de calidad del agua tratada. Precipitación química

PARÁMETRO	CALIDAD DEL EFLUENTE
pH	10.0-11.0
Temperatura	-
Turbiedad (NTU)	<10.0
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	10
Alcalinidad total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	60
Dureza total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	<50
Calcio (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	<20
Magnesio (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	<20
Sílice total (mg SiO <sub>2</sub> /L)	<30

**Tabla 15.** Eficiencia de remoción de los principales contaminantes. Precipitación química

PARÁMETRO	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
pH	n/a
Temperatura	n/a
Turbiedad (NTU)	>90%
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	>83%
Alcalinidad total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	n/a
Dureza total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	96%-99%
Calcio (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	97%-99%



PARÁMETRO	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
Magnesio (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	92%-99%
Sílice total (mg SiO <sub>2</sub> /L)	79%-91%

## 2. Disponibilidad de la tecnología

La Empresa 1, provee la tecnología cuyo principio de operación está basado en la precipitación química. La tecnología proviene de Estados Unidos de América, sin embargo el sistema completo, así como sus refacciones, se pueden adquirir en México ya que existe un proveedor.

## 3. Requerimientos mínimos para operar

Todo el proceso se lleva a cabo en un solo reactor, lo que simplifica su instalación, operación y mantenimiento. El área requerida para su instalación es mínima comparada con otros sistemas, la Tabla 16 muestra las dimensiones para sistemas con distintas capacidades.

**Tabla 16.** Espacio estimado requerido para el sistema de acuerdo a la capacidad de tratamiento

CAPACIDAD (m <sup>3</sup> /h)	DIMENSIONES (m)
40	2.8 m diámetro x 5.6 m altura
80	3.9 m diámetro x 5.6 m altura
159	5.2 m diámetro x 5.6 m altura
318	7.3 m diámetro x 5.6 m altura

Requerimientos de insumos: De acuerdo a las características del proceso se requieren los insumos presentados en la Tabla 17.



**Tabla 17.** Requerimiento de insumos para la operación. Tratamiento por precipitación química

REACTIVO QUÍMICO	COSTO UNITARIO(pesos)	UNIDAD	CONSUMO (kg/m <sup>3</sup> )
Dióxido de magnesio	\$8.00	kg	0.174
Cal	\$ 2.50	kg	0.203
Sulfato ferroso	\$ 30.00	kg	0.022
Polímero catiónico	\$ 35.00	kg	0.001
<b>Total</b>			0.4

Requerimientos de energía. La energía consumida anual es 0.13 kWh/m<sup>3</sup> debido a la operación continua de los siguientes equipos:

- Una bomba de cavidad progresiva para la recirculación y purga de lodos: 2 Hp, 460 V, 60 Hz, corriente trifásica.
- Una bomba centrífuga para la alimentación de agua residual: 2 Hp, 460 V, 60 Hz, corriente trifásica.
- Motor para mezclador: 1.5 Hp, 460 V, 60 Hz, corriente trifásica, diseñado para ser manejado con un variador de frecuencia.

#### 4. Infraestructura

El sistema está construido en concreto, posee un sistema de control y automatización para las siguientes operaciones:

- Panel de control en acero inoxidable para la línea de operación automática.



- Panel de control en acero inoxidable para el variador de frecuencia del mezclador y arranque del motor.

## 5. Generación de subproductos o residuos

Como se mencionó, el proceso de ablandamiento de agua mediante la adición de cal produce grandes cantidades de lodos; además el sistema presenta las siguientes ventajas:

- ✓ Uso del lodo en la recirculación interna que favorece la formación de flóculos mejorando la precipitación de dureza y sílice.
- ✓ Produce lodos densos, el contenido de sólidos es mayor al 20%, lo que permite eliminar el uso de un espesador y requerimientos para su disposición final.

## 6. Costos

Los costos se estimaron para un tren de tratamiento con capacidad de 100 L/s. En la Tabla 18 se muestran los costos de insumos, costos de energía, costos de operación, y costos de inversión.

**Tabla 18.** Costos estimados para el tratamiento por precipitación química

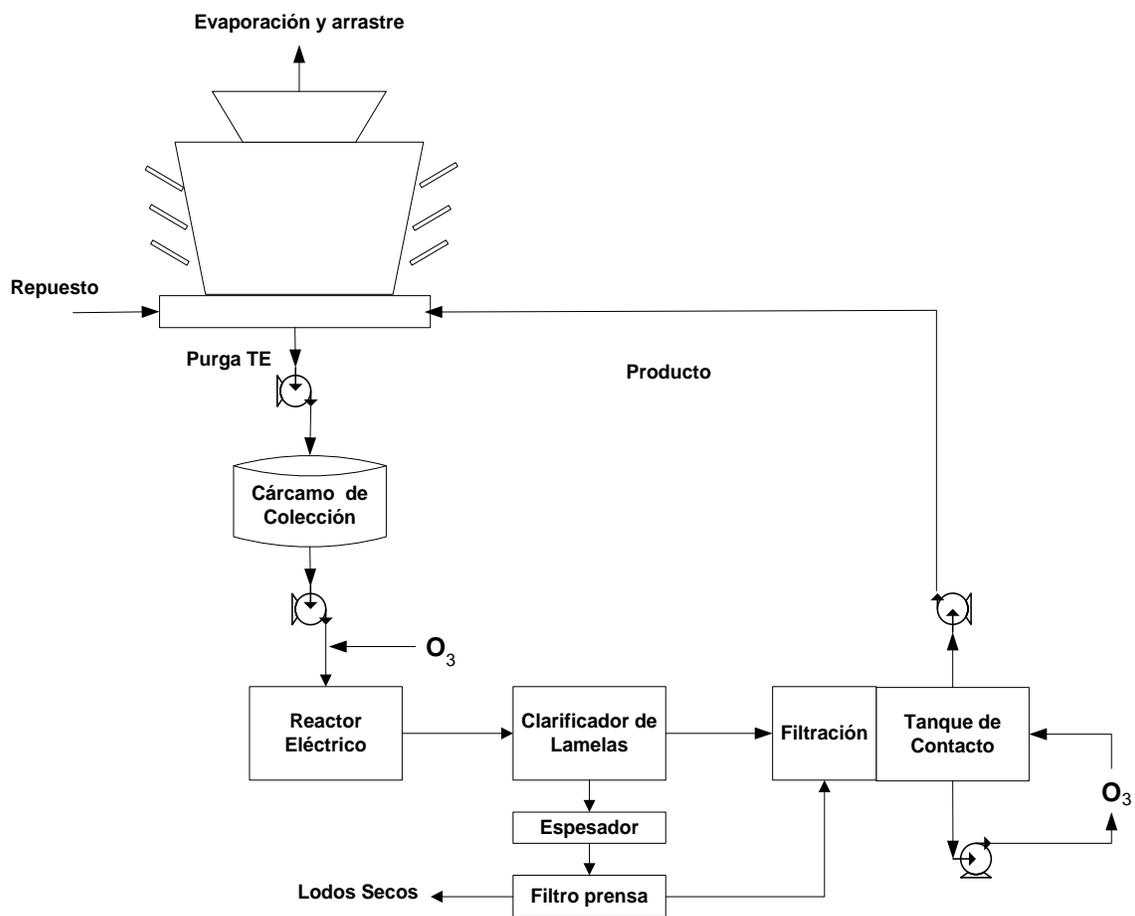
ELEMENTOS CONSIDERADOS	TOTAL
Capacidad de agua (m <sup>3</sup> /h)	360
Costos de insumos (pesos/m <sup>3</sup> de agua tratada)	2.58
Costos energéticos (pesos/m <sup>3</sup> de agua tratada)	0.117
Costos por mano de obra (pesos/m <sup>3</sup> de agua tratada)	0.25
Costos de operación (pesos/m <sup>3</sup> de agua tratada)	2.95



---

#### 4.2.2. Electrocoagulación con ozonación

El sistema de tratamiento propuesto por la Empresa 2, está constituido por un cárcamo de bombeo (opcional) y una cisterna dividida en tres módulos de tratamiento donde el agua fluye por gravedad. La descarga de las purgas es acumulada en un cárcamo de bombeo (opcional), de donde se envía un flujo constante al primer módulo el cual consiste en un reactor electrolítico; en éste existe un flujo iónico en el medio acuoso donde es cedido aluminio el cual forma un lodo que atrapa los contaminantes como sílice y dureza, mediante una densidad de corriente (amperaje) aplicada externamente mediante un rectificador de corriente. En asociación de las placas metálicas, ozono y un electrolito (cloruro de sodio), se favorece la coagulación-floculación de las sustancias coloidales y en suspensión contenida en las purgas o agua de repuesto de las torres de enfriamiento, formando como consecuencia lodos de tipo inorgánicos. El ozono es producido a partir del oxígeno separado del aire atmosférico. En esta misma etapa se genera cloro en sitio debido a la ruptura molecular del electrolito NaCl debido a la reacción electroquímica que se lleva a cabo en el reactor. Posterior a la floculación el flujo de agua se conduce de forma continua y en cascada al segundo módulo, el cual es un clarificador de lamelas donde son separados los lodos generados en la etapa anterior. Los lodos separados se envían a un filtro prensa, donde se retira la mayoría de agua contenida en los lodos, logrando aproximadamente 25% de humedad. El agua retirada de los lodos se reenvía al tanque de contacto. Por último, el flujo de agua atraviesa un tercer y último módulo, consistente en un filtro de arena, en el cual se separan las trazas de sedimentos que no fueron retenidas en el clarificador. En una segunda etapa del tercer módulo el agua clarificada se suministra ozono, para asegurar la desinfección de la misma. El agua tratada puede ser retornada a la torre de enfriamiento como agua de repuesto de calidad adecuada.



**Figura. 20** Esquema del proceso del tratamiento de purgas mediante la electrocoagulación con ozonación.

## 1. Eficiencia de tratamiento

El sistema de tratamiento puede alcanzar la eficiencia de remoción de contaminantes presentados en la Tabla 19. Logrando las concentraciones máximas presentadas en la Tabla 20.



**Tabla 19.** Eficiencia de remoción de los principales contaminantes para el tratamiento por electrocoagulación con ozonación

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>EFICIENCIA DE REMOCIÓN</b>
Sílice	100 %
Dureza	50 -70 %
Turbidez	100 %
Microorganismos	90 %
Sólidos suspendidos totales	100 %
Grasas y aceites	80 - 90 %
Sólidos disueltos totales	10%

**Tabla 20.** Calidad máxima del agua tratada del tratamiento por electrocoagulación con ozonación

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>CALIDAD MÁXIMA</b>
Sílice	0 mg/L
Dureza	80 -100 mg/L
Turbiedad	2- 3 NTU
Microorganismos	100 NMP/100 mL

El sistema es capaz de operar a las condiciones de presión y temperatura (Tabla 21) acordes a las características ambientales donde se la torre de enfriamiento del caso de estudio.



**Tabla 21.** Condiciones de operación para el tratamiento por electrocoagulación con ozonación

<b>PRESIÓN</b>	<b>TEMPERATURA</b>
Atmosférica	15 – 90°C

De acuerdo a estimaciones realizadas por el proveedor, el sistema de tratamiento propuesto podría aumentar de 1.86 ciclos (actual) a más de 3 ciclos de concentración. Debido a la capacidad oxidante del ozono, el sistema no presenta limitaciones en la operación por presencia de contaminantes de difícil degradabilidad (ejemplo: fenoles, hidrocarburos).

De acuerdo a lo anterior, el tren de tratamiento propuesto por la Empresa 2, cuenta con un sistema de tratamiento relativamente sencillo en operación, mantenimiento y control, resultando altamente eficiente en la remoción de los principales contaminantes presentes en el agua de repuesto y las purgas de las torres de enfriamiento, sin presentar limitaciones por la presencia de hidrocarburos.

## **2. Disponibilidad de la tecnología**

La Empresa 2 es una empresa 100% mexicana, así como la tecnología propuesta. La misma empresa se encarga de construir en el país los equipos electrónicos del sistema de tratamiento, por tanto, se facilita el mantenimiento, así como la disponibilidad de refacciones y accesorios durante la operación del sistema, disminuyendo las posibilidades de paro por la espera de piezas o equipos de importación.

## **3. Requerimientos mínimos para operar**

El sistema requiere de lo siguiente:

- ✓ Se requiere de placas metálicas, principalmente aluminio, para promover la coagulación-floculación de los contaminantes, aproximadamente  $72 \text{ g/m}^3$



de agua tratada, susceptible de optimización de acuerdo a pruebas de tratabilidad.

- ✓ Electrolito (cloruro de sodio), aproximadamente  $1\text{g/m}^3$ , el cual aumenta la conductividad, y por consecuencia disminuye el voltaje, reduciendo la potencia y por tanto el consumo de energía eléctrica. Generando a su vez cloro en sitio debido a la disociación molecular causada por el ozono, disminuyendo costos por consumo de biácidas.
- ✓ Polímero catiónico o aniónico, dependiendo de las pruebas de tratabilidad, 0.5 a 1 mg/L.
- ✓ Se requiere de  $1.5\text{ kWh/m}^3$  de agua tratada.
- ✓ Espacio requerido de acuerdo a la Tabla 22.

**Tabla 22.** Espacio estimado requerido para el sistema de acuerdo a la capacidad de tratamiento, para la Empresa 2

CAPACIDAD DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO (L/s)	ESPACIO REQUERIDO ESTIMADO (m <sup>2</sup> )
1	25 – 35
10	100 – 110
50	160 – 180
100	320 – 350
200	650 – 700

#### 4. Infraestructura

La infraestructura proyectada para el sistema de tratamiento considera obra civil, obra hidráulica y eléctrica, conformado básicamente por lo siguiente:



- ✓ Conexión del sistema a la descarga de las purgas de las torres de enfriamiento, así como conexión de la descarga del sistema de tratamiento al bacín de la torre.
- ✓ Fosas o cisternas de obra civil, las cuales se dividen en tres secciones: reactor electrolítico, clarificador de lamelas y filtro de arena incluyendo una sección de contacto de ozono.
- ✓ Concentrador de oxígeno, el cual separa el oxígeno del aire atmosférico.
- ✓ Generador de ozono a partir del oxígeno
- ✓ Rectificador de corriente
- ✓ Gabinete de control del sistema, el cual monitorea y controla los parámetros principales del sistema: sílice, dureza, pH, turbidez, conductividad, amperaje y voltaje.

## **5. Generación de subproductos o residuos**

Para un sistema de tratamiento de 360 m<sup>3</sup>/h se resume lo siguiente:

Se producen aproximadamente 2.5 a 3.0 toneladas de lodo/día con 25% de humedad, es decir, aproximadamente 350 mg lodo/m<sup>3</sup> de agua tratada los lodos generados podrían ser reprocesados para la recuperación de aluminio, requerido en las placas metálicas como ayuda en la coagulación-floculación. En este caso, el tratamiento y confinación estarán cubiertos por la Empresa 2.

## **6. Costos**

El esquema presentado por la Empresa 2, se estima un costo de \$5.00 a \$8.00/m<sup>3</sup> de agua tratada (El costo por operadores se estima de \$0.15 /m<sup>3</sup> agua tratada) en la Tabla 23 se observan los costos respecto al flujo de tratamiento.



**Tabla 23.** Costos de venta del sistema de acuerdo a la capacidad de tratamiento

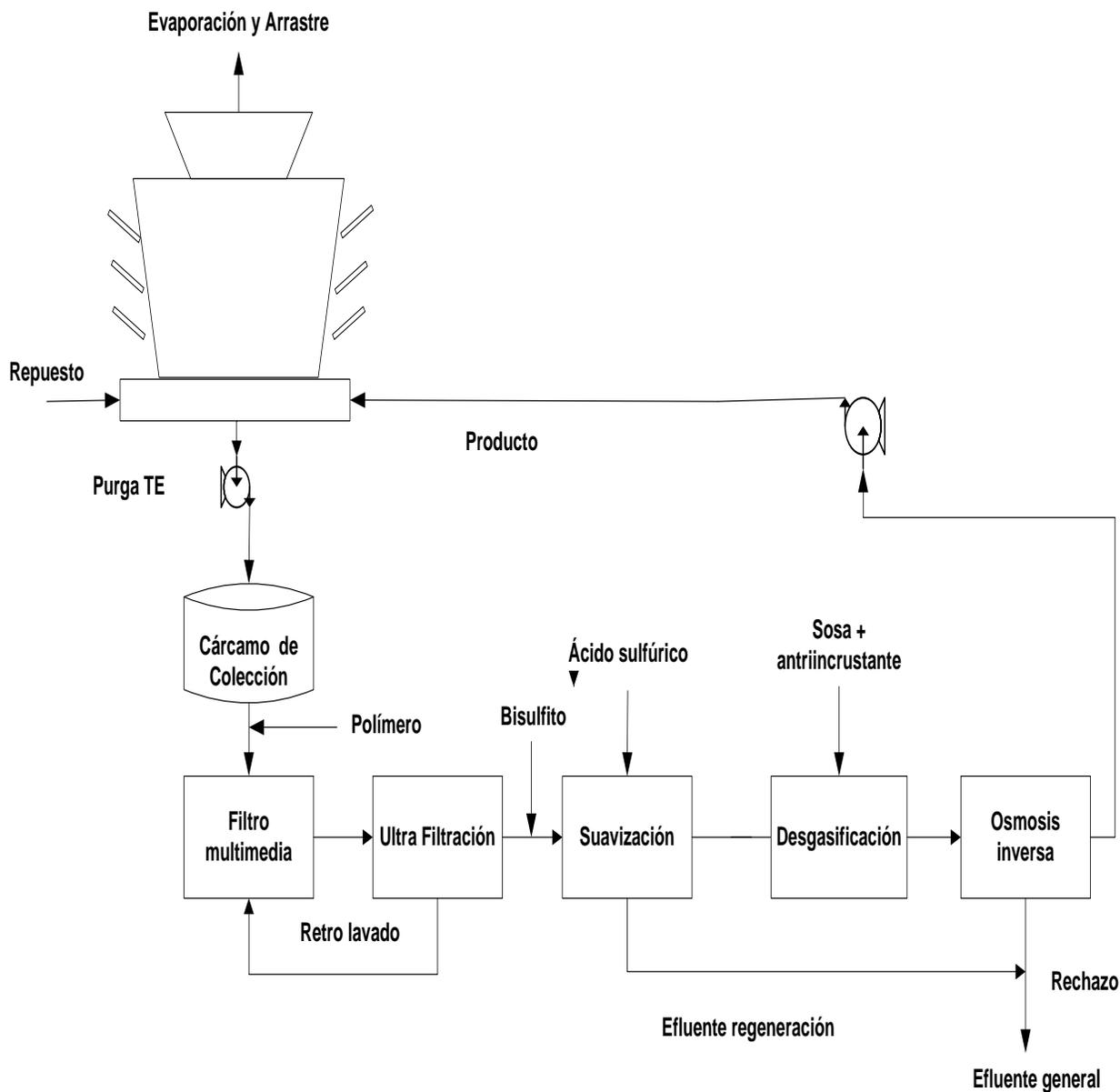
CAPACIDAD DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO (L/s)	COSTO DE VENTA ESTIMADO DEL SISTEMA (USD)
1	120,000
10	950,000
50	1,573,000
100	2,985,000
200	5,500,000

#### 4.2.3. Filtración por membranas

El principio de operación del tratamiento, se basa en la separación física de los contaminantes mediante el empleo de filtros y membranas (Figura. 21). El tren de tratamiento está constituido por un filtro multimedia empacado con grava, gravilla y antracita, mediante este filtro se obtendrá la remoción de sólidos suspendidos reduciendo su concentración hasta aproximadamente 30 mg/L; como siguiente paso la corriente pasa por las membranas de ultrafiltración cuya función es la de actuar como barrera selectiva para los sólidos en suspensión y coloides de origen biológico; una etapa de suavización en donde mediante la adición de una base se alcanza el balance dureza/alcalinidad incrementando la eficiencia de la resina para remover cationes (sales y sílice). Los hidrógenos presentes en la resina, se intercambian con los cationes presentes en el agua alimentada, al disminuir el pH se forma ácido carbónico y dióxido de carbono. Se adiciona ácido para convertir la alcalinidad remanente en dióxido de carbono, el cual se remueve en la etapa de desgasificación. Este paso mejora la calidad del agua que ingresará a las membranas de Ósmosis Inversa (OI) y reduce la cantidad de compuestos químicos que se requerirán para subir el pH en la etapa posterior. Se añade una base hasta alcanzar un pH de 10.5 a fin de incrementar la solubilidad de la sílice además de destruir los organismos presentes. Como etapa final, se utiliza un



sistema de ósmosis inversa, en donde la sílice disuelta se retendrá, se reporta que la recuperación del filtrado en esta etapa se encuentra alrededor del 85%.



**Figura. 21** Esquema del sistema de tratamiento de purgas mediante separación física por filtración con membranas.



## 1. Eficiencia de tratamiento

El sistema está diseñado para tratar las purgas provenientes de torres de enfriamiento. La planta se considera en paso simple (single pass), con una recuperación del 95% suponiéndose que se desee producir 100 L/s (1,600 GPM), la temperatura de diseño es de 25°C. El sistema de OI propuesto consiste en un tren que entregará 30 L/s (400 GPM). El flux permeado se conserva en 2.20 L/m<sup>2</sup>h (14 GFD<sup>3</sup>). El pretratamiento consta un tren de ultrafiltración de 37.88 L/s (500 GPM). El sistema es capaz de operar a las condiciones de presión y temperatura acordes a las características ambientales del caso de estudio. El tren de tratamiento propuesto, remueve sílice y sales disueltas, sin embargo es necesario un mecanismo adicional para la remoción de grasas y aceites, carbono orgánico total (COT), sílice coloidal y cloro. La calidad del agua tratada permite su reúso en el repuesto a torres de enfriamiento y dentro del proceso como agua a pulidor. Con este tratamiento se espera incrementar los ciclos de operación de las torres de enfriamiento de dos ciclos a cuatro. Los valores de la eficiencia de remoción en la Tabla 24.

**Tabla 24.** Eficiencia de remoción de los principales contaminantes. Separación física por filtración con membranas

PARÁMETRO	PORCENTAJE
SST (ppm)	<95%
Dureza	<100%
Sílice, SiO <sub>2</sub> (ppm)	<98%

## 2. Disponibilidad de la tecnología

Las refacciones y accesorios en caso de requerirse, son distribuidas por la Empresa 3, el tiempo estimado de reemplazo se muestra en la Tabla 25.

<sup>3</sup> Equivalente a las unidades americanas (gal/ft<sup>2</sup>-día)



**Tabla 25.** Tiempo estimado de reemplazo de accesorios. Separación física por filtración con membranas

ACCESORIO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	REEMPLAZO ESTIMADO
Membranas OI		225 unidades	<15% anual
Cartucho OI	35" L	26 por unidad x 4 unidades	cada 2 meses
Cartucho CIP OI	35" L	12 por unidad x 1 unidad	por año

### 3. Requerimientos mínimos para operar

El control y automatización del sistema permite la operación de la planta por un número reducido de operadores, se recomiendan dos operadores por turno y un supervisor. Adicionalmente se cuenta con un manual de operación y mantenimiento en formato digital y en idioma inglés.

La energía requerida para el tratamiento de agua es de 4.9 kWh/m<sup>3</sup> de agua tratada.

El suministro de energía debe presentar las siguientes características:

- Panel de control y bombas dosificadoras: 120 VAC/1 fase/60 Hz/20 Amps
- Motores de 200 HP: 460 VAC/3 fases/60 Hz

El consumo de los compuestos químicos puede variar dependiendo de las características del agua residual que va a tratarse. El consumo de insumos se muestra en la Tabla 26.



**Tabla 26.** Insumos requeridos para la operación. Separación física por filtración con membranas

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CONSUMO/m <sup>3</sup>
Energía	kWh	4.65
<b>Reactivos Químicos</b>		
Bisulfito de sodio	kg	0.01
Polímero	kg	0.006
Antiincrustante	kg	0.006
Ácido sulfúrico	kg	0.1
Sosa caústica	kg	0.1
<b>Consumibles</b>		
Resinas	m <sup>3</sup>	0.0000001
Membranas	Membrana	0.0001

Además de los insumos anteriores se requiere el suministro de aire comprimido para el encendido y apagado automático de válvulas, se requieren 4.53 m<sup>3</sup>/min (160 ft<sup>3</sup>/min) para alcanzar una presión de 80 psi.

#### 4. Infraestructura

Los materiales de la infraestructura son principalmente acero al carbón y acero inoxidable. Cuenta con un sistema de control distribuido, diseñado a base de microprocesadores completo, capaz de realizar totalmente el monitoreo del proceso, control modulante y control secuencial del proceso, de acuerdo a los desarrollos actuales en hardware y software. Toda la información para supervisión y control del proceso se concentra en el cuarto de control del sistema de tratamiento de agua, en éste, se debe tener una consola de operación con la capacidad para contener el equipo completo para la operación total del sistema de ósmosis inversa para ser manejada por el operador del



tipo PLC control de programación lineal (Power Line Communications)<sup>4</sup>. La consola tendrá monitor, teclado, Unidad de disco flexible y dispositivo de impresión láser. Este equipo deberá incluir los diagramas de control y mímicos del proceso necesario para una mejor interacción de la computadora con el operador lo cual permitirá la operación segura y eficiente del sistema. El sistema se adapta al espacio disponible y es flexible para de ampliación al 100%.

## 5. Generación de subproductos e impacto ecológico

Las corrientes de desecho generadas durante el tratamiento, provienen de la limpieza del filtro multimedia, de la regeneración de las resinas de intercambio iónico y de la corriente de rechazo de las membranas. Las corrientes aportadas por el filtro y las resinas se colectan en una fosa con el fin de neutralizarlas. Las membranas aportan aproximadamente el 15% de rechazo, esta corriente contiene la sílice retenida por las membranas por lo que su tratamiento consiste en la precipitación con óxido de magnesio.

## 6. Costos

Los costos estimados para el tratamiento mediante la separación física por filtración con membranas se muestran a continuación (Tabla 27 a la Tabla 31).

**Tabla 27.** Costos por consumo de productos químicos para el proceso. Separación física por filtración con membranas

DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO (pesos)	UNIDAD	CONSUMO/m <sup>3</sup>	COSTO(pesos)/m <sup>3</sup>
<b>PRODUCTOS QUÍMICOS</b>				
Bisulfito de sodio	\$ 5.06	kg	0.01	\$ 0.05
Polímero	\$ 23.40	kg	0.006	\$ 0.14

<sup>4</sup> Por significado en ingles.



DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO (pesos)	UNIDAD	CONSUMO/m <sup>3</sup>	COSTO(pesos)/m <sup>3</sup>
Antiincrustante	\$ 30.36	kg	0.006	\$ 0.18
Ácido sulfúrico	\$ 0.64	kg	0.1	\$ 0.06
Sosa cáustica	\$ 3.80	kg	0.1	\$ 0.38
<b>CONSUMIBLES</b>				
Resinas	\$ 38,982.00	m <sup>3</sup>	0.0000001	\$ 0.004
Membranas	\$ 6,440.00	Membrana	0.0001	\$ 0.64
			Total	\$1.45

**Tabla 28.** Costos por consumo de productos químicos para el tratamiento de la corriente de rechazo de las membranas

PRODUCTOS QUÍMICOS	COSTO UNITARIO (pesos)	UNIDAD	CONSUMO/m <sup>3</sup>	COSTO RECHAZO (pesos)/m <sup>3</sup>	COSTO AGUA TRATADA (pesos)/m <sup>3</sup>
Dióxido de magnesio	\$8.00	kg	0.174	\$1.39	\$0.21
Cal	\$2.50	kg	0.203	\$0.51	\$0.08
Sulfato ferroso	\$30.00	kg	0.022	\$0.65	\$0.10
Polímero catiónico	\$35.00	kg	0.001	\$0.03	\$ 0.004
			Total	\$2.58	\$0.39

**Tabla 29.** Costos por consumo de energía. Separación física por filtración con membranas

DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO (pesos)	UNIDAD	CONSUMO/m <sup>3</sup>	COSTO (pesos)/m <sup>3</sup>
Energía	\$ 0.90	kWh	4.65	\$ 4.19



**Tabla 30.** Costos por mano de obra. Separación física por filtración con membranas

	<b>Sueldo/d</b>	<b>personas/d</b>	<b>Costo</b>	<b>Costo (pesos)/m<sup>3</sup></b>
Supervisor	\$355	1	\$355	
Operador	\$265	6	\$1,590	
		<b>Total</b>	<b>\$1,945</b>	<b>\$0.25</b>

**Tabla 31.** Costos estimados para el tratamiento

<b>CAPACIDAD AGUA PERMEADA (GPM)</b>	<b>COSTO INVERSIÓN DE TRATAMIENTO FILTRACIÓN POR MEMBRANAS (USD)</b>	<b>COSTOS DE OPERACIÓN (pesos/m<sup>3</sup> de agua tratada)</b>
>50	1,652,352	12.76
50-100	2,617,421	8.96
100-300	3,022,813	7.63
300-500	6,034,536	6.47
50-700	7,105,995	6.28
700-1,000	8,185,207	6.14
1,000-1,500	9,265,00	5.89
1,500-2,500	13,121,875	5.75

#### 4.2.4. Evaluación técnica

Considerando los criterios con más importancia para cada tecnología los cuales son:

##### ⊕ Eficiencia del tratamiento

El tren de tratamiento propuesto debe garantizar que la calidad del efluente obtenido alcance los límites máximos establecidos para su reúso como agua de repuesto a torres de enfriamiento. La tecnología propuesta deberá ser capaz de operar bajo las



---

condiciones climáticas del lugar en donde se instalará y no deberá estar limitada debido a la presencia de contaminantes de difícil degradabilidad.

⊕ Disponibilidad de la tecnología

La fácil adquisición de equipo y refacciones necesarias después de un período de operación, será un punto importante a considerar ya que se debe garantizar que el tratamiento funcione correctamente en todo momento.

⊕ Requerimientos mínimos para operar

Se preferirá la estrategia de operación que incluya un número reducido de operadores y su capacitación para el buen manejo de la planta. Se tomará en cuenta la disponibilidad de manuales de operación y mantenimiento. Los insumos requeridos deberán ser de fácil adquisición y tanto éstos, como el consumo energía no deberán impactar en el costo debido a la operación y mantenimiento de la planta.

⊕ Infraestructura

El sistema deberá ser acorde con los requerimientos solicitados. La versatilidad de la infraestructura deberá permitir acoplarse al espacio disponible y ser susceptible de un aumento de capacidad a futuro. Los materiales utilizados para la infraestructura deberán poseer la calidad requerida para resistir los efectos de la intemperie y el uso de los reactivos químicos manejados durante la operación.

⊕ Generación de subproductos e impacto al ambiente

En este punto se compara el impacto al ambiente del sistema de tratamiento, se buscará que la estrategia para el tratamiento y disposición de los subproductos generados logre minimizar los efectos negativos en el ambiente o bien permita su aprovechamiento.



⊕ Experiencias en el tratamiento de agua

Se considerará como cumplimiento del parámetro, a la alternativa tecnológica que demuestre experiencia en la instalación y operación de plantas con capacidad similar además del tratamiento de agua con características similares al problema actual.

⊕ De acuerdo a las consideraciones anteriores, en la Tabla 32 se resumen los resultados obtenidos de cada tecnología.

**Tabla 32.** Características principales de las tecnologías para el tratamiento de agua de torres de enfriamiento de una refinería

PARÁMETROS	PRECIPITACIÓN QUÍMICA	ELECTROCOAGULACIÓN CON OZONACIÓN	SEPARACIÓN FÍSICA CON FILTRACIÓN POR MEMBRANAS
Eficiencia de tratamiento	Remoción de sílice y sales disueltas alcanzando la calidad requerida para agua de repuesto a torres de enfriamiento. Limitada por la presencia de hidrocarburos, se requiere un tratamiento adicional para su remoción.	Remoción de sílice y sales disueltas alcanzando la calidad requerida para agua de repuesto a torres de enfriamiento.	El efluente obtenido es agua desmineralizada.
Disponibilidad de la tecnología	Tecnología de Estados Unidos de América. Facilidad de adquisición del equipo y refacciones con las oficinas de venta ubicadas en México.	Tecnología mexicana. Construcción, mantenimiento, refacciones y accesorios disponibles en el país.	Tecnología de Estados Unidos de América. Facilidad de adquisición del equipo y refacciones con las oficinas de venta ubicadas en México.
Área requerida para la instalación	Mínimo requerimiento de espacio debido a que el tratamiento se lleva a cabo en un solo reactor. El sistema es susceptible de ampliación.	Mínimo requerimiento de espacio debido a que el tratamiento se lleva a cabo en un solo reactor. El sistema es susceptible de ampliación.	El sistema es susceptible de ampliación.
Requerimientos de mano de obra	Mínimo requerimiento de operadores debido al control y automatización del sistema, el costo se estima en \$0.25 pesos/m <sup>3</sup> .	Mínimo requerimiento de operadores debido al control y automatización del sistema, el costo se estima en \$0.25 pesos/m <sup>3</sup> .	Mínimo requerimiento de operadores debido al control y automatización del sistema, el costo se estima en \$0.25 pesos/m <sup>3</sup> .
Costo por consumo de productos químicos	2.58 pesos/m <sup>3</sup>	5.52 pesos/m <sup>3</sup>	1.45 pesos/m <sup>3</sup>



PARÁMETROS	PRECIPITACIÓN QUÍMICA	ELECTROCOAGULACIÓN CON OZONACIÓN	SEPARACIÓN FÍSICA CON FILTRACIÓN POR MEMBRANAS
Costos de energía	El consumo se estima en 0.117 pesos/m <sup>3</sup> . Bajo consumo de energía debido a que el equipo de bombeo es necesario sólo en el único tanque de reacción.	El consumo se estima en 2 pesos/m <sup>3</sup> .	El consumo se estima en 4.19 pesos/m <sup>3</sup> . Alto consumo de energía debido a la presión requerida en las membranas de OI.

De acuerdo a las premisas consideradas se toma como escala de calificación la escala de la siguiente Tabla 33.

**Tabla 33.** Escala de calificación de premisas

DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN
Premisa no disponible	0
Calificación mínima (pobre en esta premisa)	1
Calificación media (premisa promedio)	3
Calificación máxima (excelente en esta premisa)	5

En la Tabla 34 se realiza la comparación y la selección de las tecnologías propuestas en base a los parámetros seleccionados (eficiencia del tratamiento, disponibilidad de la tecnología, requerimientos mínimos para operar, infraestructura y generación de subproductos e impacto ecológico) para el tratamiento del agua de repuesto y de purga en las torres de enfriamiento.



**Tabla 34.** Resultados de la evaluación tecnológica para el tratamiento de purgas de torres de enfriamiento

PARÁMETRO	PRECIPITACIÓN QUÍMICA	ELECTROQUÍMICA CON OZONACIÓN	SEPARACIÓN FÍSICA CON FILTRACIÓN POR MEMBRANAS
Eficiencia de tratamiento	3	3	5
Disponibilidad de la tecnología	3	1	5
Requerimientos mínimos para operar	5	3	3
Infraestructura	3	3	3
Generación de subproductos e impacto ecológico	1	5	3

En base a la información expuesta y a la comparación de parámetros evaluados para las 3 tecnologías, se realiza la selección del tratamiento de purgas para las torres de enfriamiento en la Tabla 35.

**Tabla 35.** Selección de la tecnológica para tratamiento de purgas de torres de enfriamiento

PARÁMETRO	PORCENTAJE DE LA PREMISA	PRECIPITACIÓN QUÍMICA	ELECTROQUÍMICA CON OZONACIÓN	SEPARACIÓN FÍSICA CON FILTRACIÓN POR MEMBRANAS
Eficiencia de tratamiento	30	18	18	30
Disponibilidad de la tecnología	20	12	4	20
Requerimientos mínimos para operar	20	20	12	12



PARÁMETRO	PORCENTAJE DE LA PREMISA	PRECIPITACIÓN QUÍMICA	ELECTROQUÍMICA CON OZONACIÓN	SEPARACIÓN FÍSICA CON FILTRACIÓN POR MEMBRANAS
Infraestructura	15	9	9	9
Generación de subproductos e impacto ecológico	15	3	15	9
TOTAL	100	62	58	80

De los resultados anteriores, se demuestra que las tres tecnologías son técnicamente factibles para el tratamiento de purgas provenientes de las torres de enfriamiento. La tecnología de precipitación química presenta la gran desventaja de una alta generación de lodos por lo que su uso en la actualidad es cada vez menos común. Por otro lado, el proceso de tratamiento por electroquímica con ozonación no ha sido instalado en escalas mayores a 3 L/s la cual es una limitante porque el flujo requerido es mayor, pero de acuerdo al principio de tratamiento del tren e infraestructura no se observa limitante en su escalamiento, por lo cual se considera que podría operar satisfactoriamente para las purgas de las torres.

Así, de las alternativas presentadas la que obtiene mayor puntaje es la el proceso de filtración con membranas pues puede producir agua de repuesto con mejor calidad para las torres de enfriamiento. De acuerdo a las modificaciones y cambios en la infraestructura que se deben de realizar en la torre de enfriamiento para implementar el tratamiento de sus purgas de fondo, es recomendable que el tratamiento sea independiente a estas corrientes, esto es, extraer una corriente directamente del bacín para su exclusivo tratamiento.

#### 4.2.5. Análisis de la evaluación técnica de las tecnologías

Las características principales, así como las ventajas y desventajas de cada tecnología, se describen en la Tabla 36.



**Tabla 36.** Características principales ventajas y desventajas de las tecnologías para el tratamiento de purgas de torres de enfriamiento

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>PRECIPITACIÓN QUÍMICA</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Reducción de dureza y sílice por precipitación con cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>).</li> <li>➤ Empleo de CO<sub>2</sub> para la estabilización hasta un pH de 9.5 para facilitar la precipitación.</li> <li>➤ Agua efluente con: pH=10 a 11, Turbiedad&lt;10 NTU, SST=10 mg/L, Alcalinidad total=60 mg/L, Dureza total&lt;50 mg/L, Calcio&lt;20 mg/L, Magnesio&lt;20 mg/L y Sílice total&lt;30 mg/L.</li> <li>➤ Sistema construido en concreto con sistema de control y automatización.</li> <li>➤ Panel de control de acero inoxidable para purga automática y variador de frecuencia del mezclado y arranque de motor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Porcentajes de remoción: Turbiedad&lt;90%, ST&lt;83%, Dureza total 96-99%, Calcio 97-99%, Magnesio 92-99% y Sílice total 79-91%.</li> <li>✓ Todo el proceso se lleva a cabo en un solo reactor.</li> <li>✓ Mantenimiento y operación simple.</li> <li>✓ Mínima área de instalación.</li> <li>✓ Uso del lodo generado en recirculación interna, favoreciendo la formación de flóculos.</li> <li>✓ Producción de lodos densos, con contenido de sólidos mayor a 20%.</li> <li>✓ Disponibilidad de refacciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>x Produce grandes cantidades de lodos (2.5 veces mayor que la cantidad de cal empleada).</li> <li>x Disposición de lodos hacia lagunas posterior al deshidratado.</li> <li>x Se requiere de un sistema adicional de tratamiento en presencia de hidrocarburos.</li> </ul>
<b>ELECTROQUÍMICA CON OZONACION</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Reactor electrolítico con placas metálicas de aluminio.</li> <li>➤ Eliminación de sílice y dureza mediante coagulación-floculación por medio de una reacción electroquímica con catalizador (cloruro de sodio).</li> <li>➤ Se utiliza ozono para desinfección.</li> <li>➤ Requiere de un sistema de clarificación para</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tiene la capacidad de eliminación de grasas y aceites.</li> <li>✓ Porcentajes de remoción: Turbiedad 100%, SST&lt;83%, Dureza total 50-70%, Sílice total 100%, Microorganismos 90%, SST 100%, Grasas y aceites 80-90% y SDT 10%.</li> <li>✓ No presenta limitaciones de operación por presencia de contaminantes (p.ej. fenoles o</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>x Se produce cloro residual.</li> <li>x Por 100 L/s de agua a tratar, se producen 2.5 a 3 ton de lodo/d, con 25% de humedad, es decir, 350 mg lodo/m<sup>3</sup> de agua tratada.</li> </ul>



### PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

- separación de lodos y uno de filtración para retirar el agua contenida y los sólidos en suspensión.
- Agua efluente con: Turbiedad 2-3 NTU, Dureza total 80-100 mg/L, Sílice total=0 mg/L y Microorganismos=100 NMP/100mL.
- Sistema construido en concreto con sistema de control y automatización.
- Requiere la obra civil de fosas de tres secciones: reactor electrolítico, clarificador de lamelas y filtro de arena.

### VENTAJAS

- hidrocarburos).
- ✓ Sistema de tratamiento sencillo de operar y con mantenimientos simples.
- ✓ Disponibilidad de refacciones.
- ✓ Permite el control de las variables y parámetros tales como: sílice, dureza, pH, turbidez, conductividad, amperaje y voltaje.

### DESVENTAJAS

### SEPARACIÓN FÍSICA POR FILTRACIÓN CON MEMBRANAS

- Separación física con filtración y uso de membranas para remoción de sólidos suspendidos hasta 30 mg/L, coloides de origen biológico, sílice y sales disueltas.
- El filtro es del tipo multimedia empacado con grava, gravilla y antracita.
- Ultrafiltración de 1 tren.
- Ósmosis Inversa de 1 tren con dos etapas.
- Agua efluente con: Sílice total<10 mg/L, pH 8-9, SDT<150 mg/L, conductividad<250  $\mu$ mhos/cm.
- El material de construcción es acero al carbón e inoxidable.
- La regeneración de resinas se realiza con óxido de magnesio para eliminar la sílice retenida.

- ✓ Porcentajes de remoción: SST<95%, Dureza total<100% y Sílice total<98%.
- ✓ Requiere de un número reducido de operadores por ser un proceso automatizado.
- ✓ Cuenta con sistema de control distribuido diseñado a base de microprocesadores.
- ✓ El sistema se adapta de acuerdo al área disponible y es flexible para ampliación al 100%.

- x Uso de ácido y base para ajuste del pH.
- x Se requiere de un sistema adicional para la remoción de grasas y aceites, carbono orgánico total (COT), sílice coloidal y cloro.
- x Se requiere el suministro adicional de aire para el encendido y apagado automático de válvulas.
- x Se generan corrientes de desecho de limpieza de filtros, regeneración de resinas y de corrientes de rechazo de membranas, las cuales se envían a una fosa para neutralizarlas.



---

De acuerdo a la selección de la tecnología con mayor puntaje en las premisas evaluadas en la Tabla 36 se propone la tecnología de separación física por filtración con membranas que ofrece la Empresa 3; una tecnología que podría adaptarse mejor a los requerimientos para el tratamiento de purgas de las torres de enfriamiento en la refinería. Es importante resaltar algunas ventajas que presenta la tecnología, así como las consideraciones que se deberán tomar en cuenta para el éxito de su operación.

- ⊕ El tren de tratamiento propuesto, el cual consiste en un filtro multimedia, membranas de ultrafiltración, sistema de suavización y desgasificación, y un sistema de ósmosis inversa, garantiza la obtención de agua de alta pureza. El tren de tratamiento propuesto, remueve sílice y sales disueltas, sin embargo es necesario un mecanismo adicional para la remoción de grasas y aceites, carbono orgánico total (COT), sílice coloidal y cloro.
  - ⊕ El tratamiento mediante el uso de membranas, requiere el control riguroso de ciertos parámetros tales como temperatura y pH. Trabajar fuera de los intervalos establecidos para el tipo específico de membrana, repercutiría en el flujo y calidad del permeado obtenido.
  - ⊕ El tren de tratamiento previo a las membranas de ósmosis garantiza una reducción considerable del taponamiento de las membranas debido a la precipitación de material recalcitrante tal como la dureza y la sílice presente en la alimentación. Esto conlleva ventajas como reducción en la frecuencia de limpieza y mantenimiento de las membranas, además de la obtención de un mayor porcentaje de recuperación del permeado.
-



### 4.3. Evaluación económica

La evaluación económica se realizó tomando en cuenta dos criterios; el primero es la opción de tratamiento con mayor beneficio de ahorro de agua que de acuerdo a los balances realizados es el tratamiento de la purga de la torre de enfriamiento, el segundo es la mejor tecnología de acuerdo a la evaluación técnica, el resultado de esta evaluación es el tratamiento por la separación física con filtración por membranas, con estos dos criterios se realiza la evaluación económica con el siguiente procedimiento:

- I. Se calcula la inversión inicial, la cual incluye la instalación de equipo de tratamiento de separación física con filtración por membranas.
- II. Se calcula el flujo de agua tratada anual con la capacidad nominal del equipo de tratamiento y las horas efectivas de operación.
- III. Se calculan los costos fijos de producción respecto a los costos obtenidos para el tratamiento de las purgas de acuerdo a los costos proporcionados por el proveedor de la Empresa 3.

Los costos asociados a la metodología se describen en la Tabla 37.

**Tabla 37.** Estructura de costos fijos del tratamiento del agua de purga con la separación física con filtración con membranas

<b>COSTOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PURGA POR LA SEPARACIÓN FÍSICA CON FILTRACIÓN POR MEMBRANAS</b>		
<b>Conceptos Técnicos y Económicos</b>	<b>Unidades</b>	
Inversión inicial	USD	6,034,536
Capacidad nominal	m <sup>3</sup> /h	77
Vida Útil	años	20
Factor de planta nominal	%	90.0%
Horas efectivas de operación	horas	7,884.0
<b>Agua tratada anual</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>607,068</b>



---

---

**COSTOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PURGA POR LA SEPARACIÓN FÍSICA CON FILTRACIÓN POR MEMBRANAS**

---

Conceptos Técnicos y Económicos	Unidades	
Costo directo de instalación	USD/(m <sup>3</sup> /h) neto	78,371
Costo del capital	% anual	12%
Costo nivelado de inversión	USD/a-(m <sup>3</sup> /h)	10,492
Costo fijo de operación	USD/a-(m <sup>3</sup> /h)	2,351

---

- IV. Se calcula el costo variable de producción de acuerdo a los costos asociados a los productos químicos y el consumo de la energía eléctrica de la Tabla 38 tomando como referencia los costos descritos en la evaluación técnica de la separación física por filtración con membranas.

**Tabla 38.** Estructura de costos variables del tratamiento del agua de purga con la separación física con filtración con membranas

---

---

**COSTOS VARIABLES DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PURGA POR LA SEPARACIÓN FÍSICA CON FILTRACIÓN POR MEMBRANAS**

---

Conceptos Técnicos y Económicos	Unidades	Costo
Costo variable por consumo de energía eléctrica	\$USD/m <sup>3</sup>	0.54
Costo variable por producto químico	\$USD/m <sup>3</sup>	0.30
Costo variable de operación y mantenimiento	\$USD/m <sup>3</sup>	0.01

---

- V. Se estimaron los parámetros necesarios para utilizar los métodos de análisis tomando como referencia los porcentajes de la Tabla 39.
- 
-



**Tabla 39.** Consideraciones porcentuales de parámetros económicos

<b>PARÁMETRO</b>	<b>PORCENTAJE CON RESPECTO A LA INVERSIÓN INICIAL</b>
Costos de operación	1
Gastos fijos	1
Depreciación	5

VI. Se calculan los ahorros de acuerdo a los precios descritos en la Tabla 40

**Tabla 40.** Costo de las fuentes de ahorro.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>COSTO</b>
Agua de pozo como repuesto	\$USD/m <sup>3</sup>	0.75
Descarga de las purgas al cuerpo emisor	\$USD/m <sup>3</sup>	0.095

- VII. Con estimados de los costos y los ahorros, se calculan los flujos de efectivo para un periodo de 20 años utilizando Excel, en el año 5,10 y 15 se reinvierte la inversión inicial debido a que se considera que 5 años es el periodo en el que la rehabilitación de las bombas es indispensable..
- VIII. Considerando una TREMA del 12 % se calcula el VPN.
- IX. El TIR se calcula utilizando Excel, el cual requiere los flujos de efectivo durante el periodo del proyecto.
- X. Se calcula el PRI, con el método de interpolación, tomando en cuenta los valores obtenidos del VPN negativos y el inmediato valor del VPN positivo.



#### 4.3.1. Análisis de la evaluación económica.

Con base en el análisis de la opción de tratamiento en el agua de purga de la torre de enfriamiento y la evaluación técnica de los tratamientos en el agua de enfriamiento, en el presente trabajo se presenta una estimación de costos de la propuesta técnica más viable.

El caso de inversión inicial considera la instalación de un sistema de tratamiento en la purga de la torre de enfriamiento mediante el tratamiento de separación física por filtración con membranas, con una inversión de \$6,034,536 USD

Los costos operación, gastos fijos y costo de capital considerados para este caso se presentan en la Tabla 41.

**Tabla 41.** Costos para el tratamiento en la purga de la torre de enfriamiento mediante la separación física por filtración con membranas

CONCEPTO	VALOR
Costos variables de producción	\$983
Operación	\$180
Gastos fijos	\$1,150
Costo total	\$2,313
Depreciación	\$950
Costo total de producción	\$3,263
Capital de trabajo	\$2,313

Los ingresos estimados para este caso se presentan en la Tabla 42.



**Tabla 42.** Ahorros para el tratamiento en la purga de la torre de enfriamiento mediante la separación física por filtración con membranas

	UNIDAD	AGUA DE POZO COMO REPUESTO	DESCARGA DE LAS PURGAS AL CUERPO EMISOR
Costo unitario	\$USD/m <sup>3</sup>	0.75	0.095
Flujo de agua	m <sup>3</sup> /d	4,168	1,821
Consumo anual	m <sup>3</sup> /año	1,521,320	664,665
Ahorro	\$USD/año	1,140,990	63,143

Los índices económicos para el tratamiento en la purga de la torre de enfriamiento mediante la separación física por filtración con membranas se observan en la Tabla 43.

La opción de tratamiento del agua de purga de la torre de enfriamiento a través de la separación física por filtración con membranas, es técnicamente viable por la calidad de agua suministrada como repuesto, pero económicamente se observa en la Tabla 43 que el valor presente neto es negativo porque la inversión inicial no se recupera a través de los años debido a que los beneficios asociados no son rentables: estos benéficos están asociados al flujo del agua que se pretende tratar.

A continuación con los mismos criterios económicos considerados para el caso de estudio se realiza un análisis para diferentes flujos propuestos, para tratarlos con la tecnología de separación física por filtración con membranas y reusar el agua tratada como agua de repuesto a las torres de enfriamiento, el desglosé de las variables se encuentran en el Anexo 2.

Los resultados de la evaluación del tratamiento de separación física por filtración con membranas con los flujos propuestos se muestran a continuación (Tabla 44).



**Tabla 43.** Cálculo de VPN, TIR y PRI para el tratamiento en la purga de la torre de enfriamiento mediante la separación física por filtración con membranas

AÑO	FLUJO DE EFECTIVO	VP	VP ACUMULADO
0	0	- 6,034,536	-6,034,536
1	1,032,016	283,674	-5,750,862
2	1,032,016	283,674	-5,467,187
3	1,032,016	283,674	-5,183,513
4	1,032,016	283,674	-4,899,838
5	1,032,016	283,674	-4,616,164
6	1,032,016	283,674	-4,332,489
7	1,032,016	283,674	-4,048,815
8	1,032,016	283,674	-3,765,140
9	1,032,016	283,674	-3,481,466
10	1,032,016	283,674	-3,197,791
11	1,032,016	283,674	-2,914,117
12	1,032,016	283,674	-2,630,442
13	1,032,016	283,674	-2,346,768
14	1,032,016	283,674	-2,063,093
15	1,032,016	283,674	-1,779,419
16	1,032,016	283,674	-1,495,744
17	1,032,016	283,674	-1,212,070
18	1,032,016	283,674	-928,395
19	1,032,016	283,674	-644,721
20	1,032,016	283,674	-361,047
<b>VPN</b>	<b>-3,915,646</b>		
<b>TIR</b>	<b>-0.58051%</b>		
<b>PRI</b>	<b>No Recupera</b>		



En la Tabla 44 se observa que a partir de 2,736 m<sup>3</sup>/d se obtiene una tasa interna de retorno viable de acuerdo a la establecida para la evaluación económica que es del 12 %, para encontrar el flujo óptimo se gráfica (Figura. 22) los costos variables, costos fijos y costo total para cada uno de los flujos propuestos, adicionalmente el valor presente neto obtenido en la evaluación económica.

**Tabla 44.** Cálculo de VPN, TIR y PRI para diferentes flujos con el tratamiento en la purga de la torre de enfriamiento mediante la separación física por filtración con membranas

FLUJO		VPN \$ USD	TIR %	PRI
m <sup>3</sup> /d	GPM			
272	50	-1,510,963	No Disponible	No Recupera
545	100	-2,180,184	No Disponible	No Recupera
1,632	300	-4,321,362	No Disponible	No Recupera
1,848	350	-3,915,646	No Disponible	No Recupera
2,736	500	101,975	12.27%	7 años 8 meses
3,816	700	1,465,604	15.20%	6 años 9 meses
5,448	1,000	4,491,398	20.21%	4 años 10 meses
8,184	1,500	10,456,990	28.30%	3 años 2 meses
13,632	2,500	20,246,627	33.95%	2 años 7 meses

En la Figura. 22, la intersección de las curvas de los costos variables y los fijos representa el flujo óptimo en el cual los costos variables y fijos tienen un equilibrio; el flujo de 114 m<sup>3</sup>/d es el valor más viable de acuerdo al valor presente neto. Los flujos que se encuentran entre estos dos puntos representan la zona de viabilidad del tratamiento de separación física por filtración con membranas para llevar a cabo el reúso del agua tratada como agua de repuesto.

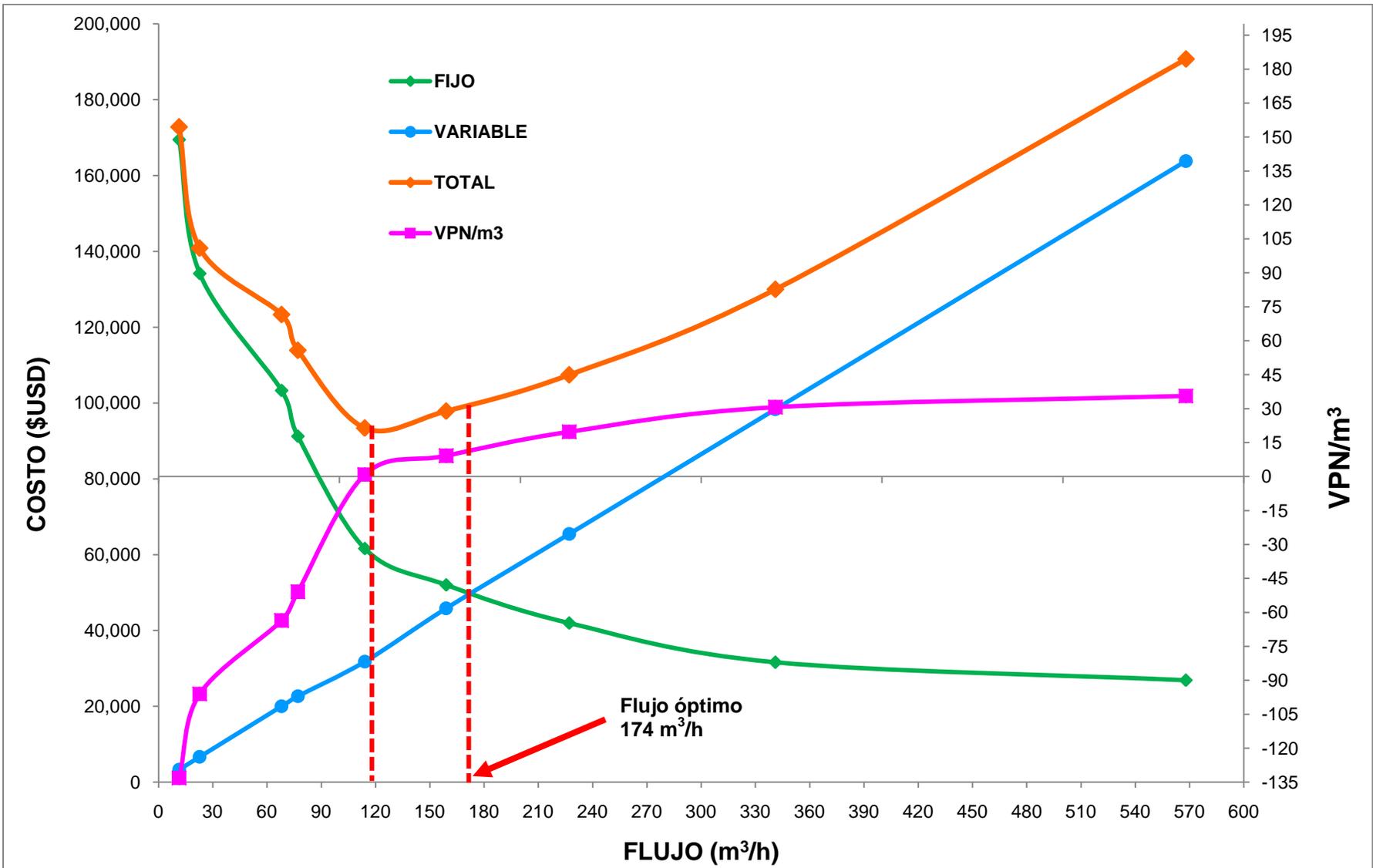


Figura. 22 Gráfica de la optimización del flujo de operación.



---

## Capítulo.5. CONCLUSIONES

A partir de la información bibliográfica consultada y de datos históricos de calidad de agua de la torre de enfriamiento que fue motivo del presente estudio, se constató que los contaminantes principales a eliminar ya sea en el agua de repuesto o en las purgas, en el caso del reúso de éstas son materia orgánica, sólidos disueltos, sales disueltas, dureza de calcio y sílice, además de microorganismos y algas que pueden provocar ensuciamiento en las torres de enfriamiento y en los equipos de intercambio de calor que reciban el agua de enfriamiento proveniente de dichas torres. Los métodos más comunes para eliminar los contaminantes antes mencionados son: precipitación química, electrocoagulación y ósmosis inversa. Para el caso de la remoción de la materia orgánica se consideran viables los procesos de oxidación avanzados. De las opciones anteriores los procesos que ofrecen mayores ventajas técnicas son los de membranas porque la remoción de los contaminantes disueltos es casi completa aunque se produce una corriente de desecho altamente salina.

Para cubrir el objetivo de ahorro de agua en una torre de enfriamiento se puede incidir en los siguientes aspectos: mantenimiento y/o cambio de los componentes principales de las torres, tratamiento del agua de repuesto para aumentar los ciclos de concentración o tratamiento de agua de purga para reutilizarla como agua de repuesto. En el presente trabajo se analizaron estas dos últimas opciones porque son las que representan mayor potencial ahorro de agua.

Las opciones propuestas para incrementar los ciclos de concentración en la torre de enfriamiento fueron:

- Opción 1: Ahorro de  $3,4615 \text{ m}^3/\text{d}$  en agua suministrada como repuesto mediante el aumento de los ciclos de concentración de 1.86 a 6.2 con el tratamiento de la agua de repuesto.



- Opción 2: Ahorro de 4,168 m<sup>3</sup>/d en agua suministrada como repuesto mediante el aumento de los ciclos de concentración de 1.86 a 3.0 con el tratamiento de la agua de purga y recircularla como agua de repuesto.

La opción 2 (*tratamiento en el agua de purga*) es la mejor para optimizar el uso de agua en la torre de enfriamiento del caso de estudio, esta opción utiliza menor cantidad de agua de repuesto proveniente de los pozos que representa un ahorro del 66% con respecto al flujo de agua utilizado en la situación actual.

En lo que se refiere a la evaluación técnica a los tres diferentes tratamientos de agua se concluye que las tres tecnologías analizadas cumplen con la calidad de agua requerida como agua de repuesto, pero la disponibilidad de la tecnología, los requerimientos mínimos para operar, infraestructura, generación de subproductos o residuos y costos mejor tratamiento que cumple estos criterios es el de separación física por filtración con membranas.

En el aspecto económico se evaluó la opción de tratamiento en el agua de purga con el tratamiento de separación física por filtración con membranas, de acuerdo a los resultados de la evaluación económica la opción de instalar el tratamiento en la torre de enfriamiento del caso de estudio no es factible debido a que los beneficios son menores respecto a los costos involucrados a la operación del sistema de tratamiento. Se realizó una evaluación económica para encontrar el flujo económicamente más conveniente para el tratamiento de separación física por filtración con membranas, el cual es de 4,176 m<sup>3</sup>/d, lo que significa que para que el tratamiento de las purgas de las torres de enfriamiento sea rentable debe buscarse tratar el mayor volumen posible lo cual se debe procurar colectar en un solo punto la mayoría de las purgas de las torres de enfriamiento de un mismo centro de trabajo como el del presente caso de estudio.



---

# BIBLIOGRAFÍA

## Artículos

- ⊕ Burger Robert (2000). "Cooling tower fill: The neglected money maker". Heat Transfer. Hydrocarbon processing. Julio 2000. pp.65-68.
- ⊕ Delenikos, Randy (2006). "*Rx for Cooling Towers*". Power Engineering. EUA. Vol. 110 Issue 11, pp. 68-74.
- ⊕ Huchler, Loraine (2000), "*Can you reduce your cooling tower blowdown rate*". Hydrocarbon Processing, Vol. 79 Issue 2, pp. 110, 121.
- ⊕ Katzel Jeanine (2000), "*Trends in cooling towers*". Plant Engineering Magazine. EUA. Vol. 54 Issue 1, pp. 38-42.
- ⊕ Smrekar J.,Sirok B. (2006) "Improving the efficiency of natural draft cooling towers", Energy Conversion and Management; Eslovenia; Faculty of Mechanical Engineering Vol. 44 pp 1086-1110.
- ⊕ Willa James (2005). "*Improve and Maintain Cooling Tower Efficiency*". Chemical Engineering Progress. New York. EUA. Vol. 101, April, No. 4; pp. 31.

## Libros y tesis

- ⊕ Cruz M. J. (2007). *Guía para la evaluación técnica de torres de enfriamiento en operación*. Tesis en Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM.
- ⊕ Coss Raúl (2006). *Análisis y evaluación de proyectos de inversión*, Limusa, México, pp. 61-63,73-75.
- ⊕ Baca Urbina G. (2003). *Fundamentos de Ingeniería Económica*. Mc Graw Hill, México, pp. 77-92.
- ⊕ Leland T Blank (1999). Ingeniería Económica. Mc Graw Hill, Colombia, pp. 386.
- ⊕ Hensley John (1998). "*Cooling Tower Fundamentals*", Marley Cooling Technologies, EUA, pp. 8-11.
- ⊕ Ramalho (1983), Tratamiento de aguas residuales, Reverté, México, pp 605-620



- 
- ⊕ Sapag Nassir (1997). *Criterios de evaluación de proyectos*, Mc Graw Hill, México.

### **Páginas Web**

- ⊕ ASTRAQUÍMICA. Torres de enfriamiento. ASTRAQUÍMICA S. A de C.V. Zapopan, Jalisco México, 22 Abril de 2007. Disponible en: <http://www.astraquimica.com/torres.htm>
- ⊕ Comisión Nacional para el ahorro de energía (CONAE). *Módulos Tecnológicos-Torres de enfriamiento* [en línea], 01 de marzo de 2009, [14 de marzo de 2009]. Disponible en: [http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA\\_442\\_1objetivo](http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_442_1objetivo)
- ⊕ Cooling Technology Institute (CTI). *What is a cooling tower?* [en línea], [15 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://www.cti.org/whatis/coolingtower.shtml>
- ⊕ North Carolina Department of Environment and Natural Resources (NCDENR) Water efficiency. *Water Management Options* [en línea], [04 de octubre de 2009]. Disponible en: <http://www.p2pays.org/ref%5C04/03101.pdf>
- ⊕ Proceso de Ozonación en agua de Manantial [en línea], [10 de noviembre de 2009]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/trataqua/peru/perapa031.pdf>
- ⊕ SPX Cooling Technologies (SPX). *Mechanical Draught Cooling Towers* [en línea], [28 de marzo de 2010]. Disponible en: [http://spxcooling.com/pdf/SPX\\_MechDraught\\_e.pdf](http://spxcooling.com/pdf/SPX_MechDraught_e.pdf)



## ANEXOS

### Anexo 1. Límites de calidad para el agua de purga en torres de enfriamiento

Tabla 45. Límites de calidad recomendados para agua de enfriamiento<sup>5</sup>

PARÁMETRO	LÍMITES RECOMENDADOS				
	Kunz (1977)	EPRI (1982)	EPRI (1998)	Sistemas de enfriamiento en Refinerías (1993)	RGLC
M Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	-	30-50 (nota 1) 200-250 (nota 2)	NE	-	-
Aluminio (mg/L)	1	-	<1	1	-
Calcio (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	300	900 (máx.)	NE	1,500 (máx.)	300 mg CaCO <sub>3</sub> /L (máx.)
Cobre (mg/L)	0.08	-	<0.1	0.5	0.5 mg/L (máx.)
Conductividad (µmhos/cm)	4000	-	-	-	3000 µmhos/cm (máx.)
DBO (mg/L)	-	-	-	200 (máx.)	-
DQO (mg/L)	-	-	-	200 (máx.)	-
Fosfatos (mg/L)	-	<5	NE	50 (máx.)	-
Hierro (mg/L)	0.5	-	<0.5	10 (máx.)	1.0 mg/L (máx.)
Manganeso (mg/L)	0.5	-	<0.5	1	-
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	-	-	<2	40 (máx.)	-
pH, unidades	8 (máx.)	6.8 - 7.2 (nota 1) 7.8 - 8.4 (nota 2)	-	7-9	7.2-7.8 máx.
SDT (mg/L)	2,500	70,000	-	-	1500 mg/L (máx.)
Sílice (mg/L)	150	150	150	300 (máx.)	240 mg/L (máx.)
SST (mg/L)	100-150	-	<100 (Nota 3) <300	200	100 mg/L (máx.)

<sup>5</sup> Límites recomendados de calidad de agua de enfriamiento de acuerdo a EPRI, Electric Power Research Institute, "Use of Degraded Water Sources as Cooling Water in Power Plants", October 2003; y Kunz, R. G., A.F. Yen, and T. C. Hess. "Cooling Water Calculations." Chemical Engineering (August) 61-71. 1977.



PARÁMETRO	LÍMITES RECOMENDADOS				
	Kunz (1977)	EPRI (1982)	EPRI (1998)	Sistemas de enfriamiento en Refinerías (1993)	RGLC
			(Nota 4)		
Sulfato (mg/L)	-	-	NE	5,000 (máx.)	-
Sulfuros (mg/L)	5	-	5	10	-
Velocidad de corrosión (mpa)					5.0 (máx.)
% Inhibición a la incrustación (SiO <sub>2</sub> )					90 (mín.)
% Inhibición a la incrustación (CaCO <sub>3</sub> )					90 (mín.)
Control bacteriológico					<300,000
Cuenta total bacteriana					Colonias/ml
Sulfato Reductoras (Bacterias/mL)					8.0 Máximo
Índice de estabilidad					5.5 min. - 7.5 máx.
Ciclos de Concentración					2.5 min. - 5.0 máx.
Ciclos de Concentración Cloro Residual (mg/L)					3.0 min. - 7.0 máx. 0.3 min. - 1.0 máx.
Turbiedad (NTU)					40 Máximo
Cloruros mg/L					600 Máximo



## Anexo 2. Cálculo de las variables económicas para el horizonte de evaluación, de los flujos propuestos para la optimización del flujo.

Año	Capacidad 11 m <sup>3</sup> /h (50 GPM)			Capacidad 23 m <sup>3</sup> /h (100 GPM)			Capacidad 68 m <sup>3</sup> /h (300 GPM)			Capacidad 114 m <sup>3</sup> /h (500 GPM)		
	(USD/año)			(USD/año)			(USD/año)			(USD/año)		
	FLUJO DE EFECTIVO	VP	VP Acumulado	FLUJO DE EFECTIVO	VP	VP Acumulado	FLUJO DE EFECTIVO	VP	VP Acumulado	FLUJO DE EFECTIVO	VP	VP Acumulado
0	0	-1,652,352	-1,652,352	0	-2,617,421	-2,617,421	0	-6,034,536	-6,034,536	0	-6,034,536	-6,034,536
1	152,122	18,929	-1,633,423	304,378	58,537	-2,558,884	911,390	229,358	-5,805,178	1,797,552	821,549	-5,212,987
2	152,122	18,929	-1,614,494	304,378	58,537	-2,500,347	911,390	229,358	-5,575,821	1,797,552	821,549	-4,391,439
3	152,122	18,929	-1,595,565	304,378	58,537	-2,441,811	911,390	229,358	-5,346,463	1,797,552	821,549	-3,569,890
4	152,122	18,929	-1,576,636	304,378	58,537	-2,383,274	911,390	229,358	-5,117,105	1,797,552	821,549	-2,748,342
5	152,122	18,929	-1,557,707	304,378	58,537	-2,324,737	911,390	229,358	-4,887,748	1,797,552	821,549	-1,926,793
6	152,122	18,929	-1,538,778	304,378	58,537	-2,266,200	911,390	229,358	-4,658,390	1,797,552	821,549	-1,105,245
7	152,122	18,929	-1,519,849	304,378	58,537	-2,207,663	911,390	229,358	-4,429,032	1,797,552	821,549	-283,696
8	152,122	18,929	-1,500,920	304,378	58,537	-2,149,127	911,390	229,358	-4,199,675	1,797,552	821,549	537,852
9	152,122	18,929	-1,481,991	304,378	58,537	-2,090,590	911,390	229,358	-3,970,317	1,797,552	821,549	1,359,401
10	152,122	18,929	-1,463,062	304,378	58,537	-2,032,053	911,390	229,358	-3,740,959	1,797,552	821,549	2,180,949
11	152,122	18,929	-1,444,133	304,378	58,537	-1,973,516	911,390	229,358	-3,511,602	1,797,552	821,549	3,002,498
12	152,122	18,929	-1,425,204	304,378	58,537	-1,914,979	911,390	229,358	-3,282,244	1,797,552	821,549	3,824,047
13	152,122	18,929	-1,406,275	304,378	58,537	-1,856,443	911,390	229,358	-3,052,886	1,797,552	821,549	4,645,595
14	152,122	18,929	-1,387,346	304,378	58,537	-1,797,906	911,390	229,358	-2,823,529	1,797,552	821,549	5,467,144
15	152,122	18,929	-1,368,417	304,378	58,537	-1,739,369	911,390	229,358	-2,594,171	1,797,552	821,549	6,288,692
16	152,122	18,929	-1,349,488	304,378	58,537	-1,680,832	911,390	229,358	-2,364,814	1,797,552	821,549	7,110,241
17	152	-133,041	-1,482,529	304,378	58,537	-1,622,295	911,390	229,358	-2,135,456	1,797,552	821,549	7,931,789
18	152	-133,041	-1,615,570	304,378	58,537	-1,563,758	911,390	229,358	-1,906,098	1,797,552	821,549	8,753,338
19	152	-133,041	-1,748,610	304,378	58,537	-1,505,222	911,390	229,358	-1,676,741	1,797,552	821,549	9,574,886
20	152	-133,041	-1,881,651	304,378	58,537	-1,446,685	911,390	229,358	-1,447,383	1,797,552	821,549	10,396,435



Año	Capacidad 159 m <sup>3</sup> /h (700 GPM)			Capacidad 227 m <sup>3</sup> /h ((1,000 GPM)			Capacidad 341 m <sup>3</sup> /h ( 1,500 GPM)			Capacidad 25000 GPM		
	(USD/año)			(USD/año)			(USD/año)			(USD/año)		
	FLUJO DE EFECTIVO	VP	VP Acumulado	FLUJO DE EFECTIVO	VP	VP Acumulado	FLUJO DE EFECTIVO	VP	VP Acumulado	FLUJO DE EFECTIVO	VP	VP Acumulado
0	0	-7,105,995	-7,105,995	0	-8,185,207	-8,185,207	0	-9,265,000	-9,265,000	0	-13,121,875	-13,121,875
1	2,507,112	1,147,555	-5,958,440	3,579,336	1,697,128	-6,488,079	5,376,888	2,640,356	-6,624,644	8,956,224	4,467,334	-8,654,541
2	2,507,112	1,147,555	-4,810,885	3,579,336	1,697,128	-4,790,950	5,376,888	2,640,356	-3,984,288	8,956,224	4,467,334	-4,187,206
3	2,507,112	1,147,555	-3,663,329	3,579,336	1,697,128	-3,093,822	5,376,888	2,640,356	-1,343,932	8,956,224	4,467,334	280,128
4	2,507,112	1,147,555	-2,515,774	3,579,336	1,697,128	-1,396,693	5,376,888	2,640,356	1,296,424	8,956,224	4,467,334	4,747,462
5	2,507,112	1,147,555	-1,368,219	3,579,336	1,697,128	300,435	5,376,888	2,640,356	3,936,780	8,956,224	4,467,334	9,214,797
6	2,507,112	1,147,555	-220,664	3,579,336	1,697,128	1,997,563	5,376,888	2,640,356	6,577,136	8,956,224	4,467,334	13,682,131
7	2,507,112	1,147,555	926,891	3,579,336	1,697,128	3,694,692	5,376,888	2,640,356	9,217,492	8,956,224	4,467,334	18,149,465
8	2,507,112	1,147,555	2,074,447	3,579,336	1,697,128	5,391,820	5,376,888	2,640,356	11,857,848	8,956,224	4,467,334	22,616,800
9	2,507,112	1,147,555	3,222,002	3,579,336	1,697,128	7,088,949	5,376,888	2,640,356	14,498,204	8,956,224	4,467,334	27,084,134
10	2,507,112	1,147,555	4,369,557	3,579,336	1,697,128	8,786,077	5,376,888	2,640,356	17,138,560	8,956,224	4,467,334	31,551,468
11	2,507,112	1,147,555	5,517,112	3,579,336	1,697,128	10,483,205	5,376,888	2,640,356	19,778,916	8,956,224	4,467,334	36,018,803
12	2,507,112	1,147,555	6,664,667	3,579,336	1,697,128	12,180,334	5,376,888	2,640,356	22,419,272	8,956,224	4,467,334	40,486,137
13	2,507,112	1,147,555	7,812,222	3,579,336	1,697,128	13,877,462	5,376,888	2,640,356	25,059,628	8,956,224	4,467,334	44,953,471
14	2,507,112	1,147,555	8,959,778	3,579,336	1,697,128	15,574,591	5,376,888	2,640,356	27,699,983	8,956,224	4,467,334	49,420,806
15	2,507,112	1,147,555	10,107,333	3,579,336	1,697,128	17,271,719	5,376,888	2,640,356	30,340,339	8,956,224	4,467,334	53,888,140
16	2,507,112	1,147,555	11,254,888	3,579,336	1,697,128	18,968,847	5,376,888	2,640,356	32,980,695	8,956,224	4,467,334	58,355,474
17	2,507,112	1,147,555	12,402,443	3,579,336	1,697,128	20,665,976	5,376,888	2,640,356	35,621,051	8,956,224	4,467,334	62,822,809
18	2,507,112	1,147,555	13,549,998	3,579,336	1,697,128	22,363,104	5,376,888	2,640,356	38,261,407	8,956,224	4,467,334	67,290,143
19	2,507,112	1,147,555	14,697,554	3,579,336	1,697,128	24,060,233	5,376,888	2,640,356	40,901,763	8,956,224	4,467,334	71,757,477
20	2,507,112	1,147,555	15,845,109	3,579,336	1,697,128	25,757,361	5,376,888	2,640,356	43,542,119	8,956,224	4,467,334	76,224,812