



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

EVALUACIÓN DE OPCIONES PARA  
OPTIMIZAR EL USO DE AGUA EN LAS  
TORRES DE ENFRIAMIENTO DE UNA  
REFINERÍA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO QUIMICO**

P R E S E N T A:

**RAÚL MIRANDA HEREDIA.**

ASESOR: DR. ALFONSO DURÁN MORENO.

México D. F.

Noviembre de 2007.





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.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres Raquel Heredia y Héctor Mata por todo el apoyo y comprensión que un hijo puede recibir.

A Servando, Araceli y Beatriz por su apoyo y cariño, los quiero hermanos.

A Madaì López Ruiz, por su cariño, sabes que eres la razón más importante de que quiera superarme y ser mejor persona cada día.

A Erick Salcedo Pérez el de Zapotitlán, échale ganas “men” solo es una época en esta vida.

A mis amigos de Zaragoza: David, Ricardo, Juan, Rodrigo, Edgar, Heriberto, Luís, Oscar, Fernando, Enrique, Jesús, Ruth y Román, por todos los momentos de franqueza y ocio en mi vida estudiantil.

A los nuevos camaradas de la torre de Ingeniería en especial al Ing. Jorge “La gorda” Mendiola, René Hernández, Pamela Tadeo y Enedino Varela.

Al Dr. Alfonso Durán Moreno por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente.

## CONTENIDO:

1	GENERALIDADES.....	1
1.1	Torres de enfriamiento.....	2
1.1.1	Capacidad de enfriamiento.....	3
1.1.2	Clasificación de torres de enfriamiento.....	3
1.1.3	Torres de tiro mecánico.....	5
1.1.4	Componentes de las torres de enfriamiento.....	7
1.2	Balance de materia en torres de enfriamiento y relación de las variables de operación.....	9
1.2.1	Disminución de purgas en torres de enfriamiento.....	13
1.3	Resumen.....	14
2	ACONDICIONAMIENTO DE AGUA EN TORRES DE ENFRIAMIENTO..	15
2.1	Corrosión.....	16
2.1.1	Prevención de la corrosión.....	19
2.1.2	Medición de la corrosión.....	20
2.1.2.1	Pruebas en intercambiadores de calor y procedimientos de control en sistemas de enfriamiento.....	20
2.1.2.2	Incrustación controlada de carbonato de calcio.....	21
2.1.2.3	Uso del índice de Langelier (ISL) para la saturación de carbonato de calcio.....	23
2.1.2.4	Índice de Stiff y Davis (SDI).....	25
2.1.2.5	Índice de estabilidad de Ryznar (ISR).....	25
2.1.2.6	Índice de Larson-Skold (L&SI).....	26
2.1.2.7	Índice de Incrustación de Puckorius (PSI).....	27
2.1.3	Inhibidores anódicos.....	28
2.1.3.1	Compuestos de cromato.....	28
2.1.4	Inhibidores catódicos.....	28
2.1.4.1	Polifosfatos.....	29
2.1.4.2	Películas protectoras.....	29
2.2	Deposición e incrustación.....	30
2.2.1	Precipitación y crecimiento cristalino.....	31
2.2.2	Condiciones para inhibir incrustaciones.....	32
2.2.3	Control de los efectos de la temperatura.....	33

2.2.4	Polifosfatos. ....	33
2.2.5	Metafosfatos. ....	34
2.2.6	Fosfonatos. ....	35
2.2.7	Dispersantes sintéticos. ....	36
2.2.8	Dispersantes para propósitos especiales. ....	37
2.3	Microbiología.....	38
2.3.1	Bacterias.....	38
2.3.2	Algas.....	38
2.3.3	Fungi.....	38
2.3.4	Ataque biológico. ....	38
2.3.5	Biocidas. ....	40
2.3.5.1	Biocidas misceláneos.....	41
2.4	Resumen.....	42
3	TRATAMIENTOS QUÍMICOS.....	43
3.1	Objetivos de los tratamientos químicos en el agua de enfriamiento. .	44
3.2	El suministro de agua.....	44
3.2.1	Consideraciones. ....	45
3.3	Selección de un programa de tratamiento. ....	47
3.3.1	Pretratamiento. ....	47
3.3.1.1	Intercambio iónico. ....	47
3.3.1.2	Osmosis Inversa.....	47
3.3.2	Tratamiento químico. ....	48
3.3.2.1	Tratamiento ácido.....	48
3.3.2.2	Cloración. ....	48
3.3.3	Poli fosfato -zinc-orgánico.....	49
3.3.4	Mercaptobenzotiazol-zinc-fosfonato. ....	49
3.3.5	Ferrocianido-zinc-polifosfato. ....	50
3.4	Resumen.....	50
4	CASO DE ESTUDIO.....	52
4.1	Descripción. ....	53
4.2	Análisis Preliminar.....	56
4.3	Opción 1: Mezcla de agua de pozos con agua desmineralizada. ....	59
4.4	Opción 2: Mezcla de agua de pozos con agua de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).....	62

4.5	Análisis del agua de la torre de enfriamiento. ....	65
4.5.1	Análisis de la opción 1. ....	65
4.5.2	Análisis de la opción 2. ....	67
4.6	Tratamiento químico. ....	70
4.6.1	Tratamiento en la torre de enfriamiento que opera con mezcla de agua de pozos-agua desmineralizada. ....	71
4.6.2	Tratamiento en torre de enfriamiento con mezcla de agua de pozos-agua PTAR. ....	73
4.7	Análisis de Resultados. ....	75
5	CONCLUSIONES. ....	77
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Criterios de aplicación de las torres de enfriamiento. ....	4
Tabla 2.	Principales componentes de las torres de enfriamiento. ....	8
Tabla 3.	Determinación de los parámetros operativos. ....	12
Tabla 4.	Ahorro en agua de repuesto. ....	14
Tabla 5.	Series electroquímicas de aleaciones seleccionadas. ....	16
Tabla 6.	Potencial de oxidación estándar de metales y aleaciones en algunas soluciones. ....	17
Tabla 7.	Escala del índice de estabilidad de Ryznar. ....	26
Tabla 8.	Índices de incrustación de CaCO <sub>3</sub> comúnmente usados. ....	27
Tabla 9.	Efectividad de los anti-precipitantes. ....	37
Tabla 10.	Análisis químico de seis tipos de agua de repuesto. ....	45
Tabla 11.	Condiciones óptimas para el tratamiento Polifosfato-Zinc- Orgánico. ....	49
Tabla 12.	Condiciones óptimas para el tratamiento mercaptobenzotiazol- zinc-fosfonato. ....	49
Tabla 13.	Condiciones óptimas para el tratamiento con ferrocianido-zinc polifosfato. ....	50
Tabla 14.	Opciones de programas de tratamiento para torres de enfriamiento. ....	51
Tabla 15.	Resultados del análisis estadístico en la torre. ....	54

Tabla 16.	Análisis de laboratorio en el agua de la torre de enfriamiento ....	56
Tabla 17.	Ciclos de concentración base a sales presentes. ....	57
Tabla 18.	Datos de operación de la torre de enfriamiento .....	58
Tabla 19.	Valores máximos para agua desmineralizada en la refinería. ....	59
Tabla 20.	Límites permisibles de agua de pozo en las torres de enfriamiento de la refinería. ....	59
Tabla 21.	Concentraciones del agua de recirculación con mezcla de agua de 80% de pozos y 20% de agua desmineralizada.....	60
Tabla 22.	Ahorro en agua de la mezcla agua de pozos-agua desmineralizada a 3.8 ciclos de concentración. ....	61
Tabla 23.	Límites permisibles de agua de PTAR en las torres de enfriamiento de la refinería.....	63
Tabla 24.	Concentraciones del agua de recirculación con mezcla: 50% de pozos y 50% de la PTAR.....	63
Tabla 25.	Ahorro en agua de la mezcla de agua de pozos con agua de la PTAR .....	64
Tabla 26.	Resultados de laboratorio de la mezcla: agua de pozos- agua desmineralizada. ....	65
Tabla 27.	Índices empleados para el diagnóstico de agua de pozos-agua desmineralizada. ....	66
Tabla 28.	Resultados de laboratorio de la mezcla: agua de pozos- agua de PTAR. ....	68
Tabla 29.	Índices empleados para el diagnóstico de agua de pozos-agua de PTAR. ....	68
Tabla 30.	Ahorro de agua debido al tratamiento químico propuesto en la opción 1. ....	73
Tabla 31.	Ahorro en agua debido al tratamiento propuesto en la opción 2.	74
Tabla 32.	Costo de agua y tratamientos propuestos .....	74
Tabla 33.	Evaluación de opciones para optimizar el uso de agua. ....	75
Tabla 34.	Evaluación de opciones en el ahorro de agua .....	76
Tabla 35.	Resultados; 10% agua desmineralizada-90% de agua de pozos. ...	84
Tabla 36.	Resultados; 20% agua desmineralizada-80% de agua de pozos. ...	84

Tabla 37.	Resultados; 30% agua desmineralizada-70% de agua de pozos. . . . .	85
Tabla 38.	Resultados; 40 % agua desmineralizada-60% de agua de pozos. . . . .	85
Tabla 39.	Resultados; 80% agua PTAR-20% de agua de pozos.....	87
Tabla 40.	Resultados; 70% agua PTAR-30% de agua de pozos.....	87
Tabla 41.	Resultados; 60% agua PTAR-40% de agua de pozos.....	88
Tabla 42.	Resultados; 50% agua PTAR-50% de agua de pozos.....	88
Tabla 43.	Condiciones para la dosificación continua .....	105
Tabla 44.	Condiciones para el choque .....	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Clasificación de las torres de enfriamiento. ....	3
Figura 2.	Esquema de una torre de enfriamiento de tiro forzado.....	6
Figura 3.	Torre de flujo a contracorriente y tiro inducido. ....	6
Figura 4.	Torre de doble flujo cruzado- tiro inducido. ....	7
Figura 5.	Sistema de recirculación en una torre de enfriamiento.....	9
Figura 6.	Requerimientos de agua de repuesto vs. Ciclos de concentración. 13	
Figura 7.	Oxidación del metal .....	17
Figura 8.	Corrosión en intercambiadores de calor .....	19
Figura 9.	Disposición típica de válvulas y conexiones para la instalación de elementos en pruebas de corrosión. ....	21
Figura 10.	Efectos de la incrustación del agua en tuberías.....	30
Figura 11.	Estructura del polifosfato. ....	33
Figura 12.	Protección del polifosfato.....	34
Figura 13.	Fórmula general de los fosfonatos.....	35
Figura 14.	Amino-metileno-fosfonato .....	35
Figura 15.	Formación de poliacrilamida. ....	36
Figura 16.	Poli acrilamida hidrolizada. ....	36
Figura 17.	Podredumbre blanca en el relleno de una torre de enfriamiento	40
Figura 18.	Incrustación en el relleno de una torre de enfriamiento. ....	40
Figura 19.	Torre de enfriamiento multicelda de tiro inducido y flujo cruzado	53
Figura 20.	Esquema del caso de estudio.....	54



Figura 21.	Ciclos de concentración reportados por la refinería.....	56
Figura 22.	Ciclos de concentración vs. agua de repuesto (condiciones reales). .....	58
Figura 23.	Ahorro en agua de repuesto con 3.8 ciclos de concentración. ...	62
Figura 24.	Ahorro en agua de repuesto con 3.1 ciclos de concentración. ...	64
Figura 25.	Cambio del Índice de Saturación de Langelier con los ciclos de concentración, caso: agua de pozos –agua desmineralizada. ....	67
Figura 26.	Cambio en el Índice de Saturación de Langelier con los ciclos de concentración, caso agua de pozos- agua PTAR. ....	69
Figura 27.	Concentración de dureza total a diferentes proporciones de la mezcla agua de pozos con agua desmineralizada.....	86
Figura 28.	Concentración de dureza de calcio a diferentes proporciones de la mezcla agua de pozos con agua desmineralizada.....	86
Figura 29.	Concentración de dureza total a diferentes proporciones de la mezcla agua de pozos con agua de PTAR. ....	89
Figura 30.	Concentración de dureza de calcio a diferentes proporciones de la mezcla agua de pozos con agua de PTAR. ....	89
Figura 31.	Valores para el cálculo de variables en C-TOWER .....	92
Figura 32.	Resultados de los cálculos en m <sup>3</sup> /día.....	92
Figura 33.	Resultados del cálculo en m <sup>3</sup> / hora .....	93
Figura 34.	Porcentaje en pérdidas del agua de recirculación vs ciclos de concentración.....	93
Figura 35.	Resultados por el efecto del tratamiento químico propuesto en la opción 1 .....	94
Figura 36.	Resultados de los cálculos m <sup>3</sup> /día .....	94
Figura 37.	Resultados de los cálculos m <sup>3</sup> /hora.....	95
Figura 38.	Porcentaje en pérdidas del agua de recirculación vs ciclos de concentración.....	95
Figura 39.	Resultados por el efecto del tratamiento químico propuesto en la opción 2 .....	96
Figura 40.	Datos de entrada para el sistema agua de pozos-desmineralizada.....	98
Figura 41.	Índices de saturación a diferentes ciclos de concentración .....	99
Figura 42.	Efectos de la temperatura en los índices de incrustación.....	99

Figura 43.	Datos de entrada para el sistema agua de pozos-PTAR .....	100
Figura 44.	Efecto de los ciclos de concentración con respecto a los índices de incrustación .....	101
Figura 45.	Efecto de la temperatura en los índices de incrustación.....	101
Figura 46.	Efecto de los ciclos de concentración con el costo anual de operación. ....	103

## INTRODUCCIÓN.

Las torres de enfriamiento de las refinerías son equipos que proporcionan agua a los intercambiadores de calor, enfriadores, o enchaquetado de otros equipos que se encuentran en las plantas de proceso.

El consumo elevado de agua de enfriamiento en las refinerías representa un problema que repercute ambiental y económicamente debido a que el agua cruda es un recurso no renovable y su explotación ocasiona cada vez más escasez 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.

Los problemas comunes que se presentan en las torres de enfriamiento de las refinerías es la falta de mantenimiento, escaso control del agua que circula en los equipos y tratamientos químicos que no dan resultados adecuados, éste último es un problema difícil de acometer, sobre todo a gran escala en cuanto a capacidad se refiere.

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar opciones para optimizar el uso de agua en las torres de enfriamiento, entendiendo optimización como el mayor ahorro posible de agua y los beneficios que esto conlleva.

En el primer capítulo se presenta el fundamento teórico, así como las variables de operación de las torres de enfriamiento.

El segundo capítulo analiza a los agentes que hacen necesario el acondicionamiento de agua en las torres de enfriamiento.

El tercer capítulo presenta el objetivo de los tratamientos químicos en el agua de las torres de enfriamiento.

El caso de estudio es similar al de una torre de enfriamiento de una refinería en el cual se evalúan dos opciones para optimizar el uso de agua en torres de enfriamiento aumentando los ciclos de concentración y la propuesta de un tratamiento químico adecuado.

Los cálculos para el análisis y evaluación de opciones para optimizar el uso de agua en la torre de enfriamiento del caso de estudio se respaldan con el programa “C-TOWER” para el consumo de agua y productos químicos y el programa “W INDEX” para la predicción de la calidad de agua en el sistema de enfriamiento.



# 1 GENERALIDADES.

## 1.1 Torres de enfriamiento.

“Una torre de enfriamiento es un equipo de transferencia de calor el cual enfría el agua debido al contacto directo con el aire atmosférico”.

(*STANDAR ASHRAE, 2000*).

Las torres de enfriamiento regulan el proceso de enfriamiento mediante la evaporación controlada, reduciendo así la cantidad de agua consumida, este proceso se logra cuando la gota de agua que se pone en contacto con el aire, se le evapora la película exterior, requiriendo para este proceso absorción de calor, el cual se toma de la propia gota, enfriándola consecuentemente, el enfriamiento se realiza tanto por calor sensible (cambio de temperatura) como por calor latente (cambio de estado físico).

La tasa de enfriamiento por evaporación es de gran magnitud en las torres de enfriamiento; alrededor del 90 % se debe al fenómeno difusivo. 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, el calor latente es cedido al aire obteniéndose enfriamiento del agua, aumento en la temperatura y humedad del aire.

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 de enfriamiento al que puede llegar el agua en el proceso de enfriamiento.

El objetivo a seguir en diseño de torres de enfriamiento es que la gota este 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.

### 1.1.1 Capacidad de enfriamiento.

En términos generales se puede decir que la capacidad de enfriamiento de una torre es la combinación de todas las variables involucradas en el diseño de la misma, esta capacidad indica la cantidad de agua que enfría la torre en condiciones de operación comparado con las condiciones de diseño, esto es entonces, el equivalente de la eficiencia térmica.

### 1.1.2 Clasificación de torres de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento son diseñadas y construidas de muchos tipos, con numerosos tamaños y modelos disponibles, es importante mencionar que no todos los modelos son apropiados para cada aplicación de carga térmica, ya que muchos tipos de torres representan ventajas como limitaciones en el sistema a tratar. (*SPX Cooling Technologies, 2006*).

La figura 1 muestra una forma usual de clasificar las torres de enfriamiento.

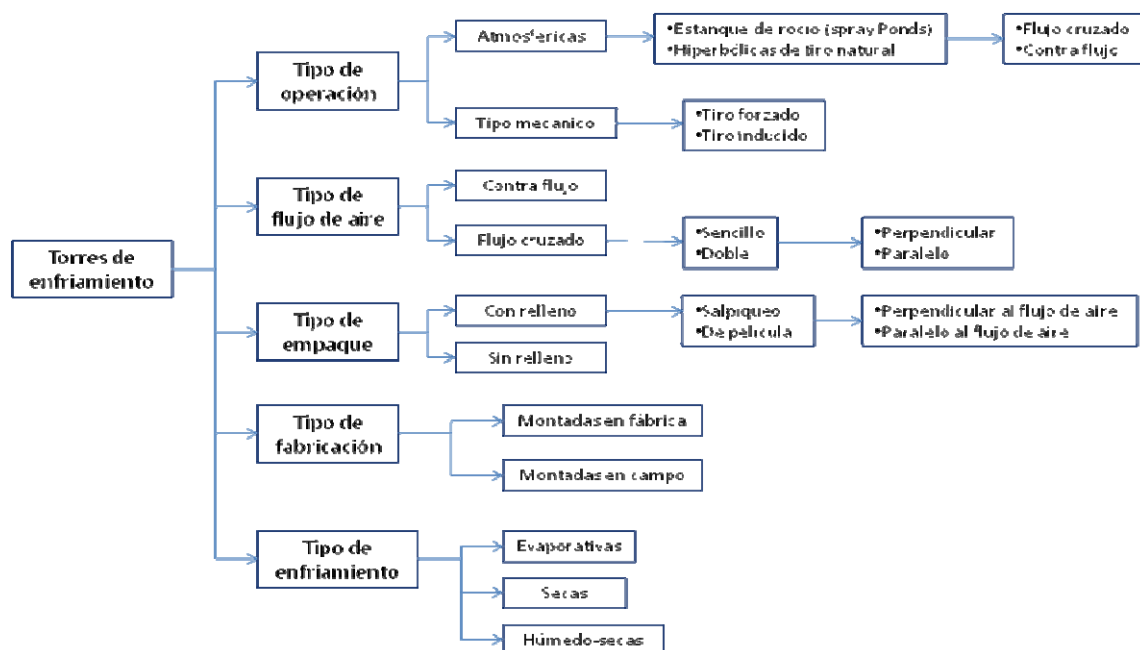


Figura 1. Clasificación de las torres de enfriamiento.

Otra forma de clasificar a las torres de enfriamiento se muestra en la tabla 1, en ésta se describen las características mas importantes y los criterios de aplicación de las torres de enfriamiento.

**Tabla 1. Criterios de aplicación de las torres de enfriamiento.**

Clasificación	Tipo	Características	Criterios de aplicación.
<b>Atmosféricas</b> "No cuentan con un dispositivo mecánico para impulsar aire en su interior"	Hiperbólica de tiro natural	Tienden a ser de gran capacidad (250, 000 GPM o mas), ocasionalmente sobrepasan los 500 pies de altura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operan efectivamente en áreas de alta humedad.</li> <li>Usadas extensamente en el campo de la generación eléctrica donde existen grandes cargas de calor unificadas.</li> </ul>
<b>Tiro mecánico</b> "Utilizan uno o múltiples ventiladores para impulsar cierto volumen de aire en su interior"	Tiro forzado	<ul style="list-style-type: none"> <li>El / los ventiladores se localizan en la entrada de la corriente de aire de la torre.</li> <li>Existen velocidades altas de aire en la entrada y bajas en la salida de la torre.</li> </ul>	La presencia de ventiladores compensa las condiciones atmosféricas variables del medio ambiente al regular el flujo de aire que entra a la torre.
	Tiro inducido	<ul style="list-style-type: none"> <li>El/ los ventiladores se localizan en la parte superior de la torre desde donde succiona el aire en su interior.</li> <li>Tienen una velocidad de descarga de aire 3 o 4 veces más grande que la velocidad de entrada a la torre.</li> </ul>	La presencia de ventiladores compensa las condiciones atmosféricas variables del medio ambiente al regular el flujo de aire que entra a la torre.
<b>Tiro híbrido</b> "Combinación de dos tipos de torres de enfriamiento"	Torres de tiro natural con ventilador/es	Externamente son torres de tipo tiro natural e internamente de tiro mecánico.	El diseño intenta minimizar la potencia requerida para el movimiento del aire en el interior de la torre.
<b>Flujo de aire</b> "Debido a la relación de flujo relativo del aire y el agua con la torre"	contra flujo	El aire se mueve verticalmente hacia arriba a través del relleno en contra la caída descendente del agua.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplican cuando es necesaria alta eficiencia térmica en la torre, cuando se requiere en la operación de la torre valores grandes de acercamiento.</li> <li>Aplican cuando la calidad de agua de suministro tiene buenos parámetros de calidad.</li> </ul>
	flujo cruzado	El aire circula en dirección perpendicular respecto al aire que desciende, 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.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se aplican cuando la calidad de agua de suministro no tiene buenos parámetros de calidad.</li> <li>Cuando se desea evitar grandes costos de mantenimiento.</li> </ul>
<b>Llenado-spray</b> "Torres sin relleno o empaque"	Llenado-spray	La transferencia de calor en la torre depende solamente la desintegración del agua sin permitir su distribución en el sistema para promover el máximo contacto aire-agua.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Está limitada a ciertos procesos donde las temperaturas altas son permisibles.</li> <li>Se utiliza cuando el agua circulante tiene excesos en contaminación o en sólidos.</li> </ul>
<b>Construcción</b> "Es característica el sitio donde son construidas"	En campo	La actividad de construcción toma lugar en el sitio de su uso final.	Se aplica para todas las grandes torres y muchas de las torres pequeñas
	Ensamblada en fábrica.	Torres que pasan virtualmente un completo ensamblaje en el punto de manufactura.	Se aplica para la construcción de grandes torres multiceldas que son ensambladas en sitio por módulos o son enviadas con el hardware apropiado para su correcto uso.
<b>Forma</b> "Aspecto visual de la torre"	Rectilíneas	Son construidas de forma celular (celdas lineales).	Se aplican en un espacio grande de terreno para su desempeño.
	Redondas de tiro mecánico (RMD)	Son construidas en un arreglo redondo con los ventiladores agrupados muy cerca del centro de la torre.	Se aplican en áreas limitadas de terreno.
<b>Método de transferencia de calor.</b> "Transferencia de calor por el contacto aire-agua"	Torres secas	Se diferencia de todas los tipos de torres anteriormente descritos que son del tipo evaporativas (húmedas) de que en las torres secas no existe contacto directo entre el aire y el agua. El agua es enfriada totalmente por calor sensible.	Se aplica en sitios en los que existe poco abastecimiento o escasez de agua.



A continuación se describen aspectos fundamentales de las torres de enfriamiento de tiro mecánico, este tipo de torres son las que se utilizan generalmente en las refinerías.

### 1.1.3 Torres de tiro mecánico.

Las torres de tiro mecánico proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado debido al movimiento mecánico de un ventilador. Las torres son compactas, de sección transversal y altura de bombeo pequeña en comparación con las torres de tiro natural, en estas torres se pueden controlar de forma precisa la temperatura de agua de salida y se pueden lograr valores de acercamiento pequeños. Si el ventilador se encuentra situado en la entrada de aire la torre es de **tiro forzado**. Cuando el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire, se habla de **tiro inducido**.

En las torres de tiro forzado, (figura 2) el aire se descarga a baja velocidad por la parte superior de la torre, estas son, casi siempre de flujo a contracorriente, de mayor eficiencia que las torres de tiro inducido puesto que la presión dinámica convertida a estática realiza un trabajo útil.

El inconveniente de éste tipo de torres es la posibilidad de recirculación del aire de salida hacia la zona de baja presión creada por el ventilador en la entrada de aire.

Las torres de **tiro inducido** pueden ser de flujo a contracorriente o de flujo cruzado. 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 (figura 3).

La ventaja que tiene este tipo de torres es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose máximo rendimiento.

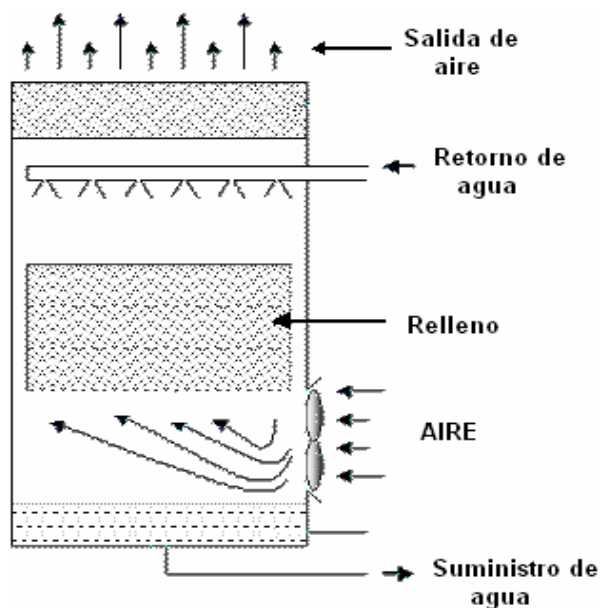


Figura 2. Esquema de una torre de enfriamiento de tiro forzado.

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 velocidad elevada con la que entra el aire permite que exista el riesgo del arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre.

La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en una gran pérdida de presión estática y un aumento de la potencia de ventilación en comparación con las torres de flujo cruzado.

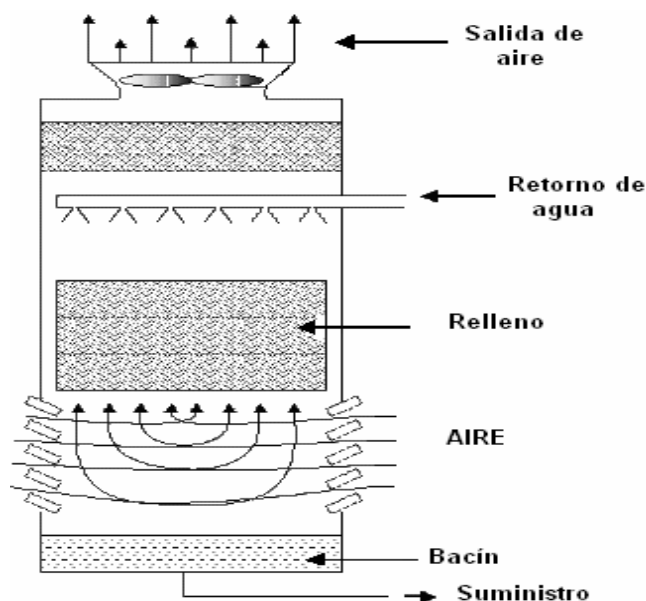


Figura 3. Torre de flujo a contracorriente y tiro inducido.

Las torres de flujo cruzado permiten que el aire circule en dirección perpendicular respecto a el agua que desciende (figura 4), éstas tienen una altura menor con respecto a las torres de flujo a contracorriente ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la de relleno.

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

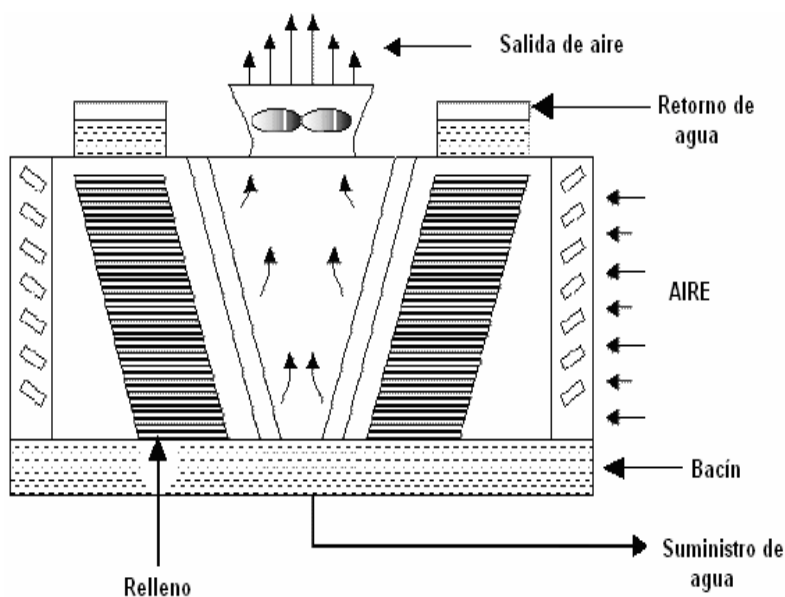


Figura 4. Torre de doble flujo cruzado- tiro inducido.

#### 1.1.4 Componentes de las torres de enfriamiento.

Además de conocer el funcionamiento de las torres de enfriamiento, es necesario conocer sus componentes para realizar un diagnóstico y evaluación de las mismas ya que algún problema en alguno de los componentes afecta en su correcta operación.

Los componentes de las torres de enfriamiento se dividen en tres grupos principales (tabla 2): componentes estructurales, componentes mecánicos y componentes eléctricos (*SPX Cooling Technologies, 2006*).

**Tabla 2. Principales componentes de las torres de enfriamiento.**

COMPONENTE	
ESTRUCTURAL	Bacín de agua fría
	Estructura general
	Sistema de distribución de agua
	Cubierta del ventilador
	Cilindro de ventilador
	Relleno
	Eliminadores de rocío
	Persianas
MECÁNICO	Ventilador
	Reductor de velocidad
	Válvulas
ELÉCTRICO	Motores

## 1.2 Balance de materia en torres de enfriamiento y relación de las variables de operación.

Después de explicar el tipo de torres de enfriamiento que se emplean en las refinerías, es necesario explicar el sistema de recirculación y sus principales variables de operación.

La figura 5 muestra el flujo de agua que se evapora (E) continuamente en el sistema de enfriamiento, esta pérdida de agua disminuye el volumen total en el bacín de agua fría (V), el agua de repuesto (M) debe ser añadida continuamente para reponer las pérdidas por evaporación, purga (B) y arrastre (D). Se sabe que en el proceso de enfriamiento continuo, las sales incrementan su concentración en el agua de recirculación (R), cuando esto sucede, la válvula del agua de retorno se abre para descargar cierto volumen de agua (B), y drenar continuamente el sistema.

La relación de la concentración total de sólidos en el agua de repuesto con la concentración en el agua de recirculación indica la cantidad de concentración existente; esta relación es conocida como “ciclos de concentración”.

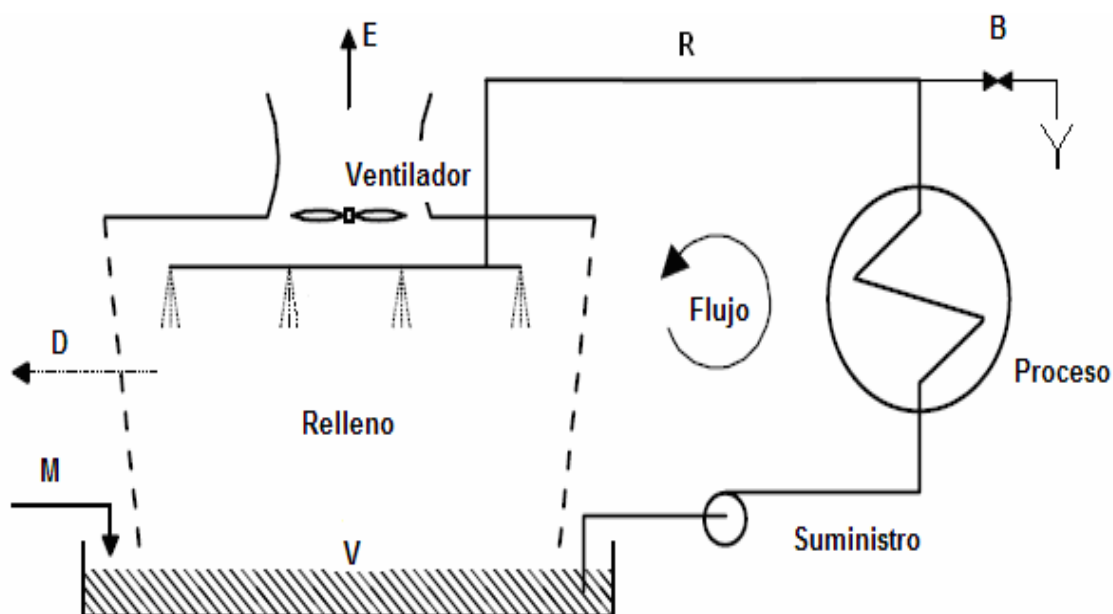


Figura 5. Sistema de recirculación en una torre de enfriamiento.

Los ciclos de concentración (C) es el número de veces que se ha concentrado el agua recirculada o el número de veces que el agua ha completado el circuito de recirculación sin ser purgada (no necesariamente es un número entero), éstos se determinan a partir de un elemento que no se descomponga, volatilice o precipite, debe ser añadida suficiente cantidad de agua de repuesto para reponer el drenado o “purgas”, el arrastre y pérdidas por evaporación en la torre. Sí tenemos, que de acuerdo a la figura 5, para un periodo dado de tiempo:

$$M = E + B + D \quad (1.1)$$

Cuando el sistema se encuentra en equilibrio a un preseleccionado valor de  $(TS)_R$  con B ajustada para mantener esa concentración, entonces, el peso de los sólidos en el repuesto es equivalente al peso de los sólidos eliminados en B y D.

$$M (TS)_M = (D + B) (TS)_R \quad (1.2)$$

Por lo que:

$$C = \frac{(TS)_R}{(TS)_M}$$

Cuando el personal de operación reduce el flujo en la purga, el control del sistema puede ser balanceado con los flujos al disminuir flujo de repuesto. La relación de los dos flujos es conocida como “Ciclos hidráulicos”. (Lorraine, 2000).

$$Ciclos\ hidráulicos = \frac{M}{B} \quad (1.3)$$

$$M = (D + B) C$$

$$C = M / (D + B) = (E + B + D) / (B + D)$$

Reordenando:

$$CD + CB = E + B + D$$

$$CB - B = E - CD + D$$

$$B(C - 1) = E - (C - 1) D$$

$$B = \frac{[E - D(C - 1)]}{(C - 1)} \quad (1.4)$$

Se alcanza una expresión de las pérdidas de agua calculada en función de purgas, arrastre y ciclos de concentración, desafortunadamente la ecuación (1.4) no es muy útil tomando en cuenta la poca certeza y confiabilidad que existe en valores de evaporación y arrastre ya que estos son en muchos casos muy difíciles de medir.

Las torres de enfriamiento generalmente son diseñadas para que (E+D) sea el 3% del flujo de circulación cuando el rango de enfriamiento sea de 30° F, de esta premisa E, es regularmente una simple estimación, un porcentaje del flujo de recirculación de la torre (10 ° F del rango de enfriamiento).

El valor estimado de E por este método es muy grande, principalmente porque una gran proporción de calor sensible se transfiere de lo que se asume en la estimación.

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

$$E = R \times \Delta T / 1000 \quad (1.5)$$

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

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

Si D es equivalente a cero en la ecuación (1.4), entonces:

$$B = \frac{E}{(C-1)} \quad (1.6)$$

Donde:

$$M = \left( \frac{R \times \Delta T}{1000} \right) + \frac{E}{(C-1)}$$

$$M = \left( \frac{R \times \Delta T}{1000} \right) * [C / (C - 1)] \quad (1.7)$$

Las pérdidas de agua por arrastre (D) son función de la eficiencia del eliminador de rocío de la torre. “En términos generales y de acuerdo a su costo, los eliminadores de rocío permiten arrastres del orden de 0.05 %, 0.02 %, 0.005, 0.002% y también de 0.0001% de pérdida con respecto al gasto que circula en la torre” (*Industrial Torres Marmex, 2006*).

Debido a la calidad de agua de la torre, es necesario eliminar permanentemente una porción de agua, con la purga continua (B) “Bleed off”, se controlan los ciclos de concentración que se determinan tener en la torre.

La tabla 3 muestra ecuaciones simplificadas del análisis anterior.

**Tabla 3. Determinación de los parámetros operativos.**

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



La situación deseable es tener el mínimo de M, con el mínimo de B, los distintos parámetros operativos del circuito se pueden determinar a partir del conocimiento de dos de ellos

### 1.2.1 Disminución de purgas en torres de enfriamiento.

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

La gráfica de la figura 6 muestra como disminuye del 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.

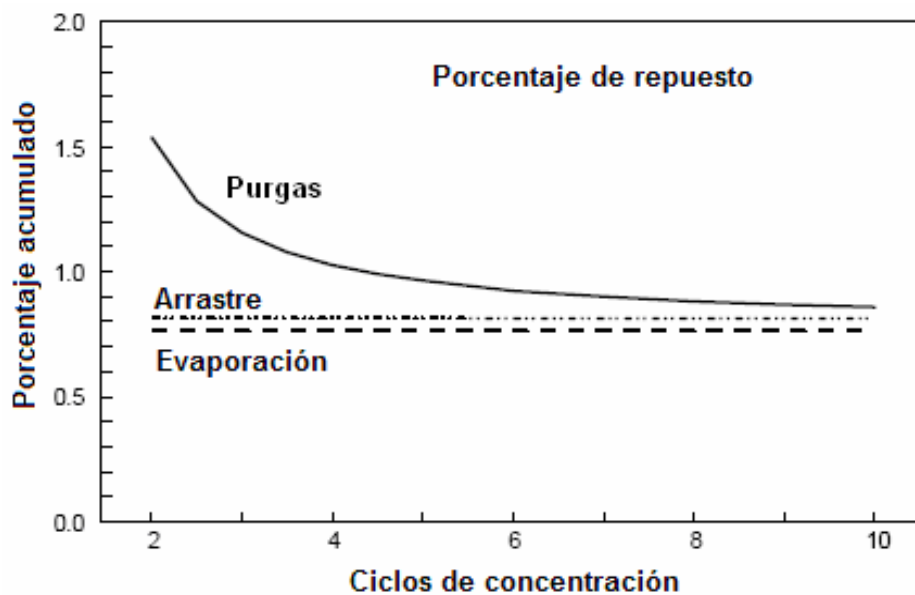


Figura 6. Requerimientos de agua de repuesto vs. Ciclos de concentración.

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 o 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.

**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

### 1.3 Resumen.

El principio de operación de las torres de enfriamiento es la transferencia simultánea de calor y masa, las torres de enfriamiento que se utilizan en las refinerías son de tiro mecánico y de gran capacidad. El balance de materia en la torre establece la relación llamada “Ciclos de concentración”, esta es útil para controlar otras variables importantes en el sistema como es, la cantidad de agua de repuesto que se suministra a la torre de enfriamiento y la disminución de purgas.

## **2 ACONDICIONAMIENTO DE AGUA EN TORRES DE ENFRIAMIENTO.**

## 2.1 Corrosión

La protección contra la corrosión e incrustaciones, micro organismos y biocapas sobre los componentes y tuberías de las torres de enfriamiento es, sin lugar a dudas, un problema de enorme importancia económica. (Powell, 1981, p.329).

La corrosión se define como el deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. La corrosión se origina por una reacción química (oxidación). El área en el que dicho metal se oxida, es llamado ánodo, el agente oxidante que es reducido se llama cátodo, ambos se encuentran separados, usualmente no distantes, cuando la corrosión continúa, los electrones fluyen a través del metal entre estas áreas. En sistemas acuosos, los cationes se desplazan hacia el cátodo, mientras que los aniones se desplazan hacia el ánodo. El flujo de electrones a través del metal (circuito externo) es la corriente de corrosión, la cual es limitada al flujo en el que los electrones son aceptados por el agente oxidante en el cátodo. La velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal y las propiedades de los metales en cuestión.

Un metal es en esencia más “noble” que otro. Esto significa que uno de los dos metales tiene una gran tendencia a conservar electrones por lo tanto el metal con mayor nobleza posee una gran tendencia a conservar electrones o a corroerse (Mc Coy, 1974, p.19-20).

**Tabla 5. Series electroquímicas de aleaciones seleccionadas**

Metal o aleación
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aluminio</li> <li>• Acero Templado (99Fe, 0.75Mn, 0.25C)</li> <li>• Acero inoxidable (85Fe, 13Cr, 1Mn, 1Si)</li> <li>• Bronce Admiralty (70Cu, 29Zn, 1Sn)</li> <li>• Cobreniquel (70Cu, 30Ni)</li> </ul>

En la tabla 5 se presentan algunos metales y aleaciones los cuales se encuentran tabulados en orden creciente de nobleza, la tabla está organizada de forma que cualquier metal en la lista sea anódico con respecto a aquel que esté por debajo del mismo. Se puede observar que el aluminio tiene mayor tendencia ser disuelto o corroído que los demás.



Figura 7. Oxidación del metal

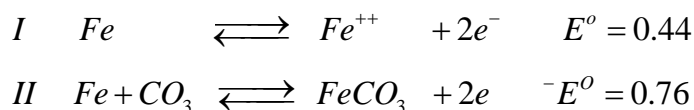
La tabla siguiente muestra el potencial de oxidación de algunos metales en diferentes soluciones.

Tabla 6. Potencial de oxidación estándar de metales y aleaciones en algunas soluciones.

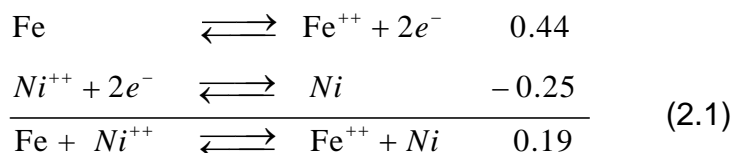
Metal	I Solución ácida pH= 0	II Solución carbonatada pH= 11 $[(CO_3)^{2-} = 1M]$	III Solución alcalina pH = 14	IV Solución sulfonada pH =11.7 $(S^{2-} = 1M)$
Aluminio	1.66	*	2.31	*
Zinc	0.76	1.06	1.24	1.44
Hierro	0.44	0.76	0.88	0.97
Níquel	0.25	0.45	0.72	0.83
Cobre	-0.34	-0.05	0.22	0.76

\* El aluminio es completamente hidrolizado en soluciones de sulfatos y carbonatos.

Las reacciones intermedias comunes para el potencial estándar de oxidación se resumen en la tabla 6, las reacciones son las siguientes.



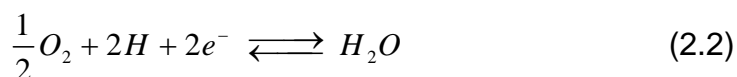
La columna I de la tabla 6, muestra el valor máximo de potencial de oxidación  $E^{\circ} = 1.66$  para el aluminio lo que indica que este metal puede ser oxidado fácilmente en aluminio  $Al^{+3}$ , por lo tanto también es corroído, de igual manera, comparando los potenciales de la columna I para el hierro y el níquel, se observa que el ion níquel puede oxidar el hierro metálico en Ion ferroso:



En general, un metal brinda sus electrones a un ion con mayor afinidad por electrones.

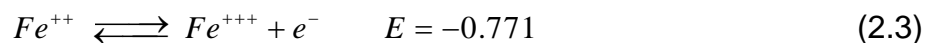
La tabla 6 muestra que el pH incrementa el potencial de oxidación al hacerse más positivo, los potenciales más grandes se encuentran en la solución sulfonada (Columna IV). Por lo tanto, no hay que esperar que el aluminio o el zinc sean adecuados para manejar soluciones alcalinas y aun más, deducir que todos los metales de la tabla 6 son corroídos por sulfuro o sulfuro de hidrógeno.

La reacción directa entre el hidrógeno y el oxígeno en fase gaseosa, es lenta concerniente de la larga cantidad de energía requerida para disociar el oxígeno molecular en átomos. La reacción catódica que quizás mejor lo representa es:

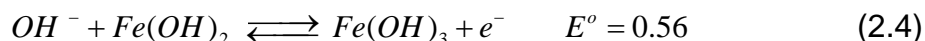


Antes de dejar el tema de los potenciales de oxidación, es necesario mencionar factores útiles en la interpretación de la química de la corrosión del acero.

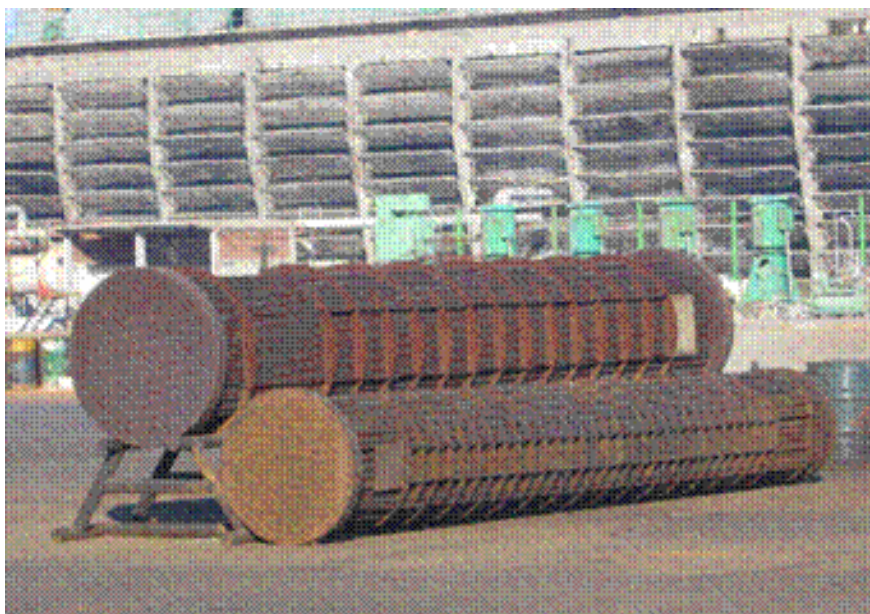
El potencial de oxidación estándar de ferroso a férrico en solución ácida es:



En solución alcalina:



Por lo tanto como el pH aumenta, la hidrólisis del ion férrico, aumenta el potencial de oxidación de la reacción ferrosa-férrico y la oxidación se realiza más fácilmente. Lo anterior demuestra la importancia en el control del pH en los sistemas de enfriamiento, la figura 8 representa intercambiadores de calor fuera de operación debido a corrosión severa frente a una torre de enfriamiento en una refinería.



**Figura 8. Corrosión en intercambiadores de calor**

### 2.1.1 Prevención de la corrosión.

La protección de cualquier metal a la corrosión por el agua depende de acondicionar el abastecimiento para corregir sus características corrosivas, o

de mantener una barrera física entre la parte anódica o catódica de la superficie metálica y el electrolito (agua). Los recubrimientos de protección pueden contener sustancias inorgánicas, orgánicas o ambas; estos pueden producir reacciones de corrosión anódica y catódica o pueden precipitarse selectivamente de la fase líquida para obtener una protección completa, estos depósitos no deben ser porosos ni continuos. Cuando se obtiene una condición favorable, se prevendrá el ataque corrosivo, al no haber contacto entre las áreas vulnerables del metal y el medio corrosivo.

En ausencia de recubrimientos, las superficies metálicas pueden ser protegidas contra la corrosión mediante tratamiento de agua y desaeración para remover los gases que aceleran el ataque corrosivo.

## **2.1.2 Medición de la corrosión.**

### **2.1.2.1 Pruebas en intercambiadores de calor y procedimientos de control en sistemas de enfriamiento.**

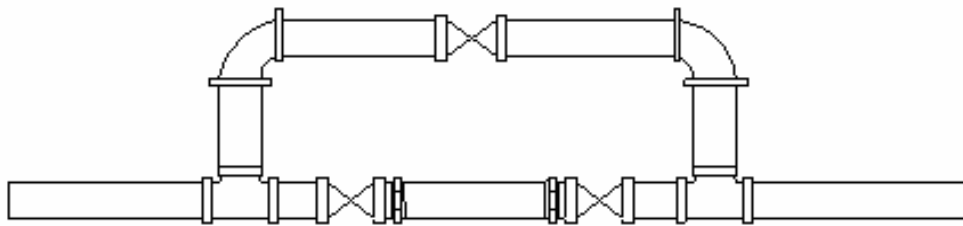
La deposición de recubrimientos protectores depende del mantenimiento de los constituyentes del agua dentro de límites especificados, estas medidas de protección pueden ser controladas adecuadamente mediante las pruebas rutinarias del agua y de los ajustes en el tratamiento, esto es cierto independientemente del tipo de acondicionamiento de aguas que se practique. Sin embargo, es necesario tener alguna indicación del efecto de ciertas variables sobre el equipo usado, la guía más satisfactoria de los tratamientos puede ser obtenida mediante el uso de intercambiadores de calor en miniatura en los que la velocidad de acumulación y el tipo de depósitos pueden ser observados con frecuencia.

A menudo es conveniente contar con algunos medios para comprobar la tendencia incrustante o corrosiva del agua de enfriamiento en varios puntos de la planta. Estas unidades generalmente pueden ser instaladas en cualquier lugar de la planta donde se encuentren localizadas las piezas críticas de equipo



y es natural que en esta forma permita una vigilancia estrecha del efecto del agua sobre la superficie del intercambio de calor.

Un procedimiento sencillo para determinar la velocidad de incrustación o de corrosión puede llevarse a cabo con piezas de prueba, estas consisten de piezas de tubo insertadas en el sistema de la planta que normalmente tienen flujo de agua sobre ellas, estas pueden ser colocadas en derivación para removerse sin sacar de servicio el equipo de planta.



**Figura 9. Disposición típica de válvulas y conexiones para la instalación de elementos en pruebas de corrosión.**

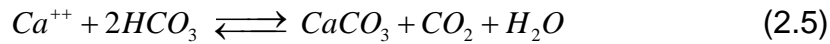
Tal equipo de prueba sirve de guía para ayudar en el control de la incrustación pero de ninguna manera puede ser considerado de forma exclusiva y rotunda (Powell, 1981, p.351).

Es necesaria la realización de monitoreos constantes para tener la seguridad en que los parámetros no cambien.

### **2.1.2.2 Incrustación controlada de carbonato de calcio.**

Existen métodos que han sido propuestos para predecir la corrosión o la agresividad del agua de los análisis químicos, uno de los más populares está basada en la química del ácido carbónico y sus sales, W Langelier en 1936 fue el primero en introducir el concepto del valor de saturación del pH en el agua.

Si un tipo de agua a altas temperatura, sin tratamiento contiene calcio u iones de bicarbonato, se produce la reacción.



Se desarrolla un recubrimiento protector en forma de incrustación de carbonato de calcio a base de regular y se ajusta el pH, la alcalinidad o iones de calcio para mantener una solución de carbonato de calcio ligeramente sobresaturada. Mediante este control, se puede depositar una capa fina impermeable y adherente sobre las superficies que requieren protección. El carbonato de calcio es un inhibidor general que cubre tanto el área anódica como la catódica porque su precipitación no depende de los productos de reacciones electroquímicas, una película alcalina sobre las superficies catódicas es un factor adicional que favorece la precipitación de carbonato de calcio.

La creación y velocidad de formación de este tipo de recubrimiento protector están influidas por varios factores. Cualquier condición química del agua que tienda a aumentar la solubilidad de los iones de calcio o a prevenir el depósito cristalino reducirá o prevendrá la formación del recubrimiento deseado.

Existe un número reducido de abastecimientos naturales de agua en los que el carbonato de calcio existe en estado de equilibrio. Para tales tipos de agua se requiere un tratamiento químico reducido o nulo, ya que estos tienden a precipitar un recubrimiento protector delgado y uniforme. El agua de muchos de los grandes lagos, es relativamente no corrosiva o puede llegar a serlo con ajustes menores en su pH, desafortunadamente, la mayor parte de los abastecimientos no es fácil de controlar por lo que se requiere un reajuste de la dureza o alcalinidad del agua para el desarrollo de la deposición e incrustación.

Langelier propuso la idea del índice calculado de saturación, como medio para predecir el comportamiento corrosivo o incrustante del agua natural, es necesario entender este índice de saturación para acondicionar

inteligentemente el agua con objeto de producir una incrustación protectora de carbonato de calcio.

### **2.1.2.3 Uso del índice de Langelier (ISL) para la saturación de carbonato de calcio.**

La materia mineral disuelta en la mayor parte de los abastecimientos de agua, consiste principalmente de calcio y magnesio en forma de dureza de bicarbonatos y dureza de no carbonatos, principalmente cloruros y sulfatos. Se encuentran usualmente presente en sales de sodio, bióxido de carbono disuelto, oxígeno y otros gases.

La tendencia de un abastecimiento de agua, es el de depositar incrustaciones cuando se calienta, hacerse alcalina o de atacar corrosivamente a los metales, esto depende del balance entre los constituyentes, al controlarlos con un tratamiento correctivo, tanto la incrustación como la corrosión pueden reducirse al mínimo, el aumento de temperatura acelera las velocidades en ambos procesos.

La incrustación que se forma bajo condiciones moderadas de temperatura es debido a que la dureza de bicarbonato se convierte, por calentamiento, en carbonato de calcio normal o se afecta por un aumento de alcalinidad suficiente para causar sobresaturación con respecto al carbonato de calcio. Las relaciones de solubilidad del carbonato de calcio disminuyen al mínimo el ataque corrosivo porque la agresividad del bióxido de carbono disuelto en el agua se reduce considerablemente conforme se aproxima el equilibrio de saturación. En condiciones de equilibrio, las diversas formas de bióxido de carbono (bióxido de carbono libre, bicarbonatos y carbonatos) están balanceados en tal forma que no causan incrustación o corrosión.

Un método conveniente de interpretar un análisis de agua para este propósito utiliza expresiones logarítmicas de la dureza de calcio, Alcalinidad-M y un factor para la temperatura y los sólidos totales.

$$pH_s = pCa + pAlk + C \quad (2.6)$$

$$ISL = pH(actual) - pH(calculado) \quad (2.7)$$

Cuando el Índice de Saturación de Langelier (ecuación 2.7) es cero, es decir, cuando pH es igual a  $pH_s$ , existe un equilibrio de saturación por lo que no hay formación de incrustación y el ataque corrosivo disminuye al mínimo.

Cuando el ISL es positivo, es decir, cuando el pH es mayor que el  $pH_s$ , existe una condición de sobresaturación de carbonato de calcio con respecto a la alcalinidad y sólidos totales a las condiciones existentes de temperatura habiendo tendencia de depositar incrustación sobre la superficie de transmisión de calor.

Cuando ISL es negativo, es decir, cuando el pH es menor que el  $pH_s$ , el equilibrio está balanceado en dirección opuesta, ocurrirá corrosión del metal descubierto y se disolverá cualquier incrustación previamente formada.

Con objeto de inhibir la corrosión, es necesario mantener el ISL ligeramente positivo, suficiente alto para considerar en forma definitiva la deposición de incrustación. El valor deseado del ISL puede variar de +0.6 a + 1.0 o mayor dependiendo de la presencia de sustancias inhibidoras.

*(Powell, 1981, p.332-334).*

Es frecuentemente preferible agregar ácido sulfúrico a el agua de repuesto que al agua caliente para mantener el ISL de +0.6 en el agua circulante. Es obvio que tal tratamiento requiere de un control analítico cuidadoso y que se requiere el ajuste con ácido o álcali para mantener el balance químico deseado. Los abastecimientos de agua cuya composición química varía ampliamente no son muy adecuados para tal tratamiento, asimismo, el agua cuya temperatura varía dentro de un amplio intervalo, es difícil de controlar para asegurar una incrustación uniforme a lo largo de todo el sistema. Mediante un control apropiado y la adaptación de un conjunto de condiciones adecuadas al

tratamiento, éste ha demostrado ser satisfactorio y económico con respecto a otras formas de control (Powell, 1981, p.335).

#### 2.1.2.4 Índice de Stiff y Davis (SDI).

El **índice** de Stiff y Davis procura superar los defectos del índice de Langelier con respecto a la gran cantidad de sólidos disueltos totales en el agua y el impacto de los efectos del ion común en la fuerza motriz para la formación de incrustaciones.

Así como el índice de Saturación de Langelier “ISL”, el índice de Stiff y Davis está basado en el concepto de nivel de saturación, el producto de la solubilidad empleado para producir el pH de saturación (pH<sub>S</sub>) empírico para el agua.

El índice de Stiff y Davis puede predecir si el agua esta formando poca incrustación comparado con el método de ISL, con la misma química y condiciones del agua. La desviación entre los índices se incrementa con la fuerza iónica. La interpretación del índice es la misma que en el índice de saturación de Langelier. (Water Services ,2004).

La ecuación (2.8) define el índice de Stiff y Davis.

$$SDI = pH - pCa - pAlk - K \quad (2.8)$$

#### 2.1.2.5 Índice de estabilidad de Ryznar (ISR).

Se define el índice de estabilidad de Ryznar como:

$$ISR = 2pH_S - pH \quad (2.9)$$

De acuerdo a los valores obtenidos se maneja una escala, en la tabla 7 (Ghislieri, 2007) se presenta la referencia de la tendencia incrustante o corrosiva del agua con respecto al ISR.

**Tabla 7. Escala del índice de estabilidad de Ryznar**

ISR	Condición
3.0	Extremadamente incrustante
5.0	Severamente incrustante
5.5	Moderadamente incrustante
5.8	Levemente incrustante
6.0	Estable
6.5	Estable, con leve tendencia corrosiva
7.0	Levemente corrosiva
8.0	Moderadamente corrosiva
9.0	Fuertemente corrosiva

#### 2.1.2.6 Índice de Larson-Skold (L&SI).

Larson y Skold estudiaron los efectos de corrosión de los cloruros e iones de sulfato del agua en los grandes lagos y su efecto en materiales como el acero y hierro fundido, encontraron que el ion bicarbonato inhibe suavemente la corrosión del acero y del hierro fundido. En general, la velocidad de corrosión se incrementa a medida que el pH se incrementa. La ecuación (2.10) describe lo anterior:

$$L \& SI = \text{epm}(Cl^- + SO_4^{-2}) / \text{epm}(\text{alcalinidad} - M) \quad (2.10)$$

El índice de Larson –Skold puede ser interpretado de la siguiente manera:

- L&SI <0.8: Los cloruros y sulfatos no tienen influencia en la formación de la película protectora.
- 0.8 < L&SI < 1.2: Los cloruros y sulfatos dificultan la formación de la capa protectora. A niveles más altos, se comparan con la velocidad normal observada de la corrosión del acero.

- L&SI > 1.2: Es el valor del incremento del índice y un alto incremento en la velocidad de corrosión observada. (Prisyazhniuk, 2006).

### 2.1.2.7 Índice de Incrustación de Puckorius (PSI).

El índice de incrustación de Puckorius toma en cuenta dos parámetros críticos, la capacidad amortiguadora del agua y la cantidad máxima de precipitación que se puede formar para mantener el agua en equilibrio.

$$PSI = 2 pH_s - pH_{eq} \quad (2.11)$$

El PSI se calcula de una manera similar que al ISR con una diferencia, el PSI utiliza la ecuación 2.11 de pH en equilibrio para considerar el equilibrio del pH para en el efecto amortiguador.

La tabla 8 muestra los índices de incrustación más comunes en la formación de carbonato de calcio. Los términos en corchete las unidades son en (mg/L).

**Tabla 8. Índices de incrustación de CaCO<sub>3</sub> comúnmente usados.**

Nombre y criterio	Fórmula
Índice de Saturación de Langelier (ISL) <ul style="list-style-type: none"> <li>• ISL &lt; 0 corrosivo</li> <li>• ISL &gt; 0 formación de incrustación.</li> <li>• ISL = 0 el agua está en equilibrio.</li> <li>• "C" Se obtiene empíricamente.</li> </ul>	$ISL = pH - pH_s$ $pH_s = p[Ca] + p[HCO_3^-] + "C"$ $C = 9.3 + 0.1(\text{Log}[TDS]-1) - 13.12\text{Log}(T) + 34.95$
Índice de estabilidad de Stiff-Davis (SDI) <ul style="list-style-type: none"> <li>• SDI &lt; 0 corrosivo</li> <li>• SDI &gt; 0 formación de incrustación.</li> <li>• ISL = 0 el agua está en equilibrio.</li> <li>• "K" es una función de la fuerza iónica</li> </ul>	$SDI = pH - pH_s$ $pH_s = p[Ca] + p[HCO_3^-] + "K"$
Índice de estabilidad de Ryznar (ISR) <ul style="list-style-type: none"> <li>• ISR &lt;&lt; 6 formación de incrustación</li> <li>• ISR &gt;&gt; 7 corrosión</li> </ul>	$ISR = 2(pH_s) - pH_{eq}$ $pH_{eq} = 1.465 \log[\text{Alcalinidad}] + 4.54$ $[\text{Alcalinidad}] = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [OH^-]$
Índice de Larson Skold (L&SI) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosión medible en presencia de Cl<sup>-</sup> &amp; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></li> </ul>	$L\&S\ I = (Cl^- + SO_4^{2-}) / (HCO_3^- + CO_3^{2-})$

Nombre y criterio	Fórmula
Índice de Saturación de Puckorius <ul style="list-style-type: none"> <li>PSI &lt;&lt; 6 se forma incrustación.</li> <li>PSI &gt;&gt; 7 agua corrosiva.</li> </ul>	$PSI = (2 \text{ pH}_s - \text{pH}_{eq})$ $\text{pH}_{eq} = 1.465 \log [\text{Alcalinidad}] + 4.54$ $[\text{Alcalinidad}] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-]$

### 2.1.3 Inhibidores anódicos.

Entre los principales inhibidores anódicos se encuentran el cromato, molibdato y tungstanato.

#### 2.1.3.1 Compuestos de cromato.

El cromato era el compuesto mayormente usado y el más eficiente de los inhibidores anódicos, especialmente cuando se combina con el ion zinc en sistemas de enfriamiento que operan en un intervalo de pH de 6.5 a 8.

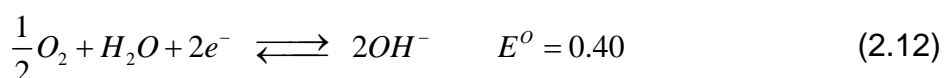
Los cromatos y bicromatos fueron usados durante varios años para inhibir la corrosión, particularmente como aditivos a la salmuera de refrigeración.

La legislación ambiental ha dictaminado prohibir el uso de cromatos por lo que las nuevas formulaciones utilizan mezclas de compuestos orgánicos biodegradables como los Fosfonatos y Azoles. (*Silbert M, 1999, p.4*).

Los tratamientos sin cromato son menos efectivos que los tratamientos con cromato. El control microbiológico es mucho más difícil, y el tratamiento total siempre es más costoso, esto hace que, en muchas instancias, sea más satisfactorio y económico instalar un sistema para eliminar cromato del agua de purga antes de descargar en el drenaje que el intento de usar tratamientos sin cromato. (*Mc Coy, 1974, p.119*).

### 2.1.4 Inhibidores catódicos.

La reacción catódica significativa en sistemas de enfriamiento es la reducción del oxígeno por la corriente de electrones debida a la corrosión:



Los agentes que limitan esta reacción son llamados inhibidores catódicos.



#### **2.1.4.1 Polifosfatos.**

Se ha demostrado que pequeñas concentraciones de polifosfato son efectivas para producir polarización catódica, en superficies de cobre, el hexa- metafosfato forma complejos solubles con el acero. Cuando se usa un inhibidor catódico, es recomendable iniciar el tratamiento en alta concentración, (60 ppm total de  $\text{PO}_4^{-3}$ ) debido a que el polifosfato es absorbido en la superficie del óxido y la suciedad presente, impide la formación de la película protectora.

Las soluciones concentradas de polifosfato son corrosivas si el pH de la solución es menor a 9.5, en adición, la hidrólisis del ortofosfato puede causar ensuciamiento.

Las funciones del polifosfato son mejores cerca de  $\text{pH}=6$ . El ion zinc sofoca la reacción catiónica intermedia representada por la ecuación 2.12, el pH se incrementa localmente precipitando  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  lo cual detiene la reducción del oxígeno.

#### **2.1.4.2 Películas protectoras.**

Debido a el cambio antes mencionado de no emplear cromato en tratamientos de agua de enfriamiento, principalmente por la toxicidad del cromo hexavalente, un número de químicos orgánicos han sido recomendados para inhibir la corrosión.

Uno de los mejores inhibidores de corrosión es la sal de sodio 2-mercapto-benzotiazol, ésta inhibe específicamente la corrosión del cobre y sus aleaciones que normalmente son cubiertas por una película de óxido de cobre para reparar defectos en su película protectora natural.

Otros agentes orgánicos que se han propuesto incluyen poliamidas, fosfaminas y compuestos fosfóricos. En general los tratamientos orgánicos son mucho más costosos que el cromato.

La concentración del químico orgánico requiere mantener una película protectora (50 – 150) ppm del total de la formulación, estas películas o capas

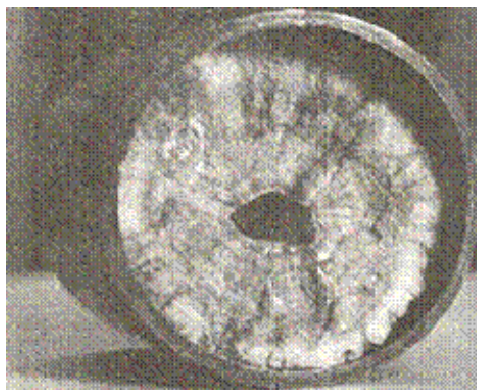
son tenues en elevada fuerza iónica y decrecen mucho más rápido de aquellas que pueden producir los cromatos. Los brotes microbiológicos deben ser estrictamente controlados para evitar la interferencia en la formación de la película.

## 2.2 Deposición e incrustación

La deposición es el crecimiento cristalino de una capa adherente de sal insoluble u óxido en una superficie donde se realiza el intercambio de calor. La deposición o ensuciamiento deriva grandemente de los iones del agua, estas deposiciones incluyen: sulfato de calcio, fosfatos de calcio y magnesio, silicato de magnesio y en ocasiones carbonato de calcio. Las deposiciones de carbonato de calcio son comunes en sistemas de distribución municipal, pero poco frecuentes en sistemas de enfriamiento industriales tratados con control de pH.

El término general “incrustación” incluye poros o acumulaciones gelatinosas de sal insoluble, óxidos de hidrógeno producidos por la corrosión y material extraño como suciedad y fibras, se originan masas microbiológicas, muchos depósitos descritos como biológicos, son aglomerados con desechos debido a secreciones de microorganismos. La incrustación interfiere con el flujo de agua de enfriamiento, y la reducción en la velocidad de transferencia de calor.

La figura 10 muestra efectos extremos de la incrustación del agua en tuberías.



**Figura 10. Efectos de la incrustación del agua en tuberías.**

## 2.2.1 Precipitación y crecimiento cristalino.

En un estudio de la cinética de precipitación de cristales de sal solubles, Doremus (1970, p.74) postuló la siguiente secuencia:

Primero. Ocurre *enucleación*<sup>1</sup> con la formación de cierto número de partículas micro cristalinas de sal, entonces la *acreción*<sup>2</sup> empieza a ocurrir con la adsorción de una capa de iones en la superficie de la partícula permitiendo disolución y orientación parcial antes de que se alojen en la red. El tamaño de las partículas originales se incrementa y se unen en un proceso llamado *coagulación*<sup>3</sup>. Finalmente existe un crecimiento competitivo en el cual, las partículas grandes crecen a expensas de las pequeñas.

La deposición e incrustación de compuestos químicos cristalinos se puede controlar de dos maneras:

- a) Se puede introducir una impureza dentro de los cristales, los cuales forman más tarde bloques de crecimiento aislado.
- b) Pueden adherirse iones, los cuales son adsorbidos en la superficie del cristal, la lentitud y otros factores interfieren con este crecimiento aislado.

La adsorción de los iones en la superficie del cristal, es el factor más importante en el aspecto de controlar el proceso de crecimiento, la velocidad frecuentemente es influenciada por la sobresaturación inicial de la solución.

$$S = (C_i - C_0) / C_0 \quad (2.13)$$

La concentración del inhibidor de cristalización requerida, depende de la temperatura, la composición de la sal que precipita y el grado de

---

<sup>1</sup> Extracción del núcleo de una célula

<sup>2</sup> Crecimiento por adición de materia como en los depósitos minerales o los continentes

<sup>3</sup> Solidificación de líquidos

sobresaturación S. Sucesivamente a alta súper saturación y alta temperatura, mayor será la concentración del inhibidor para prevenir la precipitación.

## **2.2.2 Condiciones para inhibir incrustaciones.**

Es importante considerar propuestas a la técnica de la incrustación controlada, es decir, la pérdida en la transmisión de calor debido a la incrustación, particularmente en los pasos más calientes de los condensadores y enfriadores. Las observaciones hechas por varios operadores han dado como resultado conclusiones sobre la formación satisfactoria de incrustación que pueden obtenerse mediante el control de una serie de condiciones. Los factores más importantes para obtener incrustación de inhibición satisfactoria son:

- Los inhibidores orgánicos que dispersan al calcio, retardan la precipitación y previenen la formación de incrustación cristalina.
- Una alcalinidad de sodio alta u otros sólidos que tiendan a aumentar la solubilidad de los iones de calcio.
- Aceite sobre las superficies metálicas.
- Algas y limos.
- Exceso de fosfatos.

Existen pasos definidos a seguir para controlar los factores inhibidores, por ejemplo. Con alcalinidad de sodio elevada, úsese cal en lugar de sosa cáustica o carbonato de sodio para ajustar el contenido de alcalinidad del agua con el objeto de elevar el índice de saturación.

En algunos casos, en donde parte del agua de repuesto ha sido suavizada, se hace pasar agua cruda en derivación para ajustar el contenido químico. Gran parte de la pérdida de la transmisión de calor que se ha atribuido a la incrustación se ha debido en ocasiones a limos orgánicos los cuales tienen un poder aislante del calor aún mayor que el de la incrustación.

La incrustación ideal para proporcionar la mejor protección con el mínimo de aumento en la pérdida de transmisión de calor es un depósito firmemente adherente y cristalino que se vea escasamente, algunos de los mejores depósitos de protección no logran ser apreciados fácilmente cuando se encuentran húmedos, solamente son descubiertos al aplicárseles una gota de ácido clorhídrico, revelando la existencia de carbonato debido a la efervescencia de bióxido de carbono. (Powell, 1981, p.336-337).

### 2.2.3 Control de los efectos de la temperatura.

La crítica frecuente que se ha hecho sobre el uso de la incrustación controlada es el hecho de que la deposición es demasiado gruesa sobre las superficies frías, sin embargo, cuando el control de la incrustación ha sido adecuadamente regulado, ocurre una condición intermedia de uniformidad aceptable en el espesor de la incrustación sobre todo el intervalo de temperatura dentro del sistema, siempre que la variación no sea demasiado extensa.

### 2.2.4 Polifosfatos.

El fósforo es pentavalente en estos compuestos los cuales se encuentran coordinados tetraédricamente para compartir átomos de oxígeno.

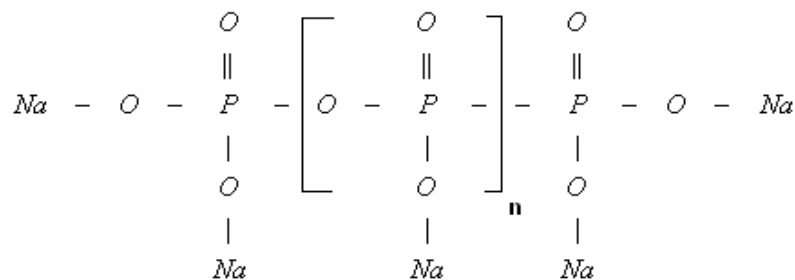
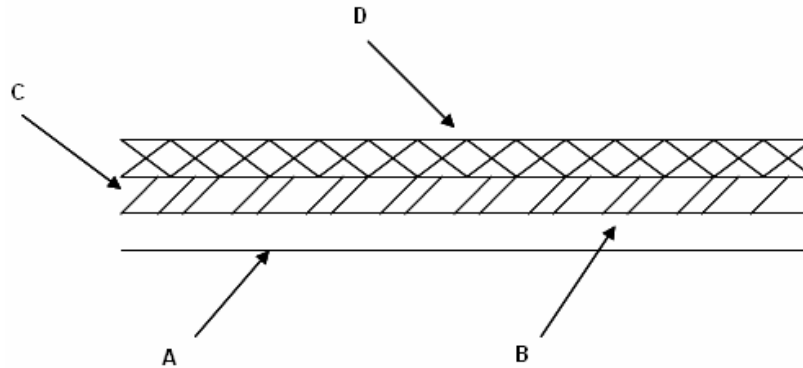


Figura 11. Estructura del polifosfato.

El tratamiento con polifosfatos es usado en muchos sistemas de distribución municipal y también dentro de los sistemas de enfriamiento debido a su bajo costo. El mecanismo de la acción protectora se muestra en la figura 12.

Las condiciones deben ser ajustadas para que el agua se encuentre inestable con respecto a la deposición del carbonato de calcio para que una pequeña capa sea depositada en la superficie del metal.



**Figura 12. Protección del polifosfato.**

(A) Superficie del metal; (B) "Cáscara de huevo" capa de  $\text{CaCO}_3$ ; (C) Capa de adsorción del polifosfato, (D) Cristales deformados de  $\text{CaCO}_3$ .

La pequeña capa de película protectora de polifosfato es adsorbida en la capa de cristales de carbonato de calcio, la superposición en la película es la capa de cristales deformados de carbonato que previenen el crecimiento de cristales normales de calcita los cuales dirigen la deposición. Los polifosfatos tienen un pequeño efecto en la precipitación del sulfato de calcio.

### 2.2.5 Metafosfatos.

Con el objeto de prevenir los depósitos de incrustación, mantener el hierro en solución y prevenir corrosión, se utilizan tratamientos en agua de enfriamiento con concentraciones de metafosfato suficientemente bajas para combinarse con todo el calcio presente. Una película perceptible de meta fosfato de hierro se deposita sobre la superficie del metal, presumiblemente sobre las áreas anódicas de donde se desprende el ion ferroso el cual inhibe la corrosión. El tratamiento funciona mejor con pH debajo de 7.0, esta es una condición que algunos operadores rehúsan tolerar debido al temor de acelerar la corrosión en el sistema.

Los metafosfatos tienen un costo intermedio entre los cromatos inorgánicos y orgánicos (en desuso) y las sales alcalinas usualmente requeridas para controlar el tratamiento de incrustación de carbonato. En muchos casos pueden justificarse si se usan sistemas cerrados ya que estos no presentan pérdidas excesivas de agua. Una razón para el control inefectivo por metafosfato ha sido el mantenimiento impropio de las sales meta, como resultado de un tratamiento ineficiente o de la conversión de metafosfato a ortofosfato.

### 2.2.6 Fosfonatos.

Los compuestos llamados fosfonatos últimamente han sustituido a los polifosfatos para controlar la deposición e incrustación. (Ralston 1969 p.21) investigó series homologas de fosfonatos que tienen la siguiente fórmula general, con valores de n = 0 hasta 14.

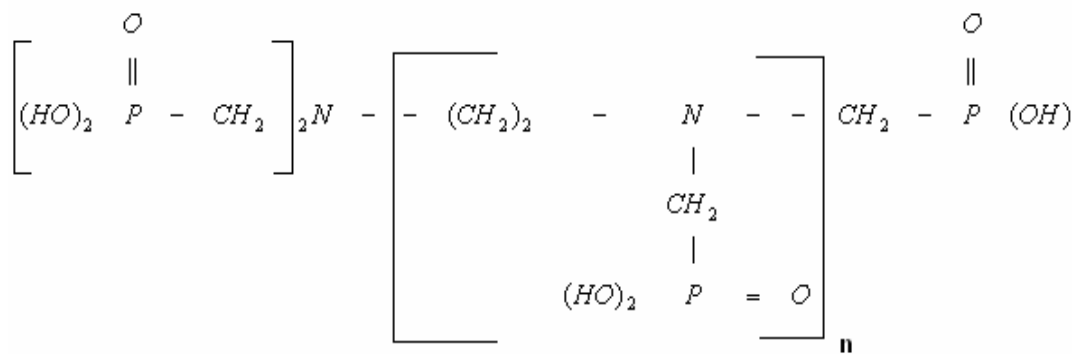


Figura 13. Fórmula general de los fosfonatos.

La sal de sodio del compuesto con n = 0, usualmente llamada amino -metileno-fosfonato, es la que se usa con mayor frecuencia en formulaciones comerciales.

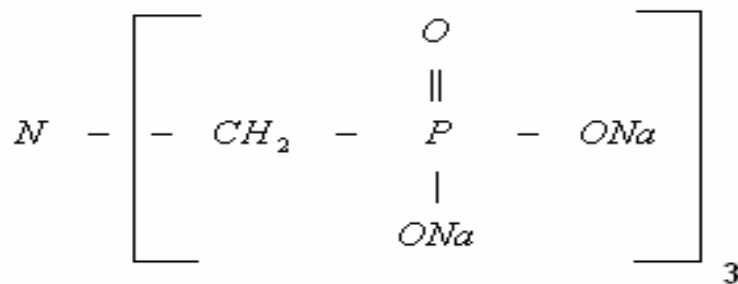


Figura 14. Amino-metileno-fosfonato

El ácido de esta sal es llamada [nitrilotris (metileno)] tri-ácido fosfónico. El mecanismo de inhibición de los fosfonatos es similar al de los polifosfatos.

A diferencia de los polifosfatos y ésteres de fosfatos con los fosfonatos, es que en en éstos últimos el átomo de carbono está unido directamente al átomo de fósforo en lugar de un grupo éter, siendo entonces la molécula más resistente a la hidrólisis.

### 2.2.7 Dispersantes sintéticos.

Un gran avance en el tratamiento de agua de enfriamiento es el desarrollo de electrolitos poliméricos como agentes dispersantes. Estos agentes son polímeros de cadena larga que contienen grupos iónicos a lo largo de la cadena, son más eficaces como dispersantes los que poseen pesos moleculares en el rango de 5 hasta 10 millones y los que son aniónicos.

La molécula de polímero ataca a la superficie de la partícula en uno de los sitios primarios de carga. La acrilamida es un monómero de polímero que polimeriza fácilmente a poliacrilamida-un polímero no-iónico.

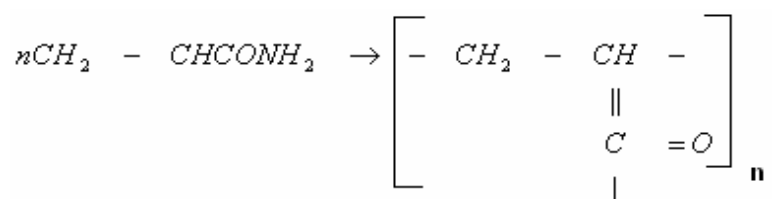


Figura 15. Formación de poliacrilamida.

Otro polímero aniónico que puede ser útil en el tratamiento de agua de enfriamiento es la poliacrilamida hidrolizada (figura 16).

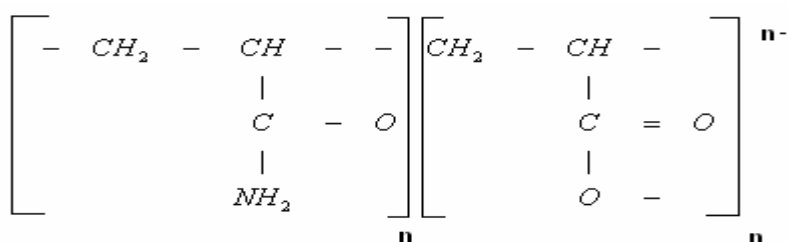


Figura 16. Poli acrilamida hidrolizada.



El poliacrilato con peso molecular menor a 10,000 en ocasiones es descrito como un antiprecipitante debido al complejo que forma entre el Ion calcio y los grupos carboxilos, éste compuesto es efectivo para prevenir la deposición de sulfato de calcio o carbonato de calcio en altas temperaturas. En ocasiones, los polímeros son recomendados para remover depósitos de lodo o barro de los sistemas de enfriamiento pero se necesita velocidad en el agua no menor de 2-3 ft/s para que cualquier dispersante polimérico sea efectivo. (Mc Coy, 1974, p.68-69).

### 2.2.8 Dispersantes para propósitos especiales.

Uno de los dispersantes aniónicos más poderosos es el químico llamado dioctil-sulfo-succianato, éste es un agente líquido usado especialmente para dispersar y eliminar aceite que se filtra dentro del sistema de enfriamiento.

La tabla 9 muestra la efectividad de algunos precipitantes según (Mc Coy 1974, p.65) con respecto a 3 tipos de sales incrustantes que se presentan usualmente en sistemas de enfriamiento.

**Tabla 9. Efectividad de los anti-precipitantes**

Inhibidor	ppm de inhibidor		
	I	II	III
Polifosfato	7.5	0.3	2 (90 %)
Fosfonato	1.5	0.25	1 (90 %)
Difosfonato	30 (20 %)	0.25	1 (90 %)
Ester de fosfato	1.6	0.7 (90 %)	3 (50 %)
Poli acrilato (Peso molecular menor de 1000)	2.8	1.5	3 (50 %)

I Sulfato de calcio, 6800 ppm, 24 horas a 150 °F

II Carbonato de calcio, 100 ppm, pH 10, 24 horas a 150 °F

III Ion ferroso, 2 ppm, pH = 6, 18 horas a 77 °F

## 2.3 Microbiología

### 2.3.1 Bacterias

Las bacterias son células microscópicas sencillas, organismos como las plantas que usualmente se reproducen por fisión binaria y en el mayor de los casos como la clorofila, las pseudomonas y eurobacter son los géneros que mayormente prevalecen en el agua de enfriamiento y los que más predominan en su formación. Las pseudomonas son organismos robustos son difíciles de exterminar, se presentan en forma natural en la tierra, son capaces de vivir con muy poco oxígeno.

### 2.3.2 Algas.

Existen dos familias de algas que prosperan en las torres de enfriamiento éstas son: Cianoficofita (alga azul-verdosa) y Cloroficofita (alga verde); su formación es cercana, muchas son aerobias y se reproducen por división celular aunque en forma de pequeñas esporas. El crecimiento de estos organismos en los componentes estructurales de las torres de enfriamiento es pequeño. Cuando se elimina con un microbicida adecuado éstas secan y desaparecen completamente. Cuando una gran población de alga se encuentra presente en una torre de enfriamiento en conjunción con lodo seco éste arrastra hacia la atmósfera debido al viento distribuyéndose lejos hacia la atmósfera en forma de polvo.

### 2.3.3 Fungi

Los Fungi son simples plantas que no contienen clorofila, sobreviven a menor pH que el de las bacterias y se reproducen por esporación. El interés de los operadores de las torres de enfriamiento se enfoca en el “Ascomicetes” y el “Fungi imperfecti” los cuales causan “podredumbre suave” y el “Basidiomicetes” que causa de la “podredumbre blanca” y “podredumbre café” en estructuras de madera.

### 2.3.4 Ataque biológico.

Todas las bacterias que crecen en los sistemas de enfriamiento son distribuidas extensamente en agua fresca y agua residual. Se mencionó

anteriormente que existen clases de Fungi que tienen efectos de deterioro en la madera.

La formación de pulpa o deslignificación es probablemente el proceso más importante relacionado con la descomposición química de la madera. Este proceso separa la lignina, prectinas y resinas de la celulosa entera o parcialmente fracturada. Deberá entenderse que ningún proceso remueve algún constituyente sin alterar o atacar alguno de los otros.

El ácido nítrico deslignifica la madera mediante una combinación de nitración, oxidación e hidrólisis. Las sales alcalinas producen deslignificación, mientras que las sales neutras sometidas a alta temperatura y presión actúan como ácidos para degradar la celulosa, todos los agentes oxidantes atacan a la lignina. El secado de la madera impregnada con álcali es severo a causa del efecto de hinchado que produce el álcali sobre la celulosa por lo que promueve la oxidación. La destrucción de la madera mediante ataque biológico, como en el caso de la deterioración química puede servir para un fin útil o bien, puede ser indeseable.

Los hongos de tipo carnosos son los verdaderos destructores de madera, la mayor parte de ellos atacan a la celulosa y producen la “podredumbre café”. Algunas especies destruyen a la lignina y producen la “podredumbre blanca” (figura 17) que es más rara.

Los hongos requieren un contenido de humedad que excede al de saturación de la fibra, y una humedad de 40 a 50%. La temperatura óptima para los hongos se encuentra entre 68 y 85° F (20 y 30° C). La celulosa resiste a la mayor parte de los productos químicos, pero es descompuesta rápidamente por muchos de los microorganismos, mientras que los hongos son selectivos en su ataque sobre la celulosa o la lignina, solamente una minoría prefiere la lignina, esto indica que ésta sirve para proteger a las celulosas de la podredumbre.

El efecto del ataque debido a hongos es una hidrólisis ácida seguida de oxidación. La velocidad de degradación de la celulosa o de la lignina depende usualmente de los hongos y la celulosa en la parte atacada. La remoción de la lignina hace a la celulosa más digestible por los microorganismos o formas superiores de vida animal.

### 2.3.5 Biocidas.

La suciedad microbiana es controlada por el uso de biocidas, los biocidas son compuestos seleccionados por su capacidad para matar microbios que tienen una toxicidad relativamente baja en plantas y animales. En los E.E.U.U., la EPA (Environmental Protection Agency) tiene autoridad reguladora para éstos y requiere el registro de todos los biocidas utilizados. El conjunto de datos presentados a la EPA incluye datos de la eficacia contra una variedad de microorganismos y datos de toxicidad para animales.

Existen dos grupos principales de biocidas químicos, los oxidantes y los no oxidantes.



**Figura 17. Podredumbre blanca en el relleno de una torre de enfriamiento**



**Figura 18. Incrustación en el relleno de una torre de enfriamiento.**

Los biocidas oxidantes incluyen al bromo, bromo-clorhidrato, cloro, dióxido de cloro, yodo, isocianuros, ozono u otros compuestos con la capacidad de aceptar electrones de otros compuestos que sirven como agentes reductores. Los biocidas oxidantes pueden acelerar la corrosión de metales si son dosificados en concentraciones excesivas.

Los biocidas halógenos (cloro, bromo y yodo), reaccionan con la proteína en las membranas de la célula para causar su disfuncionalidad, de esta manera matando/controlando el organismo, el ozono y el dióxido de cloro se cree, oxidan otros componentes de la célula microbiana.

Los biocidas no oxidantes incluyen muchos compuestos orgánicos para aplicaciones de enfriamiento de agua, como son el bromo-nitro-propanodiol, bromo-nitro-estireno, carbamatos, dicil-tio-tenamida, di-bromo-nitrilo-propanamida, dodecil-guanidina, hidrócloro, glutar-aldehído, iso-tiazolonas, bis-tio-cianatos de metileno, sales cuaternarias de fósforo y tri-hidroximetil-nitrometano. Los compuestos de amonio funcionan de varias maneras incluyendo su reacción con enzimas intracelulares solubilizando las membranas de la célula y precipitando proteínas esenciales en las paredes microbianas de la célula. Utilizados adecuadamente, los biocidas no oxidantes son eficaces para el control del proceso de ensuciamiento microbiano en instalaciones de enfriamiento de agua.

Ambos biocidas, oxidantes y no oxidantes pueden experimentar reacciones químicas con materiales en el agua que disminuyen su eficacia. Algunos biocidas reaccionan con componentes de algunos inhibidores de corrosión-incrustación, la utilización de biocida requiere un conocimiento de la química del agua, conocimiento básico de la microbiología e información específica sobre la instalación que está enfriando, fuentes de contaminación. La elección de los biocidas debe estar basada en función de los fluidos y los microorganismos a tratar. (*STANDAR ASHRAE, 2000*).

#### **2.3.5.1 Biocidas misceláneos.**

Estos biocidas son formulaciones de compuestos distintos, tienen el mérito en ser tóxicos para algas y bacterias, su compuesto activo consta de derivados de ácido di-tio-carbámico,  $\text{NH}_2\text{-CSSH}$ , como zinc dimetilditiocarbamato,  $\text{Zn}[(\text{CH}_3)_2\text{N-CSS}]_2$  el cual es especialmente activo, pero tiene la desventaja de ser extremadamente tóxico para los peces.

## 2.4 Resumen.

Los principales agentes que afectan la correcta operación de las torres de enfriamiento son la corrosión, deposición-incrustación y microorganismos. Anteriormente se han propuesto métodos y formulaciones para acondicionar el agua de enfriamiento con el objeto de combatir estos problemas, entre todos ellos destaca el índice de saturación de carbonato de calcio, útil para predecir el comportamiento incrustante o corrosivo del agua. Los métodos y formulaciones en conjunto con el monitoreo continuo, además de correctas prácticas de operación, representará mejores resultados al combatir los problemas en las torres de enfriamiento y equipos involucrados.

### **3 TRATAMIENTOS QUÍMICOS.**

El tratamiento de agua para sistemas de enfriamiento proporciona un fluido de transferencia de calor que permite al equipo funcionar óptimamente.

### **3.1 Objetivos de los tratamientos químicos en el agua de enfriamiento.**

Los objetivos del tratamiento químico en el agua de enfriamiento son los siguientes: (ASTRAQUÍMICA, 2007, p.2-3):

Prevención de incrustación y depósitos:

- Modificando la solubilidad de las sales.
- Dispersando los sólidos en suspensión.

Inhibición de la corrosión:

- Formando películas protectoras sobre la superficie del metal, ya sea por reacción, adsorción o precipitación.
- Manejando pH alto/ alcalinidad alta.

Control de la proliferación de microorganismos:

- Aplicando biocidas eficaces y adecuados, compatibles y sinérgicos entre sí.

Biodispersión o remoción de biocapa:

- Aplicando un removedor que disperse la materia orgánica depositada en sitios donde fluye al agua de enfriamiento.

### **3.2 El suministro de agua.**

El agua natural o agua cruda es una solución diluida de gases y minerales, algunos de los cuales son indeseables en el agua que se utiliza para enfriamiento. En la tabla 10 se encuentra el análisis de seis muestras aleatorias de agua, las cuales se consideran como posible agua de repuesto en un sistema de enfriamiento de recirculación abierto (Mc Coy, 1974, pp.111-112).



**Tabla 10. Análisis químico de seis tipos de agua de repuesto.**

Parámetro	Unidades	Tipo de agua					
		I	II	III	IV	V	VI
pH		8.5	7.6	7.1	7.7	7.5	7.6
Dureza Total	ppm CaCO <sub>3</sub>	27	78	160	546	125	79
Dureza de Calcio	ppm CaCO <sub>3</sub>	23	70	90	308	80	53
Alcalinidad – M	ppm CaCO <sub>3</sub>	26	60	45	336	122	59
Cloruros	ppm Cl <sup>-</sup>	6	30	150	24	3	6
Sulfatos	ppm SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	1	40	65	200	7	16
Sílice	ppm SiO <sub>2</sub>	12	6	12	12	5	51
Sólidos disueltos	ppm	70	192	205	645	145	160
Sólidos suspendidos	ppm			10	18	50	200
pH <sub>s</sub>		8.6	7.8	7.8	6.5	7.2	7.9
ISL		-1	-2	-7	+1.2	+3	-3
ISR		8.7	8.0	8.7	5.2	7.0	8.2

- El agua de la muestra I es de un suministro municipal tratada.
- II, III y IV son de agua de pozos.
- V de un lago y
- VI es agua de un río.
- Se considera Temperatura de 115° F (46.1° C)

### 3.2.1 Consideraciones.

- La concentración de la dureza de calcio en el agua de recirculación debe estar limitada para evitar la precipitación de sales de calcio insolubles, incluidas carbonatos, sulfatos y fosfatos.
- La alcalinidad al anaranjado de metilo es una medida de la cantidad de ácido requerido para ajustar el pH.
- Altas concentraciones de sulfato causan el deterioro en los bacines de concreto, lo que puede producir deposiciones insolubles de calcio.

- El sílice no debe exceder 150-175 ppm en agua de enfriamiento para evitar la formación de problemas de deposición de silicatos, los cuales tiene baja conductividad eléctrica. Por ejemplo: una pulgada en densidad de sílice, puede reducir el coeficiente de transferencia de calor en un intercambiador de un 80 - 90%.

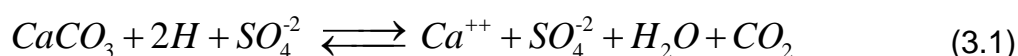
(Mc Coy, 1974, p.112).

- Alta concentración de sólidos disueltos produce 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.
- Finalmente, algunos microbiocidas son inocuos e ineficientes debido a concentración de sólidos alta.

La tabla 10 no revela la naturaleza de los sólidos suspendidos en el agua de III y IV, los cuales ofrecen continuamente óxidos e hidruros de acero. El agua de V y VI, puede contener cal, lodos, arena y escombros además de otras formas de contaminación, esto da paso a clarificar el agua de repuesto si los sólidos no disueltos exceden 200 ppm. El proceso comprende 2 etapas, sedimentación y coagulación.

El agua de IV requiere ácido sulfúrico a consideración para reducir la alcalinidad al anaranjado de metilo, la cual puede aumentar la concentración del ion sulfato, suficiente para precipitar sulfato de calcio.

La neutralización de la alcalinidad con ácido sulfúrico es representada por la ecuación 3.1.



El agua de V y VI contiene materia insoluble en consideración, esto requiere un dispersante efectivo, además, el agua de VI debe estar limitada a 3 ciclos de concentración tomando en cuenta la cantidad de sílice que contiene.

### **3.3 Selección de un programa de tratamiento.**

La selección del programa correcto de tratamiento requiere combinar características clave del sistema con varios programas de tratamiento y objetivos de los usuarios. (Loraine, 2001, p.123).

Un tratamiento químico inapropiado puede causar pérdidas en producción y falla en los equipos. Anteriormente se presentó una descripción de los conceptos de corrosión, deposición-incrustación y microbiología revisados individualmente para el acondicionamiento de agua de enfriamiento. En adelante es necesario considerar todos los factores juntos para disponer de un programa racional de tratamiento químico.

#### **3.3.1 Pretratamiento.**

##### **3.3.1.1 Intercambio iónico.**

El intercambio iónico es un proceso en que los iones se mantienen unidos a grupos funcionales sobre la superficie de un sólido por fuerzas electrostáticas, se intercambian por iones de una especie diferente en disolución. Debido a que la desmineralización completa puede alcanzarse mediante intercambio iónico, es posible utilizar procesos de tratamiento de corriente de partida, en los que parte del agua residual afluyente se desmineralice y se combine después con parte del efluente que ha sido desviado del tratamiento para producir un efluente de calidad específica, por ejemplo de una determinada dureza. (Ramalho, 1983, p.605-606).

##### **3.3.1.2 Osmosis Inversa.**

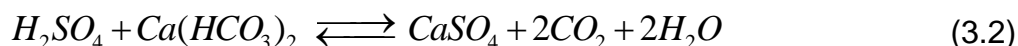
En el tratamiento de las aguas residuales mediante osmosis inversa, el afluyente contaminado se pone en contacto con una membrana adecuada a una presión superior a la presión osmótica de la solución, bajo estas circunstancias, el agua

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, p.620*).

### 3.3.2 Tratamiento químico.

#### 3.3.2.1 Tratamiento ácido.

El ácido sulfúrico a temperatura ambiente es un líquido corrosivo, es el ácido mineral de uso más frecuente en la industria. El agregado de ácido sulfúrico reduce la alcalinidad presente en el agua, produce formación de sulfatos según la ecuación 3.2, este tratamiento requiere de buen control para llevarse a cabo.



#### 3.3.2.2 Cloración.

La ecuación 3.3 muestra que cuando el gas cloro es burbujeado en agua, se forma por hidrólisis ácido hipocloroso, ion hidrógeno e ion cloro.



Si el agua contiene bases débiles, como  $CaCO_3$  o  $HCO_3^-$ , el ion hidrógeno reacciona fácilmente en comparación con el ácido hipocloroso débil. La hidrólisis se favorece por la presencia de bases débiles, las cuales hacen al cloro más soluble.

El ácido hipocloroso no disociado es el tóxico activo en la cloración. El ion hipoclorito no tiene actividad biocida, esta es la razón de que el cloro se vuelva inefectivo cuando el pH se incrementa por arriba de 7.

Existen combinaciones de químicos los cuales se recomiendan para tratar agua de enfriamiento y como en la mayoría de los productos comerciales, algunos

tienen buen rendimiento, otros son virtualmente inútiles y otros pueden ser realmente perjudiciales en el sistema.

### 3.3.3 Poli fosfato -zinc-orgánico.

La parte orgánica de esta combinación es la sal de sodio 2-mercaptobenzotiazol, el benzotriazol es menos frecuente y más caro que el primero, pero éste es compatible con cloruros. Las condiciones de operación comunes en el tratamiento se muestran en la tabla 11.

**Tabla 11. Condiciones óptimas para el tratamiento Polifosfato-Zinc-Orgánico.**

Parámetro	Unidades	Valores
pH		6.5-7
Orgánico <sup>3</sup> 30-60 ppm (total)	ppm	15-20
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	ppm	1.5-3.0
Zinc	ppm	1.5-2.0
Dureza de Calcio	ppm	300 máximo

### 3.3.4 Mercaptobenzotiazol-zinc-fosfonato.

Esta combinación debe ser usada con precaución, uno de sus fosfonatos debe ser especificado, la sal de zinc forma parte de la película protectora, al ser extremadamente rápida en su construcción se recomienda emplear algún tipo de agente dispersante como el poliacrilato, éste es tan eficiente que su dosis requiere de cuidado y control para evitar daños a corto plazo, el pH también es crítico en la aplicación de este tratamiento. La tabla 12 muestra las condiciones que han sido recomendadas para la dosificación:

**Tabla 12. Condiciones óptimas para el tratamiento mercaptobenzotiazol-zinc-fosfonato.**

Parámetro	Unidades	Valores
pH		7.5-8.0
MBT (*) 1.0-2.0	ppm	1.0-2.0
Fosfonato 8-10	ppm	8.0-10.0

Parámetro	Unidades	Valores
Zinc	ppm	4.5
Dureza de calcio	ppm	400 máximo
Polímero	ppm	3-5

(\*) Sodio 2 mercaptobenzotiazol, o benzotriazol, ingrediente activo de 1-10 ppm

### 3.3.5 Ferrocianido-zinc-polifosfato.

Si el control del pH puede ser mantenido, esta combinación provee exposición de protección a la corrosión. La concentración de fosfato es relativamente alta. Las recomendaciones en la dosificación se muestran en la tabla 13.

**Tabla 13. Condiciones óptimas para el tratamiento con ferrocianido-zinc polifosfato.**

Parámetro	Unidad	Valores
pH		6.0-6.5
Fosfato	ppm	20-25 (total)
Ferrocianido	ppm	6-7
Zinc	ppm	2-3
Dureza de Calcio	ppm	175 máximo

## 3.4 Resumen.

Existen diversas formulaciones que se pueden utilizar para prevenir y combatir los efectos de los problemas que se presentan en las torres de enfriamiento, las más efectivas se presentan en este capítulo. Los tratamientos que se presentan en la tabla 14 son una guía para controlar problemas específicos en las torres de enfriamiento. La combinación de estas formulaciones adecuadamente, tomando en cuenta consideraciones y análisis del suministro del agua en la torre, brinda mejores resultados en el momento de proponer un tratamiento químico.

Tabla 14. Opciones de programas de tratamiento para torres de enfriamiento.

Objetivo del tratamiento	Opciones de tratamiento químico.	Aplicación
Control de corrosión	Orto-fosfato, polifosfato	Excelente inhibidor, fácil de monitorear, extensamente usado en sistemas abiertos.
	Cromatos	Excelentes inhibidores, debido a regulación ambiental actualmente no se usa en torres de enfriamiento. ( <i>Silbert M, 1999, p.4</i> ).
	Zinc	Excelente inhibidor.
	Azoles	Protege el cobre y las aleaciones de cobre degradada por halógenos.
	Molibdeno	Generalmente usada en sistemas de enfriamiento cerrados
	Nitrito	Restringido para su uso en sistemas de lazo cerrado.
	Sílica	Generalmente usado en sistemas de lazo cerrado
	Borax	Generalmente usado en sistemas de lazo cerrado
Control de incrustación	Fosfonato	Se monitorea fácilmente Buen poder de dispersión
	Carboxilato	Tecnología reciente
	Dispersantes: Acrilamida, Derivados ácido acrílico, Derivados ácido polimaleico Polímeros de acrilamida	Efectivos en sistemas con alto ensuciamiento
	Bio dispersantes	Efectivo en sistemas con alta incrustación.
Control microbiológico	Halógenos: Bromo y Cloro	Requiere de un buen control de pH
	Biocidas orgánicos	Mayormente efectivos en mezclas.
Antiespumantes	Base alcoholes y ácidos grasos.	Efectivos en mezclas con agua tratada

## 4 CASO DE ESTUDIO.

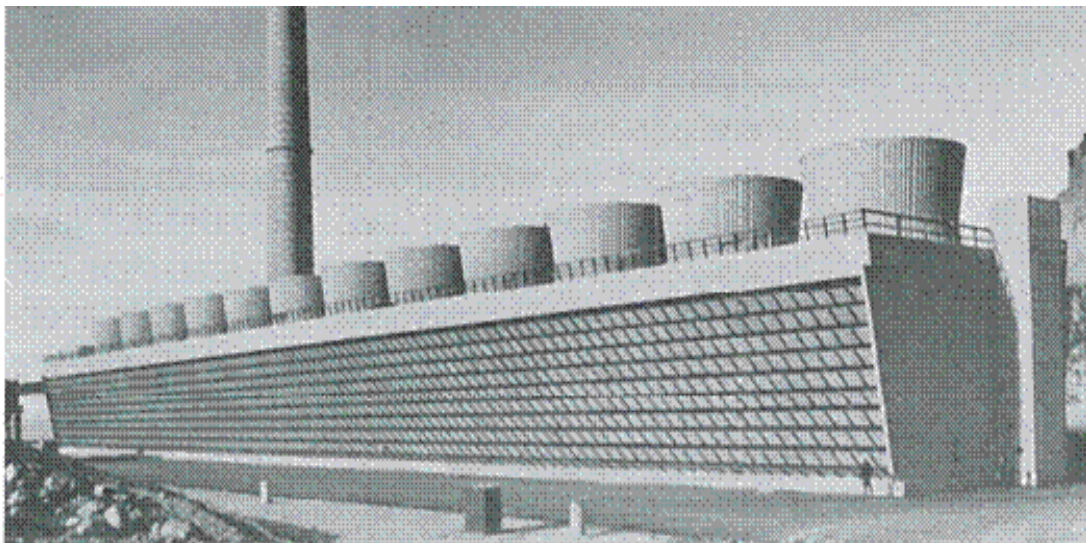


## 4.1 Descripción.

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 haciendo más eficiente energéticamente a las torres de enfriamiento.

El aumento de calidad en el agua de repuesto se traduce en el aumento de los ciclos de concentración. Otra opción para aumentar los ciclos de concentración es implementar tratamientos químicos adecuados en el agua de circulación de la torre.

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 19 muestra una torre de enfriamiento de este tipo.



**Figura 19. Torre de enfriamiento multicelda de tiro inducido y flujo cruzado**

El caso de estudio es el siguiente:

La torre de enfriamiento que brinda servicio a una planta Hidrodesulfuradora integrada con 5 unidades, una planta de desintegración catalítica y una unidad recuperadora de azufre (figura 20) está construida de concreto reforzado y

acero al carbón en su estructura, La torre de enfriamiento es de flujo cruzado y tiro inducido con un ventilador por cada una de sus 11 celdas; se le suministra agua de repuesto proveniente de la red general de pozos de la refinería.

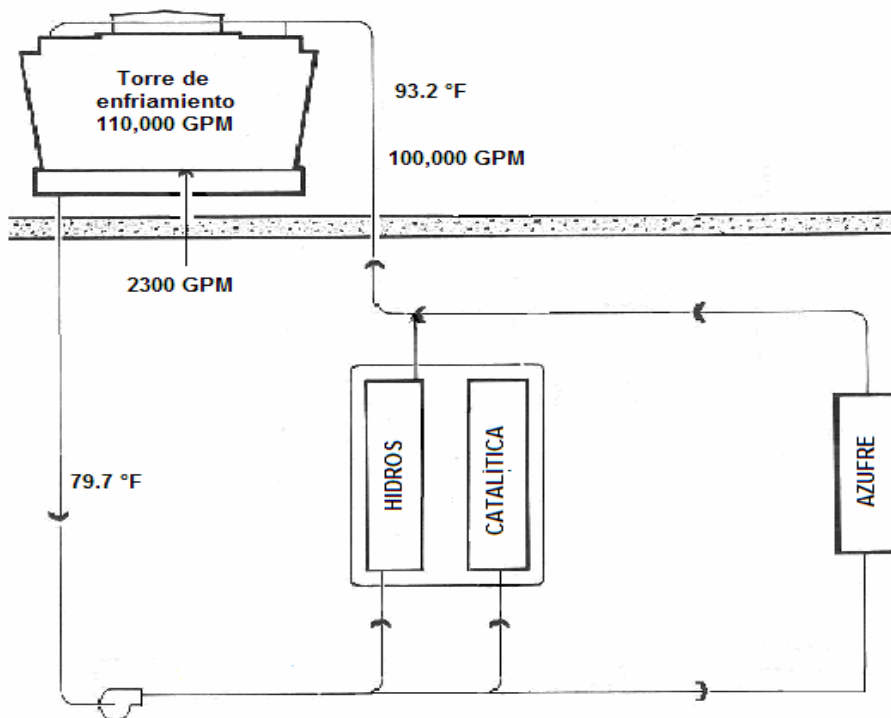


Figura 20. Esquema del caso de estudio

El personal de la refinería realizó un análisis estadístico en el último año acerca de las condiciones de operación en la torre de enfriamiento los resultados se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Resultados del análisis estadístico en la torre.

Parámetro	Unidades	Valor
Flujo de diseño	GPM (m <sup>3</sup> /día)	110,000 (601,920)
Flujo de Operación	GPM (m <sup>3</sup> /día)	100,000 (547,200)
Volumen Total	Gal (m <sup>3</sup> )	600,000 (2280)
Agua de repuesto	GPM (m <sup>3</sup> /día)	2,300 (12,585)
Temperatura de agua caliente	° C (° F)	34 (93.2)
Temperatura de agua fría	° C (° F)	26.5 (79.7)
Rango de temperatura	° C (° F)	7.5 (13.5)

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.

Con las ecuaciones simplificadas de la tabla 3, es posible calcular los ciclos de concentración estimados.

$$C = \frac{M}{B} = \frac{2,300}{950} = 2.42$$

$$E = \frac{R \times \Delta T}{1000} = \frac{100,000 \times 13.5}{1000} = 1,350 \text{ GPM}$$

$$B = M - E = 2,300 - 1,350 = 950 \text{ GPM}$$

$$M = B + E = 1350 + 950 = 2300 \text{ GPM}$$

Los ciclos de concentración estimados en la torre de enfriamiento son 2.42, lo que representa un consumo de agua de repuesto (M) de 2,300 GPM (12,585.6 m<sup>3</sup>/día).

De acuerdo a estos datos, es posible graficar los ciclos de concentración y el flujo de agua de repuesto que entra en la torre. La figura 21 muestra el efecto del aumento en los ciclos de concentración en cuanto a la disminución de flujo de agua de repuesto en la torre de enfriamiento.

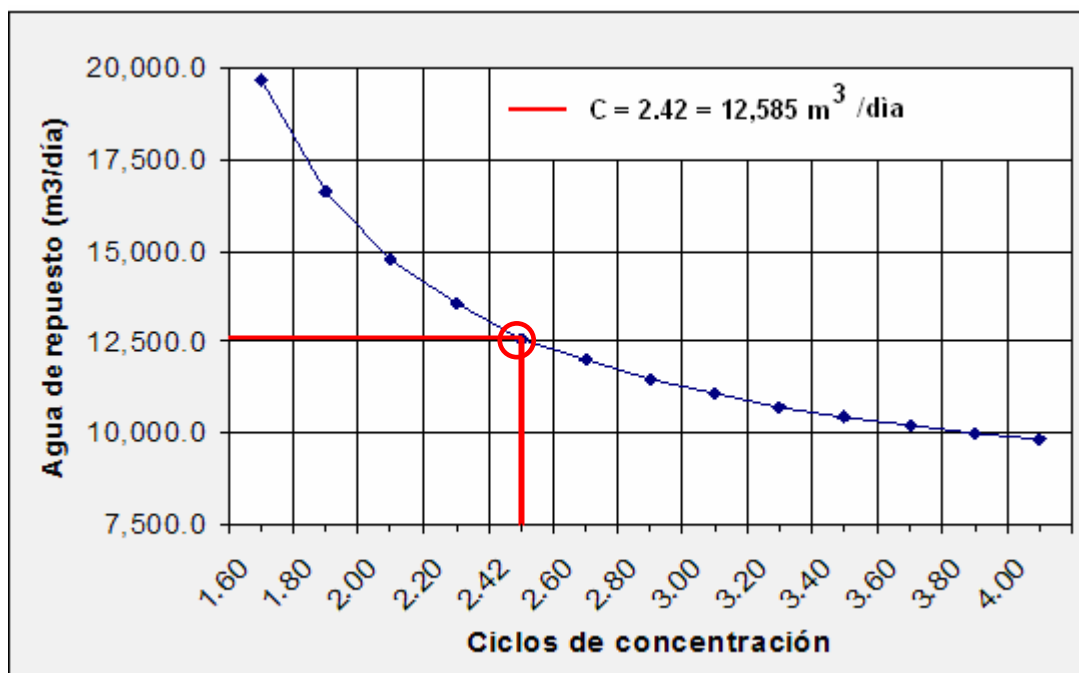


Figura 21. Ciclos de concentración reportados por la refinería.

## 4.2 Análisis Preliminar.

El personal de laboratorio de la refinería encargado de realizar análisis químicos toma muestras del agua proveniente de pozos que suministra agua de repuesto a la torre de enfriamiento y al agua de recirculación de la torre, los resultados de un análisis estadístico en el último año acerca de las sales presentes se reportan en la tabla 16.

Tabla 16. Análisis de laboratorio en el agua de la torre de enfriamiento

Parámetro	Unidades	Agua de repuesto	Agua de recirculación
Dureza Total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	448	1010
Dureza de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	268	608
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	63	141
Hierro	mg/L	0.025	0.09
Conductividad	μS/cm	1,953	4,223

Debido a que se cuenta con los datos de laboratorio correspondiente a las sales presentes en el agua de repuesto de la torre, se comparan los resultados

de los ciclos de concentración reportados (2.42) y los calculados con datos de laboratorio.

La ecuación de la tabla 3 es útil para determinar los ciclos de concentración en función de la concentración de las sales presentes:

$$C = \frac{x_R}{x_M}$$

Los resultados de los ciclos de concentración se encuentran reportados en la tabla 17.

**Tabla 17. Ciclos de concentración base a sales presentes.**

Parámetro	Unidades	Ciclos de concentración
Dureza Total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	2.25
Dureza de Calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	2.26
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	2.23
Hierro	mg/L	3.6
Conductividad	μS/cm	2.16

Descartando el valor de ciclos de concentración del hierro (3.6), la tabla 17 muestra que los ciclos de concentración en la torre se encuentran alrededor de 2.23. La figura 22 muestra el comparativo de los resultados reportados en refinería y los calculados con datos de laboratorio.

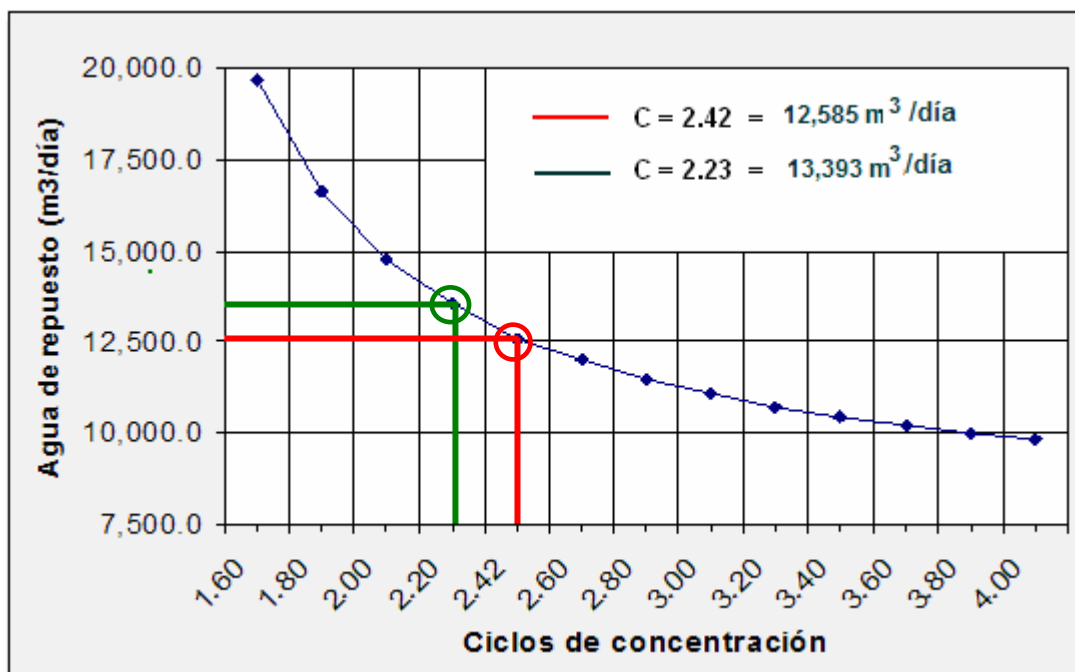


Figura 22. Ciclos de concentración vs. agua de repuesto (condiciones reales).

Los resultados de este análisis demuestran que los ciclos de concentración calculados con datos de laboratorio son menores respecto a los reportados por refinería, debido a que se cuenta con estos datos, se reportan como datos reales los ciclos de concentración determinados con la concentración de sales en el agua de la torre (2.23).

Tabla 18. Datos de operación de la torre de enfriamiento

Parámetro	Unidades	Valor
Flujo de recirculación de diseño.	GPM (m <sup>3</sup> /día)	110,000 (601,920)
Flujo de recirculación real.	GPM (m <sup>3</sup> /día)	100,000 (547,200)
Agua de repuesto reportada.	GPM (m <sup>3</sup> /día)	2,300 (12,585)
Agua de repuesto calculada.	GPM (m <sup>3</sup> /día)	2,447 (13,393)
Diferencia.	GPM (m <sup>3</sup> /día)	147.5 (807.4)
Ciclos de concentración reportados.		2.42
Ciclos de concentración calculados.		2.23
Repuesto de la recirculación reportada.	%	2.3
Repuesto de la recirculación calculada.	%	2.44

La tabla 18 muestra la diferencia de 147.5 GPM ( $807\text{m}^3/\text{día}$ ) en consumo de agua de repuesto conforme a ciclos de concentración reportados por refinería y los calculados con datos de laboratorio.

A continuación se presentan opciones para incrementar los ciclos de concentración en la torre de enfriamiento del caso de estudio.

### 4.3 Opción 1: Mezcla de agua de pozos con agua desmineralizada.

El agua desmineralizada, es el agua a la cual se le quitan los minerales y las sales, se utiliza cuando se requiere agua con bajo contenido en sales o baja conductividad. Las concentraciones de la tabla 19 representan los valores máximos permisibles de agua desmineralizada en la refinería

**Tabla 19. Valores máximos para agua desmineralizada en la refinería.**

Dureza Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L )	Dureza de Calcio (mg CaCO <sub>3</sub> /L )	Sílice (mg CaCO <sub>3</sub> /L )	Hierro (mg CaCO <sub>3</sub> /L )	Conductividad $\mu\text{S/cm}$
3	2	3	0.001	5

De la misma manera, se revisaron los límites permisibles de calidad para la alimentación de agua de repuesto en las torres de enfriamiento de la refinería (tabla 20), con estos es posible realizar pruebas para determinar una mezcla teórica de agua de pozos con agua desmineralizada.

**Tabla 20. Límites permisibles de agua de pozo en las torres de enfriamiento de la refinería.**

Parámetro	Unidades	Agua de pozo	Valores máximos
Dureza Total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	448	1,400
Dureza de Calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	268	850
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	63	200
Hierro	mg/L	0.025	1.0
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	1,953	6,000

Se consideró una mezcla teórica de 80% de agua de pozos con 20% de agua desmineralizada para elevar los ciclos de concentración de 2.23 a 3.8 de acuerdo a distintas proporciones de estos dos tipos de agua, mediante mezclas ponderadas (ecuación 4.1).

$$x_M = x_A * y_A + x_B * y_B \quad (4.1)$$

$$x_M = 3(0.2) + 448(0.8) = 359 \text{ mg / L}$$

Con la ecuación para ciclos de concentración de la tabla 3, evaluada a 3.8 en base a dureza total:

$$x_R = C * x_M = 3.8 * 3.59 = 1364.2 \text{ mg / L}$$

**Tabla 21. Concentraciones del agua de recirculación con mezcla de agua de 80% de pozos y 20% de agua desmineralizada.**

Parámetro	Unidades	Agua desmin. 20%	Agua de pozo 80%	Mezcla teórica (3.8 C)
Dureza Total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	3	448	1364.2
Dureza Ca	mg CaCO <sub>3</sub> / L	2	268	816.24
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	3	63	193.8
Hierro	mg/L	0.001	0.025	0.07676
Conductividad	μS/cm	5	1953	5940.92

De acuerdo a los resultados reportados en la tabla 21, la mezcla con 80% de agua de pozos con 20% de agua desmineralizada no excede los límites máximos en concentraciones que acepta la refinería para el suministro de agua de repuesto en sus torres de enfriamiento.



Los resultados de los cálculos para diferentes concentraciones de los dos tipos de agua para determinar la mezcla se encuentran reportados en el anexo 1 del presente trabajo.

La tabla 22 muestra el aumento en los ciclos de concentración de 2.23 a 3.8, lo que representa un ahorro de 25 % (3367,5 m<sup>3</sup>/día) en el flujo de agua de repuesto a la torre de enfriamiento, la figura 23 ilustra lo descrito.

**Tabla 22. Ahorro en agua de la mezcla agua de pozos-agua desmineralizada a 3.8 ciclos de concentración.**

Agua de repuesto actual (m <sup>3</sup> /día)	Agua de repuesto c/mezcla de agua desmineralizada (m <sup>3</sup> /día)	Consumo de agua de pozo (m <sup>3</sup> /día)	Consumo de agua desmineralizada (m <sup>3</sup> /día)	Ahorro en agua (m <sup>3</sup> /día)	Ahorro %
<b>13,393</b>	<b>10,025.5</b>	<b>8020.4</b>	<b>2005.1</b>	<b>3367.5</b>	<b>25</b>

“C-TOWER” es la abreviatura de las palabras Cooling TOWER, estas constituyen el nombre de un programa de cálculo para estimar el consumo de agua y productos de tratamiento químico en una torre de enfriamiento. C-TOWER fue desarrollado por MARVIN SILBERT y asociados.

Los datos del ahorro de agua y consumo de tratamiento químico en la evaluación de opciones del presente trabajo se pueden comprobar con los resultados obtenidos en el programa C-TOWER, los cuales se encuentran reportados en el Anexo 2.

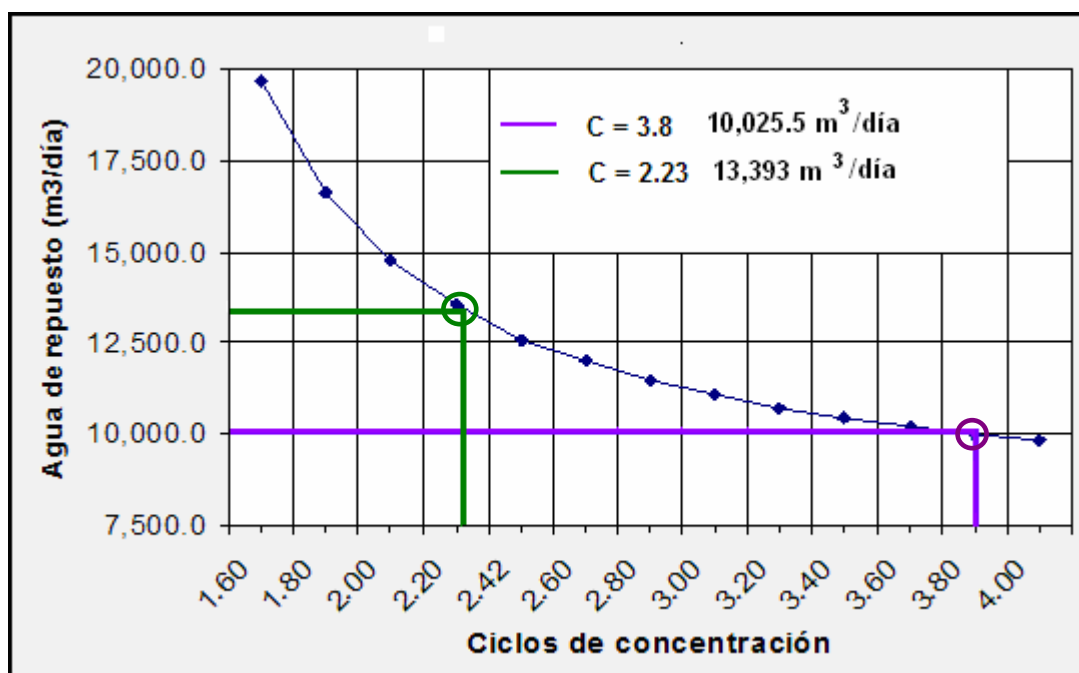


Figura 23. Ahorro en agua de repuesto con 3.8 ciclos de concentración.

#### 4.4 Opción 2: Mezcla de agua de pozos con agua de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

El agua residual tratada puede ser utilizada como agua de repuesto en torres de enfriamiento. Antes de usar este tipo de agua, es necesario evaluar por métodos físicos y químicos su calidad debido a los efluentes que son descargados en ésta, posteriormente es necesario evaluar la tendencia incrustante y corrosiva para proponer un tratamiento químico adecuado en este tipo de agua.

La ventaja que conlleva la utilización de este tipo de agua son dos: el ambiental debido al reúso del agua y el económico debido a la diferencia en precios del agua de pozos con respecto al agua tratada.

Para determinar la mezcla teórica con los dos tipos de agua, se revisaron los límites permisibles de agua en torres de la refinería que utilizan agua de la

PTAR (Planta de tratamiento de aguas residuales) como agua de repuesto y datos del personal de laboratorio de la refinería en el agua de PTAR.

Los resultados del análisis estadístico en parámetros de laboratorio del último año y los datos de los límites permisibles establecidos por la refinería se reportan en la tabla 23.

**Tabla 23. Límites permisibles de agua de PTAR en las torres de enfriamiento de la refinería.**

Parámetro	Unidades	Agua de PTAR	Valor máximo
Dureza Total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	280	1,100-1,300
Dureza de Calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	165	700-770
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	38	171-185
Hierro	mg/ L	0.17	0.30
Conductividad	μS/cm	2,700	3,500-4,100

De acuerdo a los cálculos realizados, a diferentes concentraciones de agua los cuales se reportan con detalle en el Anexo 1 del presente documento, se considera la mezcla con 50% de agua pozos y 50% agua de la PTAR para aumentar los ciclos de concentración de 2.23 a 3.1, los resultados se muestran en la tabla 24.

**Tabla 24. Concentraciones del agua de recirculación con mezcla: 50% de pozos y 50% de la PTAR.**

Parámetro	Unidades	Agua PTAR 50%	Agua Pozo 50%	Mezcla teórica (3.1 Ciclos)
Dureza Total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	280	448	1,128.40
Dureza Ca	mg CaCO <sub>3</sub> / L	165	268	671.15
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	38	63	156.55
Hierro	mg/ L	0.17	0.02	0.30
Conductividad	μS/cm	2,700	1,953	7,212.15

La concentración de las sales presentes en la mezcla teórica propuesta (3.1 C). Los niveles de dureza total, dureza de calcio, sílice y hierro se ubican por debajo de los límites establecidos para las torres de enfriamiento, sin embargo

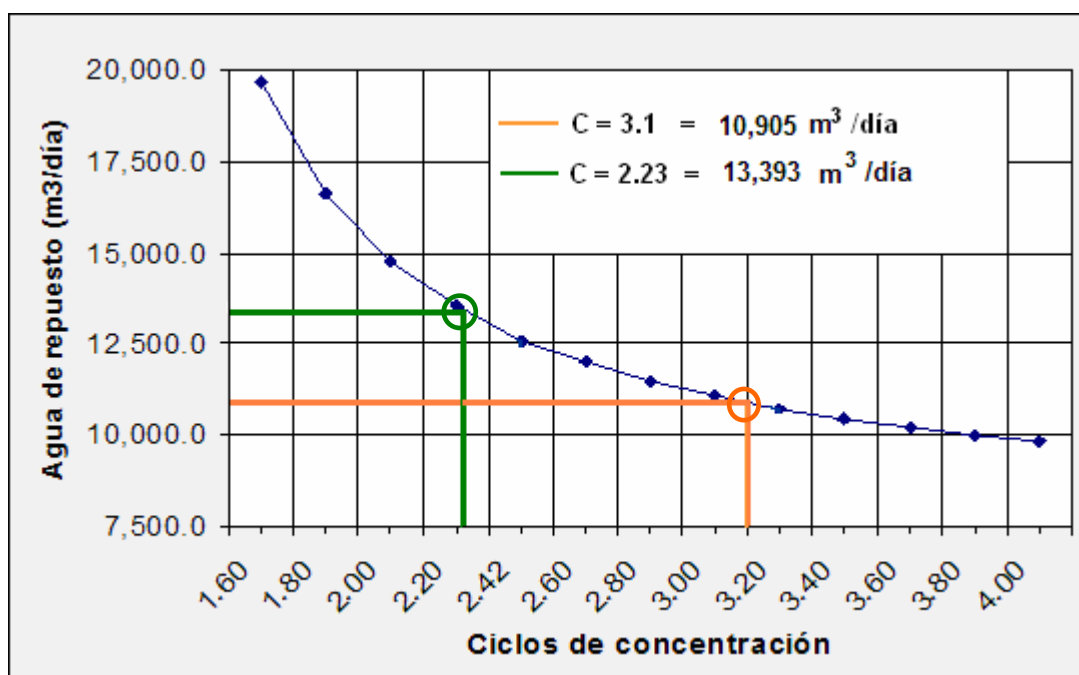
la conductividad los excede por mucho, más adelante se considerará este parámetro de sólidos en el tratamiento de la torre.

La tabla 25 presenta los resultados de ahorro de agua al emplear la mezcla con agua de la PTAR a 3.1 ciclos de concentración.

**Tabla 25. Ahorro en agua de la mezcla de agua de pozos con agua de la PTAR**

Agua de repuesto actual (m <sup>3</sup> /día)	Agua de repuesto c/mezcla de agua PTAR (m <sup>3</sup> /día)	Consumo de agua de pozo (m <sup>3</sup> /día)	Consumo de agua PTAR (m <sup>3</sup> /día)	Ahorro en agua (m <sup>3</sup> /día)	Ahorro %
<b>13,393</b>	<b>10,905</b>	<b>5,452.5</b>	<b>5,452.5</b>	<b>2,488</b>	<b>18.5</b>

Los resultados indican un ahorro del 18.5 % en agua de repuesto (2,488 m<sup>3</sup>/día), al emplear la mezcla de agua de pozo-agua de PTAR al 50%, tal como se ilustra en la figura 24.



**Figura 24. Ahorro en agua de repuesto con 3.1 ciclos de concentración.**

## 4.5 Análisis del agua de la torre de enfriamiento.

### 4.5.1 Análisis de la opción 1.

La tabla 26 muestra los resultados promedio de los reportes que entrega la empresa que se encarga de dar tratamiento a la torre de enfriamiento, empleando agua de repuesto con la mezcla de agua de pozos - agua desmineralizada y los límites permisibles correspondientes. Los parámetros de laboratorio se determinaron de muestras colectadas en el bacín de la torre de enfriamiento.

**Tabla 26. Resultados de laboratorio de la mezcla: agua de pozos- agua desmineralizada.**

Parámetro	Unidad	Valor	Valor máximo
pH		7.2	7.1-7.3
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	1,255.20	1,400
Dureza calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	760	850
Alcalinidad- M	mg CaCO <sub>3</sub> / L	113	185
Alcalinidad-P	mg CaCO <sub>3</sub> / L	-----	-----
Conductividad	μS/cm	5,390	6,000
Turbidez	NTU	5.80	20
Sílice	mg/ L	184.70	200
Hierro	mg/ L	0.09	1.0
Cobre	mg/ L	0.04	1.0
Sulfuros	mg/ L	6X10 <sup>-4</sup>	0.45
Fosfatos	mg/ L	3.60	1-4
Zinc	mg/ L	1.65	1-2
Cloruros	mg/ L	250	320
Sulfatos	mg/ L	14	-----
Cloro residual	mg/ L	0.47	0.4-0.8
Sólidos suspendidos	mg/ L	125	-----
Sólidos disueltos	mg/ L	965	-----

Es de enorme importancia conocer los niveles de corrosión e incrustación en las torres de enfriamiento a diferentes ciclos de concentración ya que el

aumento de los ciclos aumenta la recirculación del agua en las torres reduciendo las purgas pero de igual manera aumenta la cantidad de sólidos presentes en el agua.

“W-INDEX” (Water scaling INDEX calculation) es un programa desarrollado por MARVIN SILBERT and ASSOCIATES en 1990, para calcular el potencial de incrustación del carbonato de calcio en sistemas de agua, este programa calcula los índices más comunes de incrustación (índice de estabilidad de Langelier, índice de Ryznar, índice de Puckorius e índice de Larson Skold).

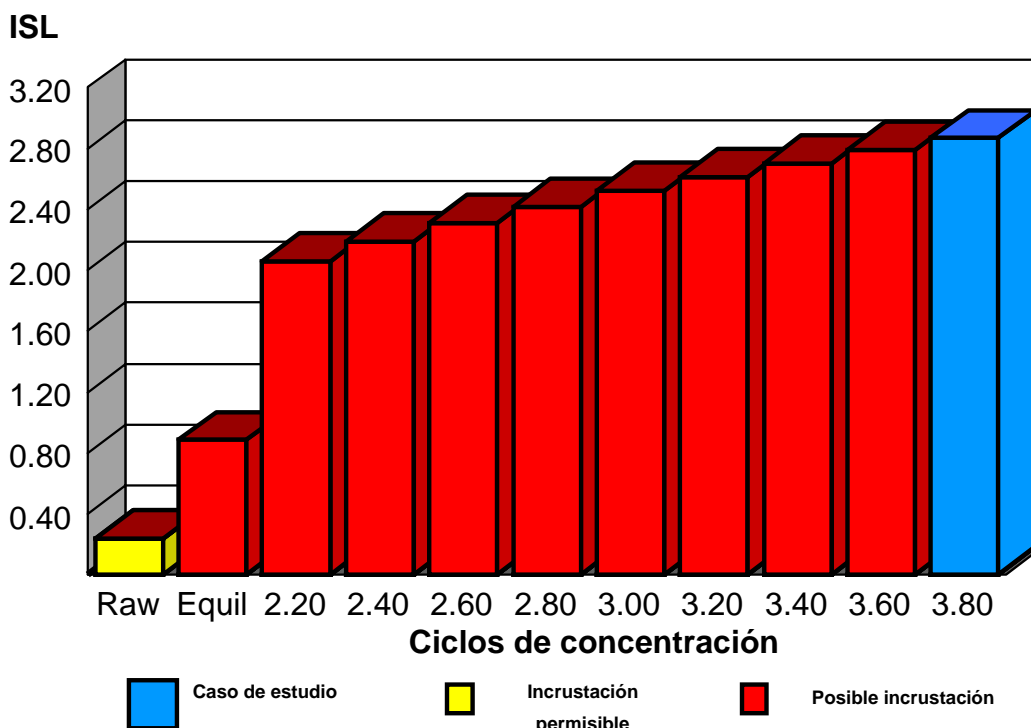
Para evaluar la tendencia incrustante o corrosiva del agua que circula con la mezcla antes descrita, se determinaron valores promedio de los Índices de Langelier, Puckorius y Ryznar con el programa W-INDEX.

La tabla 27 muestra los valores calculados para la mezcla agua de pozos-agua desmineralizada.

**Tabla 27. Índices empleados para el diagnóstico de agua de pozos-agua desmineralizada.**

Índice	Valor	Valor @ 3.8 C	Valor Ideal	Comentario
Índice de Langelier	0.24	2.87	ISL = 0 Agua en equilibrio	Leve tendencia a corrosión @ 3.8 C es incrustante
Índice de Ryznar	6.73	3.08	5.5 < ISR < 7.0 Zona estable o ligeramente incrustante	Estable con tendencia levemente corrosiva @ 3.8 C es extremadamente incrustante
Índice de Puckorius	6.38	-----	4.5 < PSI < 6.5, Rango óptimo	Tendencia leve a la corrosión

La figura 25 muestra el incremento en el Índice de saturación de Langelier (ISL) al aumentar los ciclos de concentración, esto significa alta tendencia de incrustación en los componentes de la torre, tubería e intercambiadores de calor de las plantas a las que brinda servicio.



(C) 1998, Marvin Silbert and Associates

**Figura 25. Cambio del Índice de Saturación de Langelier con los ciclos de concentración, caso: agua de pozos –agua desmineralizada.**

La Información completa y los resultados antes descritos, se encuentran reportados en el Anexo 3 del presente trabajo “Cálculos en el programa W-INDEX”.

#### 4.5.2 Análisis de la opción 2.

La tabla 28 presenta los resultados de los reportes que entrega la empresa que brinda tratamiento a la torre de enfriamiento que opera con agua de repuesto, mezcla: agua de pozos- agua de PTAR.

**Tabla 28. Resultados de laboratorio de la mezcla: agua de pozos- agua de PTAR.**

Parámetro	Unidad	Valor	Valor Máximo.
pH		7.2	7.1-7.3
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	1063.5	1400
Dureza calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	628	850
Alcalinidad- M	mg CaCO <sub>3</sub> / L	113	185
Alcalinidad-P	mg CaCO <sub>3</sub> / L	0.5	15
Conductividad	μS/cm	5230	6000
Turbidez	NTU	16.15	20
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	160	200
Hierro	mg/ L	0.23	1
Cobre	mg/ L	0.024	1.0
Sulfuros	mg/ L	0.0007	0.45
Fosfatos	mg/ L	3.0	1-4
Zinc	mg/ L	1.22	1-2
Cloruros	mg/ L	835	-----
Sulfatos	mg/ L	20	-----
Cloro residual	mg/ L	0.36	0.4-0.8
Sólidos suspendidos	mg/ L	150	-----
Sólidos disueltos	mg/ L	1539	2145

La tabla 29 reporta los índices de Langelier, Ryznar y Puckorius para la mezcla: agua de pozos-agua de PTAR.

**Tabla 29. Índices empleados para el diagnóstico de agua de pozos-agua de PTAR.**

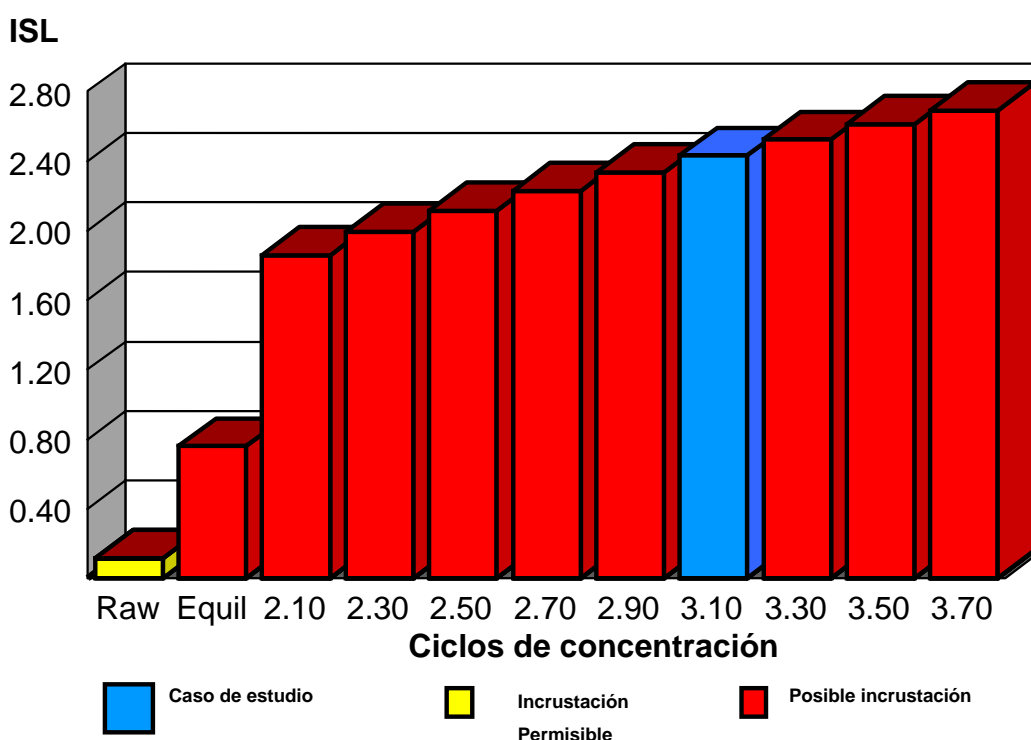
Índice	Valor	Valor @ 3.1 C	Valor Ideal	Comentario
Índice de Langelier	0.11	2.43	ISL = 0 Agua en equilibrio	Leve tendencia a depósitos e incrustaciones @ 3.1 C es incrustante
Índice de Ryznar	6.97	3.8	5.5 < ISR < 7.0 Zona estable o ligeramente incrustante	Ligeramente corrosiva @ 3.1 C es severamente incrustante
Índice de Puckorius	6.63	-----	4.5 < PSI < 6.5, Rango óptimo	levemente corrosiva



El índice de Puckorius se encuentra fuera del intervalo óptimo por lo que se predice que el agua es ligeramente corrosiva. El Índice de Ryznar indica que el agua se encuentra con tendencia a la corrosión, el valor del Índice de Langelier, al ser ligeramente positivo tiene leve tendencia a dejar depósitos e incrustaciones, por otra parte el cambio al aumentar los ciclos de concentración es notorio, de acuerdo al Índice de Ryznar, el agua a 3.1 ciclos de concentración es severamente incrustante en la torre de enfriamiento.

Los resultados del efecto de los ciclos de concentración con la temperatura y la concentración de los índices mencionados se encuentran reportados en el Anexo 3 del presente trabajo “Cálculos en el programa W-INDEX”.

La figura 26 muestra el incremento en el Índice de saturación de Langelier (ISL) al aumentar los ciclos de concentración de 2.23 a 3.1.



(C) 1998, Marvin Silbert and Associates

**Figura 26. Cambio en el Índice de Saturación de Langelier con los ciclos de concentración, caso agua de pozos- agua PTAR.**

## 4.6 Tratamiento químico.

Los productos químicos que se dosifican a una torre de enfriamiento tienen como propósito:

- Aumentar el número de ciclos de concentración con el consecuente ahorro de agua de repuesto.
- Prevenir incrustaciones o depósitos debidos a la concentración de sales por la evaporación de agua en la torre.
- Mantener bajo control la corrosión en los equipos de proceso.
- Evitar la proliferación de microorganismos los cuales afectan la operación en la torre e intercambiadores de calor.

La torre de enfriamiento del caso de estudio basa su tratamiento en dosificación de ácido sulfúrico al 98% para el control de pH y cloro para el control microbiológico. La empresa encargada de dar tratamiento químico en la torre de enfriamiento utiliza sus productos para controlar corrosión incrustación y microorganismos, no se cuenta con la información necesaria para conocer la combinación de los componentes en cada de uno de sus productos.

Como se explicó anteriormente, la consecuencia de aumentar los ciclos de concentración en las torres de enfriamiento es incrementar la cantidad de sales en el agua de recirculación causando incrustaciones, corrosión o crecimiento de materia orgánica (principalmente algas).

Enseguida se planteará un tratamiento químico aplicable en los dos escenarios antes mencionados:

#### **4.6.1 Tratamiento en la torre de enfriamiento que opera con mezcla de agua de pozos-agua desmineralizada.**

Los índices calculados en esta mezcla demuestran leve tendencia corrosiva en el agua que circula en la torre de enfriamiento. El aumento en los ciclos de concentración (3.8) se manifiesta con incremento en la concentración de las sales presentes y por tanto en deposición e incrustaciones.

La tabla 21 muestra que al aumentar los ciclos de concentración a 3.8 el valor de sílice se incrementa a 193.8 ppm, esto significa que el valor de la sílice se encuentran cercano al límite máximo permitido para las torres de enfriamiento que utiliza este tipo de agua, es recomendable no exceder un intervalo de sílice de 150-175 mg  $\text{SiO}_3/\text{L}$  en agua de enfriamiento ya que esto significa alta incrustación de silicatos y origina baja eficiencia en la transferencia de calor.

El valor de los sólidos disueltos totales en 3.8 ciclos de concentración es de 3,667 ppm según cálculos en el programa W-INDEX (Anexo 3), esto genera deposición en líneas y equipo de la torre de enfriamiento.

Se propone continuar con el tratamiento existente de ácido sulfúrico con monitoreo continuo por parte del operador de la torre con el objeto de controlar la alcalinidad total en el agua de enfriamiento debido a que a 3.8 ciclos de concentración el valor es cercano al de 2,888 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  según datos reportados en el Anexo 3.

El control en el ácido sulfúrico debe ser cuidadoso ya que la dureza de calcio se encuentra en los límites permisibles, el exceso de ácido sulfúrico para controlar la deposición origina sulfatos, los cuales, en exceso causan daños principalmente al concreto del bacín de la torre.

Se propone un tratamiento con formulación a base de fosfonato para complementar el tratamiento con ácido sulfúrico.

Los fosfonatos son buenos inhibidores, eficaces en contra de la deposición de sulfato de calcio y carbonato de calcio, son fáciles de monitorear y poseen excelente poder de dispersión, es decir, inhibición de la precipitación de la dureza causada como producto de la presencia de compuestos alcalinos térreos (carbonato de calcio, sulfato de calcio y sulfato de bario). Se deberá tener continua comunicación entre el operador y el personal encargado de la dosificación para controlar las condiciones óptimas del tratamiento.

Suponiendo que se desee aplicar el tratamiento propuesto y que con el tiempo se incrementan los ciclos de concentración determinados por la mezcla de 3.8 a 4.0, las ecuaciones de la tabla 3 del balance de materia en torres de enfriamiento son útiles para predecir el ahorro de agua.

$$E = \frac{R * \Delta T}{1000} = \frac{100,000 * 13.5}{1,000} = 1,350 \text{ GPM}$$

$$B = [E - D(C - 1)] / (C - 1) \quad (1.4)$$

$$B = \frac{[1350 - 25(3.8 - 1)]}{(3.8 - 1)} = 457.14 \text{ GPM}$$

$$D = 0.00025 * (100,000) = 25 \text{ GPM}$$

$$M = E + B + D = 1,350 + 457.14 + 25 = 1,832.14 \text{ GPM}$$

La tabla 30 muestra la disminución del flujo de agua de repuesto y purgas debido al aumento de los ciclos de concentración al emplear el tratamiento propuesto en el caso de estudio el cual opera originalmente a 2.23 C con M= 2,447 GPM (13,393 m<sup>3</sup>/día).

**Tabla 30. Ahorro de agua debido al tratamiento químico propuesto en la opción 1.**

C	M		B		Ahorro	
	GPM	m <sup>3</sup> /día	GPM	m <sup>3</sup> /día	GPM	m <sup>3</sup> /día
3.8	1,832.14	10,025.5	457.14	2,501.5	614.86	3,367.5
3.85	1,823.68	9,979.2	448.68	2,455.2	623.32	3,413.8
3.9	1,815.51	9,934.5	440.51	2,410.5	631.49	3,458.5
3.95	1,807.62	9,891.3	432.62	2,367.3	639.38	3,501.7
4.0	1,800	9,849.6	425	2,325.6	647	3,543.4

#### **4.6.2 Tratamiento en torre de enfriamiento con mezcla de agua de pozos-agua PTAR.**

El efecto del aumento en los ciclos de concentración a 3.1 en la torre de enfriamiento con la mezcla de agua pozos-PTAR, indica un valor en el índice de Langelier de 2.43 y de Ryznar de 3.8, según datos del programa W- INDEX; esto indica que el agua es severamente incrustante.

El Sílice y la dureza se encuentran por debajo de los valores máximos en la torre de enfriamiento. La concentración de sílice con 3.1 ciclos es de 156.5 ppm, este valor no excede los límites permitidos en la torre para provocar incrustación y tendencia a afectar los coeficientes de transferencia de calor en los intercambiadores (ver consideraciones del capítulo 3).

La naturaleza de los efluentes residuales presenta un serio problema de incrustación microbiológica, sin contar con la espuma que genera en la recirculación del agua.

El programa de tratamiento controlado con ácido sulfúrico se debe mantener para controlar los parámetros de alcalinidad y dureza debido a los niveles de incrustación al operar a 3.1 ciclos de concentración. Se recomienda establecer

monitoreo continuo por parte del personal de operación de la torre para un mejor control de dosificación de ácido.

Se propone el programa de fosfonatos en combinación con antiespumante, debido a la incrustación excesiva que puede existir en el agua de circulación y la formación de espuma controlando las condiciones de operación óptimas establecidas en el producto para que el tratamiento sea más efectivo.

La tabla 31 muestra el ahorro de agua debido al empleo del tratamiento químico propuesto en cierto periodo y eleva los ciclos de concentración de 3.1 a 3.3 en la mezcla de agua de pozos con agua de la PTAR.

**Tabla 31. Ahorro en agua debido al tratamiento propuesto en la opción 2.**

C	M		B		Ahorro	
	GPM	m <sup>3</sup> /día	GPM	m <sup>3</sup> /día	GPM	m <sup>3</sup> /día
3.1	1,992.85	10,904.9	617.85	3,380.9	454.15	2,488
3.15	1,977.9	10,823.1	602.9	3,299.1	469.1	2,570
3.2	1,963.63	10,745	588.63	3,221	483.37	2,648
3.25	1,950	10,670.4	575	3,146.4	497	2,722.6
3.3	1,936.95	10,599	561.95	3,075	510	2,794

Las hojas técnicas de los tratamientos propuestos se encuentran en el Anexo 5 “Hojas Técnicas”, los costos del agua<sup>1</sup> y de los tratamientos propuestos se reportan en la tabla 32, las ecuaciones de dosificación continua de químicos se reportan en el Anexo 4 “Consumo de químicos”.

**Tabla 32. Costo de agua y tratamientos propuestos**

Concepto	Unidad	Costo
Agua cruda	Pesos/m <sup>3</sup>	8.6
Agua desmineralizada	Pesos/m <sup>3</sup>	15.7
Agua residual tratada	Pesos/m <sup>3</sup>	1.25
Tratamiento antiincrustante base de fosfonato	USD/kg (pesos/kg)	3.72 (40.7)
Tratamiento antiespumante base de silicón	USD/kg (pesos/kg)	2.99 (32.7)

<sup>1</sup> Costos CONAGUA 2006

## 4.7 Análisis de Resultados

Es preciso realizar el comparativo de las dos opciones planteadas para optimizar el uso de agua en la torre de enfriamiento del caso de estudio.

La tabla 33 muestra el ahorro de agua en las torres de enfriamiento de acuerdo a las dos opciones planteadas.

**Tabla 33. Evaluación de opciones para optimizar el uso de agua.**

Variable	Opción 1	Opción 2
Ciclos de concentración	<b>4.0</b>	<b>3.3</b>
Ahorro de agua (m <sup>3</sup> /día)	<b>3,543.4</b>	<b>2,794</b>
Ahorro de agua (m <sup>3</sup> /año)	<b>1,293,341</b>	<b>1,019,810</b>
Ahorro de agua (L/ s)	<b>41</b>	<b>32</b>
% ahorro	<b>26.4</b>	<b>20.8</b>
Ventajas	- Mayor ahorro en agua de repuesto total.	- Reúso del agua. - Menor consumo de agua cruda (agua de pozos 50%)
Desventajas	Mayor consumo de agua cruda (agua de pozos 80%)	-Componentes no deseados presentes en el agua. -Mayor cantidad de tratamiento químico.

Como se explicó, originalmente, la torre de enfriamiento trabaja a razón de 2.23 ciclos de concentración con un consumo de 13,393 m<sup>3</sup>/ día en agua de repuesto de pozos, esto representa 115,180 pesos/día (42,040,627pesos/ año), sobre esa base se plantea el ahorro en la tabla 34, ésta representa la repercusión económica al emplear las dos opciones de mezcla de agua para aumentar los ciclos de concentración en la torre de enfriamiento del caso de estudio.

A pesar que la cantidad de agua total es mayor que la empleada en la opción 1, la opción 2 utiliza menor cantidad de agua de pozos (50%) para el funcionamiento de la torre y se promueve el reúso de agua debido a la utilización de agua proveniente de la PTAR.

**Tabla 34. Evaluación de opciones en el ahorro de agua**

Concepto	Opción 1			Opción 2		
	Agua de pozos	Agua desmineralizada	Tratamiento químico	Agua de pozos	Agua PTAR	Tratamiento químico
Proporción %	80	20		50	50	
Flujo m <sup>3</sup> /día (kg/día)	7,879.6	1,970	(24.6)	5,299.5	5,299.5	(64.2)
Consumo Pesos/día	67,674	30,929	1,003	45,575	6,624	2,358.1
Consumo Pesos/año	24,374,064	11,289,085	366,095	16,634,875	2,417,760	860,700
TOTAL pesos/año	36,029,244			19,913,335		
Ahorro pesos/año	6,904,483			23,022,392		
AHORRO %	16			53.6		

De acuerdo a la tabla 34, la opción 2 representa un ahorro del 53.6 % (23, 022,392 pesos /año) con respecto a la opción 1, que solamente representa el 16 %.(6, 904,483 pesos/ año).



## **5 CONCLUSIONES.**

El trabajo “Evaluación de opciones para optimizar el uso de agua en las torres de enfriamiento de una refinería” presenta:

- *Fundamentos de las torres de enfriamiento, funcionamiento y la relación de las variables más importantes en su proceso.*
- *Aspectos del acondicionamiento de agua y las características de los principales problemas que existen en las torres de enfriamiento.*
- *El objetivo de utilizar tratamientos químicos en el agua de enfriamiento, principales formulaciones de los tratamientos químicos, condiciones de operación óptima y comportamiento en el agua de enfriamiento.*

El aumento de los ciclos de concentración en el caso de estudio consistió en la propuesta de 2 opciones:

- Opción 1: Ahorro de 3,543.4 m<sup>3</sup>/día en agua de repuesto mediante el aumento de los ciclos de concentración de 2.23 a 4.0 con agua de repuesto en una mezcla con 80% de agua de pozos y 20% de agua desmineralizada, además de la inclusión de un tratamiento químico a base de fosfonatos.
- Opción 2: Ahorro de 2,794 m<sup>3</sup>/día en agua de repuesto mediante el aumento de los ciclos de concentración en la torre de 2.23 a 3.3 con agua de repuesto en una mezcla con 50% de agua de pozos y 50% de agua de PTAR e inclusión de tratamiento químico a base de fosfonato además de la utilización de antiespumante.

La opción 2 (*mezcla de agua de pozos- agua de PTAR*) es la mejor para optimizar el uso de agua en la torre de enfriamiento del caso de estudio, ésta opción utiliza menor cantidad de agua de pozos (50%) para el funcionamiento de la torre, se promueve el reúso de agua y se estima un ahorro de 23,022,392 pesos/año en consumo de agua y químicos lo cual es 53.6% menos que el uso total de agua cruda de pozos a 2.23 ciclos de concentración.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## Libros.

- Mc Coy James, The Chemical Treatment of Cooling Water, Chemical publishing Company, New York, 1974, 237 pp.
- Nalco Chemical Company, 1988. The Nalco Water Hand Book., Mc Graw Hill, 2ª edición, pp 38.8-38.3
- Powell Sheppard T, Acondicionamiento de aguas para la Industria, Limusa, México, 1981, pp 339-357.
- Perry, Manual del Ingeniero Químico, Tomo 1, Mc Graw Hill, México, 1992, pp 12-13—12-24
- Ramalho, Tratamiento de aguas residuales, Reverté, México, 1983, pp 605-620

## Páginas www.

- 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>
- Ghislieri, D. 2007. Tratamiento de agua de sistemas de enfriamiento. Tecnología y servicios industriales 1. Dd de mmm de 2006. Instituto de Ingeniería Química Tecnología y servicios Industriales. Disponible en: <  
<http://www.fing.edu.uy/iq/cursos/qica/repart/Aguaenfr.doc>>
- Millán José A. Departamento de maquinas y motores térmicos, Torres de refrigeración, Escuela Universitaria Politécnica de Donosia – San Sebastián, Universidad del país Vasco-Euskal Errico UNIBERTSITATEA UPV/EHU, San Sebastián España, 07 de Agosto de 2006. Disponible en:<<http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/Torre.htm>
- NEWPHOS, Fosfonatos, Fosfonatos especiales. 8 de Mayo de 2007. Disponible en.< <http://www.newbury.com.ar/Paginas/Fosfonatos.htm>
- Quiminet.Com. Los procesos de enfriamiento del agua. Quiminet.com, México, 30 de Mayo de 2007. Disponible en: <  
[http://www.quiminet.com.mx/ar4/ar\\_%25DD%25F4%2595I%25D7KZt.htm](http://www.quiminet.com.mx/ar4/ar_%25DD%25F4%2595I%25D7KZt.htm)

- SPX Cooling Technologies. Cooling Tower Fundamentals, SPX Cooling Technologies, Inc., Balcke/Hamon Dry Cooling/ Marley, Overland Park, Kansas USA, Octubre de 2006. Disponible en: <  
<http://spxcooling.com/en/products/list/cooling/Cooling%20Towers/>

### Publicaciones periódicas.

- Avista Technologies. "Precipitation Prevention by Scale". TS Vitec. Ltd. Febrero 2006.pp.1-4.
- Buehner W. Frank. et al. "Minimize waste by managing process design". Marketplace. Chemtech. Abril 1996 pp 64-65.
- Burger Robert. "Cooling Towers: Energy Conservation Strategies". Wilson Applied Science& Technology Abstracts. Vol. 97, 2000, número 1, pp 58-71.
- Burger Robert. "Cooling tower fill: The neglected money maker". Heat Transfer. Hidrocarbon processing. Julio 2000. pp.65-68.
- Curtis Sandra. "Increasing Cycles of concentration with the tower tech cooling Tower design". Tower tech inc. 1997. pp1-3.
- EBSCO."Improving the Efficiency of Cooling Tower Operations. EBSCO Publishing. 2002. pp 9-10.
- Edwin W. James. et al. "Using Wastewater as cooling-system makeup water". Wastewater. Chemical Engineering. Agosto1976. pp. 95-100.
- Gucciardi M. Jean. "Waste water Treatment", Ask the experts. Chemical Engineering Progress. Junio 2003. pp 25.
- Huchler A. Loraine. "Basic cooling water treatment" HP In water treatment. Hidrocarbon processing. Febrero 2001. pp 123.
- Huchler A. Loraine. "Can you reduce your cooling tower blowdown rate?" HP In water treatment. Hidrocarbon processing. 2000. p121.
- Miyamoto K. Henry. et al. "A new approach to the Langelier stability index. Materials Engineering, Chemical Engineering. Abril1986. pp 90.
- Newsfront. "Cooling towers bigger and better in plastics". Chemical Engineering. Enero 2002. pp 1-2.

- Ning Robert Y. "Process Simplification Trough the Use of Antiscalants and Antifoulants". IDS-Water. Junio 2007.pp 1.
- Prisyazhniuk. "Pronosticating scale-forming properties of water". Science Direct, Elsevier. Diciembre 2006.pp 1637-1641.
- Sheikholeslami. "Scaling Potential Index (SPI) for CaCO<sub>3</sub> Based on Gibbs Free Energies", AIChE Journal, Wiley InterScience. Volumen 51 Num. 6, Abril 4 2005. pp 1782-1784.
- Terranova Jack. "Selecting the Right Cooling Tower on a Budget". Equipment notebook. HPAC Engineering. Noviembre 2001. pp. 58-59.
- Water Services."Indexes for a Calcium Carbonate".Water Services Ltd. 2004. pp. 8-9.

## **Anexo 1: Cálculos de las mezclas de agua en la torre de enfriamiento.**

El cálculo de las mezclas de agua se realizó en hoja de cálculo a diferentes concentraciones, se seleccionó la mezcla con el mayor valor en ciclos de concentración posible que no rebasará los límites permitidos para alimentación de agua de repuesto en las torres de enfriamiento.

**Tabla 1. Resultados; 10% agua desmineralizada-90% de agua de pozos.**

Parámetro	Unidades	Desmin. 10%	Pozos 90%	Mezcla teórica de repuesto	Mezcla @ 3.8 ciclos	Mezcla @ 2.23 ciclos	Máximos
D. total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	3.0	448	403.5	1,533.3	1,010	1,400
D. de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	2.0	268	241.4	917.32	608	850
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	3.0	63	57	216.6	141	200
Hierro	mg/L	0.001	0.02	0.02	0.08	0.09	1.0
Conductividad	μS/cm	5.0	1,953	1,758.2	6,681.16	4,223	6,000

**Tabla 2. Resultados; 20% agua desmineralizada-80% de agua de pozos.**

Parámetro	Unidades	Desmin. 20%	Pozos 80%	Mezcla teórica de repuesto	Mezcla @ 3.8 ciclos	Mezcla @ 2.23 ciclos	Máximos
D. total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	3.0	448	359	1,364.2	1,010	1,400
D. de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	2.0	268	214.8	816.24	608	850
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	3.0	63	51	193.8	141	200
Hierro	mg/L	0.001	0.02	0.02	0.07	0.09	1.0
Conductividad	μS/cm	5.0	1,953	1,563.4	5,940.92	4,223	6,000



**Tabla 3. Resultados; 30% agua desmineralizada-70% de agua de pozos.**

Parámetro	Unidades	Desmin. 30%	Pozos 70%	Mezcla teórica de repuesto	Mezcla @ 3.8 ciclos	Mezcla @ 2.23 ciclos	Máximos
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	3.0	448	314.5	1,195.1	1,010	1,400
D. de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	2.0	268	188.2	715.16	608	850
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	3.0	63	45	171	141	200
Hierro	mg/L	0.001	0.025	0.01	0.06	0.09	1.0
Conductividad	μS/cm	5.0	1,953	1,368.6	5,200.68	4,223	6,000

**Tabla 4. Resultados; 40 % agua desmineralizada-60% de agua de pozos.**

Parámetro	Unidades	Desmin. 40%	Pozos 60%	Mezcla teórica de repuesto	Mezcla @ 3.8 ciclos	Mezcla @ 2.23 ciclos	Máximos
D. total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	3.0	448	270	1,026	1,010	1,400
D. de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	2.0	268	161.6	614.08	608	850
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	3.0	63	39.0	148.2	141	200
Hierro	mg/L	0.001	0.025	0.01	0.05	0.09	1.0
Conductividad	μS/cm	5.0	1,953	1,173.8	4,460.44	4,223	6,000

Las figuras 27 y 28 representan diferentes proporciones de la mezcla agua de pozos con agua desmineralizada, se observa que la mezcla teórica de 80% agua de pozos con 20% de agua desmineralizada está por debajo de los máximos permisibles que establece la refinería en cuanto a dureza total y dureza de calcio..

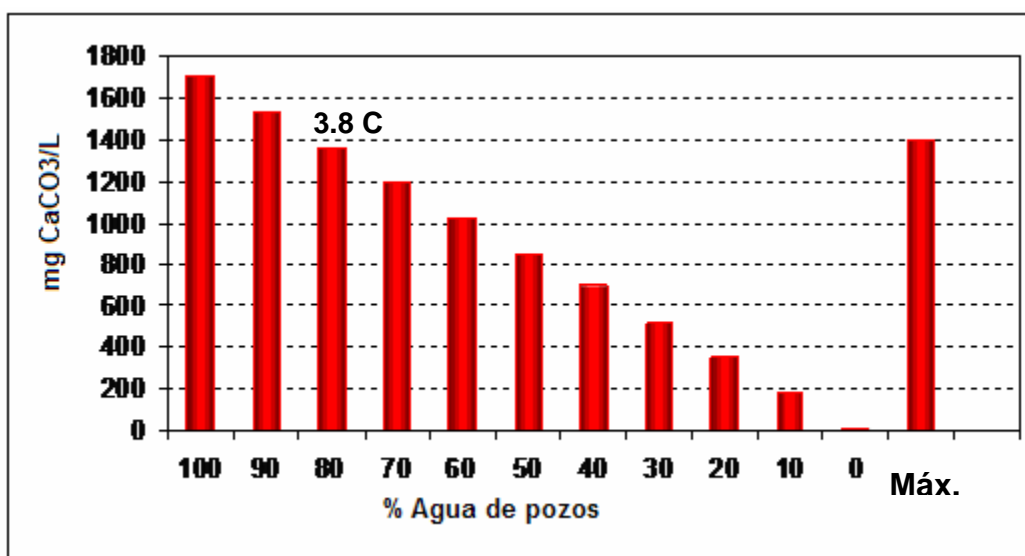


Figura 1. Concentración de dureza total a diferentes proporciones de la mezcla agua de pozos con agua desmineralizada.

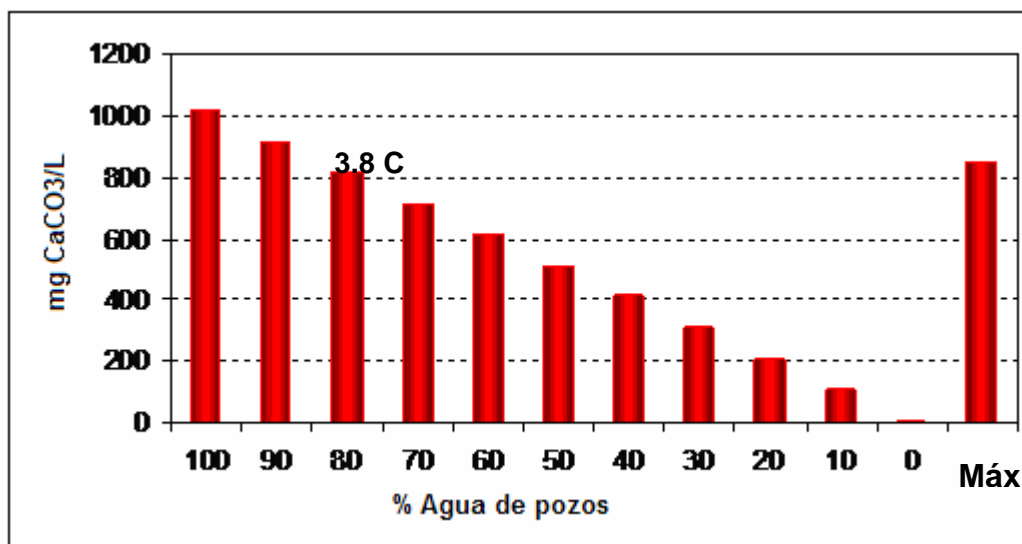


Figura 2. Concentración de dureza de calcio a diferentes proporciones de la mezcla agua de pozos con agua desmineralizada.

**Tabla 5. Resultados; 80% agua PTAR-20% de agua de pozos.**

Parámetro	Unidades	PTAR 80%	Pozos 20%	Mezcla teórica de repuesto	Mezcla @ 3.1 ciclos	Mezcla @ 2.23 ciclos	Máximos
D. total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	280	448	313.6	972.16	1,010	1,100-1,300
D. de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	165	268	185.6	575.36	608	700-770
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	38	63	43	133.3	141	171-185
Hierro	mg/L	0.17	0.02	0.14	0.43	0.09	0.3
Conductividad	μS/cm	2,700	1,953	2,550.6	7,906.86	4,223	3,500-4,100

**Tabla 6. Resultados; 70% agua PTAR-30% de agua de pozos.**

Parámetro	Unidades	PTAR 70%	Pozos 30%	Mezcla teórica de repuesto	Mezcla @ 3.1 ciclos	Mezcla @ 2.23 ciclos	Máximos
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	280	448	330.4	1,024.24	1,010	1,100-1,300
D. de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	165	268	195.9	607.29	608	700-770
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	38	63	45.5	141.05	141	171-185
Hierro	mg/L	0.17	0.025	0.12	0.39	0.09	0.3
Conductividad	μS/cm	2700	1953	2,475.9	7,675.29	4223	3,500-4,100

**Tabla 7. Resultados; 60% agua PTAR-40% de agua de pozos.**

Parámetro	Unidades	PTAR 60%	Pozos 40%	Mezcla teórica de repuesto	Mezcla @ 3.1 ciclos	Mezcla @ 2.23 ciclos	Máximos
D. total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	280	448	347.2	1,076.32	1,010	1,100-1,300
D. de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	165	268	206.2	639.22	608	700-770
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	38	63	48.0	148.8	141	171-185
Hierro	mg/L	0.17	0.02	0.11	0.34	0.09	0.3
Conductividad	μS/cm	2,700	1,953	2,401.2	7,443.72	4,223	3,500-4,100

**Tabla 8. Resultados; 50% agua PTAR-50% de agua de pozos.**

Parámetro	Unidad	PTAR 50%	Pozos 50%	Mezcla teórica de repuesto	Mezcla @ 3.1 ciclos	Mezcla @ 2.23 ciclos	Máximos
D. total	mg CaCO <sub>3</sub> / L	280	448	364	1,128.4	1,010	1,100-1,300
D. de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> / L	165	268	216.5	671.15	608	700-770
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> / L	38	63	50.5	156.55	141	171-185
Hierro	mg/L	0.17	0.02	0.09	0.30	0.09	0.3
Conductividad	μS/cm	2,700	1,,953	2,326.5	7,212.15	4,223	3,500-4,100

Las figuras 29 y 30 representan diferentes proporciones de la mezcla agua de pozos con agua de PTAR, se observa que la mezcla teórica de 50% agua de pozos con 50% de agua desmineralizada esta por debajo de los máximos permisibles que establece la refinería en cuanto a dureza total y dureza de calcio.

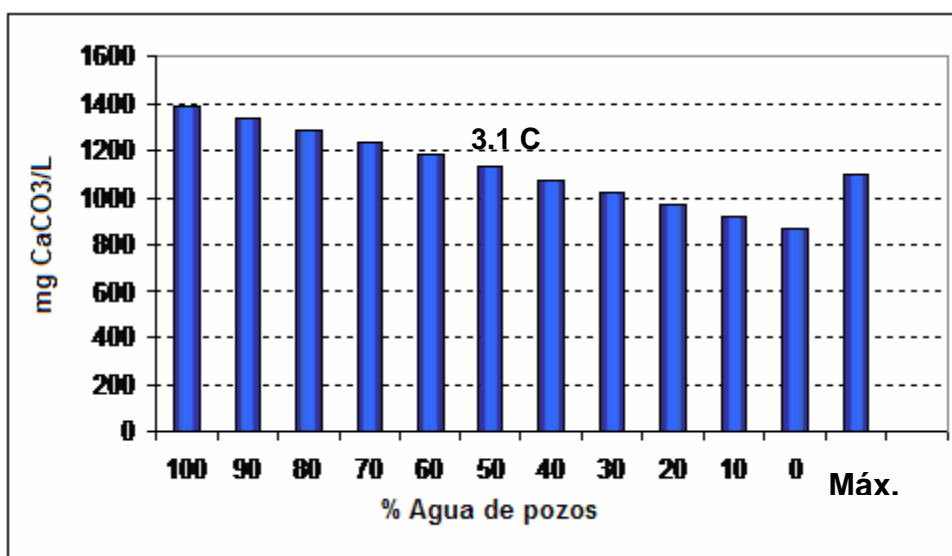


Figura 3. Concentración de dureza total a diferentes proporciones de la mezcla agua de pozos con agua de PTAR.

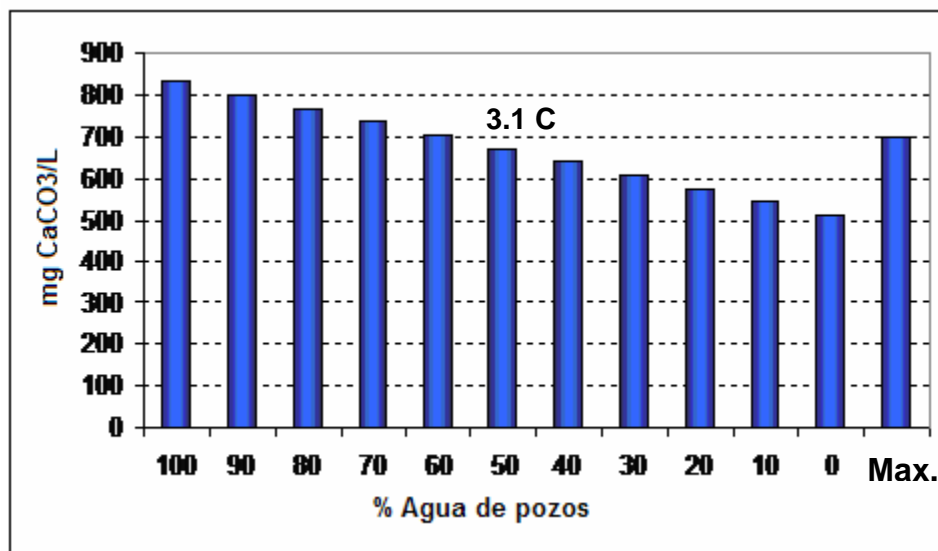


Figura 4. Concentración de dureza de calcio a diferentes proporciones de la mezcla agua de pozos con agua de PTAR.

## **Anexo 2: Cálculos en el programa C-TOWER.**

## C-TOWER.

El programa “C-TOWER” es una recopilación de cálculos de consumo de agua y químicos en las torres de enfriamiento.

- Utiliza cálculos comunes de la literatura.
- Puede trabajar con diferentes sistemas de unidades o combinación de ellas.

Los resultados del programa brindan promedios razonables a lo largo del año. En el programa no se toman en cuenta factores externos que pueden existir en un momento dado como la variación de la velocidad del viento y la humedad. El programa no se hace responsable de la interpretación de resultados por parte del usuario.

### Resultados de los ciclos de concentración en la opción 1.

En el capítulo “Caso de Estudio”, se calculó el flujo de agua de repuesto para la mezcla de agua de pozo-agua desmineralizada ( $C = 3.8$ ) y en la mezcla agua de pozo-agua PTAR ( $C = 3.1$ ). Con el programa C-TOWER es posible calcular el flujo de agua de repuesto que alimenta la torre de enfriamiento a diferentes valores de  $C$ . mediante las ecuaciones simplificadas de la tabla 3:

El flujo de evaporación se mantiene constante:

$$E = \frac{R \times \Delta T}{1000} = \frac{100,000 \times 13.5}{1000} = 1,350 \text{ GPM}$$

El flujo de agua de repuesto operando a 2.23, 3.8 y 3.1 ciclos de concentración es:

$$M_{2.23} = \frac{E \times C}{(C - 1)} = \frac{1350 \times 2.23}{(2.23 - 1)} = 2,447.56 \text{ GPM} = 13,393 \text{ m}^3 / \text{día}$$

$$M_{3.8} = \frac{E \times C}{(C-1)} = \frac{1350 \times 3.8}{(3.8-1)} = 1,832.14 \text{ GPM} = 10,025.5 \text{ m}^3 / \text{día}$$

$$M_{3.1} = \frac{E \times C}{(C-1)} = \frac{1350 \times 3.1}{(3.1-1)} = 1,992.85 \text{ GPM} = 10,905 \text{ m}^3 / \text{día}$$

A continuación se presentan los resultados del programa C-TOWER de consumo de agua de repuesto y purgas en la torre de enfriamiento a diferentes ciclos de concentración. Se introducen los valores de operación de la torre reportados en la tabla 15, se incluyen pérdidas por arrastre de 0.025 % del agua de recirculación y un coeficiente de evaporación de 1 (figura 31).

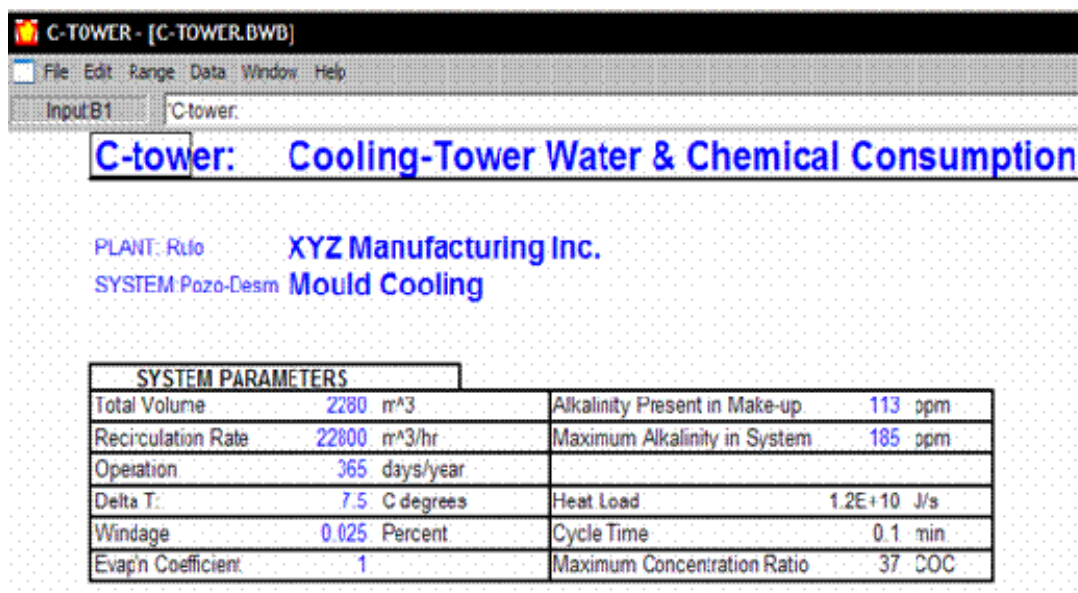


Figura 5. Valores para el cálculo de variables en C-TOWER

Los resultados del programa con 3.8 Ciclos de concentración en m<sup>3</sup>/ día se muestran en la figura 32 y en m<sup>3</sup>/ hora en la figura 33

DAILY WATER CONSUMPTION													
Cycles of Concentration		2.00	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	
Rate of	Evaporation	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	m <sup>3</sup> /day
	Windage	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	
	Bleedoff	7250.4	6019.2	5139.8	4480.2	3967.2	3556.8	3221.0	2941.2	2704.4	2501.5	2325.6	
	Make-up	14774.4	13543.2	12663.8	12004.2	11491.2	11080.8	10745.0	10465.2	10228.4	10025.5	9849.6	
	Losses	7387.2	6156.0	5276.6	4617.0	4104.0	3693.6	3357.8	3078.0	2841.2	2638.3	2462.4	

Figura 6. Resultados de los cálculos en m<sup>3</sup>/día



WATER CONSUMPTION													
Cycles of Conc		2.00	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	
Rate of	Evap'n	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	m <sup>3</sup> /hr
	Windage	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	
	Bleedoff	302.1	250.8	214.2	186.7	165.3	148.2	134.2	122.5	112.7	104.2	96.9	
	Make-up	615.6	564.3	527.7	500.2	478.8	461.7	447.7	436.0	426.2	417.7	410.4	
	Losses	307.8	266.5	219.9	192.4	171.0	153.9	139.9	128.2	118.4	109.9	102.6	
Percent	Evap'n	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	Relative to Recirc. Rate
	Windage	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
	Bleedoff	1.33	1.10	0.94	0.82	0.72	0.65	0.59	0.54	0.49	0.46	0.42	
	Make-up	2.70	2.48	2.31	2.19	2.10	2.02	1.96	1.91	1.87	1.83	1.80	
Retention Time		7.4	8.9	10.4	11.9	13.3	14.8	16.3	17.8	19.3	20.7	22.2	hours
Holding Time Index		5.1	6.2	7.2	8.2	9.2	10.3	11.3	12.3	13.3	14.4	15.4	

Figura 7. Resultados del cálculo en m<sup>3</sup>/ hora

La figura 34 muestra los resultados relativos al consumo total de agua con respecto al porcentaje del flujo de recirculación al aumentar los ciclos de concentración, se puede observar que las pérdidas por evaporación y arrastre se mantienen constantes mientras que las de la purga disminuyen.

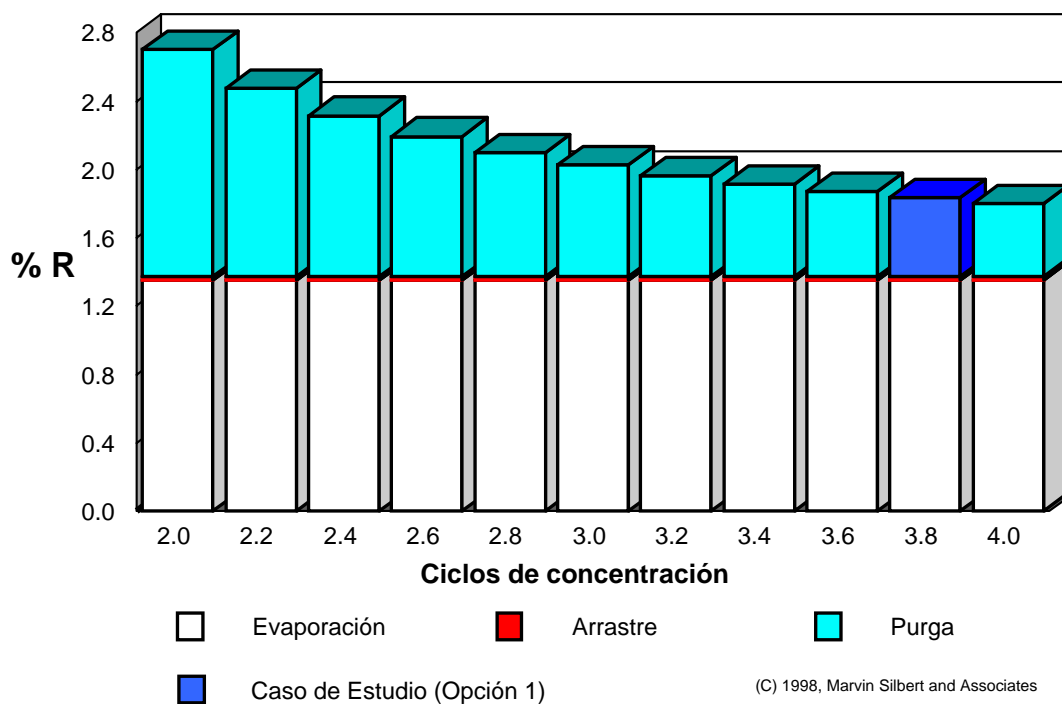


Figura 8. Porcentaje en pérdidas del agua de recirculación vs ciclos de concentración.

La figura 35 reporta los resultados en el aumento de los ciclos de concentración de 3.8 a 4.0 debido a la adición del tratamiento químico propuesto del caso de estudio.

DAILY WATER CONSUMPTION		3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00	4.10	
Cycles of Concentration		3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00	4.10	
Rate of	Evaporation	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	m <sup>3</sup> /day
	Windage	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	
	Bleedoff	3380.9	3221.0	3075.0	2941.2	2818.1	2704.4	2599.2	2501.5	2410.5	2325.6	2246.2	
	Make-up	10904.9	10745.0	10599.0	10465.2	10342.1	10228.4	10123.2	10025.5	9934.5	9849.6	9770.2	
	Losses	3517.7	3357.8	3211.8	3078.0	2954.9	2841.2	2736.0	2638.3	2547.3	2462.4	2383.0	

DAILY PRODUCT CONSUMPTION		3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00	4.10	
Cycles of Concentration		3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00	4.10	
Continuous	FOSFONA	35.1	33.5	32.1	30.7	29.5	28.4	27.3	26.4	25.4	24.6	23.8	Consumption in kg/day
	ANTIESP	35.1	33.5	32.1	30.7	29.5	28.4	27.3	26.4	25.4	24.6	23.8	

Continuous	FOSFONA	1433.1	1368.0	1308.5	1254.0	1203.8	1157.5	1114.6	1074.8	1037.8	1003.2	970.8	Individual costs in Pesos/day
	ANTIESP	1149.5	1097.3	1049.6	1005.8	965.6	928.4	894.1	862.1	832.4	804.7	778.7	

Figura 9. Resultados por el efecto del tratamiento químico propuesto en la opción 1

Para 4 ciclos de concentración se deben dosificar 24.6 kg/día de fosfonato.

Las ecuaciones de dosificación de químicos se encuentran reportadas en el anexo 5.

### Resultados de los ciclos de concentración en la opción 2.

Los resultados en el aumento de los ciclos de concentración a 3.1 se muestran en la figura 36 en m<sup>3</sup>/día y en m<sup>3</sup>/ hora en la figura 37.

DAILY WATER CONSUMPTION		2.10	2.30	2.50	2.70	2.90	3.10	3.30	3.50	3.70	3.90	4.10	
Cycles of Concentration		2.10	2.30	2.50	2.70	2.90	3.10	3.30	3.50	3.70	3.90	4.10	
Rate of	Evaporation	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	m <sup>3</sup> /day
	Windage	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	
	Bleedoff	6578.8	5545.7	4788.0	4208.6	3751.2	3380.9	3075.0	2818.1	2599.2	2410.5	2246.2	
	Make-up	14102.8	13069.7	12312.0	11732.6	11275.2	10904.9	10599.0	10342.1	10123.2	9934.5	9770.2	
	Losses	6715.6	5682.5	4924.8	4345.4	3888.0	3517.7	3211.8	2954.9	2736.0	2547.3	2383.0	

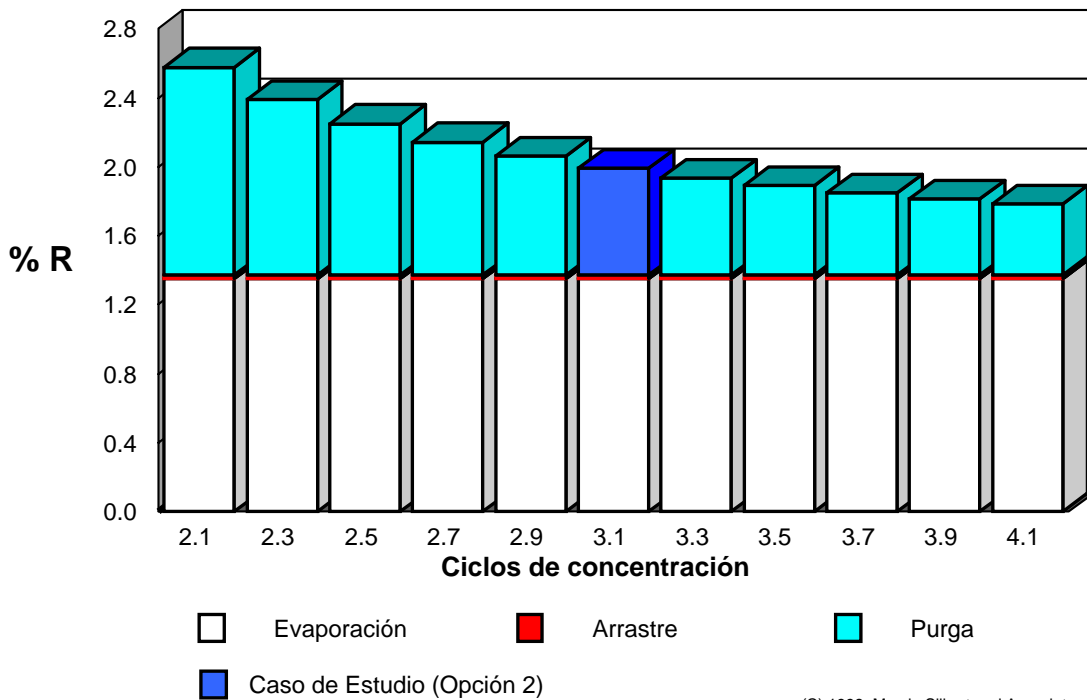
Figura 10. Resultados de los cálculos m<sup>3</sup>/día

Nótese que en los resultados el agua de repuesto es igual a la suma de las pérdidas de agua por evaporación, arrastre y purgas.

WATER CONSUMPTION													
Cycles of Conc.		2.10	2.30	2.50	2.70	2.90	3.10	3.30	3.50	3.70	3.90	4.10	
Rate of	Evap'n	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	m <sup>3</sup> /hr
	Windage	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	
	Bleedoff	274.1	231.1	199.5	175.4	156.3	140.9	128.1	117.4	108.3	100.4	93.6	
	Make-up	587.6	544.6	513.0	488.9	469.8	454.4	441.6	430.9	421.8	413.9	407.1	
	Losses	279.8	236.8	205.2	181.1	162.0	146.6	133.8	123.1	114.0	106.1	99.2	
Percent	Evap'n	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	Relative to Recirc. Rate
	Windage	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
	Bleedoff	1.20	1.01	0.87	0.77	0.69	0.62	0.56	0.51	0.47	0.44	0.41	
	Make-up	2.58	2.39	2.25	2.14	2.06	1.99	1.94	1.89	1.85	1.82	1.79	
Retention Time		8.1	9.6	11.1	12.6	14.1	15.6	17.0	18.5	20.0	21.5	23.0	hours
Holding Time Index		5.6	6.7	7.7	8.7	9.7	10.8	11.8	12.8	13.9	14.9	15.9	

Figura 11. Resultados de los cálculos m<sup>3</sup>/hora

La figura 38 representa las pérdidas de agua por (evaporación, arrastre y purgas) en % de flujo de recirculación.



(C) 1998, Marvin Silbert and Associates

Figura 12. Porcentaje en pérdidas del agua de recirculación vs ciclos de concentración.

Los flujos calculados con el programa C-TOWER concuerdan con los que se determinaron en el capítulo “Caso de estudio”.

La figura 39 reporta los resultados en el aumento de los ciclos de concentración de 3.1 a 3.3 debido a la adición del tratamiento químico propuesto del caso de estudio a base de fosfonatos y antiespumante, en ésta se observa que se requiere dosificar 32.1 kg/día de fosfonato y antiespumante para 3.3 ciclos de concentración.

DAILY WATER CONSUMPTION													
Cycles of Concentration		3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00	4.10	
Rate of	Evaporation	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	7387.2	m <sup>3</sup> /day
	Windage	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	136.8	
	Bleedoff	3380.9	3221.0	3075.0	2941.2	2818.1	2704.4	2599.2	2501.5	2410.5	2325.6	2246.2	
	Make-up	10904.9	10745.0	10599.0	10465.2	10342.1	10228.4	10123.2	10025.5	9934.5	9849.6	9770.2	
	Losses	3517.7	3357.8	3211.8	3078.0	2954.9	2841.2	2736.0	2638.3	2547.3	2462.4	2383.0	

DAILY PRODUCT CONSUMPTION													
Cycles of Concentration		3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00	4.10	
Continuous	FOSFONA	35.1	33.5	32.1	30.7	29.5	28.4	27.3	26.4	25.4	24.6	23.8	Consumption in kg/day
	ANTIESP	35.1	33.5	32.1	30.7	29.5	28.4	27.3	26.4	25.4	24.6	23.8	

Continuous	FOSFONA	1433.1	1368.0	1308.5	1254.0	1203.8	1157.5	1114.6	1074.8	1037.8	1003.2	970.8	Individual costs in Pesos/day
	ANTIESP	1149.5	1097.3	1049.6	1005.8	965.6	928.4	894.1	862.1	832.4	804.7	778.7	

Figura 13. Resultados por el efecto del tratamiento químico propuesto en la opción 2

## **Anexo 3: Cálculos en el programa W-INDEX.**

### W-INDEX.

El programa W-INDEX es un programa que calcula el potencial de la incrustación en los sistemas de agua. W- INDEX calcula los índices más usados para prevenir incrustación. Este programa puede estimar variaciones con el agua la temperatura y la concentración y un intervalo extenso de pH. Algunas restricciones se llevan a cabo al usar este programa debido a algunos factores los cuales incluyen turbulencia o pequeñas diferencias de temperatura debido a variaciones que pueden ocurrir de un sistema a otro, los autores no se hacen responsables de la interpretación de los resultados del usuario derivados de usar W-INDEX.

Los datos a introducir para el cálculo de los índices de incrustación en la mezcla agua de pozo- agua desmineralizada se muestran en la figura 40.

**W-index version 4.0 - [W-INDEX.BWB]**  
 File Edit Range Data Window Help  
 Input\_OutputK15

**W-index Calcium Carbonate Scaling Index Calculations**  
 Sample ID ..... **Agua de Pozos - Agua Desmineralizada**

INPUT DATA					
Temperature	25	C			
TDS	965	ppm			
M - Alkalinity	113	ppm CaCO3			
P - Alkalinity	0	ppm CaCO3			
Ca Hardness	760	ppm CaCO3			
pH @ Temperature	7.2				pH<10.3 Positive Root Applies
Chloride	250	mg/L Cl			
Sulfate	14	mg/L SO4			
Ionic Strength	0.024	Moles/L			
DISTRIBUTION					
		Traditional as ppm CaCO3	Moles/L	mg/L	ppm CaCO3 Mole %
Hydrogen Ions			6.3E-08	0.00	0.00
Carbon Dioxide			2.9E-04	12.71	14.49
Bicarbonate	113	M	2.0E-03	120.19	98.56
Carbonate			1.5E-06	0.09	0.15
Hydroxide Ions			1.6E-07	0.00	0.01
INDICES					
		Positive Root		Negative Root	
pHs	6.96			11.35	
Langelier Saturation	0.24	CAUTION		4.15	DANGER
Ryznar Stability	6.73			-NA-	
Puckorius Practical	6.38			-NA-	
IAP/Ksp			0.71		Undersaturated
Caplan pH			7.86		
Kunz			7.72		
Puckorius Equilibrium pH			7.55		
Skellman Sulfate			0.01		Undersaturated
Larson-Skold			3.18		** CARBON STEEL CORROSION **
CONSTANTS					
			K	pK	
Dissociation of Water		Kw	1.0E-14	13.99	
Solubility Product for Calcite		Ks	4.7E-09	8.33	
Carbon Dioxide - Bicarbonate Equivalence		K1	4.4E-07	6.35	
Bicarbonate -Carbonate Equivalence		K2	4.7E-11	10.33	

Figura 14. Datos de entrada para el sistema agua de pozos-desmineralizada.

Los resultados de los Índices calculados para los parámetros de laboratorio en la mezcla de agua de pozos – agua desmineralizada a 25° C, y la variación de los ciclos de concentración a 3.8 se muestran en la figura 41.

Sample ID ..... **Agua de Pozos - Agua Desmineralizada**

**EFFECTS OF CONCENTRATING WATER IN COOLING SYSTEM**

Valid for pH 7-10

Sample Temperature = 25 C

	Raw Water	Equi- brated	Cycles of Concentration								
			2.20	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80
TDS	965	965	2123	2316	2509	2702	2895	3088	3281	3474	3667
Ca	760	113	249	271	294	316	339	362	384	407	429
Talk	113	760	1672	1824	1976	2128	2280	2432	2584	2736	2888
pH	7.20	7.85	8.42	8.48	8.54	8.59	8.64	8.69	8.73	8.77	8.81
pHs	6.96	6.97	6.36	6.29	6.23	6.17	6.12	6.07	6.03	5.98	5.94
LSI	0.24	0.88	2.06	2.19	2.31	2.42	2.52	2.61	2.70	2.79	2.87
RSI	6.73	6.08	4.30	4.10	3.92	3.76	3.60	3.46	3.32	3.20	3.08

**Figura 15. Índices de saturación a diferentes ciclos de concentración**

Tal como se mencionó en el caso de estudio de este trabajo, la mezcla de agua tiende a ser incrustante en la medida que aumentan los ciclos de concentración en la torre de enfriamiento, esto se refleja en el aumento del Índice de Saturación de Langelier (ISL) y la disminución en el índice de saturación de Ryznar (ISR). Lo mismo ocurre en los índices de Saturación debido al aumento en la temperatura en el sistema de enfriamiento (figura 42).

**W-index Temperature Effects Upon Scaling Indices**

Sample ID ..... **Agua de Pozos - Agua Desmineralizada**

**TEMPERATURE EFFECTS - from positive root and valid for pH <10.3**

Temp (C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
pH	7.50	7.36	7.25	7.16	7.09	7.04	7.01	6.99	6.99	7.00	7.03
pHs	7.55	7.30	7.07	6.87	6.68	6.52	6.37	6.25	6.13	6.03	5.94
LSI	-0.05	0.06	0.18	0.29	0.41	0.52	0.64	0.75	0.86	0.97	1.09
RSI	7.60	7.23	6.89	6.57	6.28	6.00	5.74	5.50	5.27	5.06	4.86

**Figura 16. Efectos de la temperatura en los índices de incrustación.**

Los datos a introducir en W.-INDEX para la mezcla, agua de pozos-agua PTAR según parámetros de laboratorio a 25° C se muestran en la figura 44.

W-index version 4.0 - [W-INDEX.BWB]

File Edit Range Data Window Help

Input\_OutputL34

**W-index Calcium Carbonate Scaling Index Calculations**

Sample ID ..... **Agua de Pozos - Agua PTAR**

INPUT DATA					
Temperature	25	C			
TDS	1539	ppm			
M - Alkalinity	113	ppm CaCO3			
P - Alkalinity	0.5	ppm CaCO3	***** P-ALK TOO HIGH FOR pH *****		
Ca Hardness	628	ppm CaCO3			
pH @ Temperature	7.2		pH<10.3 Positive Root Applies		
Chloride	835	mg/L Cl			
Sulfate	20	mg/L SO4			
Ionic Strength	0.038	Moles/L			
DISTRIBUTION					
	<i>Traditional as ppm CaCO3</i>		<i>Moles/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>ppm CaCO3</i>
Hydrogen Ions			6.3E-08	0.00	0.00
Carbon Dioxide			2.9E-04	12.71	14.49
Bicarbonate	112	M - 2P	2.0E-03	120.19	98.56
Carbonate	1	2P	1.5E-06	0.09	0.15
Hydroxide Ions			1.6E-07	0.00	0.01
INDICES					
	<i>Positive Root</i>		<i>Negative Root</i>		
pHs	7.09		11.35		
Langelier Saturation	0.11	CAUTION	4.15	DANGER	
Ryznar Stability	6.97		-NA-		
Puckorius Practical	6.63		-NA-		
IAP/Ksp		0.46	Undersaturated		
Caplan pH		7.86			
Kunz		7.72			
Puckorius Equilibrium pH		7.55			
Skillman Sulfate		0.02	Undersaturated		
Larson-Skold		10.50	** CARBON STEEL CORROSION **		
CONSTANTS					
			<i>K</i>	<i>pK</i>	
Dissociation of Water		<i>Kw</i>	1.0E-14	13.99	
Solubility Product for Calcite		<i>Ks</i>	4.7E-09	8.33	
Carbon Dioxide - Bicarbonate Equivalence		<i>K1</i>	4.4E-07	6.35	
Bicarbonate -Carbonate Equivalence		<i>K2</i>	4.7E-11	10.33	

Figura 17. Datos de entrada para el sistema agua de pozos-PTAR

El efecto de aumentar a 3.1 ciclos de concentración con la mezcla agua de pozos- agua PTAR, son los que se muestran en la figura 44, se observa aumento del Índice de saturación de Langelier “ISL” y la disminución en el índice de saturación de Ryznar “ISR”.

De igual manera que en el caso anterior, se observa la tendencia incrustante en el agua que circula en la torre.



### W-index Concentration Effects Upon Scaling Indices

Sample ID ..... **Agua de Pozos - Agua PTAR**

#### EFFECTS OF CONCENTRATING WATER IN COOLING SYSTEM

Valid for pH 7-10

Sample Temperature = 25 C

	Raw Water	Equi- brated	Cycles of Concentration								
			2.10	2.30	2.50	2.70	2.90	3.10	3.30	3.50	3.70
TDS	1539	1539	3232	3540	3848	4155	4463	4771	5079	5387	5694
Ca	628	113	237	260	283	305	328	350	373	396	418
Talk	113	628	1319	1444	1570	1696	1821	1947	2072	2198	2324
pH	7.20	7.85	8.38	8.45	8.51	8.56	8.61	8.66	8.71	8.75	8.79
pHs	7.09	7.09	6.53	6.46	6.39	6.34	6.28	6.23	6.19	6.14	6.10
LSI	0.11	0.76	1.86	1.99	2.11	2.23	2.33	2.43	2.52	2.61	2.69
RSI	6.97	6.33	4.67	4.47	4.28	4.11	3.95	3.80	3.66	3.53	3.41

Figura 18. Efecto de los ciclos de concentración con respecto a los índices de incrustación

La figura 45 muestra el aumento en la tendencia de incrustación con el aumento de temperatura en el sistema de enfriamiento de la opción 2.

### W-index Temperature Effects Upon Scaling Indices

Sample ID ..... **Agua de Pozos - Agua PTAR**

#### TEMPERATURE EFFECTS - from positive root and valid for pH <10.3

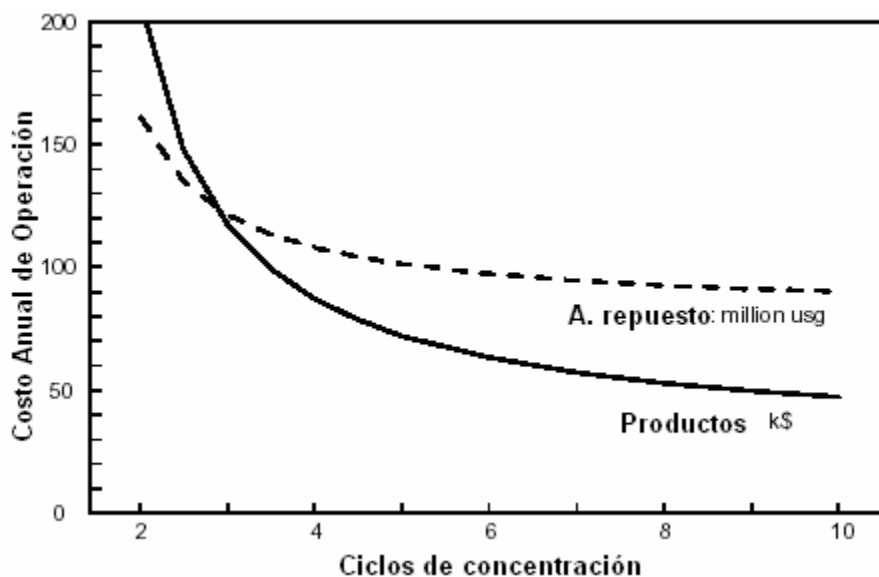
Temp (C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
pH	7.50	7.36	7.25	7.16	7.09	7.04	7.01	6.99	6.99	7.00	7.03
pHs	7.67	7.42	7.19	6.99	6.81	6.64	6.50	6.37	6.26	6.16	6.07
LSI	-0.17	-0.06	0.06	0.17	0.28	0.40	0.51	0.62	0.74	0.85	0.96
RSI	7.84	7.48	7.13	6.82	6.52	6.25	5.99	5.75	5.52	5.31	5.11

Figura 19. Efecto de la temperatura en los índices de incrustación

## **Anexo 4: Consumo de Químicos.**

### Consumo de Químicos.

Los requerimientos del agua de repuesto decrecen rápidamente en los primeros ciclos de concentración como se ha observado anteriormente, por otra parte los costos en consumo de químicos van a la baja a medida que los ciclos de concentración se incrementan en el sistema (46).



**Figura 20. Efecto de los ciclos de concentración con el costo anual de operación.**

El consumo de químicos se relaciona directamente a las pérdidas del agua tratada desde el sistema, no al agua de repuesto añadida al sistema. Las pérdidas por evaporación no eliminan los productos químicos así como lo hacen las purgas y el arrastre.

Es interesante el notar que el volumen sujeto dentro del sistema no siempre es exactamente conocido. Algunas estimaciones toman el volumen del bacín o del nivel de espejo con una adición que va del 25 al 50%, otros asumen que este debe de ser 6-10 veces el flujo de recirculación. El valor exacto puede ser obtenido por un método de búsqueda, donde una cantidad conocida de sustancia medida, sea añadida fácilmente y la concentración sea medida una vez de que esta se encuentre bien mezclada. Esto es útil para trabajar con algunos estimados y tener una idea de algún tiempo-base con parámetros operativos, particularmente cuando se trata de estimar la dosificación de productos químicos.

**Tiempo por ciclo:** Esto es la duración en tiempo para que el agua recorra el lazo o circuito en el sistema de enfriamiento, lo anterior se realiza por la relación:

$$t = \frac{V}{R} \quad (\text{A-4.1})$$

$$t = \frac{2280 \text{ m}^3}{22,800 \text{ m}^3 / \text{h}} = 0.1 \text{ h} = 6 \text{ min}$$

Si el volumen está en galones o litros el flujo en galones o litros por minuto, el tiempo será en minutos.

**Tiempo de retención:** Esto es una indicación sobresimplificada de la duración en tiempo para que una impureza sea removida a través del sistema de purgado. Para esta aplicación, el término purga quiere decir purgado de arrastre y pérdidas. Esto está dado por la relación:

$$t = \frac{V}{B + A} \quad (\text{A-4.2})$$

$$E = 1,350 \text{ GPM} = 307.8 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$B = \frac{E}{C - 1} = \frac{307.8}{3.8 - 1} = 110 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$A = 0.025\% (22,800 \text{ m}^3 / \text{h}) = 5.7 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$t = \frac{2,280 \text{ m}^3}{(110 + 5.7) \text{ m}^3 / \text{h}} = 19.7 \text{ h}$$

**Índice de tiempo de espera (HTI):** Este es una aproximación más real en la retención del tiempo, reconociendo todo el material que no se ha removido y que no pasa por la válvula de purga. Esto esta dado por la relación:

$$t = 0.693 \frac{V}{B + A} \quad (A-4.3)$$

Para 3.8 ciclos de concentración.

$$t = 0.693 (19.7) = 13.6 \text{ h}$$

El factor 0.693 es  $\ln 2$ , este es del mismo tipo del que se utiliza para cálculos de cinética química y en reacciones nucleares.

Es posible calcular la dosificación de productos para una mayor cantidad de tiempo. El cálculo para la alimentación continua de productos como inhibidores o dispersantes, está dado por la ecuación A-4.4 y la tabla 43.

$$\text{Dosificación continua} = \frac{\text{ppm deseadas} \times MU}{C \times 120 \times X} \quad (A-4.4)$$

**Tabla 9. Condiciones para la dosificación continua**

Flujo de alimentación en	Con MU en	X
lb/día	GPD	1,000
kg/día	GPD	454
kg/día	L/día	120

Para la alimentación por choque de productos como biocidas, los cálculos son independientes de los ciclos de concentración, la ecuación A-4.5 y la tabla 44 aplican en esta operación.

$$\text{Choque} = \frac{\text{ppm deseadas} \times V}{120 \times X} \quad (\text{A-4.5})$$

**Tabla 10. Condiciones para el choque**

Flujo de alimentación en	Con V en	X
lb/choque	Galones	1,000
kg/choque	Galones	454
kg/choque	L	120

Para eliminar la alcalinidad, la adición del ácido sulfúrico puede ser calculada de la ecuación A-4.6.

$$\text{Dosificación de ácido} = \frac{\text{ppm de alcalinidad a remover} \times MU}{120 \times X} \quad (\text{A-4.6})$$

## **Anexo 5: Hojas Técnicas.**

Fosfonato.

	<b>Ficha Técnica</b> <b>AGRIFOS® 400 SL</b>	<b>DTF - 02</b>
		Página 1 de 8

## 1. GENERALIDADES

Agrifos® 400 SL, es un fungicida preventivo sistémico recomendado para el control de enfermedades causadas principalmente por hongos Oomicetos; también ejerce control en otras clases de hongos. El fosfito mono potásico y dipotásico, ingrediente activo del producto, además de ejercer propiedades fungicidas, aporta elementos nutricionales a la planta como el Potasio.

## 2. TIPO DE PRODUCTO

### Ingrediente Activo y Concentración:

400 g/L de ácido fosforoso, presente en forma de fosfito monopotásico y dipotásico

**Formulación:** Concentrado Soluble (SL)

**Nombre Comercial:** AGRIFOS® 400 SL

**Grupo Químico:** Fosfonatos

## 3. PROPIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS

**Estado Físico:** Líquido

**Color:** Azul

**Olor:** Inodoro

**Punto de Ebullición:** 100 °C

**pH:** 5.5 – 6



 <small>CALIDAD A TIEMPO, TODO EL TIEMPO</small>	<b>Ficha Técnica</b> <b>AGRIFOS® 400 SL</b>	<b>DTF - 02</b>
		Página 2 de 8

## 4. TOXICOLOGÍA

Toxicidad Aguda:

Producto	DL <sub>50</sub> Oral	DL <sub>50</sub> Dermal	CL <sub>50</sub> Inhalatoria
Agrifos®400	> 2.000 mg/kg	> 5.050 mg/kg	> 2.02 mg/L

## 5. INFORMACIÓN REGULATORIA

EN COLOMBIA:

- Registro de Venta ICA No.: 4116 – Fungicida de Uso Agrícola
- Categoría Toxicológica: III Medianamente tóxico

ESTADOS UNIDOS:

- Registro EPA (Environmental Protection Agency): No. 71962-1  
Como Fungicida para el control de una amplia gama de patógenos.

AUSTRALIA:

Reg. No. 46229 - Fungicida

## 6. PROPIEDADES BIOLÓGICAS

Modo de Acción:

En general, los fosfonatos como Agrifos® 400 SL, poseen un complejo modo de acción en su control de enfermedades ocasionadas por oomicetos. En forma directa, los fosfonatos disminuyen la tasa de desarrollo e inhiben la esporulación del patógeno, induciéndolo a la producción de metabolitos de estrés. En forma indirecta, las plantas al ser estimuladas por los metabolitos de estrés del patógeno, producen una respuesta de defensa rápida (producción de fitoalexinas) la cual detiene el desarrollo de la enfermedad y promueve la reparación de las lesiones.

## **Silicona** *productos de silicon, s.a. de c.v.*

### Antiespumante NF - 10 Hoja técnica

#### Descripción del producto.

El Antiespumante NF - 10, está formulado con un fluido de polidimetilsiloxano modificado de peso molecular medio y emulsificantes no iónicos grado alimenticio.

#### Características.

- Fácilmente dispersable en agua.
- Excelente control de la espuma.
- Funciona desde concentraciones de 0.06%.
- Estable al almacenamiento.

#### Aplicaciones.

Agente antiespumante que se utiliza en los procesos industriales donde se presentan problemas de formación de espuma, como ejemplos podemos citar: teñido de textiles, fabricación de guantes de látex e insecticidas utilizados en la agricultura, pinturas y adhesivos, tratamiento de aguas residuales, etc. La estabilidad del antiespumante dentro del sistema espumante, puede verse afectado por las condiciones de proceso, temperaturas superiores a 45°C), por lo que es necesario su evaluación antes de ser utilizado en el proceso productivo. Funciona en sistemas no iónicos, catiónicos y aniónicos.

#### Instrucciones de uso.

Una concentración del 0.05 al 2.0% del Antiespumante NF - 10, con respecto al peso total del líquido espumante, es un arranque excelente para evaluar el producto en estas aplicaciones. Para obtener un mejor resultado, en la destrucción inicial de la espuma, se recomienda diluir el producto con agua de 1-1 hasta 1-2 según se requiera, antes de adicionarlo al líquido generador de espuma.

El agua de dilución se debe agregar al antiespumante con ligera agitación, hasta obtener una dispersión homogénea.

## **Silicona** *productos de silicon, s.a. de c.v.*

No se recomienda preparar diluciones que puedan estar almacenadas por periodos prolongados, es preferible preparar únicamente la cantidad de antiespumante que se va a utilizar en ese momento.

### Propiedades físicas.

PROPIEDADES	VALOR
Tipo de emulsificante.	No iónico
Fluido	Polidimetilsiloxano
Contenido de Silicón en %	11 - 12
Sólidos totales en %	14 - 16
Ph.	6 - 7
Color	Blanco
Diluyente	Agua
Estabilidad al almacenamiento	6 Meses

- No presenta degradación a 40°C
- Estable al almacenamiento durante seis meses en su envase original.

### Almacenamiento.

El producto se garantiza por un periodo de 6 meses a partir de la fecha de facturación. Durante el almacenamiento, el producto no debe presentar cambios en la viscosidad olor y color.

### Nota.

Estas especificaciones se presentan de acuerdo a los parámetros actuales que tenemos para este producto; en la inteligencia que estos valores pueden cambiar en función a modificaciones de nuestro proceso, por lo que debe someterse a prueba antes de su aceptación.

## NOMENCLATURA

R = Agua de recirculación (GPM)

V = Volumen total de agua (Gal)

E = Evaporación (GPM)

M = Agua de repuesto (GPM)

B = Purga (GPM)

D = Arrastre (GPM)

C = Ciclos de concentración.

$(TS)_M$  = Sólidos totales en el agua de repuesto (mg/L)

$(TS)_R$  = Sólidos totales en el agua de recirculación (mg/L)

$x_R$  = Concentración de especies en el agua de recirculación (mg/L)

$x_M$  = Concentración de especies en el agua de repuesto (mg/L)

$\Delta T$  = Rango de temperatura (°F)

$C_i$  = Ciclos de concentración iniciales.

$C_f$  = Ciclos de concentración finales.

$pH_S$  = pH de saturación.

$pCa$  = Factor logarítmico de la dureza de calcio expresado en ppm de  $CaCO_3$  equivalente.

$pAlk$  = Factor logarítmico de la alcalinidad-M expresado en ppm de  $CaCO_3$  equivalente.

C = Factor logarítmico de los sólidos totales en ppm de la temperatura del agua.

ISL = Índice de Saturación de Langelier.

(diferencia algebraica entre el pH actual y el pH calculado de saturación)

SDI = Índice de Stiff y Davis.

K = Constante de Stiff y Davis (basado en la fuerza iónica y la temperatura)

ISR = Índice de estabilidad de Ryznar.

L&SI = Índice de Larson-Skold.

Alk-M = Alcalinidad al anaranjado de metilo.

$e_{pm} Cl^- = ppm Cl^- * 0.202$ .

$e_{pm} M = ppm CaCO_3 (Alk-M) * 0.202$ .

S = Coeficiente de sobresaturación.

$C_i$  = Concentración inicial de sal (ppm)

$C_0$  = Concentración de sal en equilibrio (ppm)

PSI = Índice de incrustación de Puckorius.

$pH_{eq}$  = pH de equilibrio.

$x_A$  = Concentración de la especie en el tipo de agua A (mg/L)

$x_B$  = Concentración de la especie en el tipo de agua B (mg/L)

$y_A$  = Proporción del tipo de agua A

$y_B$  = Proporción del tipo de agua B