BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA QUÍMICA

"DETERMINACIÓN DEL AHORRO DE AGUA EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON BASE EN UN TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO PARA EL CONTROL DE LA SÍLICE DISUELTA"

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO.

PRESENTA:
GASPAR MUÑOZ KAREN

ASESOR INTERNO:
M.C. CESAR LUNA ORTEGA

ASESOR EXTERNO:
ING. FERNANDO TORRES LÓPEZ

PUEBLA, PUE. 04 Julio de 2014

BENEMÉRITA
UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA

**FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA**

C. KAREN GASPAR MUÑOZ
PASANTE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA
PRESENTE:

Oficio No. FIQ/AC/642/2014
Asunto: Registro de Tema de Tesis
Fecha: 27 de Mayo de 2014

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Química cuyo título es el siguiente:

"DETERMINACIÓN DEL AHORRO DE AGUA EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON BASE EN UN TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO PARA EL CONTROL DE LA SÍLICE DISUELTA"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1 **ANTECEDENTES**
CAPÍTULO 2 **METODOLOGÍA**
CAPÍTULO 3 **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: M.C. César Luna Ortega

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **ÚNICAMENTE POR UN AÑO.**

Facultad de Ingeniería Química
BENEMERITA
SECRETARIA ACADÉMICA

A T E N T A M E N T E
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"

M.I.C. MA. GPE. TITA VÁZQUEZ E. DE LOS MONTEROS
SECRETARIA ACADÉMICA

C.c.p. Director de Tesis: M.C. César Luna Ortega
Archivo.

Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA

ASUNTO:
AUTORIZACIÓN
IMPRESIÓN DE TESIS

LIC. Ma. Cristina Laura Gómez Aguirre.
Directora de la Administración Escolar
De la BUAP.
Presente

Por este conducto me permito presentar a Ud. al C. pasante de la carrera de Ingeniería

Gaspar Muñoz Karen

Quién presenta como tema de tesis:

"DETERMINACIÓN DEL AHORRO DE AGUA EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON BASE EN UN TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO PARA EL CONTROL DE LA SÍLICE DISUELTA"

La cual ha sido debidamente revisada y se autoriza para su impresión correspondiente.

Sin otro particular y para los fines que se estimen conducentes reitero mi distinción.

ATENTAMENTE
"Pensar Bien, para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 03 de Julio de 2014

Director de Tesis
M.C César Luna Ortega

ÍNDICE

Índice de figuras viii

Índice de tablas x

Índice de gráficas x

Introducción xi

Hipótesis xiii

Objetivos xiv

Objetivo general xiv

Objetivos específicos xiv

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Servicios auxiliares 2

1.2 Torres de enfriamiento 3

1.2.1 Componentes de torres de enfriamiento 4

1.2.2 Clasificación de las torres de enfriamiento 7

1.2.3 Ciclos de concentración de una torre 14

1.3 Agua como fluido de servicios auxiliares 16

1.3.1 Parámetros de calidad del agua 18

1.4 Principales problemas relacionados con el agua y las torres de enfriamiento 22

1.4.1 Corrosión 23

Control e inhibición de corrosión 26

1.4.2 Incrustación 29

Sílice como principal factor de incrustación 30

Control e inhibición de incrustaciones 34

1.4.3 Ensuciamiento y problemas biológicos 35

Control e inhibición del ensuciamiento y problemas biológicos 37

1.5 Tratamiento fisicoquímico 39

Capítulo 2. Metodología

2.1 Tratamiento químico para el control de la sílice disuelta 43

2.1.1 Control de sílice 43

2.1.2 Control de pH 44

2.1.3 Control de microorganismos 45

2.1.4 Inhibidor de corrosión 45

2.2 Control y monitoreo en torres de enfriamiento 47

Capítulo 3. Resultados y discusiones 50

3.1 Análisis del agua de pozo 51

3.2 Análisis de agua tratada en la torre 56

3.3 Comparación entre 2.5 y 3.5 ciclos de concentración 60

Conclusiones 67

Anexo 69

Bibliografía y referencias 73

ÍNDICE DE DIAGRAMAS Y FIGURAS

Diagrama 1. Clasificación de torres de enfriamiento 9

Diagrama 2. Fuentes de suministro de agua 16

Diagrama 3. Sustancias presentes en el agua 17

Figura 1. Partes de una torre de enfriamiento 5

Figura 2. Principales flujos de una torre de enfriamiento 6

Figura 3. Torre a contracorriente 10

Figura 4 Torre de tiro inducido con flujo cruzado 11

Figura 5. Torre de tiro forzado 13

Figura 6. Principales problemas en la torre de enfriamiento 23

Figura 7. Celda básica de corrosión 24

Figura 8. Diagrama de inhibición de corrosión más comunes 27

Figura 9. Incrustación en relleno de torre y tuberías. 30

Figura 10. Modelo de óxido de silicio 31

Figura 11. Modelo de ácido orto-silícico 31

Figura 12. Modelo de sílice polimérica 32

Figura 13. Estructura de silicato de magnesio 33

Figura 14. Esquema de adición de químicos en la torre 46

Figura 15. Esquema del equipo de monitoreo 49

Figura 16. Condiciones de operación de la torre a 2.7 c.c 66

Figura 17. Condiciones de operación a 3.5 c.c 68

ÍNDICE DE GRÁFICAS Y TABLAS

Gráfica 1 Efecto del pH sobre la solubilidad de la sílice 33

Gráfica 2. pH del agua de pozo 52

Gráfica 3. Conductividad del agua de pozo 55

Gráfica 4. Sílice presente en el agua de pozo 54

Gráfica 5. Dureza de calcio presente en el agua de pozo 55

Gráfica 6. pH en el agua de torre 57

Gráfica 7. Conductividad del agua en torre 58

Gráfica 8. Dureza de calcio en agua de enfriamiento 58

Gráfica 9. Concentración de sílice en agua de enfriamiento 59

Gráfica 10. Consumo promedio de agua de reposición en torre 66

Gráfica 11. Extracción de agua de pozo 72

Tabla 1. Conceptos básicos en una torre de enfriamiento 6

Tabla 2. Diseños básicos de torres de enfriamiento 8

Tabla 3. Parámetros físicos del agua 18

Tabla 4. Parámetros de operación de la torre de enfriamiento 42

Tabla 5. Datos promedio del agua de pozo de la planta 43

Tabla 6. Parámetros y frecuencia de monitoreo en torres de enfriamiento 60

Tabla 7. Comparación entre los ciclos de concentración 64

Tabla 8. Comparación de costos del agua de reposición 64

Tabla 9. Uso de agua de pozo en servicios auxiliares 67

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más importantes y abundantes del planeta, el cual se está agotando debido a cambios climáticos y al uso desmedido que se le da. En la tierra se encuentran 1,460 millones de kilómetros cúbicos de agua aproximadamente, más de un 97% corresponde al agua salada de mares y océanos y más del 70 % del agua dulce se encuentra congelada en los polos; constituye uno de los recursos fundamentales para el sector industrial, así como para las actividades agropecuarias, domésticas y municipales. (VIAN ORDUÑO, 1998)

El agua en la industria ocupa aproximadamente un 20% del consumo mundial y sus aplicaciones son numerosas dada su abundancia, economía y disponibilidad, puede utilizarse como materia prima o para acondicionamiento de proceso, para este último se utiliza como fluido refrigerante, disolvente, vehículo de arrastre o para producción de vapor. (VIAN ORDUÑO, 1998)

Dada sus propiedades físicas y químicas es necesario que exista un tratamiento previo para el agua o para los equipos de proceso; el agua como se encuentra en los sistemas naturales aparece acompañado de distintos compuestos disueltos y sólidos en suspensión que determinan la calidad de la misma.

El estudio de sus características es un requisito para determinar sus posibilidades de empleo y el tratamiento necesario que se necesita para usarse en diferentes aplicaciones.

En el acondicionamiento de proceso se utiliza agua generalmente para enfriar o calentar sistemas, uno de ellos son los sistemas de enfriamiento que controlan temperatura y presión transfiriendo calor de fluidos calientes del proceso al agua

de enfriamiento; conforme esto sucede el agua de enfriamiento se calienta y debe ser enfriada antes de usarse de nuevo o ser reemplazada por agua nueva de reposición. (McCABE, 2007)

La reducción de temperatura del agua en la torre de enfriamiento se produce principalmente por evaporación, al evaporarse permanecen los iones disueltos del agua en el sistema hasta que su concentración aumenta hasta que alcanza su máxima solubilidad, es decir, deja de ser soluble provocando incrustaciones y depósitos.

Las torres de enfriamiento son indispensables para el proceso, estos sistemas utilizan agua como materia prima y el uso constante de ésta ocasiona que los minerales que se encuentran disueltos se vayan acumulando y se depositen en el interior de las torres, tuberías o bombas.

HIPÓTESIS

La adición de un dispersante de sílice en el agua que retorna a la torre de enfriamiento y al agregar ácido sulfúrico para mantener el potencial de hidrógeno (pH) controlado en un rango de 7.5 a 8.5 aproximadamente originará que la sílice permanezca soluble hasta una concentración de 250 ppm, lo que aumentará el tiempo de circuito del agua en la torre y los ciclos de concentración, haciendo que el uso de purgas sea más esporádico y se reduzca el uso de agua de reposición, lo que disminuirá la extracción del agua de pozo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

1. Determinar el ahorro de agua que se genera en una torre de enfriamiento de una planta de confitería con base en el aumento de los ciclos de concentración, controlando el pH del agua y aplicando un dispersante de sílice como una mejora en el tratamiento fisicoquímico en el agua de enfriamiento de los servicios auxiliares.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir y analizar el tratamiento fisicoquímico para torres de enfriamiento.

2. Determinar los consumos de agua y gastos económicos que genera la torre de enfriamiento en la planta de confitería.

3. Presentar una alternativa técnico-económica que mejore la operación de la torre de enfriamiento.

4. Realizar un análisis comparativo entre los consumos de agua que presento la torre de enfriamiento operando a 2.5 ciclos de concentración y 3.5 ciclos de concentración.

CAPÍTULO 1
ANTECEDENTES

ANTECEDENTES

Una planta de confitería localizada en el estado de Puebla cuenta con una torre de enfriamiento de tiro forzado marca Baltimore Aircoil Company, la cual se utiliza como un servicio auxiliar que se encarga de retirar las cargas térmicas absorbidas por el agua de enfriamiento y que han sido generadas por el trabajo constante de los equipos de proceso o para acondicionar la materia prima de éste.

La planta de confitería cuenta con un pozo de agua propio del cual se extrae el agua para suministrar a la misma en sus diferentes áreas como producción y servicios.

El agua tiene propiedades fisicoquímicas que varían conforme a la región geográfica en que se encuentra. En el estado de Puebla por ser una zona geográfica montañosa y volcánica el agua contiene minerales, entre los que destaca la sílice.

La sílice existe como ácido silícico en solución y cuando el índice de solubilidad de sílice se excede, el ácido silícico se transforma en óxido de silicio (SiO_2), que puede convertirse en cristales, éstos se depositan en los sistemas de enfriamiento causando incrustación y corrosión que pueden ocasionar graves problemas de operación en los equipos, los procesos o la planta en general.

Las torres de enfriamiento convencionales se encuentran operando entre 2.0 y 2.5 ciclos de concentración, esto ocurre debido a los efectos que tiene la sílice acumulada en el agua de enfriamiento mediante la operación de la torre.

De manera preventiva en las torres de enfriamiento se utilizan las purgas con el fin de conseguir una reducción en la acumulación de sustancias disueltas como la

sílice. Al utilizar frecuentemente las purgas se genera un consumo mayor de agua y sumándolas a las perdidas por evaporación y fugas, entre otras, se estima que en el caso particular de la planta de confitería, aproximadamente se repone un 50% del volumen total de agua utilizada en la torre, lo que significa un consumo aproximado de agua de reposición de 120 m^3 por día; como agua de reposición se utiliza el agua de pozo y debido a su naturaleza, localización e impacto ambiental su extracción se hace cada vez más costosa.

Las plantas industriales están divididas y organizadas en áreas diferentes, que en conjunto se encargan de que la producción sea continua, segura y de calidad. Algunos ejemplos de estas áreas son recursos humanos, producción, departamento de calidad, seguridad e higiene y departamento de servicios auxiliares entre otros.

1.1 Servicios auxiliares

Todos los procesos industriales necesitan de otros servicios complementarios para que funcionen de manera efectiva y eficiente, estos se denominan servicios auxiliares y no están contemplados como parte constituyente del proceso. Principalmente contribuyen a mantener estables las condiciones de operación de los equipos, proporcionando electricidad, aire comprimido, vapor, combustibles, agua, aire acondicionado y sistemas de intercambio de calor.

Particularmente, los sistemas de intercambio de calor están diseñados para transferir energía térmica de un medio de mayor temperatura a otro de menor temperatura, estos medios pueden estar en fase gaseosa o fase líquida. (MCCABE, 1998)

Entre los equipos de intercambio de calor se encuentran:

- Intercambiadores de calor:
    - De tubo y coraza.
    - De tipo placa.
    - Intercambiadores de superficie raspada.
- Equipo con superficie ampliada.
- Tubos de calor.
- Condensadores y evaporadores.

Cuando los medios que intercambian energía térmica de manera directa son una fase gaseosa y una líquida, la operación se conoce como humidificación o des-humidificación; las operaciones de humidificación se aplican al sistema aire-agua, las cuales implican transferencia de materia entre una fase liquida pura y un gas permanente que es casi insoluble en el líquido. (MCCABE, 1998)

Los equipos más comunes para esta operación son:

- Sistemas de aire acondicionado.
- Torres de enfriamiento.

1.2 Torres de enfriamiento

La aplicación más importante de las torres de enfriamiento consiste en disminuir la temperatura del agua recirculada que usan los condensadores e intercambiadores de calor en plantas de proceso, plantas de energía y unidades de aire acondicionado.

Las torres de enfriamiento son columnas de gran diámetro en cuyo interior se alojan empaques especiales diseñados para ofrecer un contacto adecuado entre el líquido caliente y aire que lo enfriará con una baja caída de presión. (MCCABE, 1998)

El agua caliente se distribuye a través del empaque mediante boquillas aspersoras o por una rejilla con tubos o bateas con muescas, mientras que el aire pasa a través del empaque por medio de ventiladores de tiro forzado o inducido o en algunos diseños es arrastrado por convección natural. (HENSELEY, 2006)

Este enfriamiento se lleva a efecto poniendo el agua en contacto directo con una corriente de aire cuya temperatura sea inferior a la del agua., en estas condiciones el agua se enfría por evaporación parcial debido al intercambio de calor sensible y latente con el aire seco y frio que circula en el sistema. (HENSELEY, 2006)

La temperatura límite de enfriamiento del agua es la temperatura húmeda del aire que corresponde a sus condiciones de entrada a la torre por la parte inferior de la misma, ya que el contacto se efectúa en contracorriente, una pequeña fracción del agua se evapora, aproximadamente se evapora un 2% del agua por cada 10°C del enfriamiento de la misma.

El cambio de la temperatura de entrada desde la entrada hasta la salida se conoce como intervalo y generalmente es de 6 a 17° C. La composición o cantidad total del agua suministrada debe ser igual a la de evaporación y las pérdidas de desplazamiento más la cantidad de purga. (Ahorro y eficiencia energética en climatización, 2002)

1.2.1 Componentes de torres de enfriamiento

En la Figura 1 se muestran algunos componentes importantes de las torres de enfriamiento como el cárcamo o contenedor de agua fría, sistema de distribución de agua, cubierta de ventilador, ventilador, soportes mecánicos de equipos, relleno, eliminadores de arrastre, carcasa y persianas entre otros, mientras la Figura 2 muestra los principales flujos en una torre de enfriamiento.

El agua de reposición y el agua enfriada se deposita en el cárcamo de almacenamiento, es bombeada hacia el proceso para retirar cargas térmicas y regresa a la torre con mayor temperatura.

El agua caliente entra por la parte de arriba de la torre y es depositada en las charolas de distribución las cuales contienen aspersores que distribuyen el agua por la torre; esta choca con el relleno para aumentar el área de contacto con el fin de enfriarla más rápido.

El enfriamiento del agua ocurre cuando a través de las persianas entra aire a la torre y tiene contacto con el agua que va descendiendo desde la parte superior, debido al choque térmico entre estos dos flujos se produce una evaporación, el aire caliente se extrae por medio del ventilador o chimenea que se localiza por la parte superior de la torre

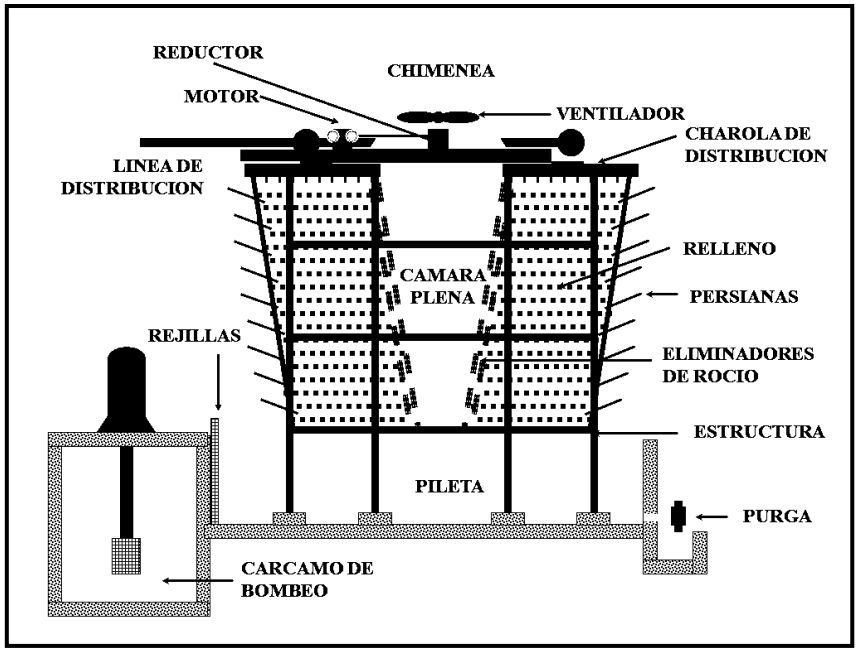


Figura 1. Partes de una torre de enfriamiento.

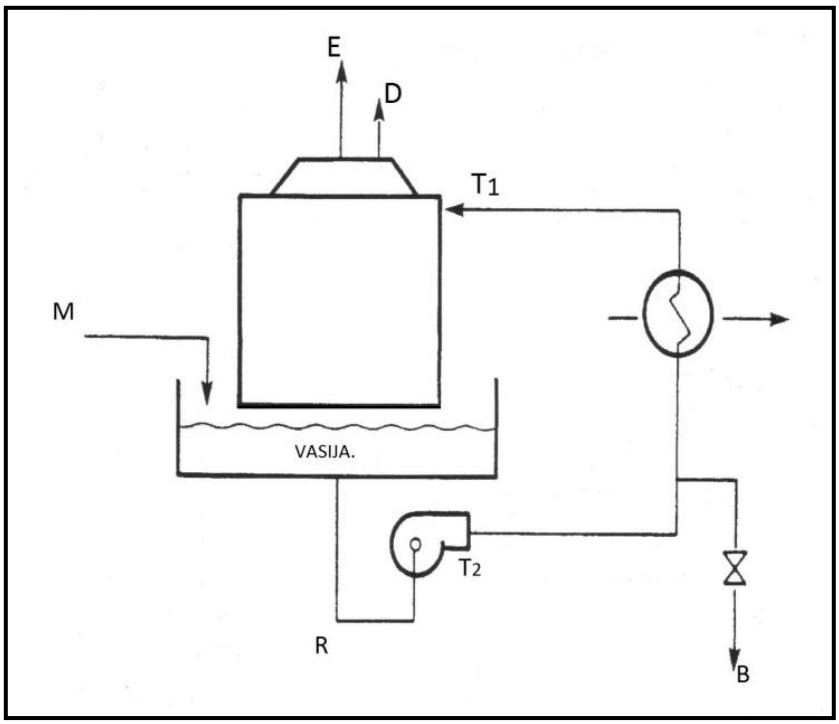


Figura 2. Principales flujos de una torre de enfriamiento. (NALCO, Cooling Water Technical Manual, 2005)
(E) Flujo de evaporación, (D) Corriente de aire, (M) Agua de reposición, (T_1) Temperatura de entrada, (T_2) Temperatura de salida, (R) Flujo de recirculación, (B) Flujo de purga.

Algunos conceptos relacionados con las torres de enfriamiento son los siguientes.

Tabla 1. Conceptos básicos en torres en enfriamiento.

Concepto	Definición
Temperatura de bulbo húmedo	Es la temperatura de equilibrio o temperatura límite de enfriamiento alcanzada por una pequeña masa de líquido en contacto con una masa mucho mayor de gas húmedo.
Tiempo de circuito o tiempo de vida media	Es el tiempo que tarda el agua para cumplir un ciclo de circulación dentro del sistema.
Calor sensible	Es la absorción o cesión de calor que no provoca la modificación del estado físico del

	cuerpo o fluido. La variación de temperatura está en función de la cantidad de calor intercambiado y de una característica física propia de cada cuerpo conocida como calor específico. (HASLEGO, 2010)
Purga	Sacar aire u otro fluido en un circuito, aparato o máquina para su buen funcionamiento. (DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA, 2010)
Agua de reposición	Es el agua que se agrega a la torre para reemplazar la cantidad de agua que ha salido del sistema mediante arrastre, purga o evaporación.
Tiempo de residencia	Es el tiempo máximo que se mantiene en el circuito cualquier producto químico añadido al sistema.
Tiempo de circuito o tiempo de vida media	Es el tiempo que tarda el agua en recorrer una sola vez el circuito de enfriamiento.
Contenedor o cárcamo de almacenamiento.	Recipiente de recolección del agua fría a donde retorna la línea de succión, y está situada en el fondo de la torre.
Perdidas por arrastre	Es la cantidad de agua que se encuentra en forma de finas gotas y es arrastrada por el vapor hacia la parte superior de la torre.

1.2.2 Clasificación de las torres de enfriamiento

Las torres de enfriamiento son diseñadas y fabricadas en diversos tipos, tamaños, modelos, materiales, etc.

Existen 2 diseños básicos de torres de enfriamiento.

1. Torres de un solo paso.

2. Torres de recirculación, las cuales pueden ser abiertas o cerradas.

Tabla 2. Diseños básico de torres de enfriamiento (NALCO, Introduction to Cooling Water Treatment, 2005)

Tipo de torre	Funcionamiento
Torres recirculantes abiertas o directas	Bombas circulan agua por intercambiadores de calor, a su paso por éstos, el agua atrapa el calor y lo lleva a las torres de enfriamiento, donde el calor es liberado debido a la evaporación parcial del agua.
Torres de un solo paso	El agua pasa una sola vez por los equipos de intercambio de calor. El contenido mineral del agua de enfriamiento sigue sin cambio conforme pasa por el sistema.

Las torres de recirculación abierta son el diseño más utilizado en el enfriamiento industrial, su clasificación se muestra en el Diagrama 1.

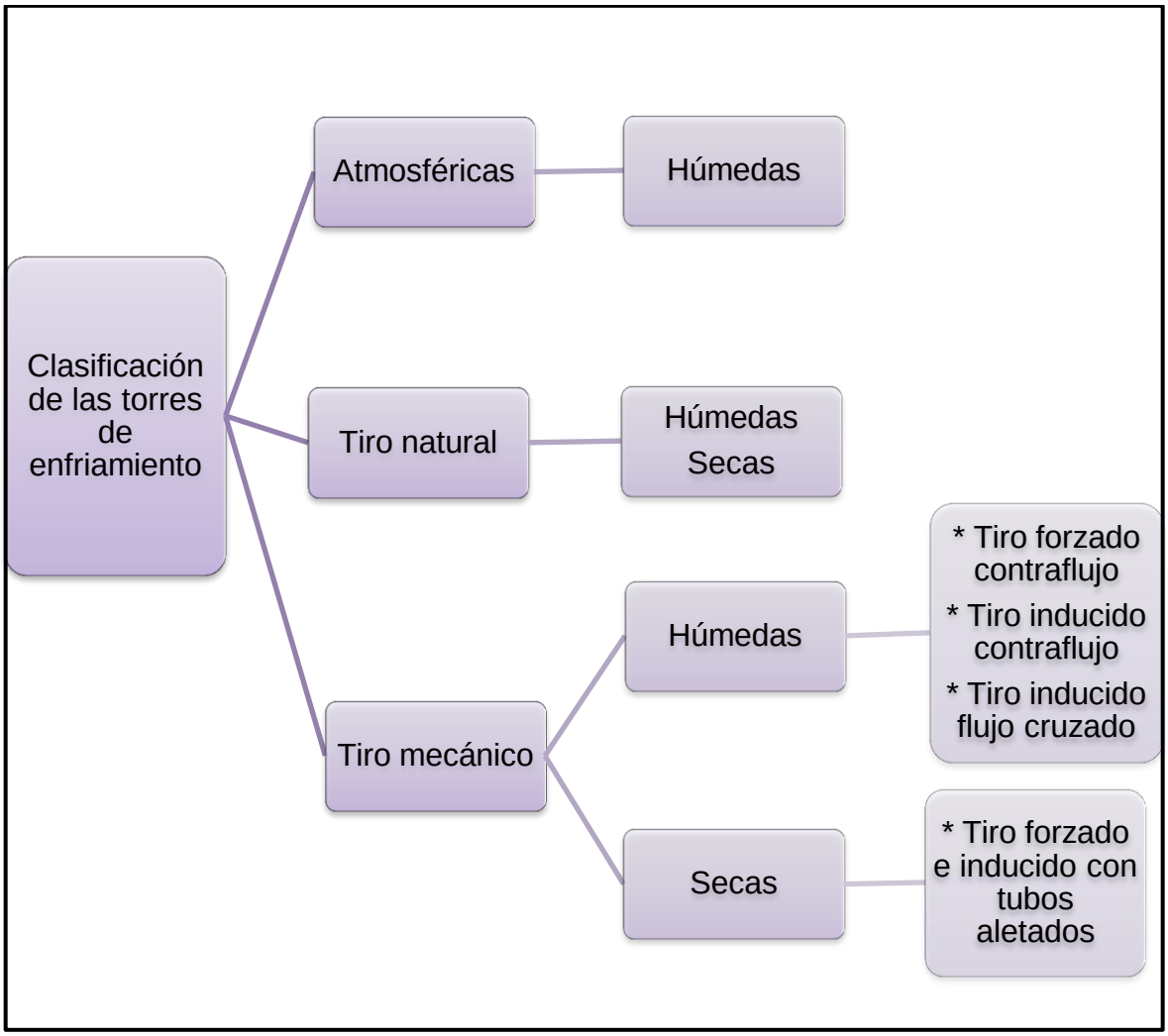


Diagrama 1. Clasificación de torres de enfriamiento.
(HENSELEY, 2006)

Las torres de refrigeración más comunes son las de tipo húmedo, donde una porción del agua es evaporada. Las torres de enfriamiento húmedas por evaporación se clasifican en flujo cruzado y contraflujo, esto depende de tipo de contacto que tiene el agua con el aire de refrigeración; puede fluir en contra o a través de la caída del agua. (HENSELEY, 2006)

Algunas torres no utilizan la evaporación como el proceso de enfriamiento; estas torres se llaman torres de enfriamiento en seco. En los sistemas de enfriamiento

en seco el agua pasa a través de tubos y se sopla aire sobre el exterior de dichos tubos.

Existen torres de refrigeración que pueden ser combinaciones de estos dos tipos, y se denominan torres de refrigeración híbridas o torres de enfriamiento en seco y húmedo.

a) Torres de contraflujo o contracorriente.

En las torres a contracorriente como se muestra en la Figura 1.3 el aire entra por debajo de la capa de relleno y se mueve verticalmente ascendiendo en contra de la caída del agua, la torre a contracorriente utiliza un ventilador de aire colocado en la base de la torre.
La naturaleza cerrada de una torre de contraflujo también restringe la exposición del agua a la luz solar directa, lo que retarda el crecimiento de algas.

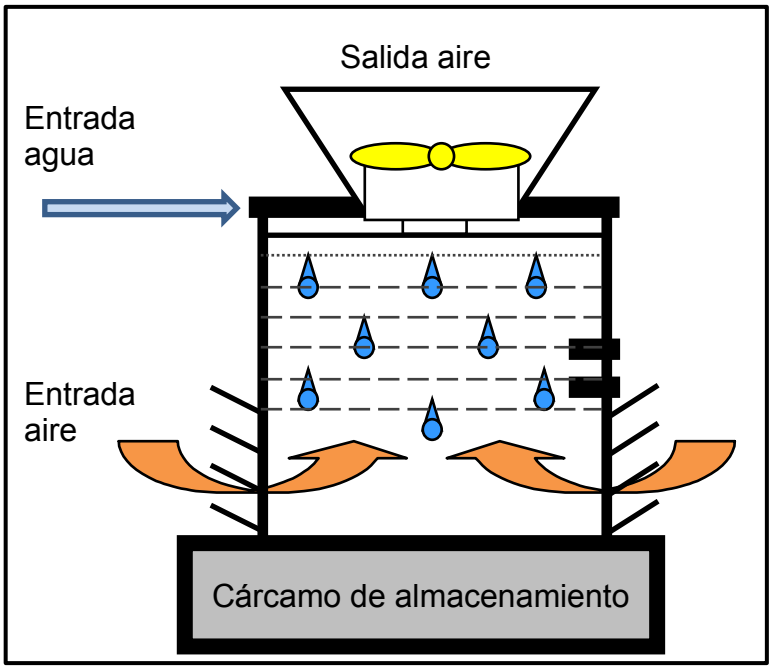


Figura 3. Torre a contraflujo o contracorriente. (NALCO, Cooling Water Technical Manual, 2010)

b) Torres de flujo cruzado.

Las torres de flujo cruzado tienen una configuración donde el aire fluye horizontalmente a través de la caída del agua, como se muestra en la Figura 4. El agua a enfriar se deposita en los contenedores de entrada de agua caliente que se localizan encima de las áreas de relleno distribuyéndose de manera que la torre se llene por gravedad a través de las aspersores de dosificación.

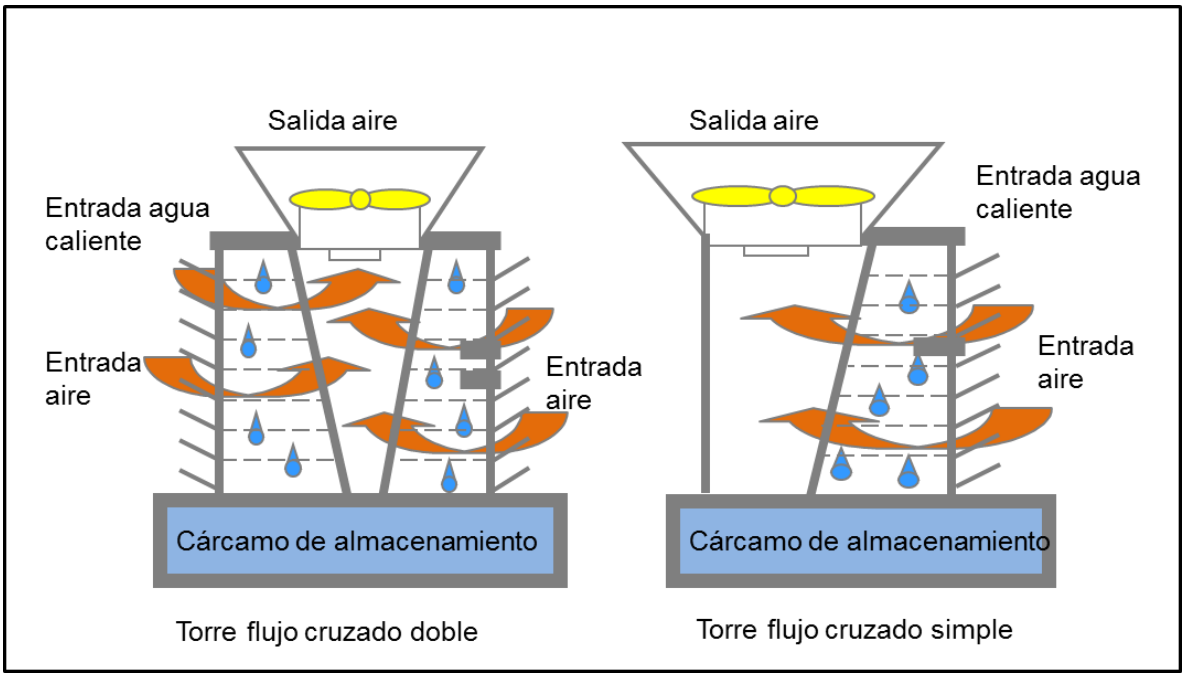


Figura 4. Torres de tiro inducido con flujo cruzado. (NALCO, Introduction to Cooling Water Treatment, 2005)

Una torre de flujo único como indica la Figura anterior tiene solamente una entrada de aire y un banco de relleno, los lados restantes de la torre se encuentran entubados. Se utilizan habitualmente en lugares donde una vía de aire se encuentra disponible a partir de una sola dirección.

Las torres de enfriamiento por evaporación también se pueden describir por la manera en la que el aire es suministrado a la torre, pueden ser de tiro natural o tiro mecánico.

Las torres de tiro natural dependen de las diferencias entre la densidad del aire dentro y fuera de la torre para proporcionar movimiento al aire y éste pueda ser aspirado a través de la torre y pueden ser atmosféricas e hiperbólicas, en éstas torres, el aire se calienta por el contacto del agua de recirculación que cae a través del aire.

En las torres de tiro mecánico el aire se mueve a través de la torre mediante ventiladores individuales o múltiples para proporcionar un flujo de un volumen de aire a través de la torre, por lo tanto su rendimiento térmico tiende a una mayor estabilidad, la presencia de los ventiladores también proporciona un medio para regular el flujo de aire, para compensar los cambios en las condiciones atmosféricas y de la carga por la manipulación de la capacidad del ventilador.

En las torres de tiro mecánico, la ubicación del ventilador indica si el tipo de la corriente de aire es inducida o forzada.

c) Torres de tiro forzado

En éste tipo de torres el ventilador se encuentra en la corriente de aire que entra a la torre y el aire se sopla a través de ella como lo indica la Figura 5, están equipadas con ventiladores de tipo centrífugo, aunque requieren una potencia más considerable que los de tipo hélice, tienen la ventaja o son capaces de operar contra las presiones estáticas altas asociadas con los conductos. Se caracterizan por las altas velocidades de entrada de aire y velocidades bajas de salida, por lo tanto, son extremadamente susceptibles a la recirculación y se considera que tienen menos estabilidad en el rendimiento que el tiro inducido.

Las torres de flujo cruzado también se sub clasifican por el número de los terraplenes y las entradas de aire que son atendidas por cada ventilador.

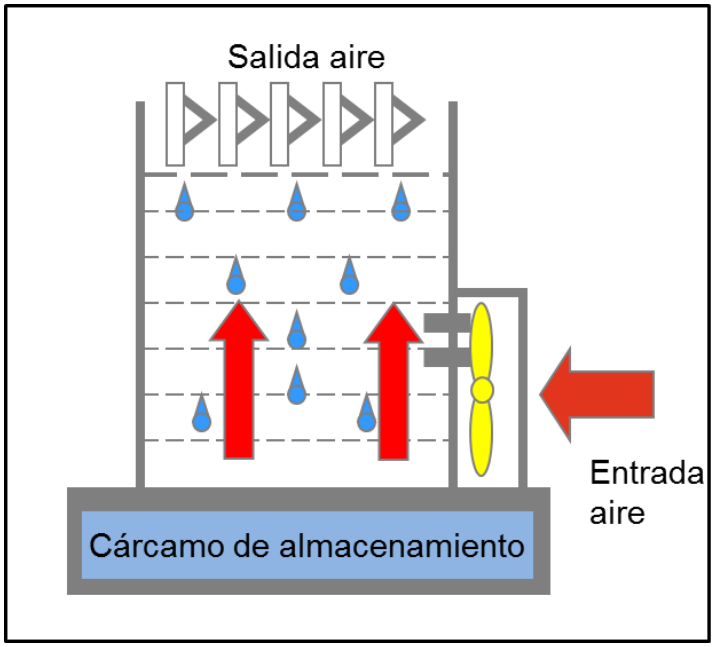


Figura 5. Torre de tiro forzado.
(NALCO, Introduction to Cooling Water Treatment, 2005)

d) Torres de tiro inducido

Las torres de tiro inducido son aquellas torres en las que se sitúa un ventilador en la corriente de aire que sale y extrae aire a través de la torre, éste tipo de torres se representa en la Figura 4.

Las primeras torres utilizadas en la industria fueron elaboradas de madera, posteriormente se utilizaron materiales como el fibrocemento, plástico estratificado, cerámica, aceros al carbón, aceros inoxidables y galvanizados entre otros.

1.2.3 Ciclos de concentración de una torre

Es la relación entre la concentración de sólidos en el sistema y la concentración de estos en el agua de reposición que fluye hacia la torre.

La evaporación del agua en una torre de enfriamiento es la manera en la que se cede el calor al ambiente que ha sido absorbido dentro del proceso y por este medio se concentran todos los iones disueltos dentro del sistema.

El número de veces que estos iones se concentran, definen el número de ciclos de concentración. Si el único gasto de agua fuera por evaporación, los iones disueltos en la recirculación se concentrarían hasta que la solubilidad de cada uno de los iones presentes en el agua se superara, provocando incrustación y depósitos dentro de la torre.

La concentración de los iones en el agua para evitar incrustaciones se controla con el agregado de compuestos que inhiben la incrustación y mediante la purga del sistema. (NALCO,1995)

Las torres de enfriamiento operan con base en los rangos establecidos en los ciclos de concentración, estos se pueden calcular de dos maneras, por ejemplo:

Si la concentración de un ion en el agua de recirculación es 100 ppm y la concentración de este mineral en el agua de reposición es de 50 ppm, los ciclos de concentración pueden ser calculados mediante:

1. $$\frac{C_{iR}}{C_{iMU}} = C.C$$

Dónde: C_{iR}= Concentración del ión en agua de recirculación

C_{iMU}= Concentración del ión en agua de reposición

C.C= Ciclos de concentración

Por lo que: $\frac{100\ \text{ppm}}{50\ \text{ppm}} = 2$ ciclos de concentración.

Para que este método de cálculo sea exacto se debe basar en un ion soluble que esté presente en el agua de reposición y que no tenga cambios químicos en el sistema.

1. Otro método de calcular los ciclos de concentración en la torre es mediante la siguiente expresión.

$$\frac{F_{MU}}{F_{BD}} = C.C$$

Dónde: F_{MU}= Flujo del agua de reposición

F_{BD}= Flujo del agua de purga

C.C = ciclos de concentración

Por ejemplo, si el agua de reposición del sistema entra 500 m^3/h y el flujo de la purga del sistema es de 100 m^3/h, con base en la expresión anterior los ciclos de concentración se determinan de la siguiente manera:

$$\frac{500 \text{ ppm}}{100 \text{ ppm}} = 5 \text{ ciclos de concentración}$$

La velocidad de purga es la cantidad de agua de recirculación que es liberada por el sistema en un periodo de tiempo determinado, al incrementarse el flujo de purga se reduce la concentración de todos los químicos y sólidos disueltos en el sistema, esto se debe a que el agua es removida y reemplazada por agua fresca o agua menos concentrada (NALCO, 2010). Es importante mantener un ajuste en la velocidad de la purga debido a que una purga excesiva puede llegar a alterar o desconcentrar los químicos adicionados en la torre.

1.3 Agua como fluido de servicios auxiliares

El agua es un líquido incoloro, inodoro y casi insípido que es esencial para la vida animal y vegetal, es el más empleado de los disolventes.

Su abundancia, disponibilidad, bajo costo, fácil manejo, sus propiedades térmicas que le permiten intercambiar grandes cantidades de calor por unidad de volumen, que no se expanda ni comprima significativamente dentro de los rangos normales de temperatura en fase líquida, que no se descomponga y un manejo seguro, son factores que hacen que el agua sea un excelente refrigerante.

El diagrama 2 desglosa las principales fuentes de agua disponible así como los usos específicos que se les da.

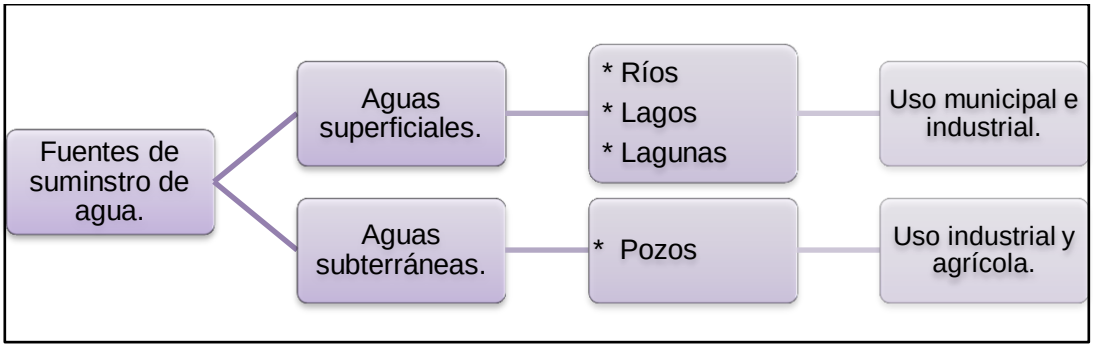


Diagrama 2. Fuentes de suministro de agua. (RIGOLA L. M., 1990)

El agua tal como se encuentra en los sistemas naturales aparece acompañada de distintos compuestos sólidos, líquidos o gaseosos los cuales determinan su calidad.

Se puede clasificar en:

1. Agua potable.
2. Agua de lluvia.
3. Agua residual.

Entre las sustancias presentes más comunes en el agua se describen en el Diagrama 3.

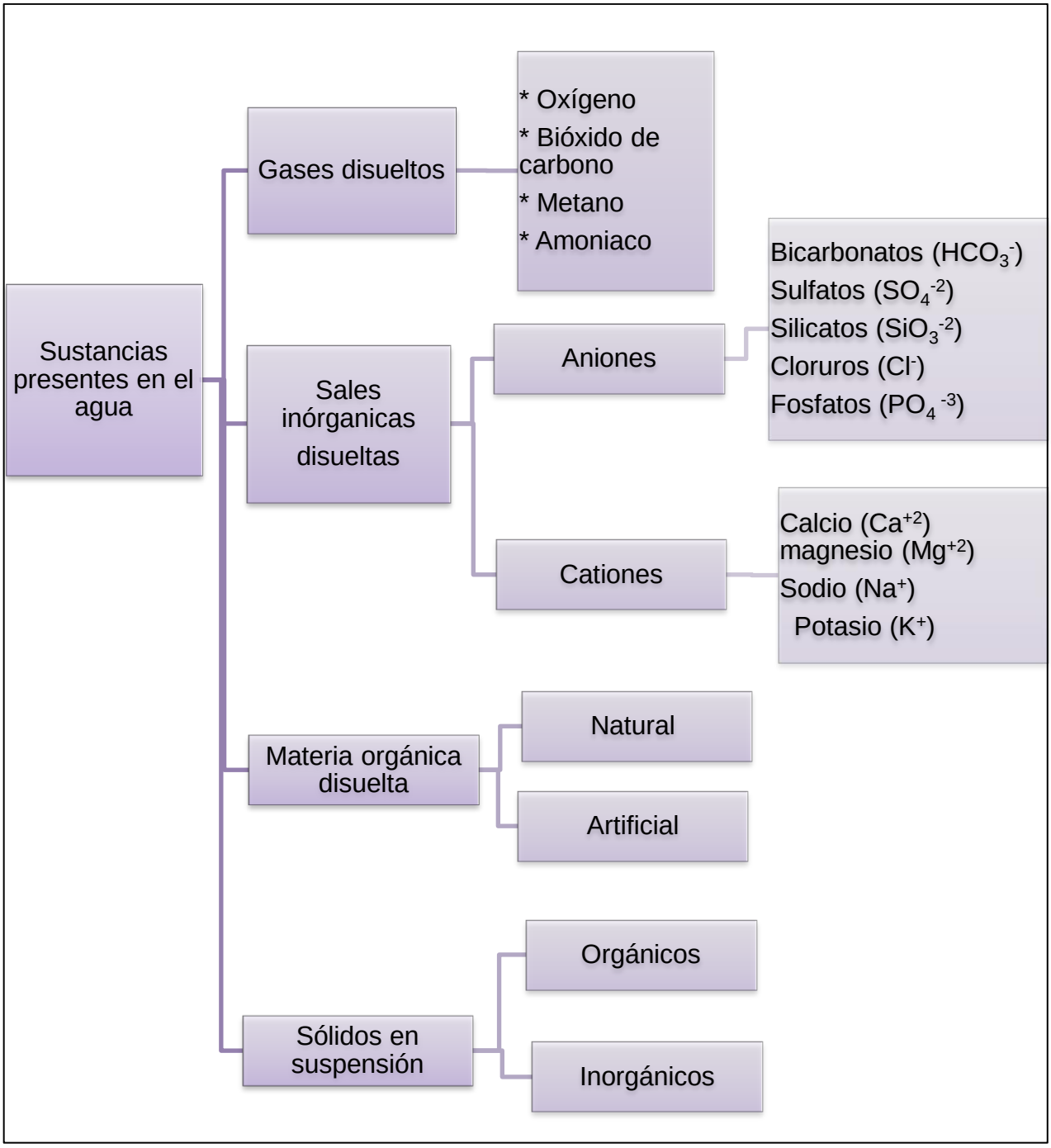


Diagrama 3. Sustancias presentes en el agua.

El calcio, magnesio y sílice son los más representativos, ya que son los causantes de la dureza del agua que provoca las incrustaciones. (KEMMER, 1989)

La materia orgánica puede ser húmica o vertidos contaminantes, si esta se degrada por los microorganismos aerobios presentes en el agua se denomina biodegradable, a diferencia de la materia orgánica no oxidable por vía biológica que se conoce como refractaria o persistente.

La materia biodegradable se transforma en productos finales inocuos con la participación del oxígeno, lo que afecta la concentración del mismo en el sistema, con las consiguientes repercusiones ecológicas; mientras que los del segundo grupo, permanecen en el agua por largos periodos de tiempo en los que su acción química y toxica constituye un mayor riesgo potencial.

La presencia de los sólidos suspendidos provoca turbiedad en el agua y la inhabilita para algunas aplicaciones.

1.3.1 Parámetros de calidad del agua

El agua debe presenta parámetros específicos que determinan si es apta para los diferentes usos que se le da, éstos pueden ser físicos o químicos, los parámetros físicos se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros físicos del agua (JENKIS, 2004)

Parámetro físico	**Definición**
Olor, sabor y color	Éstas determinaciones se denominan organolépticas y dependen de los compuestos que tenga el agua. En el agua, algunos colores son indicativos de contaminantes, por ejemplo el color

	amarillo es debido a ácidos húmicos, el color rojizo se debe a presencia de hierro y el manganeso da un color negro.
Turbidez	Se refiere a la dificultad para transmitir la luz a través del agua, es causada por materiales en suspensión o coloidales y generalmente se encuentran en aguas superficiales.
Conductividad	Es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad, indica la materia ionizable total presente den el agua y es el resultado del movimiento de los iones de las impurezas presentes

Los parámetros químicos se describen a continuación:

- Parámetros químicos

1. pH

El pH es definido como el logaritmo negativo del reciproco de la actividad del ion hidrógeno:

$$pH= - Log[H^+]$$

Es la medida de la naturaleza ácida o alcalina de una solución acuosa, la escala de pH tiene un intervalo de 0.0 a 14.0 siendo 0.0 la máxima acidez y 14.0 la máxima alcalinidad.

El pH es una medición de la actividad, no de la concentración del ion hidrogeno. El pH del agua a 25ºC es de 7.0, el punto en el cual las concentraciones de iones hidrogeno (H^+) y de iones hidroxilo (OH^-) tienen la misma magnitud.

El pH es una medida muy importante para el control de la corrosión y formación de incrustaciones. Un pH bajo da origen a corrosión y un pH alto puede causar precipitación de $CaCO_3$ como incrustación. (RIGOLA L. , 1990)

2. Dureza

Se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos como iones de calcio y magnesio presentes en el agua, se expresa en equivalentes de carbonato de calcio ($CaCO_3$) y es un parámetro importante que determina la calidad del agua. Los términos para cuantificar la dureza del agua dependen de las sales que se precipitan en ella.

Dureza de calcio y magnesio: se refiere a la cantidad de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua, respectivamente. La dureza total es la suma de la dureza de calcio y magnesio.

La dureza también se clasifica en dureza temporal y dureza permanente.

La dureza temporal es la parte de la dureza total que puede incrustarse y corresponde a la cantidad de calcio y magnesio que puede asociarse con iones bicarbonato. Su determinación analítica corresponde al contenido en bicarbonatos presentes en el agua y como máximo es igual a la dureza total del agua.
Por lo tanto, la dureza permanente corresponde a la cantidad de calcio y magnesio restante que se asocia con los otros iones, como cloruros y sulfatos, entre otros. Es la diferencia entre la dureza total y la dureza temporal y en general en las condiciones de trabajo normales no produce incrustaciones. (ASCOLESE, 1998)

3. Alcalinidad

La alcalinidad se refiere a la capacidad que tiene el agua para neutralizar ácidos. En el agua de enfriamiento se encuentran diversas formas de alcalinidad que se representan por iones de carbonato (CO_3^{-2}), bicarbonato (HCO_3^-) e hidróxidos (OH^-).

Cuando el pH es inferior a 8.3 prácticamente no hay ion de bicarbonato.

Los dos tipos de alcalinidad son:

Alcalinidad P: se define por la suma de la mitad de la alcalinidad de carbonatos y toda la alcalinidad de hidroxilos.

Alcalinidad M o total: se define como la suma de carbonatos, bicarbonatos e hidroxilos. (La dureza del agua, n.d)

4. Potencial de óxido reducción (redox)

El potencial de óxido reducción (ORP) es denominado como toda reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en su estado de oxidación. (MARTI, 2008)

Cuando un elemento químico reductor cede electrones al medio, se convierte en un elemento oxidado y la relación que guarda con su precursor queda establecida mediante lo que se llama “par redox”, se dice que cuando un elemento químico capta electrones del medio, este se convierte en un elemento reducido y forma un par redox con su precursor oxidado.

El potencial de óxido reducción es una medida de la actividad de los electrones, es decir; sirve para monitorear y controlar las reacciones químicas, se relaciona con el pH que mide la actividad de protones y el potencial de óxido reducción la actividad de los electrones; también se relaciona con el contenido de oxígeno, su unidad de medida son los milivoltios o voltios.

Un valor positivo y de alta magnitud indica un ambiente que favorece las reacciones de oxidación, por otro lado, un valor negativo y de baja magnitud indica que existe un ambiente altamente reductor.

Las reacciones de oxidación y reducción regulan el comportamiento de muchos compuestos químicos presentes en cuerpos de agua naturales. La reactividad, solubilidad y movilidad cíclica de elementos esenciales para los sistemas biológicos, por ejemplo, fierro (Fe), azufre (S), nitrógeno (N), carbono (C), fósforo (P) y varios elementos metálicos son afectados por cambios en el potencial redox, al mismo tiempo, el potencial redox afecta la distribución y la actividad metabólica de microorganismos.

Algunos ejemplos en donde es utilizado el potencial redox son en el control de ozono o cloro y la reducción de cromo o destrucción de cianuro.

1.4 Principales problemas relacionados con el agua y las torres de enfriamiento

Las propiedades fisicoquímicas del agua tienen un gran impacto directo en los principales problemas a los que se enfrentan las torres de enfriamiento, éstos se describen en la siguiente figura.

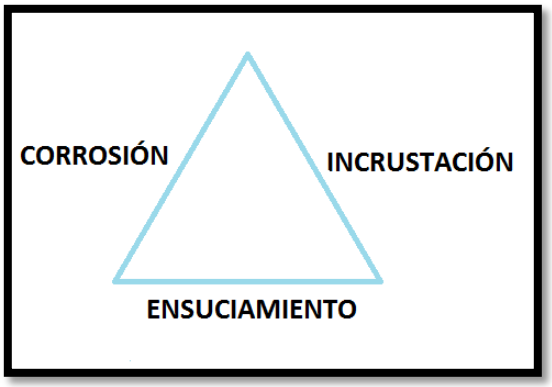


Figura 6. Principales problemas en la torre de enfriamiento.

1.4.1 Corrosión.

La manufactura de los metales comunes que se emplean en los sistemas de enfriamiento, tales como acero suave, implica la eliminación de oxígeno del mineral natural; los sistemas de agua de enfriamiento son ideales para la reversión del metal al óxido original, a este proceso se le conoce como corrosión.

"La corrosión de metales es una reacción electromecánica del metal con su medio ambiente, indica en términos termodinámicos que el hierro refinado tiene un gran potencial para volver a su estado natural (óxido)." (GÓMEZ DE LEÓN & ALCARAZ, 2004)

En la siguiente reacción, el hierro entra en solución en el ánodo y la ruta del complejo de reacción se muestra a continuación, donde el resultado final es la reacción anódica.

$$Fe + H_2O \rightarrow Fe(H_2O)$$
$$Fe(H_2O) \rightarrow Fe(OH)^- + H^+$$
$$Fe(OH)^- \rightarrow Fe(OH) + e^-$$
$$Fe(OH) \rightarrow H^+ \rightarrow Fe^{+2} + H_2O$$
$$\overline{Fe \rightarrow Fe_2+ + H_2O}$$

En el agua de enfriamiento predominan las reacciones catódicas, éstas son la reducción del oxígeno por los electrones liberados en el ánodo, es un mecanismo de multi etapas como se muestra en la siguiente reacción. (NALCO, 2010)

$$O_2 \rightarrow O_2$$
$$O_2 + H^+ + e^- \rightarrow H_2O$$
$$H_2O + H^+ + e^- \rightarrow H_2O_2$$
$$H_2O_2 + 2e^- \rightarrow 2OH^-$$
$$O_2 + 2\,H_2O + 42e^- \rightarrow 4OH^-$$

La corrosión causa pérdida del grosor del metal o hasta perforación de la pared de los tubos que puede causar fuga de fluidos del proceso o del agua de enfriamiento.

Para que este fenómeno ocurra debe existir una celda de corrosión que consiste en un ánodo, un cátodo y un electrolito.

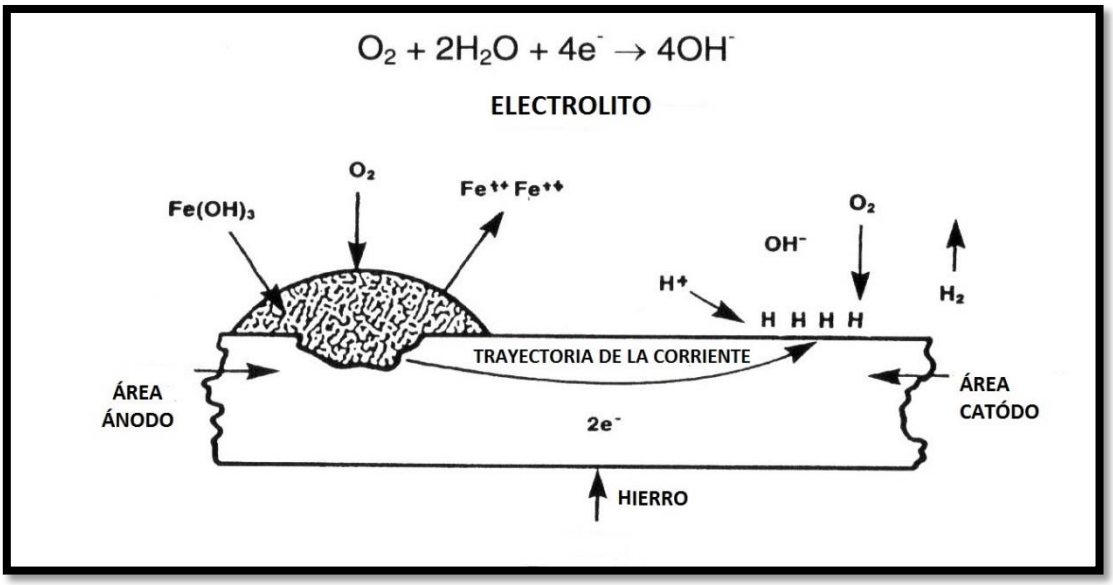


Figura 7. Celda básica de corrosión. (NALCO, 1995)

En este proceso Figura 7, los iones de metal (ánodos) se disuelven en el electrolito que en este caso es el agua, quedando libres los electrones, estos electrones fluyen por el metal donde ocurren reacciones que los consumen. El resultado de esta actividad es la pérdida de metal y muchas veces la formación de depósitos.

Los factores que contribuyen a que el agua genere corrosión son los siguientes:

1. Oxígeno y gases disueltos

El oxígeno disuelto en el agua es esencial para que se realice la reacción catódica, ya que impulsa esta reacción para que acepte los electrones del metal.

2. Sólidos suspendidos y disueltos

Estos solidos pueden aumentar la corrosión porque aumentan la conductividad del agua. Los cloruros y sulfatos disueltos son en particular corrosivos, los sólidos suspendidos pueden influir en la corrosión por acción erosiva o abrasiva y pueden depositarse en superficies metálicas para formar celdas localizadas de corrosión.

El incremento de sólidos disueltos en condiciones normales del agua de enfriamiento hace que se genere un mejor medio electrolítico y un mejor entorno para la corrosión. El aumento de las cantidades de cloruro y iones de sulfato son particularmente agresivos ya que esos iones estimulan la reacción de disolución anódica.

3. Alcalinidad o acidez

Las aguas ácidas y las ligeramente alcalinas pueden disolver el metal o la película protectora de óxido en las superficies metálicas.

En un pH neutro la corrosión del acero tiende a ser bastante uniforme, sin embargo, al aumentar el pH por encima de 7.5 la corrosión se vuelve cada vez más irregular. Por lo tanto, a una escala superior de pH el mecanismo de la corrosión es considerado como de formación de picaduras.

Dentro de un rango ácido pH<4, la película de óxido de hierro es disuelta continuamente, si el pH se encuentra dentro del rango de 4 a 10 la corrosión es más dependiente de la difusión de oxígeno y es relativamente independiente de pH, mientras que por encima de un pH de 10 el hierro se incrementa pasivamente.

4. Velocidad del agua

En el agua de refrigeración no tratada, el aumento de la velocidad entrega más oxígeno al sitio de la corrosión, esto es porque transporta oxígeno al metal. Por lo que las altas velocidades y suficiente oxígeno pueden llegar a la superficie para causar pasivación parcial y el flujo disminuirá ligeramente, a velocidades más altas, la erosión de las películas protectoras provocan corrosión o erosión en superficies metálicas, películas protectoras y óxidos.

5. Actividad microbiana

El crecimiento microbiano aumenta la formación de celdas propensas a la corrosión, además, los subproductos de algunos organismos como el sulfuro de hidrógeno que proviene de bacterias anaeróbicas, son corrosivos para muchos metales.

Control e inhibición de corrosión

El control de corrosión es una parte importante en el mantenimiento de los sistemas de agua fría.

Los métodos más comunes para la prevención o inhibición de la corrosión incluyen las siguientes tareas:

a) Usar materiales resistentes para la corrosión, como aceros inoxidables, aleaciones de cobre y níquel, plástico, concreto y aceros al carbón entre otros.
b) Aplicación de recubrimientos o barreras inertes; incluyen barreras orgánicas, metálicas, barreras vítreas tales como pintura y resinas epoxi, que se aplican para proteger metales ante un ambiente corrosivo.
c) Protección catódica o ánodos de sacrificio; la protección catódica trabaja para suministrar electrones al metal que normalmente se corroe, mientras que el metal anódico produce electrones.
d) Aplicación de químicos inhibidores de corrosión. (GÓMEZ DE LEÓN & ALCARAZ, 2004)

En la siguiente figura se muestra la clasificación de los inhibidores químicos de corrosión así como los más utilizados.

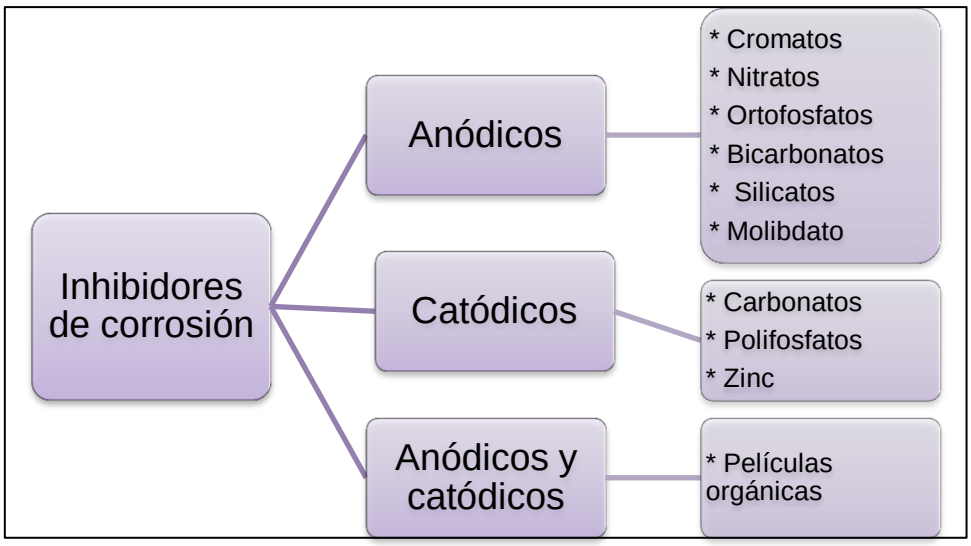


Figura 8. Diagrama de inhibidores de corrosión más comunes.

- *Inhibidores anódicos de corrosión*

Su funcionamiento se basa en la interferencia con la reacción anódica para romper el circuito electroquímico, su principal función es reducir la velocidad de disolución del metal.

Se clasifican en:

a) Inhibidor anódico oxidante. Entre ellos destacan cromatos y nitritos; promueven la rápida oxidación de la superficie metálica para formar una capa adherible y delgada de óxidos metálicos; no requiere de oxígeno para funcionar y aumenta el potencial del sistema al punto de que el metal llegue a pasivar.

b) Inhibidor anódico no-oxidante. Estos inhibidores funcionan reaccionando con iones metálicos, como Fe^{+2}, para formar una sal o complejo que se precipita como una película en los sitios anódicos, por ejemplo, fosfatos, fosfonatos, o molibdato.

- *Inhibidores catódicos de corrosión*

Éstos inhibidores previenen la oxidación de oxígeno en un cátodo, reduciendo el flujo de corrosión para formar una película como barrera sobre el metal, restringiendo oxígeno y reduciéndolo en sitios catódicos.
Las películas catódicas deben tener la permeabilidad física y eléctrica similar a las películas anódicas.

Las películas o barreras catódicas generalmente están formadas por el OH^- producido por la reacción catódica, se localizan en un pH alto (rango entre 10 y 11) en los sitios catódicos se precipitarán varios materiales que pueden crear una película de inhibición.

- *Inhibidores de formación de película*

La mayoría de los inhibidores forman una capa de protección en la superficie del metal, especialmente por adsorción la cual limita la corrosión, ya que previene las reacciones de corrosión.

Por ejemplo, los inhibidores solubles en aceite a veces se utilizan en sistema cerrados, este tipo de inhibidores son absorbidos por la superficie del metal, ya que no son solubles en el agua.

1.4.2 Incrustación

Las incrustaciones son capas densas de material inorgánico que se forma con precipitaciones de minerales tales como carbonato de calcio, fosfato de calcio, silicatos de magnesio y sílice, estas precipitaciones se forman si los iones de dichos minerales disueltos en el agua exceden su solubilidad.

Los factores principales que favorecen la incrustación son:

1. *Temperatura.*
2. *Alcalinidad o acidez.*
3. *Cantidad de material formador de incrustaciones que esté presente.*
4. *Influencia de otros minerales disueltos, sean o no formadores de incrustaciones*.

Conforme van cambiando estos factores también cambia la tendencia a la incrustación; la mayoría de las sales se vuelven más solubles conforme aumenta la temperatura, esta solubilidad se conoce como directa o normal. Otros minerales son menos solubles conforme aumenta la temperatura como el carbonato de calcio, este tipo de solubilidad se denomina solubilidad inversa.

Un cambio de pH o alcalinidad también interviene en la formación de incrustaciones, por ejemplo, conforme aumenta el pH o alcalinidad el carbonato de

calcio disminuye en solubilidad y se precipita en las superficies del sistema, otros minerales como la sílice son menos solubles a menor alcalinidad. Por la región geográfica en la que se encuentra estado de Puebla, la sílice es el factor principal que causa incrustaciones.

Sílice como principal factor de incrustación

La sílice (SiO_2) ocupa el segundo lugar de abundancia en la tierra, es un material vidrioso e insoluble, generalmente se encuentra acompañado, ya que forma parte de rocas, arena, cenizas etc.

La sílice en el agua es de mucha importancia en los usos industriales, ya que ésta forma incrustaciones en calderas y sistemas de refrigeración, formando depósitos insolubles sobre los álabes de las turbinas y puede disminuir la eficiencia del intercambio de calor, algunos ejemplos de estas incrustaciones se exhiben en la Figura 9.

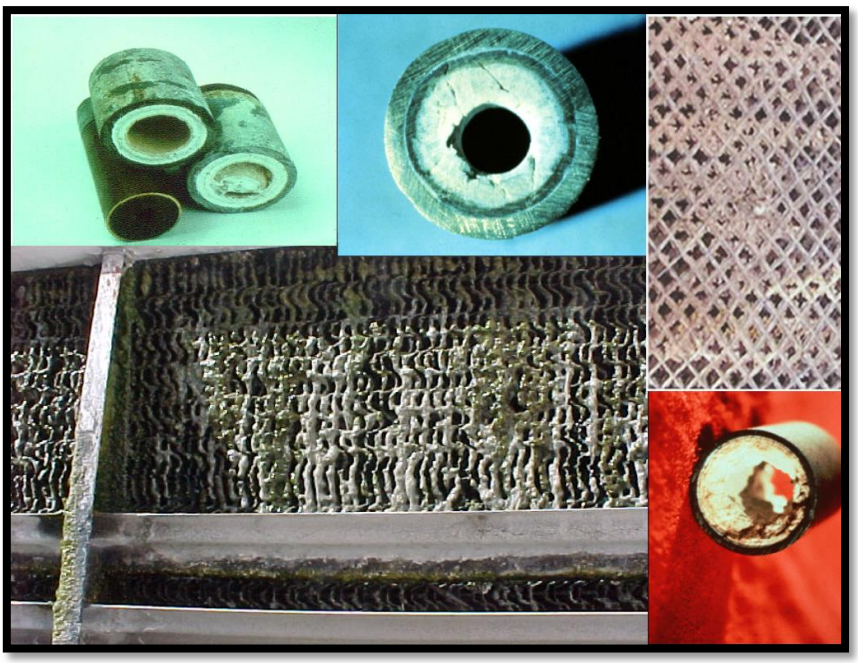


Figura 9. Incrustaciones en relleno de torre y tuberías.

La sílice se encuentra en el agua como un anión en un estado soluble, se halla soluble como ácido silícico $Si(OH)_4$, contribuye a la alcalinidad del agua y puede considerarse como materia coloidal. Las aguas naturales contienen entre 1 y 40 ppm de Sílice, éstas condiciones pueden variar dependiendo la región y pueden alcanzar concentraciones de hasta 100 ppm.

El óxido de silicio (SiO_2) no es aplicable al tratamiento del agua, debido a que la sílice se despolimeriza en agua y se hidroliza para formar ácido silícico. El óxido de silicio representado en la Figura 10 tiene al menos 11 formas cristalinas tetraédricas diferentes, mientras que el modelo de "orto" como se muestra en la Figura 11 está completamente hidratado y es útil para describir a la sílice disuelta, éste modelo satisface la tetraédrica preferencia y explica fácilmente por qué la sílice es altamente soluble en pH alto (rodeado de iones OH^-).

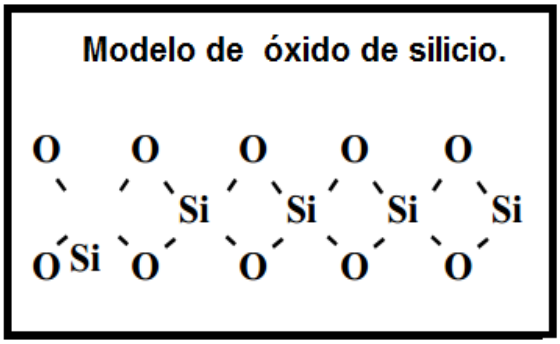


Figura 10. Modelo de óxido de silicio. (MEYERS, 2008)

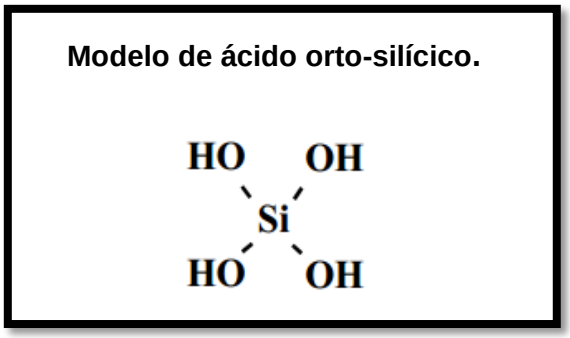


Figura 11. Modelo ácido orto silícico. (MEYERS, 2008)

El ácido silícico en condiciones ácidas es prácticamente insoluble, pasando directamente a su forma amorfa, conocida como sílice polimérica o coloidal representada en la Figura 12.

En condiciones de pH neutro el $Si(OH)_4$ no es ionizable, conforme aumenta el pH va aumentando el nivel de ionización y previene la polimerización. La polimerización del ácido silícico da como resultado la formación de partículas coloidales con baja solubilidad, su factor de solubilidad es aproximadamente 10^{-10}, lo que indica que es un índice muy pequeño. (MEYERS, 2008)

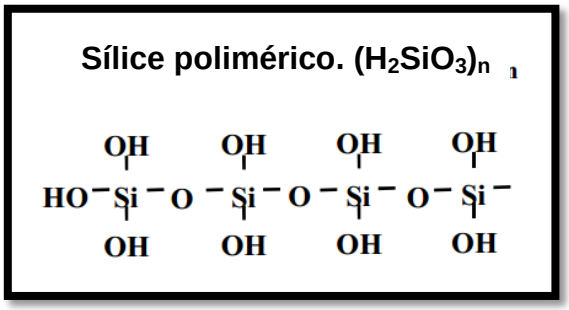


Figura 12. Modelo de sílice polimérica. (MEYERS, 2008)

Su reacción con adsorbentes como óxido de magnesio (MgO) y óxido férrico (Fe_2O_3) muestra características similares a la de los coloides típicos, ésta combinación es indeseable en las aguas de las torres de enfriamiento.

La sílice representada como (SiO_2) difícilmente se precipitará, por lo general, las incrustaciones de sílice contienen un divalente o trivalente de cationes como calcio y magnesio; aunque el silicato de calcio es muy insoluble, este compuesto no se forma rápidamente a menos que se encuentre a altas temperaturas.

Algunos medios de adición son el magnesio precipitado (óxido de magnesio), la adición de sales de magnesio solubles como cloruro de magnesio ($MgCl_2$) es a menudo indeseable debido a un aumento del total de solidos disueltos.

La sílice en combinación con el óxido de magnesio reacciona formando silicato de magnesio ($MgSiO_3$) que es el componente con mayor efecto en la incrustación en las torres; su estructura es representada en la Figura 13. (MEYERS, 2008)

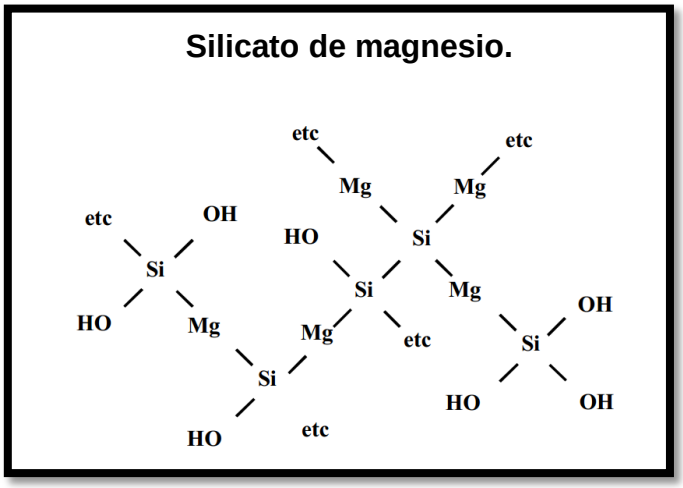


Figura 13. Estructura del silicato de magnesio. (MEYERS, 2008)

Gráfica 1. Factor de solubilidad de la sílice. (MEYERS, 2008)

La Gráfica 1 muestra que la sílice a un pH entre 4.5 y 7.5 no es soluble, mientras que a pH bajos y por arriba de 8.5 su solubilidad comienza a aumentar, sin embargo, no es posible llevar el agua a pH ácidos ya que se ocasionarían problemas de corrosión y el aumentar los niveles de pH lo suficiente para evitar que la sílice no se deposite implica un mayor costo de operación y una tendencia a la incrustación debido a que los minerales compuestos de silicato se vuelven menos solubles.

Control e inhibición de incrustación.

Las maneras básicas para controlar las incrustaciones son:

1. Limitar las concentraciones de minerales formadores de incrustación, se controla la relación de concentración eliminando los minerales antes de que entren al sistema.
   Esta es la relación entre los sólidos disueltos en la purga y en el agua de reposición en una torre de enfriamiento.

2. Alimentar ácido para mantener disueltos los minerales como carbonato de calcio, tomando en consideración que no todos los minerales son más solubles a menores niveles de pH.

3. Hacer cambios mecánicos en los sistemas o equipos.

4. Usar químicos diseñados para impedir las incrustaciones.

Los inhibidores químicos de incrustaciones evitan esta incrustación porque mantienen solubles los minerales que la forman, impidiendo su mecanismo de cristalización.

Los inhibidores cinéticos modifican la estructura cristalina de la incrustación lo cual reduce la velocidad del crecimiento del depósito, al formarse los nuevos cristales

de la incrustación, los dispersantes pueden evitar la deposición manteniendo estas partículas en suspensión evitando así el ensuciamiento.
Se utilizan fosfatos orgánicos, polifosfatos y compuestos poliméricos ya que pueden funcionar como inhibidores de umbral como inhibidores cinéticos.

1.4.3 Ensuciamiento y problemas biológicos

El ensuciamiento es la acumulación de materiales sólidos, aparte de la incrustación, de manera que estos perturban la operación de los equipos de la planta o contribuyen a su deterioro.
Algunos ejemplos de ensuciamiento son provocados por tierra, sedimentos, arena, productos de la corrosión, materiales orgánicos naturales, masas microbianas y fosfatos de hierro y aluminio.

Los factores más importantes que contribuyen al ensuciamiento son:

1. *Características del agua*

La mayoría de las aguas tiene sólidos suspendidos que causan problemas de ensuciamiento.

2. *Temperatura*

Las superficies de transferencia de calor con mayor temperatura que el agua de enfriamiento aceleran el ensuciamiento, es decir, a mayor temperatura aumenta la tendencia al ensuciamiento.

3. *Velocidad de flujo*

Con flujos bajos (0. 3 m/s o menos) ocurre ensuciamiento por el asentamiento natural del material suspendido; a mayores velocidades (0.9 m/s o más) puede

haber ensuciamiento, suele ser menos rápido de manera que la acumulación es menos severa.

4. *Crecimiento microbiano*

El crecimiento incontrolado de microorganismos puede causar la formación de depósitos que con el tiempo llegan a convertirse en ensuciamiento, corrosión e incrustación.

Los microorganismos pueden introducirse a los sistemas de enfriamiento mediante el agua de reposición o a través el aire que entra a las torres de enfriamiento, las masas de microorganismos y sus productos de desecho son conocidas como babazas, éstas suelen ser pegajosas y capaces de atrapar la suciedad presente en el agua.

La disponibilidad de oxígeno, bióxido de carbono, cantidad de luz, humedad, y temperaturas entre 4.4 y 65 °C son factores que pueden favorecer al crecimiento de estos microorganismos. (ASCOLESE, 1998)

Al crecer los microorganismos se van acumulando hasta formar grandes masas, estas se conocen como babazas microbianas, las cuales también incluyen sus productos de desecho. Por lo general estas masas son pegajosas y son capaces de atrapar la suciedad presente en la masa de agua.

La presencia de babazas microbianas reduce la eficiencia de transferencia de calor de los equipos ya que éstas son más aislantes que los demás depósitos. (NALCO, Introduction to Cooling Water Treatment, 2005)

5. *Corrosión*

La corrosión forma productos insolubles que emigran y se mezclan con otros escombros, generando contaminación en el proceso o masas microbianas para agravar el ensuciamiento.

6. *Contaminación*

Cualquier material que se fugue del lado del proceso en equipos de intercambio de calor puede causar problemas serios de ensuciamiento como depósitos, formación de productos insolubles, emisión de nutrientes para microrganismos o reacciones con inhibidores de incrustación o corrosión para formar suciedad insoluble.

Control e inhibición del ensuciamiento y problemas biológicos

El ensuciamiento se puede controlar mecánicamente o mediante el uso de tratamientos químicos, implica tres formas principales:

1. Prevención: evitando la entrada de cualquier suciedad al sistema de enfriamiento.
2. Reducción: mediante filtraciones laterales o limpiezas periódicas en la pileta o cárcamo de almacenamiento de la torre.
3. Control continuo: se puede adicionar dispersantes químicos, agitación de cambiadores con aire o enjuagues a contracorriente.

Los químicos que se utilizan como inhibidores se clasifican en:

- Refuerzos de carga, que son polímeros aniónicos.
- Humectantes o tensoactivos.

Los dispersantes utilizados son de refuerzo de carga y agentes humectantes que funcionan para mantener la suciedad en suspensión evitando que se asiente en las superficies metálicas o ayudando a eliminar los depósitos. Los dispersantes de refuerzo de carga hacen que las partículas de suciedad se repelen entre sí aumentando la carga eléctrica que lleven.

Los humectantes reducen la tensión del agua, inhibiendo la formación de nuevos depósitos y eliminando los depósitos existentes.

Para reducir la suciedad se requiere de un control continuo de los aspectos mecánicos, operacionales y químicos del sistema, el tratamiento es la única manera de reducir el ensuciamiento ya que si no es controlado, la suciedad puede reducir la eficiencia energética de cualquier proceso en que se utilice el sistema de enfriamiento. (Treatment of cooling water, 2009)

Para el control microbiano se utilizan tres tipos de biocidas, biocidas oxidantes, no oxidantes y biodispersantes.

Los biocidas oxidantes oxidan componentes celulares importantes en los microorganismos, los más comunes son cloro gaseoso e hipoclorito de sodio líquido. En muchos casos se utiliza un tratamiento a base de bromo, el cual está disponible como sólido o líquido, este ofrece mayores ventajas de seguridad y desempeño respecto al cloro y el hipoclorito de sodio.

Los biocidas no oxidantes son compuestos orgánicos que reaccionan con componentes celulares específicos dentro de los microbios destrozando finalmente dicha célula, estos biocidas son especialmente críticos en sistemas que han sufrido contaminación del agua de refrigeración por pérdidas del proceso, que utilizan relleno de las torres de alta eficacia tipo película o para los que sufren interrupciones frecuentes para la dosificación de biocida oxidante.

Los biodispersantes no matan a los microrganismos; aflojan los depósitos microbianos que al desprenderse de la superficie metálica se enjuagan en la masa del agua de enfriamiento. Además de aflojar los biodepósitos, los biodispersantes también son capaces de impedir la formación de biopelículas.

1.5 Tratamiento fisicoquímico

El tratamiento para el agua de enfriamiento ha sido implementado desde años atrás, el tratamiento fisicoquímico se fundamenta en reacciones químicas entre los componentes contaminantes y distintos reactivos, su finalidad es eliminar o disminuir el carácter tóxico y peligroso de determinados componentes presentes en el fluido.

Las reacciones que se producen entre los reactivos, los contaminantes y las sustancias químicas se desarrollan de una manera controlada, donde influye el pH, temperatura, presión, etc. (ASCOLESE, 1998)

El objetivo principal de un tratamiento fisicoquímico en las torres de enfriamiento es combatir los principales problemas causados por la circulación de agua a través de ellas, los cuales son corrosión, ensuciamiento e incrustación. Su implementación depende del tipo de material de la torre, tuberías y equipos que estén en contacto con el agua de enfriamiento, Así que, en general, un tratamiento fisicoquímico resulta en una combinación específica de diversos tratamientos como los que se han mencionado en los apartados anteriores para resolver la problemática de cada torre de forma particular.

Actualmente, los siguientes cinco puntos son los principales objetivos particulares de un tratamiento en fisicoquímico para el agua de refrigeración.

1. Reducción del consumo de agua.

2. Prolongación de la vida útil de los equipos, mediante la estabilización del rendimiento de los intercambios térmicos. diseñadores de plantas.

3. Limitación de los efectos sobre el medio ambiente causados por los residuos de descarga.

4. La seguridad del personal que está en contacto con los productos utilizados para el tratamiento.

5. El control en la propagación bacterias y microorganismos como legionella.

CAPITULO 2
METODOLOGÍA.

METODOLOGÍA

La torre de enfriamiento en donde se implementó un nuevo tratamiento fisicoquímico está elaborada de acero galvanizado y contiene con un relleno plástico, es una torre de tiro forzado con un flujo cruzado y utiliza ventiladores axiales; el volumen total de la torre es de 10 m^3, opera con un intervalo de temperatura de seis grados aproximadamente, cuenta con un flujo de recirculación de 341m^3/h y flujo de purga de 1.82 m^3/h, el tiempo de circuito del agua en la torre es aproximadamente 3.75 horas por lo que el agua de reposición es de 5.01 m^3/h. Las características específicas de operación de la torre se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de operación en la torre de enfriamiento.

Parámetro		Unidades
pH	7.8	
Ciclos de concentración	2.7	
Dureza Calcio	394.2	ppm $CaCO_3$
Alcalinidad	93.09	ppm $CaCO_3$
Flujo del agua de reposición.	5.01	m^3/h
Flujo de recirculación	341	m^3/h
Flujo de purga	1.86	m^3/h
Flujo de evaporación	3.16	m^3/h
Temperatura de entrada	29.4	°C
Temperatura de salida	23.3	°C
Variación de temperatura	6.1	°C
Tiempo de circuito	3.75	h

La Tabla 5 se elaboró con el promedio de los datos experimentales obtenidos durante un periodo de 6 meses, muestra las características más importantes del agua; en estas condiciones, el limitante para el reúso del agua es la sílice, la

incrustación pura de sílice ocurre particularmente cuando el nivel de óxido de silicio (SiO_2) en la recirculación es superior a 150 ppm y la temperatura está por debajo de 21º C.

Tabla 5. Datos promedio del agua de pozo de la planta.

Parámetro	Unidades	Promedio	Min	Max	St. Dev
pH		7.53	7.30	7.78	0.14
Dureza Calcio	Ppm $CaCO_3$	110.00	106	116	2.41
Conductividad	µs/cm	338.75	319	378	15.17
Sílice	Ppm SiO_2	63.98	54.10	71.20	6.29

2.1 Tratamiento fisicoquímico para el control de la sílice disuelta

El tratamiento fisicoquímico que se seleccionó para nuestra torre de enfriamiento fue a base de fosfatos ya que éste es el adecuado para el tipo de material y condiciones a las que opera el equipo.

Un tratamiento fisicoquímico completo consiste en inhibir y controlar todas las fuentes que provocan los problemas como corrosión, incrustación y ensuciamiento.

2.1.1 Control de sílice

La sílice es el factor principal por el cual el agua no puede permanecer por más tiempo en la torre de enfriamiento y para tener un aumento en los ciclos de concentración se requiere de un control más riguroso de la sílice disuelta que se encuentra presente en el agua.

Para controlar el principal problema ese utiliza un producto a base de polímero, agua, derivados de ácido orgánico y fosfato de calcio ($Ca_3(PO_4)_2$) que impide la formación de incrustaciones, debido al control de la polimerización de sílice y a la dispersión de sílice coloidal. También reduce el ensuciamiento del agua de refrigeración al inhibir la precipitación de carbonato de calcio y al dispersar limo, arcillas y óxidos metálicos; trabaja con ayuda de un inhibidor de corrosión e incrustaciones, este segundo químico es un multifuncional diseñado para agua corrosiva y con una dureza o alcalinidad de baja a media.

Conforme a las características de operación y el tipo de material de la torre la concentración del dispersante de sílice en el agua de enfriamiento debe estar en una concentración de 120 a 125 mg/L.

Este dispersante se adiciona a una línea del agua que se une al retorno de agua de la torre, por lo que al entrar a la torre el dispersante se encuentra completamente diluido.

2.1.2 Control de pH

Como se ha mencionado, el control de pH es indispensable para prevenir la formación de sales y para mantener la sílice disuelta en el agua, es por esto que se adiciona un ácido fuerte como el ácido sulfúrico para mantener un pH entre 7.5 y 8.5; esto se logra por medio de un sistema automatizado que cuenta con sensores y una bomba dosificadora que opera de modo automático y mantiene en equilibrio el pH del agua de enfriamiento.

2.1.3 Control de microorganismos

Se utiliza un producto a base de bromo y se describe mejor como bromo estabilizado, el cual a diferencia del hipoclorito de sodio no pierde su actividad con el paso de los días ni con el cambio de temperaturas.

Su baja volatilidad reduce la emisión de producto a la atmosfera, reduce la concentración de halógeno en el vapor de agua disminuyendo la corrosión de los metales en contacto con el vapor.

El uso de los biocidas de bromo estabilizado no favorecen la formación de cloruros, esta es una ventaja ya que estos iones a altas concentraciones favorecen la corrosión en los equipos.

2.1.4 Inhibidor de corrosión

Para la inhibición de corrosión se utiliza un producto que es resultado de una mezcla sinérgica de pasivadores, inhibidores de corrosión y dispersantes, es utilizado como complemento del programa químico para los sistemas de enfriamiento; está elaborado específicamente para metales blancos ya que el material de nuestra torre es de acero galvanizado.
Particularmente se utiliza un producto de agentes de pasivación, inhibidores de corrosión y dispersantes aptos para aceros inoxidables, polipropileno y PVC entre otros.

El suministro y distribución de estos químicos puede hacerse directamente hacia el equipo o agregarse al agua de retorno de la torre; el ácido sulfúrico y el biocida son los únicos químicos que se adicionan directamente a la torre, el ácido entra a la parte del cárcamo de almacenamiento y es depositado en una bandeja con

divisiones a diferentes niveles, en ésta el ácido se va mezclando con el agua para una disolución más eficiente que no dañe el equipo; mientras que los otros químicos se adicionan en una línea de agua que posteriormente se incorpora a la línea de retorno de agua a la torre.

En la siguiente figura (2.1) se muestra el esquema de adición de químicos en la torre de enfriamiento.

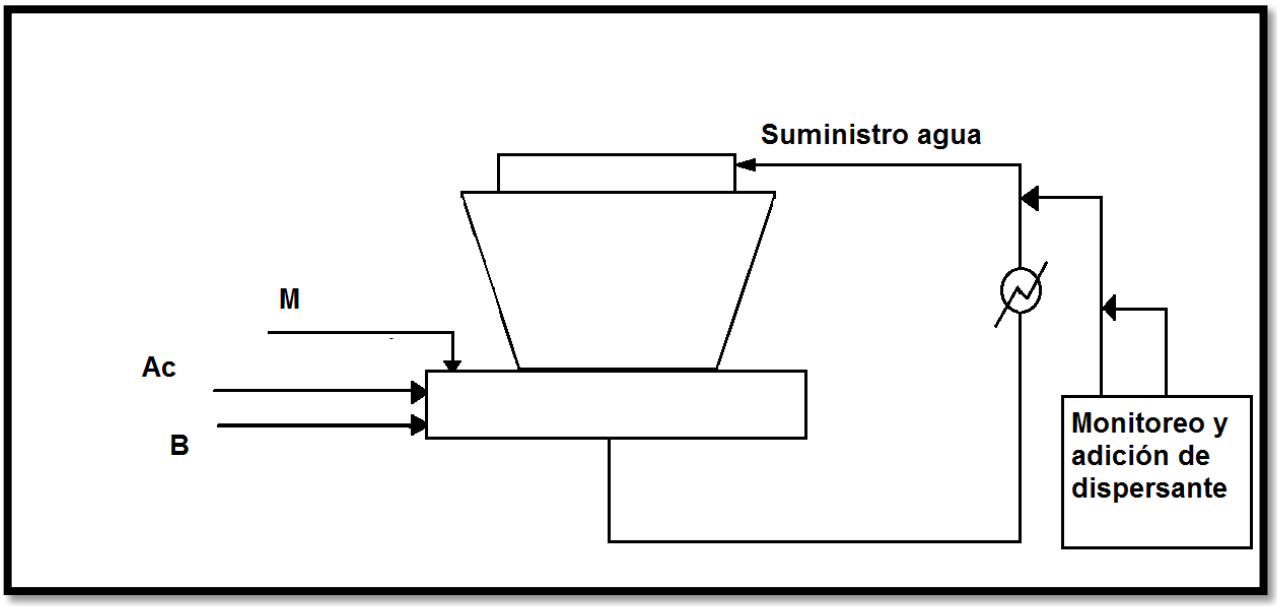


Figura 14. Esquema de adición de químicos en la torre de enfriamiento.
(m) Agua de reposición, (ac) Entrada de ácido en la torre, (b) Entrada de biocida en la torre.

A excepción del ácido sulfúrico, los químicos adicionados cuentan con una tinta fluorescente la cual permite que el flourómetro (medidor de fluorescencia) determine la concentración de productos químicos que contiene el agua de enfriamiento, lo que permite tener un monitoreo competo y constante.

2.2 Control y monitoreo en la torre de enfriamiento

La optimización de los programas de tratamiento para reducir y controlar corrosión, depósitos y suciedad microbiana son de gran importancia en las torres de enfriamiento ya que se mejora la trasferencia de calor por todo el sistema y así aumenta la eficiencia de todo el proceso.

El monitoreo es una parte integral y de mucha importancia para cualquier tratamiento fisicoquímico o industrial del agua. Se utiliza para conocer la eficacia del tratamiento y establecer niveles óptimos para dar como resultado un tratamiento efectivo en el consumo de agua y químicos.

El éxito del programa de tratamiento depende en gran medida del grado de control ejercido sobre cada uno de los parámetros críticos, es decir, que la torre opere bajo las especificaciones de pH, conductividad, dureza y actividad microbiológica entre otros.

Con la finalidad de tener un monitoreo constante del tratamiento y de los parámetros fisicoquímicos del agua en la torre de enfriamiento se cuenta con un equipo automatizado de alta tecnología, diseñado con un software de última generación el cual facilita su operación, puede ser monitoreado y manipulado por medio de dispositivos móviles, los principales beneficios del dispositivo utilizado son los siguientes:

- Control de la Incrustación.
- Control de la Corrosión.
- Bio-Control.
- Control de PH y ORP.
- Control de la Conductividad /Purga.
- Seguimiento de Corrosión y Turbidez.

- Registro de Datos y Comunicación instantánea de alarmas.

Para el último punto mencionado la operación para cada torre de enfriamiento está enlazada al correo electrónico o a un dispositivo móvil para la comunicación de alarmas que se activan cada vez que un parámetro se encuentre fuera de rango.

El equipo cuenta con sensores de pH, ORP, conductividad y con un fluorómetro que realiza un análisis puntual cada 10 segundos aproximadamente y cuenta con un rango para cada parámetro, en él también se registra el tiempo de circuito, temperatura del agua y concentraciones de los químicos adicionados.

La adición de químicos está programada para que las bombas dosificadoras se encuentren operando en un modo automático, para algunos químicos como el dispersante de sílice y el biocida se opera mediante control de tiempo ya que por las propiedades químicas de estos productos, si se encuentran en altas concentraciones generan corrosión e incrustación.

Las bombas dosificadoras para los químicos se activan dependiendo de los resultados arrojados por el monitoreo continuo que tiene el equipo y cuando se encuentren fuera de rango las activa para cumplir la concentración de químicos dentro del agua de enfriamiento.

El control de purgas de la torre está basado en la conductividad, teniendo un límite de 1500 µs/cm con un rango de ± 25 µs/cm, es decir cuando la conductividad rebasa los 1525 µs/cm se abre la válvula de purga y continúa purgando hasta que la conductividad baje hasta los 1475 µs/cm.

La figura 2.2.1 muestra el esquema del equipo para monitoreo, sus partes principales y la ubicación de los sensores.

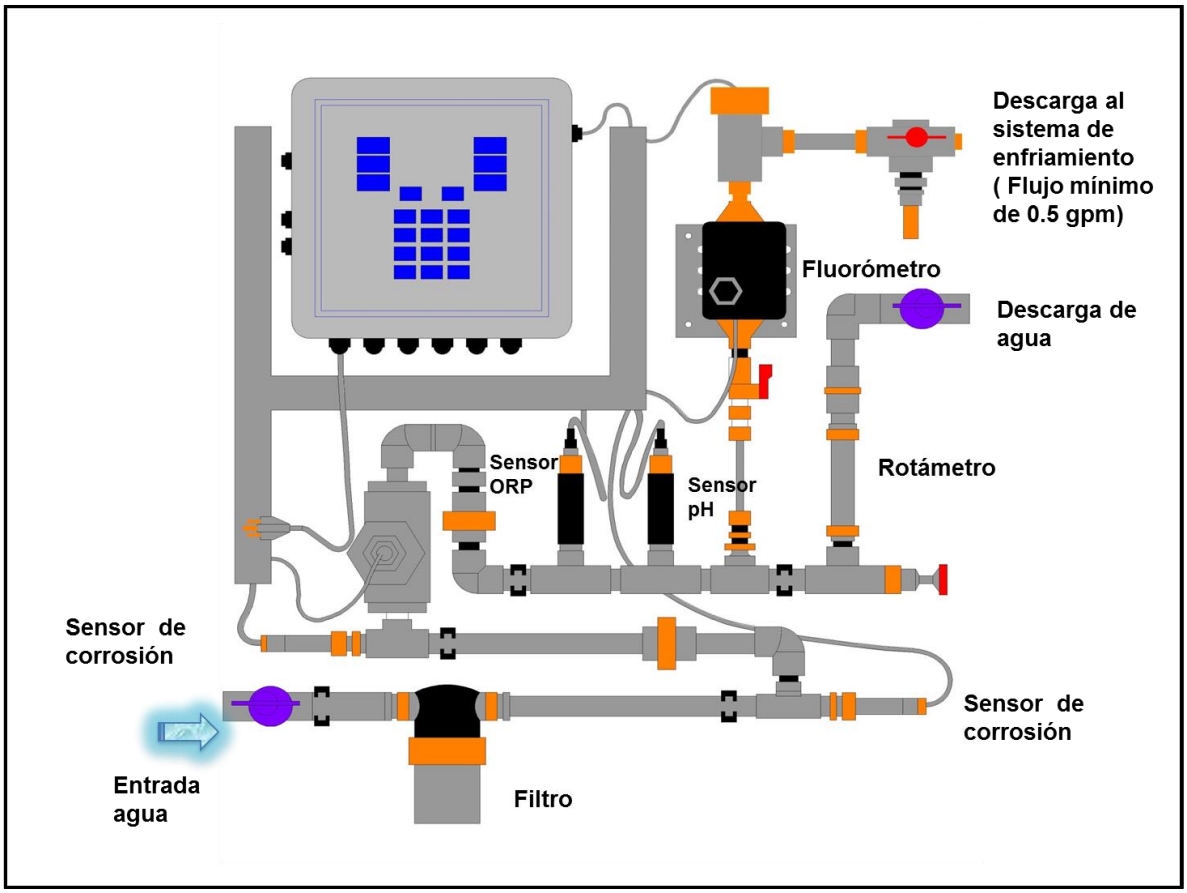


Figura 15. Esquema del equipo de monitoreo.

Con el fin de tener un registro para corroborar los datos arrojados por el equipo se realizan corridas de análisis fisicoquímicos conforme a las normas establecidas por la empresa, dichos análisis se realizan de dos a tres veces por semana, a las muestras se les realiza el análisis de los parámetros de mayor interés como medición de sílice, pH, dureza de calcio y el residual o concentración de producto que se encuentra en el agua.

CAPÍTULO 3.
RESULTADOS Y DISCUSIONES.

3.1 Análisis del agua de pozo

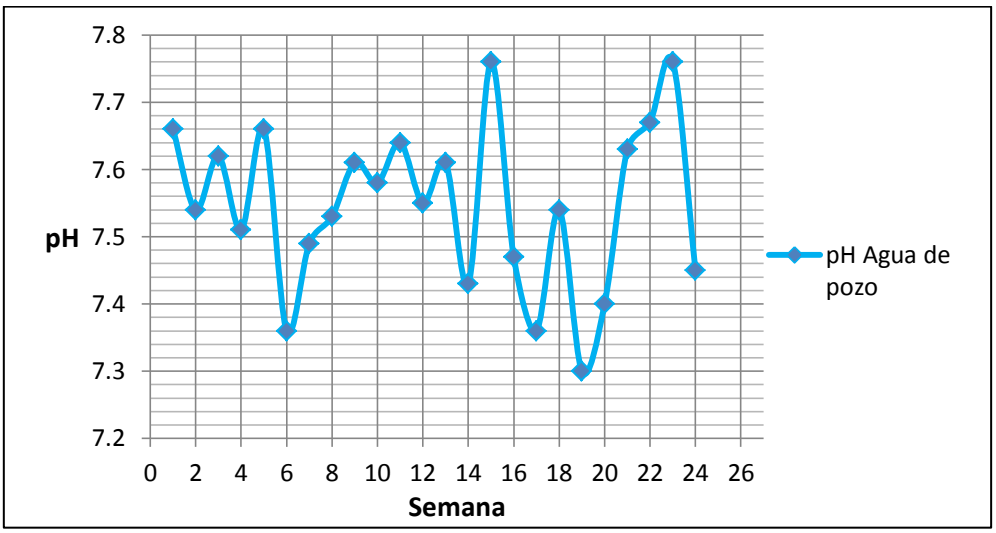
La recopilación de datos para caracterizar el agua de pozo de la planta se llevó a cabo durante un periodo de 6 meses, (segundo semestre de 2013), en donde se realizaron análisis fisicoquímicos para determinar dureza, conductividad, pH, dureza de calcio y sílice presentes en el agua.

Los análisis fisicoquímicos del agua de pozo se realizaron con el fin de conocer las características que posee y conforme a éstas se estableció el tratamiento y los parámetros permisibles a los que puede operar la torre de enfriamiento.

Las características que tiene el agua de pozo de la planta de confitería se muestran en las siguientes gráficas, en donde se presentan variaciones constantes sobre el contenido de sílice, pH, conductividad y dureza de calcio.

La Gráfica 2 muestra la variación de pH que ha tenido el agua en este periodo, en el eje de las abscisas se muestra el periodo de tiempo y en las ordenadas los valores de pH, el rango en que se encuentra el pH del agua de pozo tiene una apertura considerable; con el tratamiento fisicoquímico se busca que el pH se mantenga constante para evitar problemas de incrustación o corrosión.

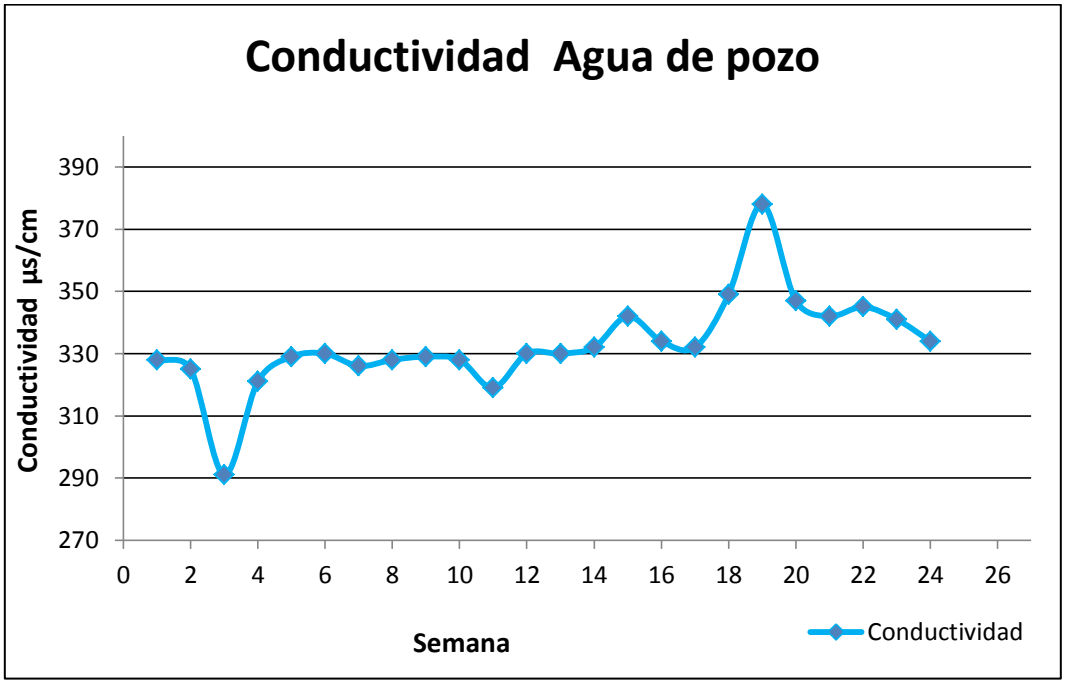
Gráfica 2. pH del agua de pozo.



La conductividad que tiene el agua de pozo se muestra en la Gráfica 3, ésta puede interpretarse como la representación de la concentración total de sólidos y minerales como calcio, magnesio o sílice disueltos en ella.

La conductividad permanece constante en un valor de 330 a 340 µs/cm, ocasionalmente se registran valores por arriba de los 340 µs/cm siendo de 380 µs/cm el valor máximo y único registrado; teniendo una conductividad dentro de estos valores aún se garantiza un buen funcionamiento y da la posibilidad de tener un aumento en los ciclos de concentración de la torre.

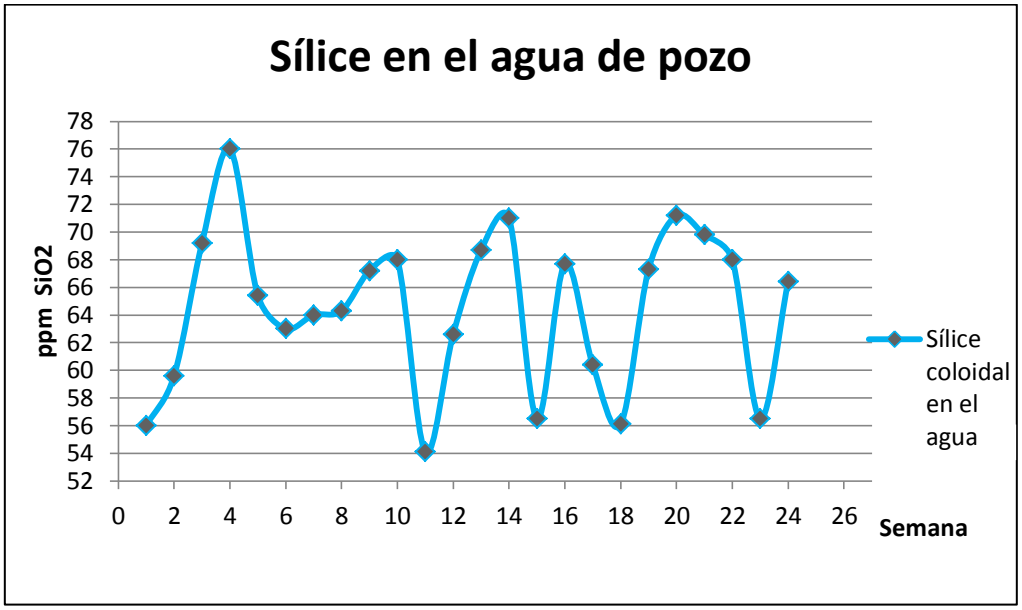
Gráfica 3. Conductividad del agua de pozo.



La Gráfica 4 muestra los datos registrados de sílice presente en el agua de pozo, se aprecia que no tiene una concentración constante ya que los valores determinados varían entre un 20 y 30 por ciento aproximadamente.

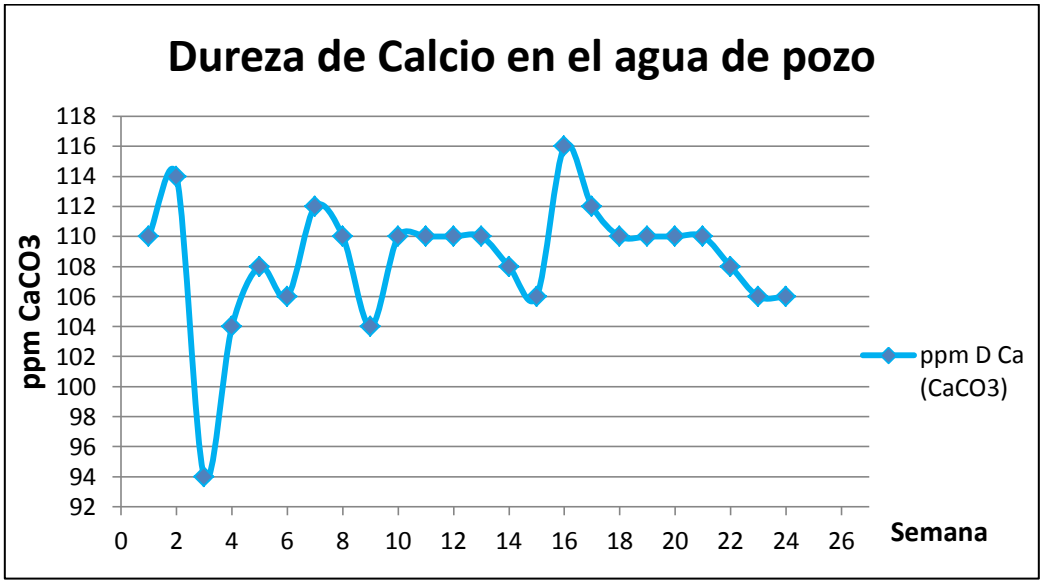
Con las drásticas variaciones en la concentración de sílice en el agua de pozo y sin un dispersante de sílice los ciclos de concentración de la torre variarían de 1.9 a 2.7 ciclos de concentración, tomando como referencia la concentración menor y la concentración mayor de sílice presente en el agua.

Gráfica 4.Sílice presente en el agua de pozo.



En la Gráfica 5 interpreta la dureza de calcio, la cual permanece constante en mayor frecuencia en un rango de 106 a 112 ppm $CaCO_3$, tomando en cuenta que la dureza de calcio representa aproximadamente la mitad de la dureza total se puede determinar que el agua de pozo de la planta de confitería es una agua dura, ya que se valora como agua dura a aquellas aguas que contienen una concentración de dureza total por arriba de los 150 ppm de $CaCO_3$.

Gráfica 5. Dureza de calcio presente en el agua de pozo.



3.2 Análisis del agua de enfriamiento con el tratamiento fisicoquímico

Para confirmar el buen funcionamiento del tratamiento se realizaron análisis fisicoquímicos al agua de torre, se recopilaron los resultados de estos análisis que fueron elaborados durante el último semestre de 2013.

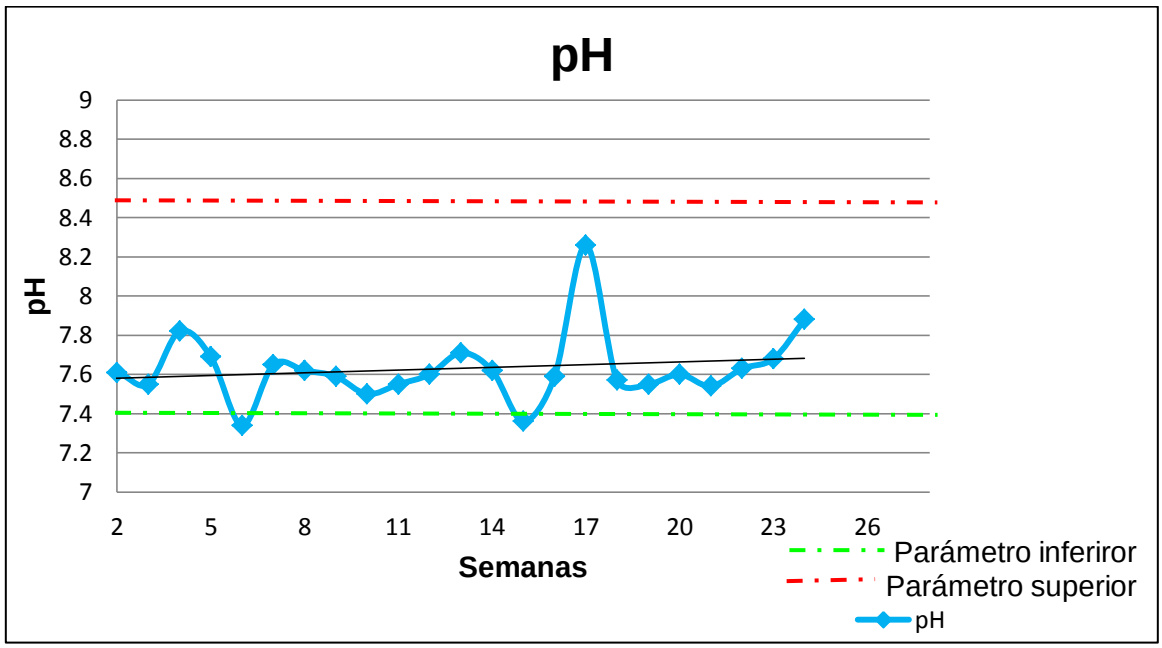
La tabla 6 establece los análisis realizados al agua de enfriamiento, los parámetros permisibles para cada uno de ellos así como la frecuencia de análisis; la elaboración de esta tabla fue conforme al diseño del equipo y al tratamiento suministrado.

Tabla 6. Parámetros y frecuencia del monitoreo en torres de enfriamiento.

Toma de muestra	Análisis realizado	Parámetros establecidos	Frecuencia de muestreo
1	pH	7.0 - 9	Semanal
2	Conductividad	700 - 1500 µs/cm	Semanal
3	DCa	200 - 600 ppm $CaCO_3$	Semanal
4	ORP	200 - 350 mV	Semanal
5	Sílice	150 - 220 ppm SiO_2	Semanal
6	Residual de producto	80 - 150 ppm de producto	Semanal

En la Gráfica 6 muestra que el pH permaneció sin variaciones significativas y dio un buen resultado la implementación de ácido sulfúrico, ya que prácticamente mantuvo constante el pH tanto del agua de pozo enfriamiento y éste se encontró dentro de los límites establecidos.

Gráfica 6. pH en el agua de torre.

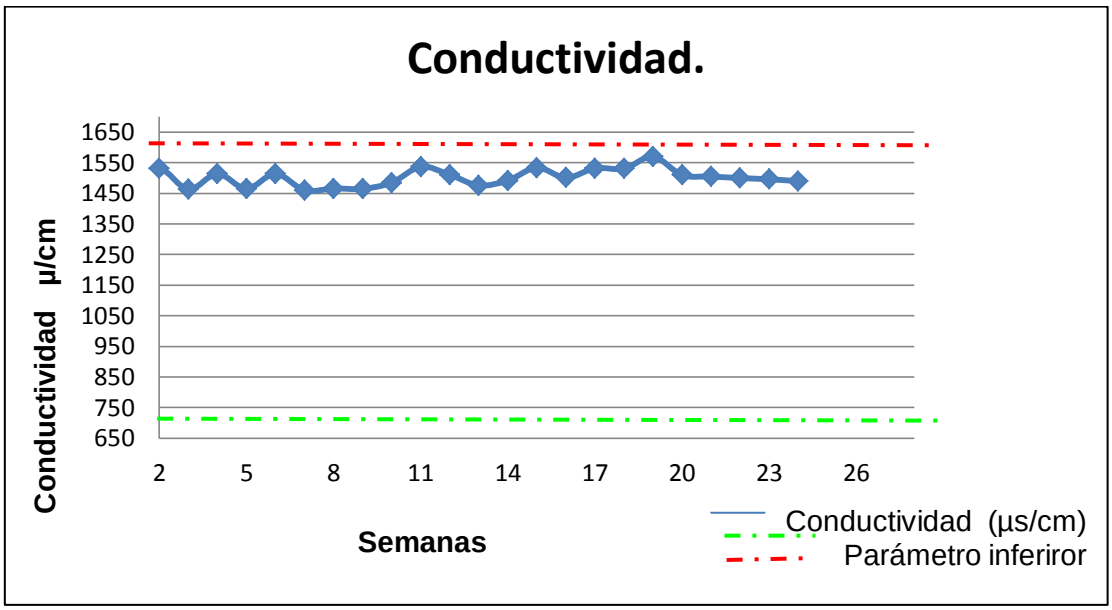


La Gráfica 7 representa la conductividad del agua de enfriamiento, por su fácil medición se establece como principal punto de referencia para determinar la purga de la torre, esto se debe a que representa la concentración de sólidos y sales presentes en el agua.

Se observa que se encuentra dentro del rango establecido y cerca del límite superior, ya que si se encontrara en medio del rango o cerca del límite inferior no se estaría cumpliendo la condición principal de los 3.5 ciclos de concentración.

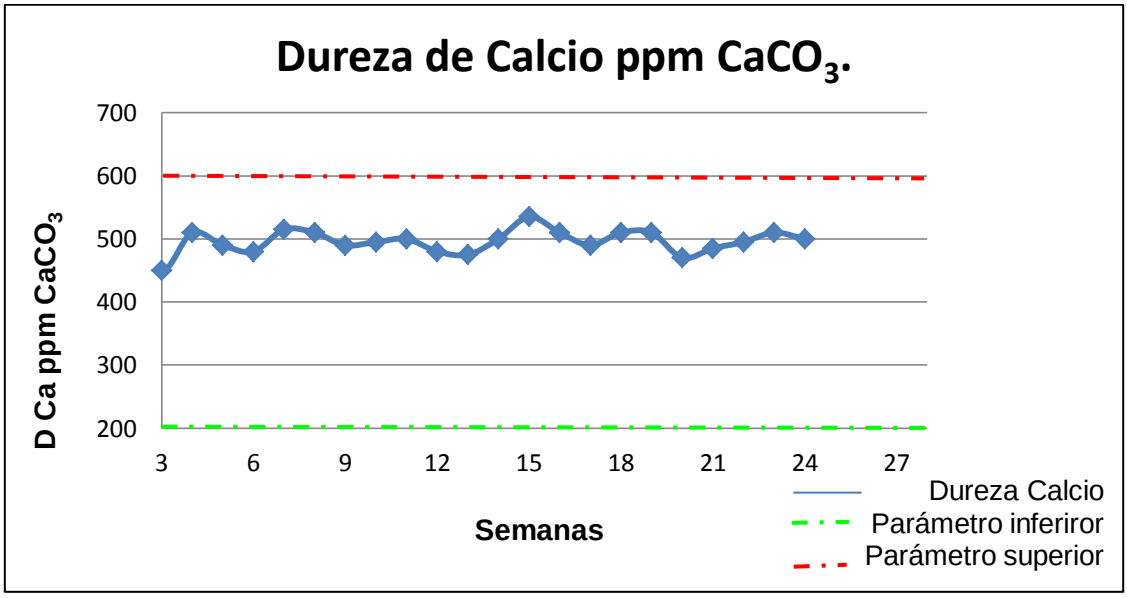
La conductividad de la torre de enfriamiento permanece prácticamente constante, ya que la diferencia entre el menor valor registrado y el mayor valor es de 100 unidades aproximadamente, lo cual no representa una variación significativa.

Gráfica 7. Conductividad del agua en torre



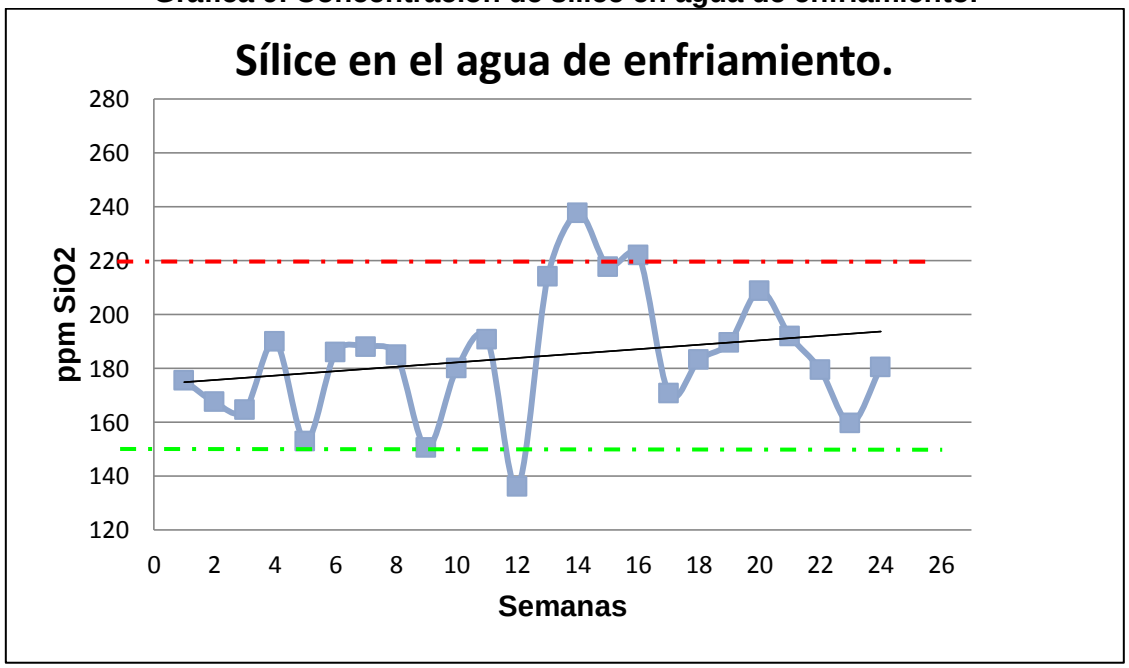
En la Gráfica 8 se muestra la dureza de calcio que contiene el agua de enfriamiento, conforme a la Tabla 6 se observa que la dureza de calcio se encuentra dentro de las especificaciones proporcionadas, lo que significa que las concentraciones de dureza se mantienen estables y el riesgo que se corre de incrustaciones por dureza temporal es mínimo.

Gráfica 8. Dureza de Calcio de agua de enfriamiento.



La Gráfica 9 muestra una considerable variación en la concentración de sílice, esto se debe a que el agua de pozo no presenta una concentración constante respecto a la sílice. A pesar de que en la semana 14 se encontró la mayor concentración de sílice ésta no rebasó los 250 ppm, por lo que el tratamiento para mantener la sílice disuelta ha funcionado correctamente.

Gráfica 9. Concentración de sílice en agua de enfriamiento.



3.3 Comparación entre 2.5 y 3.5 ciclos de concentración

Con las propiedades fisicoquímicas del agua de pozo, la torre operaba con las características que se muestran en la figura 3.2 y manejaba de 2.5 a 2.7 ciclos de concentración y se mantenía un punto máximo de conductividad de 900 µs/cm; siendo de 3.75 horas el tiempo de circuito del sistema, es decir, que al paso de 3.75 horas se purgaba la torre y se alimentaban como agua de reposición 5.01 m^3/h aproximadamente, lo que significa un consumo de agua de pozo de 120.24 m^3/día aproximadamente y por año 43,887.60 m^3.

Para el cálculo de los ciclos de concentración de la torre de enfriamiento se utiliza una relación que se basa en la concentración de los iones presentes en el agua, se utilizan las concentraciones de sílice para determinar éste cálculo, ya que la sílice es nuestro factor limitante

- Máxima concentración permisible de sílice en el agua: 150 mg/L
- Contenido de sílice en el agua de pozo: 60 mg/L

Basándonos en la definición de los ciclos de concentración tenemos lo siguiente:

$$\frac{C_{iR}}{C_{iMU}} = C.C$$

Donde C_{iR} es la concentración máxima permisible de sílice= 150 mg/L

C_{iMU} es la concentración de sílice en el agua de pozo= 63 mg/L

Cálculo de los ciclos de concentración:

$$\frac{150\ \mathrm{mg/L}}{63\ \mathrm{mg/L}} = 2.3\ \text{ ciclos de concentración}$$

Como se ha mencionado anteriormente, el control de la purga está determinado por la conductividad del agua y tomando la conductividad como un factor limitante, se determinan los ciclos de concentración con base en ésta.

Siguiendo la relación establecida:

$$\frac{[C_s]}{[C_{H_2O}]} = C.C$$

$[C_s]$ es la concentración máxima de conductividad.

$[C_{H_2O}]$ representa la conductividad de agua de pozo.

- Máxima concentración permisible de conductividad en agua de enfriamiento : 900 µs/cm
- Conductividad del agua de pozo: 340 µs/cm

Cálculo de los ciclos de concentración:

$$\frac{900\ \mu s/cm}{340\ \mu s/cm} = 2.6 \text{ ciclos de concentración}$$

En la Figura 16 se especifica la operación de la torre de enfriamiento, así como los parámetros fisicoquímicos más importantes.

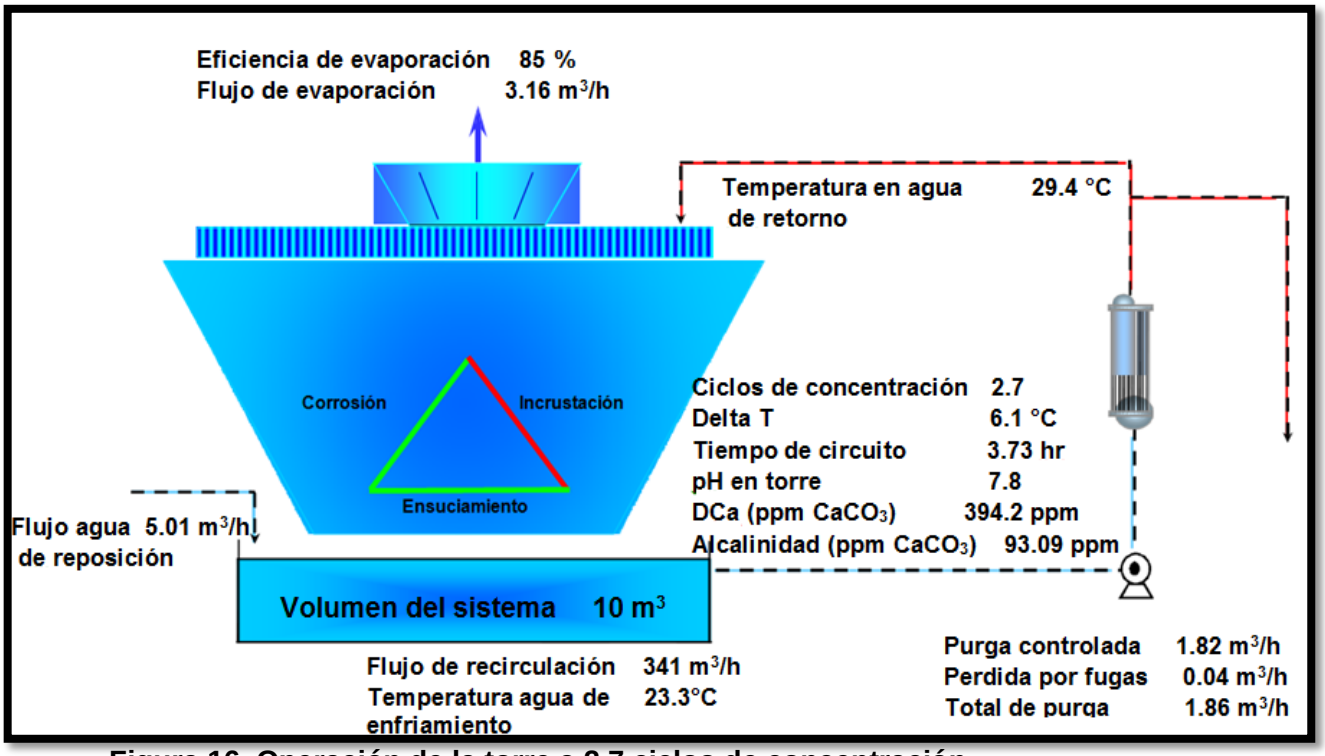


Figura 16. Operación de la torre a 2.7 ciclos de concentración.

Con el implemento del dispersante de sílice y el pH controlado, la torre aumenta los ciclos de concentración y disminuye el uso de purgas en el sistema, lo que significa una cantidad menor de agua de reposición.

Para el cálculo de los ciclos de concentración de la torre de enfriamiento con la implementación del dispersante de sílice se obtiene:

- Máxima concentración permisible de sílice en el agua: 250 mg/L
- Contenido de sílice en el agua de pozo: 60 mg/L

Cálculo de los ciclos de concentración:

$$\frac{220\ \mathrm{mg/L}}{60\ \mathrm{mg/L}} = 3.6\ \text{ciclos de concentración}$$

Con base a la conductividad se obtienen los siguientes cálculos:

- Máxima concentración permisible de conductividad en agua de enfriamiento : 1500 µs/cm
- Conductividad del agua de pozo: 340 µs/cm

Cálculo de los ciclos de concentración:

$$\frac{1500\ \mu s/cm}{340\ \mu s/cm} = 4.4 \text{ ciclos de concentración}$$

La Figura 17 describe la optimización de la torre de enfriamiento y comparándola con la Figura 16 se observa que las variaciones en la torre son los flujos del agua de reposición, el pH que se debe mantener en la torre, el flujo de purga total, el tiempo de circuito y la dureza de calcio. La Tabla 3.3.1 muestra la comparación de la operación de la torre de enfriamiento entre los 2.7 y 3.5 ciclos de concentración.

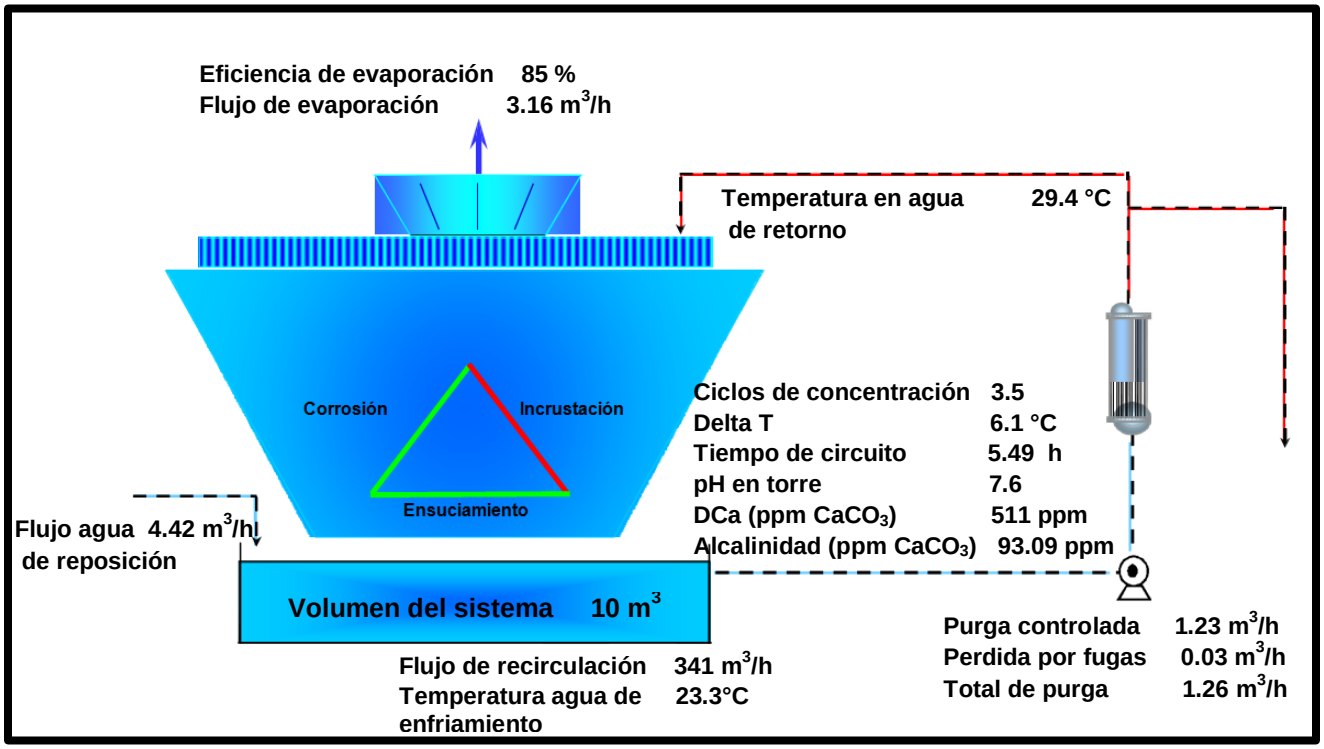


Figura 17. Condiciones de operación de la torre de enfriamiento a 3.5 ciclos de concentración.

Tabla 7. Comparación entre los ciclos de concentración.

Parámetro	*Unidades*	*2.5 c.c*	*3.5 c.c*
pH		7.8	7.6
DCa	ppm $CaCO_3$	394.2	511
ΔT	°C	6.1	6.1
Alcalinidad	ppm $CaCO_3$	93.09	93.09
Tiempo de circuito	h	3.73	5.49
Flujo de reposición	m^3/h	5.01	4.42
Flujo de purga	m^3/h	1.86	1.26
Flujo de evaporación	m^3/h	3.16	3.16
Porcentaje de evaporación	%	85	85

Con el aumento de los ciclos de concentración, el flujo de agua de reposición se reduce un 20% aproximadamente, cuando la torre operaba a 2.5 ciclos de concentración se utilizaban 5.01 m^3/h de agua de reposición al aumentar éstos ciclos el flujo del agua disminuye a 4.42 m^3/h, lo que anualmente significa que se utilizan 38,719.2 m^3 de agua de reposición.

La extracción de agua de pozo tiene un costo de $14.00 M.N aproximadamente, haciendo una comparación de costos entre la operación anterior a 2.5 ciclos y la nueva operación a 3.5 ciclos se obtiene lo siguiente:

Tabla 8. Comparación de costos del agua de reposición.

Costos de operación.	***Con 2.5 ciclos de concentración***	***Con 3.5 ciclos de concentración.***
Flujo de agua de reposición	5.01 m^3/h	4.42 m^3/h
Flujo de agua de reposición por año	43,887.60 m^3	38,719.20 m^3
Costo por m^3 de agua de reposición	$14.00 M.N	$14.00 M.N
Costo por año de agua de reposición	**$614,426.40 M.N**	**$542,068.80 M.N**

El ahorro del agua de reposición implica disminuir su extracción del pozo; el costo beneficio de este ahorro de agua se presenta por medio de la comparación entre los costos determinados entre la operación a 2.5 ciclos y a 3.5 ciclos y se representa de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} Consumo\ por\ año\ de\ agua \\ de\ reposición\ a\ 2.7\ c.c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Consumo\ por\ año\ de\ agua \\ de\ reposición\ a\ 3.5\ c.c \end{bmatrix} = \text{Ahorro de agua } (m^3)$$

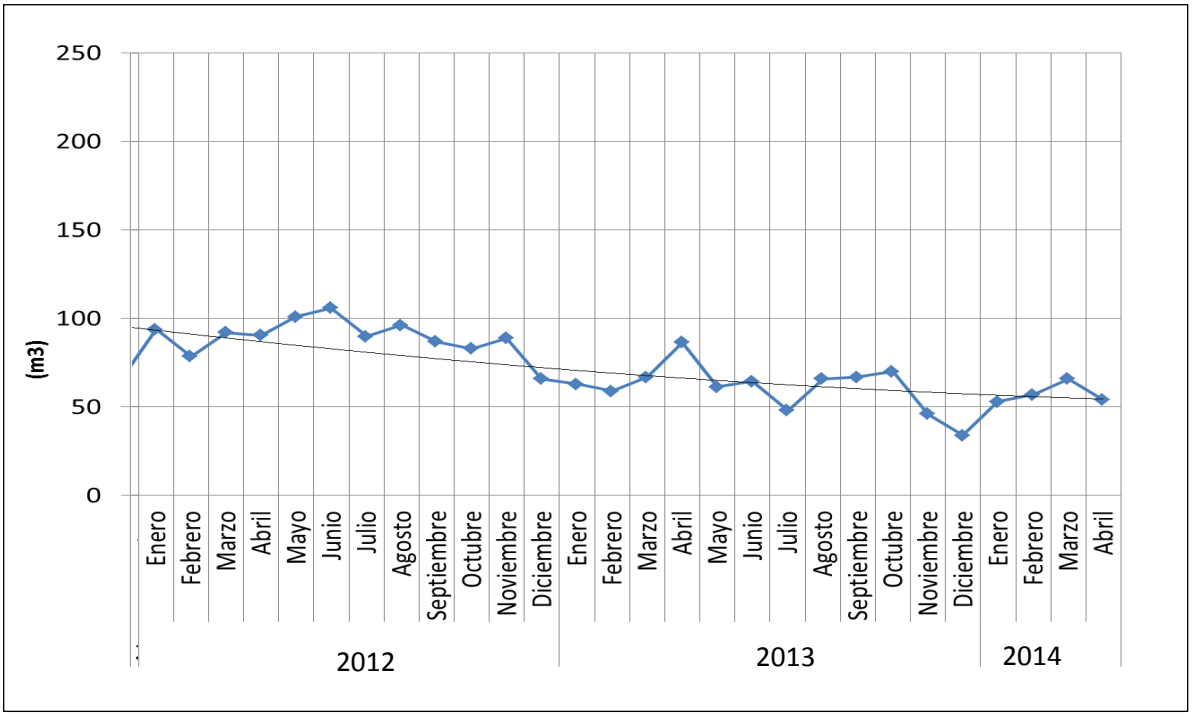
La reducción de costos para el agua de reposición para la torre se define de la siguiente manera:

Consumo por años de agua de reposición a 2.7 ciclos	**Consumo por años de agua de reposición a 3.5 ciclos**	**Ahorro**
43,887.60 m^3	38,719.20 m^3	***5,168.40* m³**

Costo por año de agua de reposición a 2.7 ciclos	**Costo por año de agua de reposición a 3.5 ciclos**	**Ahorro**
$ 614,426.40 M.N.	$ 542,068.80 M.N.	**$ 72,357.60 M.N.**

La Gráfica 10 describe el consumo promedio de agua que se han registrado desde el año 2012, se muestra una considerable reducción en el agua de reposición a partir del año 2013; para éste año se implementó el tratamiento fisicoquímico para mantener la sílice disuelta en el agua de enfriamiento y la gráfica muestra una disminución del 20 al 30 % aproximadamente del consumo de agua en la torre.

Gráfica 10. Consumos promedio de agua de reposición en torre de enfriamiento.



CONCLUSIONES

Los servicios auxiliares consumen un 49% del total de la extracción de agua en la planta, del 49% destinado para servicios auxiliares las torres de enfriamiento son los mayores consumidores utilizando más del 50% de ésta, esto se representa en la siguiente gráfica.

Gráfica 11. Extracción de agua de pozo.

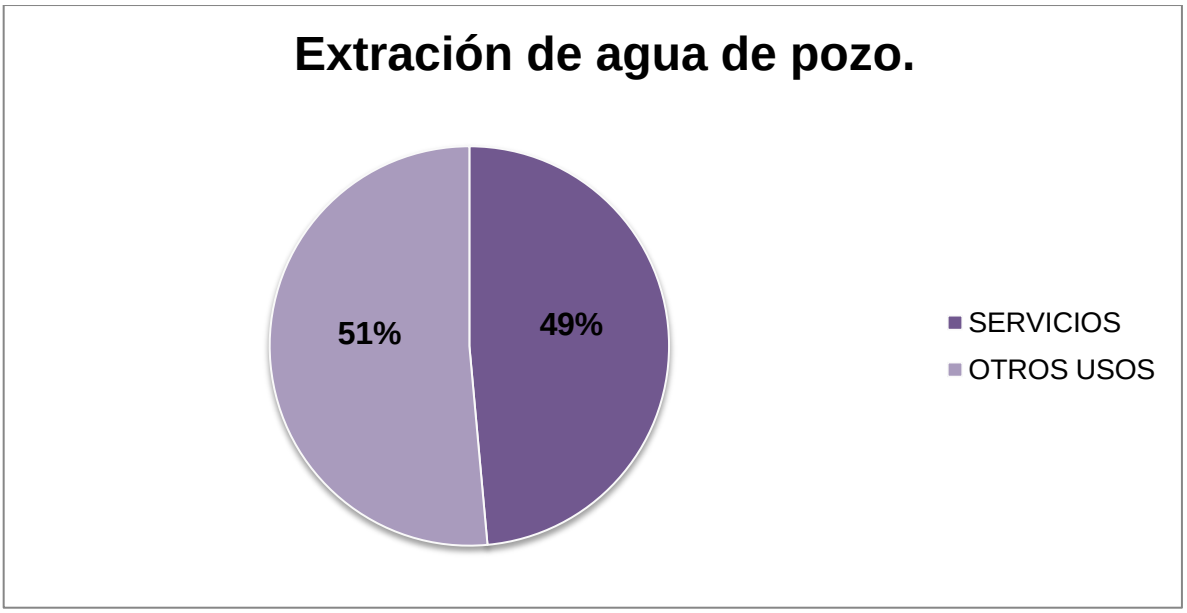


Tabla 9. Uso del agua de pozo en servicios auxiliares.

Torres de enfriamiento	Calderas	Agua 60°	Osmosis
52%	17%	6%	25%

La Tabla 9 representa la distribución de servicios auxiliares, e indica que las torres de enfriamiento son las que ocupan mayor cantidad de agua para su operación. Debido a la gran demanda de agua que genera la torre de enfriamiento, se implementó una nueva alternativa para la operación y optimización de la torre,

conforme a los resultados presentados se puede determinar que esta metodología de operación y control resultó exitosa.

Se logró mantener el pH del agua de enfriamiento estable, presentado valores más constantes que los que presentaba el agua de pozo, el uso del dispersante de sílice sí logró mantener concentraciones de sílice hasta de 220 ppm, por lo tanto se incrementaron los ciclos de concentración ya que este factor se mantuvo controlado dentro del sistema sin provocar problemas de operación o daños en los equipos, el resultado del uso de estos químicos fue un menor consumo de agua de reposición.

Una de las consecuencias del aumento en los ciclos de concentración de la torre es la disminución del uso de purgas, esto es a causa de que se utilizó el dispersante de sílice ya que el agua de enfriamiento mantuvo concentraciones más altas de sílice; el flujo de purga disminuyó 60 m^3/h, es decir, 1440.0 m^3/día, ésta disminución se ve reflejado en el flujo de agua de reposición y por lo tanto aumento el tiempo de circuito en la torre.

El consumo de agua de reposición disminuyó en un 20% aproximadamente; partiendo de un consumo anual de 43,887.60 m^3 se logró reducir a un 38,719.20 m^3 por año, considerando el costo de extracción del agua de pozo se determinó un ahorro económico de $72,357.60 M.N. por año.

Los datos de los análisis fisicoquímicos y consumos se realizaron para una de las tres torres con las que cuenta la planta de confitería, por lo que los beneficios de ahorro de agua y económicos se triplican dando como resultado un ahorro en la extracción de agua de pozo de 15,505.20 m^3 anuales, lo que equivale a un ahorro de $217,072.80 M.N. por año.

ANEXO

Metodología para el control químico del proceso

Para justificar y comprobar los resultados mostrados en el monitoreo contante del equipo se realizan análisis químicos para el agua de pozo y el agua de enfriamiento, estos análisis siguen métodos estrictos para garantizar que los resultados son confiables, a continuación se describen a detalle los análisis realizados.

- **Muestreo**

La muestra debe ser almacenada en un recipiente de plástico cerrado herméticamente, el frasco debe estar identificado de acuerdo al lugar de toma de muestra.

Para la toma de muestra la línea debe ser purgada alrededor de 5 minutos y el recipiente debe en el que se recolecta y guarda debe ser lavado por lo menos tres veces con la misma agua que almacenará antes del llenado; éste método de muestreo aplica para las siguientes determinaciones descritas.

1. Determinación de pH

Se utiliza un potenciómetro de cualquier proveedor conocido y certificado, la metodología varía dependiendo del potenciómetro utilizado y de su manual de uso.

- *Metodología*

1. Las mediciones son realizadas a 25°C ± 2°C, a menos que otra cosa sea especificada en los controles de rutina.

2. Los electrodos de pH deben sumergirse (cerca de una pulgada de la punta del electrodo) dentro de la solución buffer de pH 4 cuando no se usen.

3. Para la medición de la muestra se sumerge el electrodo cerca de una pulgada en el agua de la muestra que debe ser alrededor de 200 ml.

4. Permitir que el electrodo llegue al equilibrio con la muestra hasta que se obtenga una lectura estable, registrar el resultado.

2. Determinación de conductividad.

Se utiliza un conductímetro de cualquier proveedor conocido y certificado, la metodología varía dependiendo del conductímetro utilizado y de su manual de uso.

- *Metodología*

1. Las mediciones son realizadas a 25°C ± 2°C, a menos que otra cosa sea especificada en los controles de rutina.

2. Los electrodos deben sumergirse (cerca de una pulgada de la punta del electrodo) dentro de agua desmineralizada o destilada.

3. Para la medición de la muestra se sumerge el electrodo cerca de una pulgada en el agua de la muestra que debe ser alrededor de 200 ml y permitir que el electrodo llegue al equilibrio con la muestra hasta que se obtenga una lectura estable, registrar el resultado.

3. Determinación de dureza total y dureza de calcio

Para ambos análisis se requiere de la misma cantidad de muestra, para el análisis de dureza de calcio se utiliza un buffer específico y un indicador diferente; la metodología y cálculos son los mismos para ambas determinaciones.

- *Reactivos*

- Solución buffer de dureza total.
- Solución buffer para dureza de calcio.
- Solución EDTA
- Polvo indicador, eriocromo de negro T.
- Polvo indicador para dureza de calcio.

- *Metodología*

1. En un matraz Erlenmeyer colocar 50 ml de muestra.
2. Agregar 1 ml de solución buffer y una pizca de polvo eriocromo negro T.
3. Titular con EDTA.

En presencia de dureza, al agregar el buffer y el polvo indicador, la muestra se tornará color rosa y al titular virará a azul; cuando no hay dureza el vire será inmediato después de agregar el polvo indicador.

- Cálculos

Dureza como ppm de $CaCO_3$ *= (ml gastados de sol EDTA)(40)*

4. Determinación colorimétrica de Sílice

Se utiliza un colorímetro marca Hatch modelo DR/890, el método de análisis puede variar dependiendo de la marca y manual de uso de cada equipo.

- *Reactivos*

- Set de reactivos a base de molibdato y ácido cítrico para

determinar sílice.

- Agua destilada o desmineralizada.

- *Metodología*

Se mide 10 ml del agua de muestra y se diluye en 10 ml con agua destilada.

Se separan 10 ml en 2 celdas de vidrio con tapa; la primera será el blanco y la segunda corresponderá a la muestra.

Se agrega en una celda el primer reactivo correspondiente a reactivo de molibdato, ya que se disolvió se agrega el segundo sobre de reactivo y esperar 10 minutos para que reaccione, ya que transcurrió el tiempo se agrega el último reactivo y se deja un tiempo de 2 minutos para su reacción.

Se limpian las celdas con un papel para evitar alguna interferencia y se coloca el blanco para medición y posteriormente la muestra.

- Cálculos

Sílice como ppm de $SiO_{2\,=}$ *(resultado obtenido por el colorímetro)(2)*

Bibliografía

1. Ahorro y eficiencia energética en climatización. Guía técnica torres de Refrigeración. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. Recuperado el 23 de mayo de 2014. Disponible en http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Torres_refrigeracion_GT4_07_05eca613.pdf

2. AQUAPROX. (2009). TREATMENT OF COOLING WATER. BERLÍN. ED SPRINGER. RECUPERADO EN 4 MAYO DE 2014. DISPONIBLE EN HTTP://DX.DOI.ORG/10.1007/978-3-642- 01985-2

3. AQUATRON S.A. Potencial óxido-reducción. Buenos Aires, Argentina. Recuperado el 23 de mayo de 2014. Disponible en http://www.acquatron.com.ar/pdf/Sobre_el_ORP.pdf

4. ASCOLESE, C.R. Bain, D.I, Soria, M. *Selección de programas para proteger circuitos de refrigeración*. Tratamiento de Aguas. Hercules BetzDearborn Inc. (EE.UU.) Recuperado el 16 de mayo de 2014. Disponible en http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/369/08articulo.pdf

5. Diccionario de la lengua española. (n.d.). Recueprado en marzo 13, 2014. Disponible en Real Academia Española: http://www.rae.es/

6. GÓMEZ DE LEÓN, F. C., ALCARAZ, D. L. (2004). Manual básico de corrosión para ingenieros. Murcia, España: Servicio de publicaciones Universidad de Murcia.

7. HENSLEY, J. C. (2006). *Cooling Tower Fundamentals.* Kansas, U.S.A: SPX Cooling Technologies.

8. JENKIS, D. (2004). *Química del agua. California*, E.U.A: Limusa

9. KEMMER, F. (1989). *Manual del agua de Nalco*. McGraw-Hill.

10. La dureza del agua. (n.d.). Recuperado n marzo 30, 2014,. Disponible en http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/valenzuela_m_td/capitulo3.pdf

11. MARTÏ, Burriel, F., LUCENA, Conde, F. (2008). *Química analítica cualitativa.* Madrid, España: Cengage Learning

12. MCCABE, W. L. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. McGraw Hill.

13. MEYERS Peter. *Behavior of silica in ion exchange and other systems*. ResinTech Inc. Recuperado el 5 mayo de 2014. Disponible en http://www.snowpure.com/docs/resintech-silica-iwc99.pdf

14. NALCO COMPANY. (2010). *Cooling Water Technical Manual.* Exclusivo para uso interno.

15. NALCO COMPANY. (2005). *Introduction to Cooling Water Treatment.* Exclusivo para uso interno.

16. NALCO COMPANY. *Cooling Water Products Applications.* Exclusivo para uso interno.

17. *Parametros fisico quimicos*. (n.d.). Recuperado en Marzo 30, 2014. Disponible en Alcalinidad: http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alcalinidad.pdf

18. Pearis. Dave, *Silica Over-Saturation, Precipitation, Prevention and Remediation In Hot Water Systems*. Recuperado de http://www.cal-water.com/pdf/Silica_scaling_Remediation.pdf

19. *Quimica del agua*. (n.d.). Marzo 30 de 2014. Disponible en http://www.quimicadelagua.com/Conceptos.Analiticos.Dureza.5.html

20. *Quality assurance test procedures.* Nalco Company. (1997, Noviembre) Exclusivo para uso interno

21. RIGOLA, L. M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales.* España: Alfa omega Marcondo.

22. SIRENA A. José, G. Á. (2010, Octubre 1). Predicción y evaluación empírica del coeficiente de pérdida de carga en rellenos de torres DE. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica., p. 20.

23. *Torres de Enfriamiento: Diseño y Operación Consideraciones.* (8 de Noviembre de 2010). Recuperado el 25 de Marzo de 2014, de http://www.cheresources.com/content/articles/heat-transfer/cooling-towers-design-and-operation-considerations?pg=2

24. VIAN ORTUÑO, A. (1998). *Introducción a la Química Industrial*. España: Reverté.

25. WEBER, W. J. (2003). *Control de calidad de agua procesos fisicoquímicos.* España: Reverté.