

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“TRATAMIENTO QUÍMICO Y CONTROL EN LÍNEA DE UN SISTEMA
DE ENFRIAMIENTO PARA HORNOS”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUIMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

ROXANA ANGELICA GAMIO PALACIOS

LIMA – PERÚ

2004

En gratitud a mi esposo por su gran amor y constante apoyo, y a la memoria de mis padres como una muestra de cariño por su esfuerzo y dedicación.

RESUMEN

La planta que es caso de estudio se dedica a la fabricación de productos químicos, teniendo como parte crítica del proceso el empleo de un horno de alta transferencia térmica, el cual es refrigerado con agua de pozo, debido a que no se cuenta con sistemas que permitan acondicionar el agua para su empleo.

El agua es enfriada en una torre de enfriamiento y enviada al sistema de hornos. La alta concentración de sólidos y las elevadas tasas de transferencia de calor hacen que se lleve a cabo un control muy estricto de la calidad del agua que será empleada. Un descuido por parte del personal de planta, originaría incrustación y corrosión en el sistema, lo cual obligaría a paradas no programadas en la producción.

El objetivo buscado es eliminar toda posibilidad de generación de incrustaciones en el sistema de hornos y corrosión de los equipos relacionados, mediante un tratamiento químico diseñado para contrarrestar los problemas anteriormente mencionados, y con un control estricto de los parámetros críticos del sistema. Situación que se puede llevar a cabo mediante la instalación de equipos dosificadores y sistemas de control en línea automatizados, temas que serán parte importante de nuestro estudio y que tienen un beneficio importante en los procesos de la planta.

ÌNDICE

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN	7
II. DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TÉCNICAS	9
2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL AGUA	9
2.1.1. Calor Específico	9
2.1.2. Propiedades Disolventes	9
2.1.3. Concentración de Sólidos Disueltos	13
2.2. PROBLEMAS RELACIONADOS AL PROCESO	14
2.3. PROBLEMAS DE INCRUSTACIONES RELACIONADOS CON EL AGUA	15
2.3.1. Mecanismo de la formación de incrustaciones	15
2.3.2. Factores que influyen la formación de incrustaciones	16
2.4. PROBLEMAS DE CORROSIÓN RELACIONADOS CON EL AGUA	19
2.4.1. El proceso de Corrosión	20
2.4.2. Pila Básica de Corrosión	20
2.4.3. Las consecuencias de la Corrosión	21
2.5. PROBLEMAS DE ENSUCIAMIENTO RELACIONADOS CON EL AGUA	23
2.6. PROBLEMAS DE ENSUCIAMIENTO BIOLÓGICO RELACIONADOS CON EL AGUA	24
2.7. TRATAMIENTOS QUÍMICOS PARA EL CONTROL DE LOS PROBLEMAS RELACIONADOS AL AGUA	26
2.7.1. Métodos Generales de Inhibición de incrustaciones	26
2.7.2. Métodos Generales para Inhibir la Corrosión	27
2.7.3. Métodos Generales para prevenir el Ensuciamiento	36
2.7.4. Métodos Generales para prevenir el Ensuciamiento Microbiano	41
2.8. TÉCNICAS DE MONITOREO Y CONTROL DE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO	43

2.8.1.	Ciclos de Concentración	44
2.8.2.	Medidas Críticas y Control de Sistemas de Enfriamiento	46
III.	DESARROLLO DEL TEMA	51
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	51
3.2.	DIAGRAMA DEL PROCESO	52
3.3.	PROBLEMÁTICA ACTUAL DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE HORNOS	53
3.3.1.	Objetivo	53
3.3.2.	Descripción del Sistema	53
3.3.3.	Distribución del Agua	53
3.3.4.	Caracterización del Agua del sistema	55
3.3.5.	Diagnóstico del Sistema	57
3.3.6.	Problemas Actuales en Planta	60
3.3.7.	Conclusiones del Diagnóstico	61
3.4.	SISTEMA ACTUAL DE CONTROL QUÍMICO Y MONITOREO	62
3.4.1.	Tratamiento Químico Actual	62
3.4.2.	Control del Tratamiento Químico - Resultados	63
3.4.3.	Servicio de Campo	64
3.4.4.	Sistemas Automáticos de Control	65
3.4.5.	Conclusiones del Sistema Actual de Control y Monitoreo	66
3.5.	PROPUESTA PARA OPTIMIZAR EL CONTROL QUÍMICO Y MONITOREO DEL AGUA MEDIANTE UN PROGRAMA DE TRATAMIENTO QUÍMICO Y SISTEMAS DE CONTROL EN LINEA	66
3.5.1.	Programa de Tratamiento Actual	66
3.5.2.	Programa Integral para el Tratamiento de Agua Propuesto	69
3.5.3.	Dosis Recomendadas y puntos de Aplicación del Programa Propuesto	71

3.5.4. Control y Monitoreo	72
3.5.5. Sistemas Automáticos de Control	75
3.6. IMPLEMENTACIÓN E INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL EN LINEA	80
3.6.1. Etapa I	80
3.6.2. Etapa II	81
3.6.3. Etapa III	83
3.6.4. Evaluación a nivel Planta	84
IV. CONCLUSIONES	85
V. RECOMENDACIONES	89
VI. BIBLIOGRAFÍAS	90
VII. APÉNDICE	91

I. INTRODUCCIÓN

El sistema de enfriamiento se compone de dos partes fundamentales: el sistema de enfriamiento y el sistema del proceso. El sistema de enfriamiento consiste normalmente en una torre de enfriamiento y sus componentes asociados (ventiladores, rejillas de ventilación, bombas, etc.). El sistema del proceso consiste generalmente en equipos de intercambio de calor en forma de intercambiadores de calor, condensadores, camisas de reactor, hornos, etc.

El agua es enfriada en una torre de enfriamiento y enviada al sistema de hornos. La alta concentración de sólidos y las elevadas tasas de transferencia de calor hacen que se lleve a cabo un control muy estricto de la calidad del agua que será empleada. Un descuido por parte del personal de planta, originaría incrustación y corrosión en el sistema, lo cual obligaría a paradas no programadas en la producción.

La mayor parte de los procesos industriales de producción necesitan agua de enfriamiento para aumentar su eficiencia y reducir sus riesgos. Refinerías, acerías, plantas petroquímicas, plantas termoeléctricas y otras plantas funcionan con equipos o procesos que requieren temperaturas adecuadas para una producción eficiente y correcta. Los sistemas de agua de enfriamiento controlan estas temperaturas transfiriendo calor desde los fluidos calientes, originados por los procesos, al agua de enfriamiento. Naturalmente, en el transcurso de esta transferencia el agua se calienta y por lo tanto hay que enfriarla antes de usarla de nuevo, o bien hay que reemplazarla gradualmente con un suministro de agua fría. Desgraciadamente, esta agua "fresca" de reposición contiene minerales, tierra, desechos, bacterias y otras impurezas. Más aún, a medida que el agua circula a través del sistema, se van acumulando otros contaminantes. Pronto las temperaturas comienzan a subir, la eficiencia del equipo de enfriamiento disminuye y puede incluso ser necesario parar la planta.

El agua, sus propiedades, y tratamientos pueden tener una gran influencia en la eficiencia de la operación de las torres de enfriamiento y equipos de proceso. Entendiendo la disposición física de los sistemas involucrados y sus principios de

operación (permisos, vigilancia informada), es posible detectar antes de tiempo los problemas potenciales del sistema.

II. DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TÉCNICAS

2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL AGUA

2.1.1. Calor Específico

El calor específico de una sustancia es una razón que compara la absorción de calor de dicha sustancia con la absorción de calor del agua. El calor específico del agua es 1, es decir, cuando se agrega 1 kcal (1 Btu) de calor a 1 kg (1 libra) de agua, la temperatura del agua sube 1°C (1°F). Esto quizás no nos impresione hasta que comparemos esta medida con el calor específico de otros materiales. Por ejemplo, el metanol tiene un calor específico de 0,39, porque sólo hacen falta 0,39 kcal (Btu) para elevar la temperatura de 1 kg (1 libra) de metanol 1°C (1°F). El calor específico del plomo es 0,03, aproximadamente 1/33 el del agua. Eso significa que hacen falta 33 kg de plomo para absorber la misma cantidad de calor que 1 kg de agua, para el mismo aumento de temperatura.

El agua puede absorber más calor que prácticamente cualquier otra sustancia que pudiéramos considerar para usos generales de enfriamiento. Esta gran capacidad para absorber y desprender calor hace del agua el material ideal para sistemas de torres de enfriamiento; absorbe calor del proceso y desprende calor en la torre de enfriamiento mediante el proceso de evaporación. Comparada con otras sustancias, el agua consigue este enfriamiento con aumentos de temperatura relativamente pequeños y causando problemas ambientales mínimos.

2.1.2. Propiedades Disolventes

En contraste con su conveniente capacidad para enfriar, el agua tiene características que pueden ser muy perjudiciales. El agua se considera el "disolvente universal" a causa de su tendencia a disolver, en mayor o menor grado, una extensa variedad de materiales incluyendo metales y sólidos. La capacidad disolvente del agua es perjudicial para los equipos de los sistemas de enfriamiento porque puede tener un efecto directo sobre la cantidad de incrustaciones y corrosión.

Respecto a los sistemas de agua de enfriamiento, la capacidad disolvente del agua puede causar graves problemas. Cuando el agua disuelve diversos minerales, los retiene en solución; estos minerales disueltos se llaman sólidos disueltos.

Antes de utilizar el agua para el enfriamiento industrial hay que controlar adecuadamente estas impurezas mediante tratamientos, o eliminarlas del suministro de agua, para evitar problemas como corrosión, incrustaciones y ensuciamiento que pueden destruir equipos de enfriamiento muy caros.

Dependiendo de la situación geográfica, el agua de reposición que alimenta los sistemas de enfriamiento puede contener diversas combinaciones y concentraciones de minerales, gases y materia microbiológica. Como estas impurezas pueden causar graves problemas en un sistema de enfriamiento, es importante conocer en todo momento la cantidad y tipo de sólidos presentes.

Las siguientes propiedades químicas del agua nos dan información valiosa acerca del efecto del agua en un sistema de enfriamiento: conductividad, dureza, alcalinidad y pH.

- **Conductividad.-** La conductividad es una medida que indica la facilidad con que circula la corriente eléctrica a través de una muestra de agua. Por ejemplo, en el circuito de prueba la lámpara eléctrica sólo se enciende cuando circula la corriente por la solución contenida en el recipiente. La intensidad de la luz depende de la capacidad de la solución para conducir la corriente. Cuando el recipiente contiene agua destilada absolutamente pura, sin sólidos disueltos, la lámpara no se enciende porque el agua totalmente pura no conduce la electricidad. En términos químicos, el agua pura no es un electrolito.

Sin embargo, si añadimos cloruro de sodio (sal común) al agua, la lámpara se enciende porque los iones de cloro y sodio disueltos transportan la corriente eléctrica a través del agua, cerrando el circuito. Esa solución es un electrolito, porque puede conducir la electricidad. Si añadimos más sal a la solución la lámpara brilla con más intensidad,

puesto que al haber más sólidos disueltos, pueden transportar más corriente.

Los minerales como el cloruro de sodio, bicarbonato de calcio, carbonato de magnesio y dióxido de silicio, son sustancias comunes que se disuelven en el agua, formando soluciones electrolíticas o conductoras. Ya que la conductividad es proporcional a la cantidad de sólidos disueltos en el agua, se puede usar como medida de la cantidad de sólidos disueltos. La conductividad es una medida importante porque indica la concentración de minerales disueltos en el agua de enfriamiento, así como su aumento o disminución. Si la concentración de algunos minerales crece demasiado, se pueden formar en poco tiempo depósitos peligrosos que reducen la eficiencia del sistema para transferir calor y dañan los equipos del sistema de enfriamiento.

Aunque la conductividad proporciona una buena medida de la cantidad de materiales disueltos en el agua de enfriamiento, no indica qué tipos de contaminantes están presentes. Para obtener información acerca de los tipos de impurezas del agua de enfriamiento tenemos que medir otras propiedades químicas del agua.

- **Dureza.-** Entre los muchos minerales que disuelve el agua están los compuestos de calcio y magnesio. La dureza del agua se refiere a la cantidad de calcio y magnesio presentes. Estos compuestos pueden causar dificultades en un sistema de enfriamiento porque pueden precipitarse formando depósitos densos y muy duros, particularmente en equipos de intercambio de calor. Es necesario monitorear la dureza cuidadosamente, ya que esos depósitos pueden reducir considerablemente la capacidad de enfriamiento de un sistema. En algunos casos pueden causar la parada total del sistema.

A diferencia de la mayoría de las sales, la solubilidad de las sales de calcio y magnesio varía en relación inversa con la temperatura. Por eso son tan importantes.

Una manera de determinar el potencial de formación de depósitos de estas sales en un sistema de enfriamiento es conocer la alcalinidad del sistema.

- **Alcalinidad.-** Cuando se forman incrustaciones o hay corrosión en un intercambiador de calor, a menudo es a causa de la alcalinidad, al menos parcialmente. Hay dos formas de alcalinidad que requieren particular atención en los sistemas de enfriamiento: la alcalinidad debida a los bicarbonatos y a los carbonates.

El programa completo de tratamiento de agua de enfriamiento diseñado para el sistema de enfriamiento de una planta, especifica un cierto intervalo de alcalinidad para ese sistema. Monitoreando cuidadosamente la alcalinidad del agua de enfriamiento, se pueden hacer ajustes para asegurar que proporcionamos al sistema la máxima protección contra las incrustaciones y la corrosión.

- **pH.-** El pH, igual que la alcalinidad, es una medida clave en los sistemas de enfriamiento de agua porque muchos programas de tratamiento de agua están diseñados para funcionar solamente dentro de ciertos intervalos del pH. La definición científica del pH es la siguiente: el logaritmo de la inversa de la concentración de iones hidronio (H_3O^+) (comúnmente llamado ion hidrógeno) en una solución. Sencillamente, a medida que la cantidad de iones de hidrógeno (H^+) presentes en el agua cambia, también cambia el pH.

Recuerde que el programa de tratamiento del agua usado para combatir las incrustaciones y la corrosión solamente puede funcionar dentro de un intervalo del pH cuidadosamente prescrito. Si el sistema funciona fuera de ese intervalo, aunque sea durante un periodo muy breve, los aditivos químicos pueden ser ineficaces y pronto comenzarán a surgir problemas. Cuanto más alto sea el pH, más incrustaciones formará el agua. Cuanto más bajo sea el pH, más corrosiva será el agua.

2.1.3. Concentración de Sólidos Disueltos

Cuando el agua pasa por un sistema de agua de enfriamiento de recirculación abierta, el calor que recibe de los fluidos del proceso es liberado en la torre de enfriamiento mediante la evaporación. Pero las moléculas de vapor caliente que escapan de la solución durante la evaporación no arrastran los sólidos disueltos. Por eso, cuando no existen otras pérdidas de agua del sistema, el proceso de evaporación causa un aumento de la concentración de sólidos disueltos en el agua de recirculación.

Para estimar cuanta agua se pierde y con cuanta rapidez se acumulan los sólidos, hay que comparar la temperatura del agua de enfriamiento cuando entra a la torre con su temperatura cuando sale. Aproximadamente cada 6°C (10°F) de descenso de la temperatura, resultan como promedio una pérdida del 0,85% de agua de enfriamiento recirculada a causa de la evaporación. Por ejemplo, si un sistema de enfriamiento tiene una tasa de flujo de circulación de 9000 m³/h (40000 galones por minuto, o GPM) y la temperatura del agua desciende de 38° a 32°C (100 a 90°F) al caer a través de la torre de enfriamiento, un 0,85% de esos 9000 metros cúbicos por hora, o sea, 76,5 m³/h (340 GPM) se pierden en el aire. Al mismo tiempo, considerando que no hay otras pérdidas de agua del sistema, el porcentaje de sólidos disueltos restantes en el agua de recirculación se concentra en un 0,85%. La dureza, la conductividad, la alcalinidad y el pH del sistema aumentan a medida que aumenta la concentración de sólidos disueltos. Si este ciclo de concentración continúa incontrolado, los depósitos comenzarán a causar problemas.

Para evitar un aumento excesivo de la concentración de sólidos disueltos, se retira deliberadamente y continuamente del sistema una parte del agua de recirculación una vez que se alcanza cierta concentración de sólidos disueltos. Este proceso se llama purga. El agua retirada se reemplaza por agua de reposición fresca y con menos materiales disueltos. Manteniendo

un caudal de reposición continuo, la cantidad de sólidos eliminados del sistema es igual a la cantidad de sólidos admitidos en el mismo.

2.2. PROBLEMAS RELACIONADOS AL PROCESO

Los sistemas de agua de enfriamiento, independientemente de la configuración de los equipos, de los materiales de construcción o de las fuentes del agua, son todos ellos propensos a cuatro problemas básicos: corrosión, incrustaciones, ensuciamiento y contaminación microbiana. Cuando no se controlan, estos problemas provocan una pérdida de transferencia de calor y la falla de los equipos, causando a su vez una pérdida de producción y beneficios, costos de mantenimiento más elevados y en casos más serios, la parada de la planta.

Cada uno de estos problemas está relacionado con las leyes básicas naturales por las que los metales tienden a volver a su estado oxidado natural, los minerales a precipitar, los sólidos en suspensión a sedimentar y los microorganismos a multiplicarse. En conjunto, todos estos problemas pueden detener el funcionamiento de un sistema de agua de enfriamiento de forma muy rápida.

Los cuatro problemas principales pueden resumirse de la forma siguiente:

- **Incrustaciones.** Los minerales tales como el calcio y el magnesio son relativamente insolubles en agua y pueden precipitar para formar depósitos de incrustaciones en las condiciones típicas de un sistema de agua de enfriamiento.
- **Corrosión.** En la fabricación de metales usados normalmente en los sistemas de enfriamiento, tales como el acero dulce, se elimina el oxígeno de los minerales naturales. Los sistemas de agua de enfriamiento proporcionan un entorno ideal para que el metal vuelva a su estado oxidado. Este proceso de inversión se denomina corrosión.
- **Ensuciamiento.** La formación de depósitos de materiales en suspensión en los intercambiadores de calor se llama ensuciamiento.

Los agentes de ensuciamiento pueden proceder de fuentes externas tales como el polvo ambiental presente en los alrededores de una torre de enfriamiento o de fuentes internas tales como productos de corrosión.

- **Ensuciamiento microbiano.** Los sistemas de agua de enfriamiento proporcionan un entorno ideal en el que las bacterias crecen, se multiplican y causan problemas de depósitos en los intercambiadores de calor.

Afortunadamente, la tecnología moderna proporciona métodos de protección contra cada uno de estos problemas. A continuación estudiaremos detalladamente cada uno de los problemas. También revisaremos las formas de prevenir y tratar químicamente cada uno de ellos.

2.3. PROBLEMAS DE INCRUSTACIONES RELACIONADOS CON EL AGUA

Las incrustaciones constituyen uno de los problemas más comunes encontrados en los sistemas de agua de enfriamiento. Cuando se forman incrustaciones en las superficies de los intercambiadores de calor y en las tuberías de transferencia, demoran el intercambio de calor, aceleran el ensuciamiento, fomentan cierto tipo de corrosión y crecimiento microbiano, y aumentan la contrapresión de bombeo. Esto, a su vez, resulta en la disminución del rendimiento de la planta, reducción de la productividad, retrasos de los planes, más tiempos de parada de mantenimiento y aumento de los costos de los equipos, reparaciones y repuestos. Todo lo anterior provoca el aumento de los costos de operación y la disminución de los beneficios.

2.3.1. Mecanismos de la formación de incrustaciones

La acumulación de incrustaciones tiene lugar cuando las sales en disolución acuosa precipitan debido a que se ha excedido su solubilidad.

Las incrustaciones normalmente forman una capa densa de minerales muy adherente entre sí y a las superficies del metal. Las incrustaciones pueden ser de naturaleza cristalina o amorfa y, debido a su baja conductividad térmica, impiden la transferencia de energía a través de las superficies del intercambiador de calor.

Los fangos y los agentes de ensuciamiento normalmente son partículas insolubles presentes en el agua de reposición o introducidas por fugas del proceso o crecimiento microbiano dentro de un sistema de enfriamiento. Estos sólidos tienden a formar depósitos o masas sueltas, no adherentes, normalmente en las secciones de un sistema con baja velocidad de flujo. No obstante, se pueden incorporar sólidos en suspensión a las incrustaciones.

El carbonato de calcio es el tipo más común de incrustaciones encontrado en los sistemas de agua de enfriamiento; no obstante, también se observan incrustaciones de sulfatos, fosfatos y silicatos, así como también otras sales de calcio, hierro, manganeso, magnesio y zinc.

2.3.2. Factores que influyen en la formación de incrustaciones

La cristalización directa de un compuesto sobre una superficie ocurre cuando se dan cuatro condiciones paso a paso.

- Sobresaturación, excediendo la solubilidad del compuesto en el agua del sistema
- Nucleación, formación de pequeñas partículas de incrustaciones embrionarias
- Tiempo de contacto adecuado, que permite el crecimiento del cristal
- Formación de incrustaciones excediendo la disolución.

Éstos son los cuatro factores principales que influyen en la formación de incrustaciones. En este trabajo también se describen varios factores adicionales que se sabe afectan el tipo, velocidad de precipitación y adherencia de las incrustaciones en los sistemas de agua de enfriamiento.

- **Sobresaturación**

La sobresaturación es el punto en que la concentración de una sal excede su solubilidad en el agua. Un sistema de enfriamiento llega a la sobresaturación debido a evaporación, fluctuaciones de pH o cambios de temperatura.

El nivel de sobresaturación en la masa de agua no es indicativo siempre del nivel de sobresaturación en zonas localizadas. La sobresaturación puede ser muy localizada, tal como en una película delgada de flujo de agua laminar junto a una superficie de transferencia de calor, en la interfase gas/líquido de una burbuja, en una hendidura o debajo de una capa de depósito existente. Ésta es la razón por la que se pueden formar incrustaciones en intercambiadores de calor aun cuando la masa de agua esté considerada como no incrustante.

- **Nucleación**

La nucleación o formación inicial de un precipitado, tiene lugar por medio de dos mecanismos básicos: nucleación homogénea y heterogénea. La nucleación homogénea ocurre de forma espontánea y está causada por un alto nivel de sobresaturación de la especie incrustante. La nucleación heterogénea ocurre cuando partículas extrañas o la rugosidad superficial inician la formación de incrustaciones. La nucleación heterogénea es más común en los sistemas de agua de enfriamiento debido a la presencia de sólidos en suspensión, productos de corrosión, zonas de corrosión, soldaduras, hendiduras, la rugosidad superficial de un intercambiador de calor y películas de óxido, que pueden iniciar incrustaciones.

- **Tiempo de contacto adecuado**

Para que se formen incrustaciones después de que se sobresature una solución y haya ocurrido la nucleación, debe transcurrir suficiente tiempo de contacto entre la solución y las zonas de nucleación. Por lo

general, cuanto mayor sea el tiempo de contacto, más probable será la formación de incrustaciones. El tiempo necesario para la formación de incrustaciones puede variar de unos pocos segundos a muchos años, dependiendo del nivel de sobresaturación, tipo y número de zonas de nucleación, temperatura, pH, agitación y otros factores.

- **Disolución, formación y envejecimiento de incrustaciones**

Durante la acumulación de depósitos de incrustaciones, se producen fenómenos constantes de disolución y nueva formación de depósitos en las caras del cristal. Las incrustaciones se acumulan cuando la velocidad de formación de depósitos es mayor que la velocidad de disolución. Cuando las incrustaciones empiezan a precipitar, especialmente si se depositan rápidamente, muestran generalmente una estructura relativamente porosa que se elimina fácilmente con un ligero esfuerzo mecánico. Sin embargo, el envejecimiento cambia drásticamente las propiedades físicas de la mayoría de las incrustaciones. Las incrustaciones recientemente precipitadas normalmente pueden eliminarse con facilidad, mientras que las incrustaciones envejecidas tienden a endurecerse, a hacerse densas y más adherentes y difíciles de eliminar. Este fenómeno se debe en su mayor parte a la disolución, a la formación de depósitos, al crecimiento de cristales y a los cambios de fase, en los que tiene lugar una hidratación y deshidratación, hasta que los cristales individuales formen una masa maciza y unificada. Este proceso de envejecimiento se acelera si ocurre sobre las superficies de los intercambiadores de calor.

- **pH del sistema**

Las grandes fluctuaciones del pH tienen un efecto significativo en la formación de incrustaciones, en los sistemas de agua de enfriamiento. Al aumentar el pH, aumenta también el potencial de incrustación de

casi todas las incrustaciones comunes en el agua de enfriamiento, incluyendo el carbonato de calcio, fosfatos de calcio y zinc, hidróxido de zinc y silicato de magnesio. Los descensos de pH aceleran la corrosión, proporcionan zonas de nucleación para la formación de incrustaciones y aumentan el potencial para algunas formas de incrustaciones de sílice.

- **Aumento de la temperatura**

La solubilidad de muchos de los minerales incrustantes comunes es inversamente proporcional a la temperatura, lo que significa que la solubilidad de estas especies disminuye al aumentar la temperatura. Esto es particularmente cierto en el caso del carbonato de calcio y fosfato de calcio, que se forman más velozmente en aquellos puntos en que la temperatura de la superficie es máxima. Así pues, las altas temperaturas de la superficie pueden provocar la formación de incrustaciones localizadas de las superficies del intercambiador de calor, reduciendo en consecuencia la transferencia de calor.

2.4. PROBLEMAS DE CORROSIÓN RELACIONADOS CON EL AGUA

La corrosión es un proceso natural y en los sistemas de enfriamiento es un problema muy serio. La corrosión reduce la eficiencia de cualquier sistema, y si no se controla, produce grietas, fugas y la contaminación del producto. Los equipos de enfriamiento diseñados para funcionar durante años pueden fallar en cuestión de días, lo que significa unos costos elevados de mantenimiento y reparación, e incluso tener que parar totalmente la producción. Afortunadamente, la corrosión puede controlarse. Posteriormente describiremos en detalle la corrosión: lo que es, lo que hace y lo que se puede hacer para controlarla.

2.4.1. El proceso de corrosión

La corrosión es un fenómeno que hace que los metales elaborados, tales como el acero, el cobre y el zinc, vuelvan a sus estados nativos como compuestos químicos o minerales. Por ejemplo, el hierro, en su estado natural, es un compuesto oxidado (Fe_3O_4 , FeO , Fe_2O_3), pero cuando se procesa para formar hierro y acero pierde oxígeno y se convierte en hierro puro (Fe°). En presencia de agua y oxígeno, las fuerzas de la naturaleza atacan sin cesar al acero, volviendo a convertir el hierro elemental (Fe°) en óxido, normalmente en forma de una combinación de Fe_2O_3 y Fe_3O_4 .

2.4.2. Pila básica de corrosión

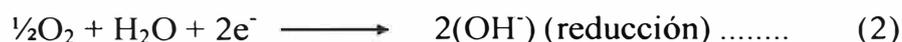
Aunque la corrosión es un proceso complicado, se puede explicar fácilmente como una reacción electroquímica. El metal se pierde en aquella parte llamada zona anódica (o ánodo). En este caso, el hierro (Fe°) se disuelve en el agua y se oxida formando el ión Fe^{+2} . Como consecuencia de la formación de Fe^{+2} , se desprenden dos electrones que circulan por el acero hasta llegar a la zona catódica (o cátodo).

El oxígeno (O_2) disuelto en el agua se desplaza hacia la zona catódica y cierra el circuito eléctrico, usando los electrones que circulan hacia el cátodo, formando iones hidroxilo (OH^-) en la superficie del metal. Químicamente las reacciones son como sigue:

Reacción anódica:



Reacción catódica:



A un pH bajo (<5), el ión hidrógeno (H^+) puede ocupar el lugar del oxígeno y cerrar el circuito eléctrico, según se muestra en la Ecuación (3):



Como la mayoría de los sistemas de enfriamiento operan en un intervalo de pH comprendido entre 6,5 y 9,5, no tiene lugar la reducción de H^+ . La reacción catódica principal es la reducción del oxígeno (Ecuación 2). Toda la superficie metálica está cubierta de innumerables zonas anódicas y catódicas de tamaño microscópico.

En el caso del metal, las diferencias de composición pueden ser causadas por diferentes microestructuras. Las inclusiones en la superficie del metal o debajo de la misma pueden ser la causa de que se formen pares de ánodos y cátodos. Estas impurezas pueden haberse formado cuando el metal estaba en estado fundido o al haberse incrustado en las superficies durante las operaciones de laminado, acabado o desbastado.

2.4.3. Las consecuencias de la corrosión

Si no se controla la corrosión, los intercambiadores de calor dejarán de funcionar de forma eficiente debido a la acumulación de depósitos causados por la corrosión, y cada vez habrá más equipos que dejarán de funcionar debido a la presencia de fugas. Como consecuencia, se perderá más tiempo manteniendo y limpiando el sistema o incluso reemplazando los equipos dañados o que ya no funcionan como debieran. Con el tiempo, las fugas en el sistema pueden causar una contaminación del producto, o incluso una parada total de la planta. Todos estos problemas cuestan dinero. En casos graves, algunos de estos problemas pueden costar incluso puestos de trabajo.

- **Reducción de la eficiencia de la transferencia de calor.**

Los intercambiadores de calor limpios, sin corroer, permiten que la planta opere a la máxima tasa de producción. Cuando hay depósitos en las superficies de transferencia de calor, el sistema de enfriamiento no puede realizar su función, la producción disminuye y los costos aumentan.

- **Aumento del tiempo de mantenimiento y limpieza.**

Sea cual sea el lugar donde ocurra la corrosión en un sistema de enfriamiento, la herrumbre puede llegar a otros puntos por las tuberías, ensuciando los intercambiadores de calor y las tuberías de transporte. La manera normal de eliminar los depósitos consiste en parar y sacar fuera el sistema para limpiarlo. Aún así, incluso si los tubos se limpian con agua a presión, con varillas o con ácido, toma tiempo y mano de obra hacer el trabajo bien. El tiempo empleado se traduce en dinero cuando una unidad no está produciendo.

- **Reparaciones y reemplazo de equipos.**

Si el estado de corrosión es avanzado, la mera limpieza de los equipos no será suficiente. Los tubos pueden gotear por muchas partes. Algunos pueden repararse o desconectarse taponándolos. En otros casos, la única forma de recuperar el rendimiento del intercambiador de calor es instalando tubos nuevos o reemplazando todo el intercambiador de calor, lo cual es una operación costosa.

- **Contaminación del lado del proceso o del lado del agua.**

Cuando se producen fugas debido a la corrosión, pueden presentarse problemas graves en ambos lados del sistema. El agua de enfriamiento puede pasar directamente a la corriente de proceso, contaminando el producto y ocasionando una pérdida de producción. Cuando la corriente del proceso contamina el lado del agua, se producirán aún más depósitos, ensuciamiento y corrosión.

- **Paradas no programadas.**

Si no se hace nada por detener la corrosión del sistema de enfriamiento, ésta puede hacer parar una planta completamente, de forma inesperada. En ese caso, los costos del agua, del mantenimiento

y de la reparación del sistema resultan bajos comparados con el dinero perdido debido a la pérdida de producción.

2.5. PROBLEMAS DE ENSUCIAMIENTO RELACIONADOS CON EL AGUA

El ensuciamiento es un problema común de los sistemas de agua de enfriamiento (tanto en los de recirculación como en los de paso único). Existen varias clases de agentes de ensuciamiento, orgánicos e inorgánicos, que se depositan en las superficies de transferencia de calor, se acumulan en los equipos u obstruyen los intercambiadores de calor y las tuberías. Como consecuencia del ensuciamiento se producen pérdidas de transferencia de calor y corrosión debajo de los depósitos así como aumentos de la demanda de energía, lo que resulta en paradas sin planear, mayor mantenimiento, pérdidas de productividad y reemplazo de equipos. Todo lo anterior se traduce en una disminución de los beneficios.

El ensuciamiento se distingue de la formación de incrustaciones en que los depósitos de ensuciamiento se forman a partir de material en suspensión en el agua, mientras que las incrustaciones se forman a partir de minerales disueltos que precipitan. No obstante, los depósitos de ensuciamiento también contienen cantidades sustanciales de incrustaciones y productos de corrosión además de crecimiento microbiano. La combinación de estos productos complica el mecanismo de ensuciamiento y es la razón por la que es difícil prevenir y limpiar los depósitos de ensuciamiento. Es obligatorio efectuar un análisis detallado de las condiciones del sistema y conocer las características del agua antes de hacer recomendaciones específicas para resolver el problema.

Los materiales que causan el ensuciamiento de un sistema de enfriamiento pueden ser los siguientes:

- Crecimiento microbiano.
- Material coloidal transportado a lugares específicos (por ejemplo, hierro, carbonato de calcio, productos de corrosión).

- Limo o sólidos en suspensión presentes en el agua de reemplazo.
- Polvo y partículas transportados por el aire y depositados en el sistema por contacto aire/agua. En el caso de una torre de enfriamiento de recirculación, los sólidos proceden de la acción de lavado de la torre. Las partículas del aire quedan atrapadas al atravesar el relleno de la torre.
- Contaminantes tales como aceite o corrientes de proceso químico que pasan al agua de recirculación procedentes de intercambiadores de calor o cajas de engranajes de los ventiladores de la torre de enfriamiento.
- Desechos varios de gran tamaño (insectos, pedazos de madera, hojas, etc.).

2.6. PROBLEMAS DE ENSUCIAMIENTO BIOLÓGICO RELACIONADOS CON EL AGUA

Un buen control microbiano es crítico para el rendimiento aceptable de todos los programas de tratamiento de agua de enfriamiento. Las buenas prácticas de bio-control permiten asegurar la existencia de superficies limpias desde el punto de vista biológico en sistemas de enfriamiento, permitiendo un control eficaz de las incrustaciones, corrosión y ensuciamiento. La multiplicación microbiana sin controlar puede pudrir la madera de las torres de enfriamiento, producir corrosión, ocasionar pérdidas de energía y reducir la transferencia de calor, lo que puede resultar en paradas de la planta.

El control microbiano de los sistemas de agua de enfriamiento comprende típicamente el control de bacterias, algas y hongos. También se pueden encontrar otros microorganismos en el agua de enfriamiento, sin embargo normalmente no son problemáticos y no es necesario tenerlos en cuenta en el tratamiento del agua de enfriamiento. La presencia de protozoos y organismos multicelulares normalmente es indicativa de una grave contaminación microbiana y pérdida del control microbiano. Los

organismos más comunes encontrados en el agua de enfriamiento pertenecen al reino de los Protistas. Estos organismos no son ni plantas ni animales, pero tienen muchas características de ambos.

TABLA I: Clases principales de microorganismos problemáticos y sus problemas asociados en los sistemas de enfriamiento:

<u>Clasificaciones</u>	<u>Descripción</u>	<u>Problemas comunes</u>
BACTERIA		
Aerobias formadoras de babazas Pseudomonas Pigmentadas Mucoides Aerobacter	Masas pegajosas y viscosas coloreadas normalmente por sólidos en suspensión o productos de corrosión	Ensuciamiento. Crea las condiciones para la multiplicación de bacterias anaerobias corrosivas. Produce ácidos y gases. Reduce el rendimiento de la transferencia de calor.
Corrosivas anaerobias Desulfovibrio Clostridium Facultativas	Color negro. Olor a huevos podridos (H ₂ S). Crecen idealmente debajo de babazas u otros depósitos y en zonas de poco flujo.	Corrosión. Reducción de pH.
Depositadoras de hierro Sphaerotilus Gallionella Nitrificantes	Sphaerotilus puede ser blanco o de color rojizo, mientras que Gallionella casi siempre es de color rojizo. Aspecto filamentoso y resbaladizo; a menudo forma depósitos voluminosos de color rojo.	Formación de depósitos insolubles de hierro en el sistema de enfriamiento.
Nitrificantes	Produce ácidos en sistemas contaminados con NH ₃ .	Reducción del pH. Corrosión.
HONGOS		
Mohos Aspergillus Penicillium Trichoderma	Masas filamentosas y viscosas que se forman típicamente en la madera. Normalmente son de color blanco o están coloreadas por la contaminación del sistema.	Putrefacción de la madera y ensuciamiento.
Tipos de levaduras Torula Rhodotorula	Correosas o elásticas, parecidas a mucosidades.	Ensuciamiento.
ALGAS		
Oscillatoria Chlorococcus	Se encuentran sólo en partes a las que llega luz natural o artificial. Seltas, viscosas, elásticas. A menudo son de color verde o castaño.	Obstrucción de los agujeros de distribución de las plataformas.

2.7. TRATAMIENTOS QUÍMICOS PARA EL CONTROL DE LOS PROBLEMAS RELACIONADOS AL AGUA

2.7.1. Métodos generales de inhibición de incrustaciones

Las incrustaciones en los sistemas de agua de enfriamiento se pueden prevenir de cuatro formas básicas:

- 1. Limitando la concentración de las especies iónicas críticas,** haciendo que sus concentraciones en el agua de enfriamiento sean menores que las necesarias para formar incrustaciones. De esta forma se impide que se excedan las solubilidades de las especies incrustantes. Esto se puede lograr pre tratando el agua, ablandándola con zeolita o cal, eliminando iones o limitando los ciclos de concentración de la torre por medio de purgas para reducir la concentración de los iones productores de incrustaciones.
- 2. Reduciendo la alcalinidad o el pH con ácido.** Ésta es una manera de eliminar iones, ya que se eliminan los iones carbonato y bicarbonato convirtiéndolos en CO_2 . Una ppm de ácido sulfúrico concentrado elimina 1 ppm de alcalinidad M.
- 3. Alterando el diseño o la operación del sistema.** El potencial de formación de incrustaciones puede reducirse considerablemente efectuando cambios en el diseño del sistema o efectuando cambios mecánicos.
- 4. Aplicando inhibidores químicos de incrustaciones.** Los inhibidores químicos de incrustaciones pueden actuar de varias maneras: inhibición umbral, modificación del cristal, quelación, dispersión o acondicionamiento para formar lodos en vez de incrustaciones duras.
 - La modificación del cristal es una forma de inhibición umbral en que una cantidad sub-estequiométrica de inhibidor (es decir, <1 ppm de inhibidor por ppm de óxido de hierro incrustante en el agua) demora la precipitación. El agente de modificación del cristal deforma la estructura cristalina de las incrustaciones de modo que

éstas no lleguen a ser adherentes. Estos agentes pueden ser materiales orgánicos conteniendo fósforo o dispersantes orgánicos.

- Los agentes quelantes reaccionan con los iones formadores de incrustaciones formando un complejo iónico soluble que impedirá la precipitación de las incrustaciones que contengan los iones quelados. En el agua de enfriamiento, los polifosfatos y los dispersantes aniónicos son los agentes quelantes más usados para Fe^{+2} , Mn^{+2} y Ca^{+2} .

Otros agentes quelantes, tales como el EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) y el NTA (ácido nitrilotriacético), reaccionan también con los iones para formar complejos estables muy solubles que no tienden a formar incrustaciones. Estos son más comunes en el tratamiento de agua de calderas.

- Los acondicionadores de incrustaciones modifican la estructura cristalina de una incrustación mediante la inclusión de un inhibidor en la red cristalina para formar un tipo de depósito voluminoso, poco adherente en vez de una incrustación dura. Entre los agentes acondicionadores típicos se encuentran los ligninos, taninos y polímeros de acrilato.

La inhibición de incrustaciones por el efecto umbral y la modificación del cristal pueden lograrse normalmente con concentraciones bajas de inhibidores (menores que la relación 1:1 de producto químico a incrustación). El grado de inhibición variará dependiendo de la magnitud de la condición incrustante. Las dosis se tendrán que aumentar al empeorar la condición incrustante (aumento de pH, flujo calórico, alcalinidad P y M, iones de dureza).

2.7.2. Métodos generales para inhibir la corrosión

Como se sabe los cuatro componentes básicos de una pila de corrosión son: el ánodo, el cátodo, el circuito a través del metal entre el ánodo y el

cátodo por donde circulan los electrones y el electrolito. Se deben completar los cuatro elementos de un circuito de corrosión para que ésta pueda tener lugar. Esto implica, entre otras cosas, una reacción anódica y catódica. Por lo tanto, cualquier compuesto químico aplicado al agua que detenga la reacción anódica detendrá la corrosión; como corolario, cualquier material agregado que reduzca la reacción catódica reducirá la corrosión. La clasificación de inhibidores químicos se basa en la forma en que el inhibidor afecta la pila de corrosión. Así pues, los inhibidores químicos se clasifican en tres grupos grandes:

- Inhibidores anódicos
- Inhibidores catódicos
- combinación de inhibidores anódicos y catódicos e inhibidores orgánicos.

Inhibidores anódicos

Los inhibidores de corrosión anódicos funcionan extinguiendo la reacción anódica para cortar el circuito electroquímico. Deben detener totalmente las reacciones de oxidación en el ánodo, ya que de lo contrario no disminuirán las velocidades de corrosión. La pérdida de metal se concentrará en cualquier superficie anódica restante y producirá picaduras. Por lo tanto, es importante mantener en todo momento cantidades suficientes de inhibidor anódico en el sistema para impedir el ataque por picaduras.

Los inhibidores anódicos pueden clasificarse en dos categorías, basándose en el mecanismo de inhibición. La primera clase de inhibidores anódicos funciona reaccionando con los iones metálicos que se disuelven, tales como Fe^{+2} , para formar una sal o complejo insoluble que precipita en forma de película en las zonas anódicas (por ejemplo, bicarbonato, fosfato, fosfonato de hierro). La segunda clase (cromato, nitrito, etc.) fomenta la oxidación rápida de la superficie del metal formando una capa muy

adherente y delgada de óxidos metálicos. El potencial de la capa de productos de corrosión formada por estos inhibidores se aproxima al potencial del cátodo. Así pues, al disminuir la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, se reduce la fuerza impulsora para la corriente de corrosión y oxidación del metal.

Inhibidores catódicos

Los inhibidores catódicos reducen generalmente la velocidad de corrosión formando una barrera o película en el cátodo, restringiendo la reducción de oxígeno en la superficie catódica para completar la reacción de corrosión. Debido a que la velocidad de corrosión general está bajo control catódico, se reduce proporcionalmente a la reducción de la superficie catódica.

Combinación de inhibidores anódicos y catódicos e inhibidores orgánicos

Esta categoría incluye materiales orgánicos que forman y mantienen una barrera entre las fases del agua y del metal para prevenir la corrosión. Esta película es sustancialmente más gruesa que las películas establecidas con la aplicación apropiada de inhibidores inorgánicos. Uno de los peligros inherentes de este método es que una pequeña rotura producida en la película continua permite que el agente corrosivo ataque la zona sin proteger, produciendo una penetración rápida del metal.

Otra serie de inhibidores son los aplicados para reducir la corrosión del cobre y aleaciones de cobre. Estos inhibidores son compuestos orgánicos que reaccionan con la superficie del metal y forman películas protectoras sobre el cobre y aleaciones de cobre. Forman una película extremadamente delgada.

❖ Forma en que actúan los inhibidores de corrosión químicos

Un programa de control de corrosión eficaz depende normalmente de inhibidores específicos para detener la reacción anódica, disminuir la

reacción catódica o hacer ambas cosas a la vez. Aunque estos inhibidores se citan como anódicos o catódicos, los mecanismos exactos de funcionamiento no se conocen exactamente. En varios casos, un inhibidor puede mostrar características tanto anódicas como catódicas, pero una de ellas puede predominar sobre la otra. Los inhibidores más comunes usados como protectores contra la corrosión en sistemas de agua de enfriamiento se citan a continuación:

- **Principalmente anódicos**
 - Cromato
 - Nitrito
 - Ortofosfato
 - Bicarbonato
 - Silicato
 - Molibdato

- **Principalmente catódicos**
 - Carbonato
 - Polifosfato
 - Fosfonato
 - Zinc

- **Tanto anódicos como catódicos**
 - Formadores de películas orgánicas

En esta parte trataremos la forma en que actúa cada inhibidor para reducir la corrosión del sistema.

INHIBIDORES ANÓDICOS

Según hablamos anteriormente, los inhibidores anódicos operan mediante mecanismos de oxidación o precipitación. Es importante conocer los

aspectos positivos de estos inhibidores y sus limitaciones para establecer controles en los programas de inhibición de la corrosión en agua de enfriamiento.

El cromato ha sido uno de los inhibidores anódicos más usados. Sigue siendo muy eficaz. No obstante, a medida que aumentan las regulaciones ambientales, el ortofosfato ha venido desempeñando una función cada vez más importante. El nitrito, bicarbonato y silicato reciben menos consideración que el cromato u ortofosfato para sistemas de enfriamiento de recirculación abiertos debido al costo y a las limitaciones técnicas, incluyendo el potencial de formación de depósitos, efecto de nutrición en los microbios y eficacia limitada, particularmente los silicatos y molibdatos. Los inhibidores que no son a base de cromatos por lo general requieren unos intervalos de control más reducidos que los cromatos.

- **Inhibidores anódicos de oxidación.**

Cromato.- El ión cromato es un agente oxidante fuerte que acelera la oxidación del ión ferroso a ión férrico formando rápidamente una capa delgada y muy adherente, casi invisible, de óxido de hierro. Los óxidos metálicos producidos en esta reacción se pasivan y son relativamente inertes como para seguir oxidándose o corroyéndose.

Debe haber una concentración suficiente de cromato presente en el sistema para oxidar completamente todas las zonas anódicas a un potencial más noble. Si no se cubren todas las zonas anódicas disponibles con una capa de productos de corrosión polarizados se producirá un ataque localizado por picadura. Se necesitan concentraciones de cromato superiores a 100 ppm para producir esta capa en aguas de enfriamiento con un pH de 6,5 a 7,5. En los programas alcalinos se permiten concentraciones menores. Por esta razón, los inhibidores a base de cromato se formulan normalmente con un inhibidor catódico, tal como el zinc, para usar en este intervalo de pH. Los cromatos se pueden usar solos en programas alcalinos o en sistemas cerrados en que se mantengan altas concentraciones.

El cromato es muy tóxico para los peces y se sospecha que es un carcinógeno para los seres humanos si se inhala.

Nitrito.- El nitrito oxida las superficies de acero dulce formando una capa de productos de corrosión extremadamente delgada y muy tenaz de una manera similar al cromato. Se necesitan concentraciones mucho mayores de nitrito en comparación con las de cromato (2 a 3 veces más). Los nitritos se usan principalmente en sistemas cerrados. Las mezclas de inhibidores basadas en nitritos están tamponadas normalmente entre valores de pH de 8 y 11.

Los microorganismos convierten el nitrito (NO_2) en nitrato (NO_3). El nitrato no es un inhibidor de corrosión eficaz para el acero dulce. El ácido hipocloroso, procedente de la cloración, oxida el nitrito a una forma inactiva de nitrato. Los hidrocarburos y glicoles no afectan el rendimiento del nitrito.

- **Inhibidores anódicos formadores de precipitados y películas**

Ortofosfato.- El ortofosfato forma un complejo insoluble con los iones metálicos disueltos, tales como Fe^{+2} , que se depositan en zonas anódicas. El ortofosfato férrico es mucho más adherente y menos sensible al pH que otros inhibidores anódicos. La película se forma mejor en un intervalo de pH comprendido entre 6,5 y 7,0. Entre otras ventajas adicionales de los programas de inhibidores a base de ortofosfato en medio ácido se incluyen la disminución de potencial para la formación de incrustaciones de ortofosfato cálcico (dependiendo de su naturaleza como inhibidor catódico mínimo) y la mayor tendencia a una corrosión general de tipo decajado. La dosis típica mínima en condiciones de pH neutro es mayor que 10 ppm en forma de PO_4 .

Silicatos. Los silicatos reaccionan con los iones de metal disueltos en el ánodo. El complejo resultante de ión metálico/silicato forma un gel que se

deposita en las zonas anódicas. El gel formado sobre las zonas anódicas es muy tenaz y no es sensible al pH comparado con otros inhibidores usados comúnmente. Las propiedades de inhibición de los silicatos aumentan al aumentar la temperatura y el pH. Los silicatos tienen propiedades surfactantes, lo que les permite penetrar los tubérculos e inhibirla corrosión activa.

Molibdatos. La tecnología de los molibdatos es bastante nueva, y sólo recientemente se ha averiguado que los molibdatos pueden usarse como inhibidores de corrosión. La interpretación de los mecanismos está evolucionando a medida que se desarrolla la tecnología.

El molibdeno está en el Grupo VIA de la tabla periódica, junto con el cromo. Se ha estudiado extensivamente como alternativa del cromato.

Muestra efectos inhibidores en la corrosión general y localizada de metales ferrosos y no ferrosos. A diferencia del cromato, el molibdato tiene una capacidad muy pequeña de oxidación.

El molibdato es un inhibidor de corrosión eficaz para las aleaciones metálicas. Se acepta generalmente que la inhibición de la corrosión del hierro se logra cuando el molibdato queda adsorbido en la superficie porosa del óxido, probablemente por medio de un proceso de intercambio iónico, seguido por la formación de una película insoluble que se cree que es de molibdato férrico (FeMoO_4). La adsorción produce una capa impermeable a otros aniones, particularmente cloruros y sulfatos.

Los molibdatos se usan en la actualidad en combinación con otros inhibidores (nitrito, zinc, benzotriazol, ortofosfato, mercaptobenzotiazol y otros), produciendo una mayor pasivación y mejorando un desequilibrio de costos que de lo contrario sería inaceptable.

INHIBIDORES CATÓDICOS

Normalmente se usan tres tipos de inhibidores catódicos en los sistemas de agua de enfriamiento: zinc, polifosfato y alcalinidad.

Zinc.- Los iones solubles de zinc cargados positivamente (Zn^{+2}) son atraídos por las zonas catódicas debido al entorno iónico negativo de la superficie. Los iones solubles de zinc reaccionan con los iones hidróxido libres que rodean el cátodo para formar $Zn(OH)_2$ insoluble. El $Zn(OH)_2$ precipita en la superficie catódica y forma una película adherente que impide que el O_2 llegue al metal catódico, disminuyendo así la velocidad de corrosión.

La formación de una película de hidróxido de zinc se ve grandemente afectada por el pH. Si el pH es muy ácido, el zinc dejará la superficie y se disolverá. Si el agua de enfriamiento es demasiado alcalina, el zinc precipitará en el agua. Quedará poco, si es que queda algo, para la formación de la película en las zonas catódicas. En la mayoría de las aguas, el zinc empezará a precipitar a un pH superior a 7,8 cuando no haya estabilizadores de zinc apropiados.

El rendimiento de los inhibidores de zinc puede verse afectado drásticamente por la contaminación del agua de enfriamiento. Las fugas del proceso de H_2S harán precipitar ZnS en el agua. Las fugas de hidrocarburos pueden absorber los iones de zinc del agua de enfriamiento, haciendo que no haya zinc disponible para la formación de películas.

El zinc, a altas concentraciones de 3-5 ppm, se usa normalmente como el único inhibidor de corrosión en programas de agua de enfriamiento alcalinas donde la corrosividad natural disminuye con un pH alto. El zinc también puede mezclarse con otros inhibidores de corrosión tales como el cromato para mejorar el rendimiento en programas de agua de enfriamiento ácida. El zinc es uno de los mejores y más económicos inhibidores de corrosión y se usa en muy diversas clases de aplicaciones. Las restricciones ambientales pueden limitar el uso del zinc en algunas aplicaciones.

Polifosfatos.- Los polifosfatos ligan los iones de calcio, zinc y otros iones divalentes para formar una partícula coloidal cargada positivamente. Este complejo cargado positivamente emigra a las zonas catódicas, donde precipita para formar una película inhibidora de corrosión. Los polifosfatos requieren la presencia de un ión divalente, tal como el calcio, para funcionar como inhibidores de corrosión. El complejo coloidal de polifosfato cálcico se difunde lentamente por el agua, de modo que se necesitan altas concentraciones para la formación inicial de la película. Para formar eficazmente el complejo de polifosfato, el ión divalente (calcio en la mayoría de los casos) debe estar presente en concentraciones suficientes. Dependiendo del polifosfato usado, la concentración mínima de calcio está comprendida típicamente en un intervalo de 50 a 100 ppm. La película que se deposita en las zonas catódicas incluye un coprecipitado de polifosfato cálcico y carbonato cálcico. El tratamiento combinado de zinc y polifosfato forma una película más adherente que la de polifosfato solamente. La presencia de zinc en un programa de polifosfatos también aumenta la velocidad a la que se forma la película de inhibidor. El control estricto del pH es esencial para los programas de polifosfatos. La película inhibidora formada es sensible al pH y puede resultar atacada por fluctuaciones en pH ácido. Las fluctuaciones en pH alcalinos pueden producir la precipitación en agua de complejos de polifosfato cálcico.

Fosfonatos.- Los fosfonatos se introdujeron inicialmente como inhibidores de incrustaciones para sustituir a los polifosfatos. En los fosfonatos, el fósforo (P) está unido al carbono (C), formando un enlace -C-P-, en vez de a un oxígeno (enlace -P-O-P-), como en los polifosfatos. El enlace -C-P- tiende a ser más resistente a la hidrólisis que el enlace -P-O-P-, disminuyendo la velocidad de descomposición. Los fosfonatos inhiben de forma excelente la precipitación de calcio, por lo que son adecuados para el uso con aguas duras en intervalos de pH alcalinos.

Se ha descubierto recientemente que cuando se usan ciertas combinaciones de fosfonatos junto con polímeros que controlan la precipitación de fosfonato de calcio, pueden proporcionar protección contra la corrosión en aguas duras en intervalos de pH alcalinos. El mecanismo exacto por el que los fosfonatos pasivan el acero dulce no está aún claro. Parece que forman una película pasiva catódica compuesta principalmente por fosfonatos cálcicos. Como los programas con fosfonatos operan a mayores alcalinidades, se reduce a un mínimo la reducción del pH en base a los núcleos de picadura por hidrólisis de los iones ferroso y férrico. Esto disminuye la posibilidad de una corrosión por picadura.

Carbonato.- Cuando el agua de enfriamiento contenga suficiente calcio y alcalinidad a un pH alto (8,0-9,0), hay que tener en cuenta las incrustaciones debidas al carbonato cálcico. El alto pH localizado causado por la formación de OH⁻ en el cátodo puede aumentar el potencial de formación de incrustaciones. Aunque se debe evitar la acumulación masiva de carbonato cálcico, cierto nivel de formación de incrustaciones puede proporcionar una protección deseable contra la corrosión. No se recomienda aumentar la alcalinidad echando cal para fomentar la formación de incrustaciones. Los programas de agua de enfriamiento alcalina contienen inhibidores de incrustaciones para reducir a un mínimo la formación de carbonato cálcico. Así pues, el papel del carbonato cálcico como inhibidor catódico es menor en la tecnología de tratamiento actual.

2.7.3. Métodos generales para prevenir el Ensuciamiento

El control del potencial de ensuciamiento en los sistemas de agua de enfriamiento constituye un factor importante para optimizar el rendimiento de transferencia de calor. Los agentes de ensuciamiento contribuyen a la demanda de inhibidores de corrosión, interfieren con la eficacia de los mismos, inician la corrosión y reducen el rendimiento de transferencia de calor.

Se deben considerar cuatro factores al diseñar un programa de control de ensuciamiento:

- Composición química del agua.
- Ajustes mecánicos
- Inhibidores químicos
- Metalurgia

El programa de más éxito debe combinar los elementos importantes de cada uno de estos factores para cumplir con las necesidades de la planta.

2.7.3.1. Ajustes de la composición química del agua

El potencial de ensuciamiento de las partículas sólidas en suspensión no se corrige fácilmente cambiando la composición química del agua, aunque se pueden efectuar ciertos ajustes para reducir el potencial de ensuciamiento de un cierto constituyente:

Los ajustes de la composición química del agua ejercen la máxima influencia sobre el control de la corrosión y formación de incrustaciones; los cambios mecánicos y los inhibidores de ensuciamiento son más importantes para controlar el potencial de ensuciamiento.

2.7.3.2. Ajustes mecánicos

Ciertos ajustes mecánicos resultan muy eficaces para controlar el potencial de ensuciamiento del sistema. La clarificación del agua, filtración de corrientes laterales, uso de deflectores, limpieza con aire comprimido, inversión del flujo del agua de enfriamiento, aplicación de vacío en estanques de torres de enfriamiento y las relaciones espaciales constituyen algunas de las áreas que deben entenderse y considerarse al recomendar programas.

Clarificación del agua

La clarificación del agua de reemplazo de un sistema de enfriamiento es una práctica muy común. El proceso de clarificación puede comprender un clarificador convencional para eliminar los sólidos en suspensión o puede usar un ablandamiento parcial con cal. En aguas de reemplazo con un alto contenido de sólidos en suspensión, la clarificación normalmente es el medio mas económico de prevenir la sedimentación de sólidos en el sistema.

Otro método de eliminar sólidos en suspensión del agua de reemplazo consiste en el uso de filtros. Éstos pueden contener lechos de un solo medio o de mezcla de medios. Su rendimiento puede aumentarse por filtración directa o indirecta.

Filtración de corrientes laterales

La filtración de corrientes laterales constituye un método eficaz de reducir a un mínimo los problemas causados por materia en suspensión. La adopción de un filtro de corriente lateral no sólo resulta en un mejor rendimiento de la operación, sino también en una disminución del costo de los productos químicos. La pérdida de compuestos químicos de tratamiento de agua por medio de la adsorción en materiales en suspensión puede reducirse usando un filtro de corrientes laterales.

El tamaño del filtro lateral usado depende de la cantidad de sólidos en suspensión, pero debe ser suficientemente grande como para tratar del 1 al 5% del caudal de recirculación. Debe tener un tamaño tal que todo el agua del sistema pase por el filtro al menos una vez en 24 horas. El retrolavado de los filtros se puede efectuar con agua de la torre de enfriamiento para reducir la cantidad de agua desechada. Este caudal de retrolavado debe descargarse en un sistema de alcantarillado y no debe volver al sistema de enfriamiento. Resaltando las siguientes ventajas se puede justificar su necesidad:

- Mejor transferencia de calor
- Ahorros en el control microbiológico (como resultado de eliminar organismos y agentes de nutrición del agua del sistema por filtración)
- Ahorros en los costos de compuestos químicos debido a una menor adsorción y a una pérdida de ellos en la materia en suspensión.

2.7.3.3. Inhibidores químicos

Los inhibidores de ensuciamiento químicos completan el programa total para reducir a un mínimo el potencial de ensuciamiento en un sistema de agua de enfriamiento. Los inhibidores de ensuciamiento se clasifican en tres grupos principales:

- Dispersión por refuerzo de cargas o estabilización estérica
- Reducción de la tensión superficial
- Agentes quelantes

Dispersión por refuerzo de cargas

Los sólidos en suspensión de los sistemas de agua de enfriamiento tienen una cierta probabilidad de colisión. Si dos partículas chocan, con frecuencia quedan adheridas entre sí. A esto se le denomina aglomeración. Al aglomerarse las partículas, el tamaño de las mismas aumenta. Al continuar este proceso, disminuye la capacidad de la partícula de permanecer en suspensión en el agua, y aumenta el potencial de sedimentación. Específicamente, la dispersión es un proceso usado para impedir la precipitación de sólidos. El uso de este término implica la existencia de un material sólido que no sedimenta en un período especificado. La dispersión puede producirse por la repulsión de las partículas debida a cargas electrostáticas o efectos estancos. Las partículas resultantes serán suficientemente pequeñas como para producir una suspensión estable. Estudios recientes han demostrado que ciertos polímeros limitan la aglomeración de partículas.

Un dispersante puede afectar la carga de la superficie de las partículas o crear una barrera física para la aglomeración.

Los productos químicos que son adsorbidos por las partículas y aumentan la carga existente se denominan reforzadores de cargas. El aumento de la relación carga a masa de las partículas produce un mayor efecto de repulsión entre las partículas. La repulsión entre partículas de la misma carga es similar a la repulsión observada cuando se juntan dos polos idénticos de un imán. Cuando más se refuerce la carga de las partículas, menor será el potencial de colisión, aglomeración y sedimentación subsiguiente de las partículas. No obstante, cuanto mayor sea la dureza del agua, menos eficaz será el efecto de refuerzo de carga. Algunos polímeros pueden seguir siendo eficaces en aguas duras debido a que forman capas espesas que impiden físicamente la colisión entre partículas. A esto se le denomina estabilización estérica.

Reducción de la tensión superficial

Las moléculas de agua se atraen entre sí con gran fuerza, y se alinean en la superficie. Esta fuerte atracción crea la tensión superficial. Estas moléculas tienen un extremo hidrófilo (atraído por el agua) y un extremo hidrófobo (repelido por el agua). El extremo hidrófobo, cuando entra en contacto con el agua de enfriamiento, es repelido por el agua y es forzado a concentrarse en la superficie externa del agua. Ésta es la forma en la que un surfactante descompone las fuerzas de atracción del agua en la superficie y reduce la tensión superficial.

Cuanto menor sea la tensión superficial, menor será la energía necesaria para hacer pasar una partícula a la fase acuosa. Se dice a veces que este fenómeno consiste en mejorar la humectabilidad. Una partícula que pueda pasar al agua más fácilmente es más probable que pueda eliminarse del punto donde tenga lugar el ensuciamiento.

Las partículas hidrófobas serán atraídas por el extremo hidrófobo de la molécula de reducción de la tensión superficial y luego serán transportadas por el agua de recirculación. Esta característica de emulsificación es el mecanismo usado para eliminar hidrocarburos que han ensuciado superficies metálicas.

Agentes quelantes

El término quelación se aplica generalmente al fenómeno por el que se mantienen en forma soluble iones o compuestos. Las dosis estequiométricas de inhibidor necesarias para este tipo de inhibición son muy costosas y no son las más indicadas para la mayoría de las aplicaciones de agua de enfriamiento.

2.7.4. Métodos generales para prevenir el Ensuciamiento Microbiano

Los agentes químicos usados para controlar las poblaciones de microbios pueden agruparse en tres clases generales: oxidantes, no oxidantes y biodispersantes.

Oxidantes.- Los biocidas oxidantes comprenden compuestos tales como el cloro, bromo, dióxido de cloro, ozono, hipoclorito y compuestos orgánicos de cloro y bromo de desprendimiento lento. Aunque existen grandes diferencias químicas entre estos compuestos, su forma principal de actuar consiste en oxidar los compuestos de los microorganismos. No se conoce ningún organismo que se haya hecho inmune o haya desarrollado otro tipo de resistencia a un biocida oxidante. Los oxidantes son eficaces contra todos los tipos de microorganismos importantes en el tratamiento del agua de enfriamiento; es decir, bacterias, hongos, algas y levaduras.

No oxidantes.- Este grupo comprende un gran número de compuestos orgánicos que interfieren con el metabolismo del microorganismo o perturban la membrana de la célula. Se cree que algunos actúan

principalmente rompiendo y disolviendo las membranas de las células y otros desnaturalizando (desenrollando o deformando) las proteínas.

A diferencia de los biocidas oxidantes, los agentes no oxidantes son más eficaces cuando se aplican en concentraciones altas a moderadas. A bajas concentraciones, la mayoría de estos compuestos se biodegradan rápidamente, es decir, los organismos son capaces de metabolizarlos. De hecho, los microorganismos pueden adaptarse a muchos biocidas no oxidantes y usarlos como una fuente de carbono, y por tanto como sustancias nutritivas. Esta adaptabilidad es particularmente cierta si el organismo desarrolla una tolerancia si está expuesto a bajas concentraciones del biocida durante un período prolongado. Esta acumulación de tolerancia ha desembocado en la práctica de aplicar de forma alternativa distintos tipos de biocidas no oxidantes para impedir que se establezca una población resistente de microorganismos.

Un asunto importante en lo que se refiere al uso de biocidas orgánicos no oxidantes es su persistencia en el medio ambiente. Es necesario considerar las consecuencias medioambientales antes de que los biocidas puedan obtener las aprobaciones necesarias de la EPA para su uso en el tratamiento de agua de enfriamiento. Todos los biocidas no oxidantes deben usarse con controles cuidadosos para prevenir cualquier efecto perjudicial en los peces y otras formas de vida acuática.

Los biocidas no oxidantes se diferencian con respecto a su eficacia contra tipos específicos de organismos y pH del agua. Muchos biocidas no oxidantes actúan solamente contra bacterias, hongos o algas. El pH también ejerce una influencia considerable en el carácter específico y actividad de cada biocida.

A menudo se usa una combinación de productos cuando es necesario controlar distintos tipos de microorganismos en el agua de enfriamiento.

TABLA II: Eficacia de los biocidas no oxidantes más comunes

Biocida	Aplicación principal	Intervalo de pH eficaz
Sulfato de cobre	Algas	6 – 7,5
Bistiocianato de metileno (MBT)	Bacterias	6 – 7,5
Glutraldehido	Bacterias	7 – 9,5
Carbamatos	Bacterias y hongos	7 – 9,5
Sales de amonio cuaternario	Gama amplia	6 – 9,5
Cocodiamina	Bacterias	6 – 9,5
Óxido de tributilestaño (TBTO)	Hongos y algas	7 – 9,5
Triazina	Hongos y algas	7 – 9,5
Dodecilguanidina	Hongos, bacterias y algas	8 – 9,5
Dibromonitrilopropionamida (DBNPA)	Bacterias	6 – 9,0
Metrodinazol	Bacterias (reductoras de sulfatos solamente).	6 – 8,5
Isotiazolonas	Bacterias y hongos	6 – 9,5

Biodispersantes.- El uso de biodispersantes para mejorar el control microbiológico del sistema de enfriamiento constituye un aspecto importante de todos los programas de biocontrol. Estos productos no destruyen los microorganismos, sino que los ponen en suspensión en el agua para que puedan ser arrastrados fuera del sistema o ser destruidos con más facilidad por los biocidas. Los dispersantes también previenen o retardan la adhesión de los microorganismos a las superficies de transferencia de calor. La característica principal de los biodispersantes es su capacidad para eliminar los crecimientos microbianos de las superficies de transferencia de calor y colaborar en el mantenimiento de la limpieza del sistema.

2.8. TÉCNICAS DE MONITOREO Y CONTROL DE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

La corrosión, incrustaciones, ensuciamiento y crecimiento microbiano son amenazas constantes para los sistemas de agua de enfriamiento que no deben ignorarse. Si no se controlan, reducen el rendimiento de enfriamiento y la productividad de la planta, y pueden causar un gasto enorme de

energía. Incluso los sistemas que están parcialmente corroídos o sucios consumirán más energía que un sistema limpio y bien controlado, simplemente para proporcionar la misma cantidad de enfriamiento.

Los programas de tratamiento de agua de enfriamiento impiden este desperdicio de energía, manteniendo así la productividad de la planta y alargando la duración de los equipos de agua de enfriamiento. El éxito del programa de tratamiento depende en gran medida de la cantidad de control ejercido sobre cada uno de los parámetros críticos. Los agentes químicos de tratamiento del agua actúan de forma adecuada cuando se mantienen dentro de las especificaciones de pH, alcalinidad, conductividad, dureza, actividad microbiológica y otras concentraciones en el agua.

2.8.1. Ciclos de concentración

El agua perdida en la torre de enfriamiento por evaporación es agua pura. Todos los sólidos disueltos quedan en la torre y se acumulan en el sistema de enfriamiento. Esta acumulación de sólidos disueltos se denomina mecanismo de concentración del sistema de enfriamiento. Las relaciones de concentración son importantes porque el programa del agua de enfriamiento está diseñado para operar dentro de los intervalos específicos de los ciclos de concentración.

Monitoreo.- El número de ciclos de concentración, o relación de concentración, del sistema de enfriamiento puede calcularse de dos formas distintas. La primera consiste en comparar la concentración de un cierto ión soluble en el agua de recirculación con la concentración en el agua de reposición. Por ejemplo, si la concentración de un ión en el agua de recirculación es de 100 ppm, y la concentración de ese mineral en el agua de reposición es de 50 ppm, los ciclos de concentración serían 2 (100 dividido por 50). Para que este método de cálculo sea exacto, debe basarse en un mineral que no esté sujeto a cambios químicos en el sistema.

La segunda forma de calcular los ciclos de concentración consiste en dividir el caudal del agua de reposición del sistema por el caudal de purga del sistema. Por ejemplo, si el caudal de agua de reposición del sistema es de 500 galones por minuto y el caudal de purga del sistema es de 100 galones por minuto, los ciclos de concentración (o relación de concentración) serían 5 (500 dividido por 100).

Control. Hay dos métodos para controlar la concentración de los agentes químicos y minerales críticos de un sistema de agua de enfriamiento:

1. Regulación del caudal de suministro de los agentes químicos.
2. Regulación del caudal de purga.

La regulación del caudal de suministro de agentes químicos ajusta las concentraciones de agentes químicos individuales. Sólo afecta a un agente químico cada vez.

El caudal de purga es la cantidad de agua de recirculación purgada o eliminada del sistema en un tiempo dado. El caudal de purga se expresa normalmente en términos de un volumen unitario por tiempo (por ejemplo, m³/h o GPM). Aumentando el caudal de purga se reduce la concentración de todos los agentes químicos y sólidos del sistema, porque el agua eliminada es reemplazada por agua de reposición menos concentrada. Al reducir el caudal de purga se aumenta la concentración de todos los agentes químicos y sólidos en el sistema, ya que la cantidad de agentes químicos y sólidos que se acumulan en la torre de enfriamiento excede la cantidad que se elimina en la purga.

En lo que se refiere al ajuste del caudal de purga para alterar la concentración de un agente químico o mineral es importante recordar lo siguiente: La concentración de una sustancia no puede cambiarse mediante la purga sin afectar la concentración de cada una de las otras sustancias del sistema. Por ejemplo, si la alcalinidad desciende por debajo del intervalo necesario para el tratamiento eficaz de los agentes

químicos, el caudal de purga puede disminuirse para hacerla subir de nuevo. No obstante, al hacer esto, aumentaría la concentración de los otros valores químicos del agua. Así, al aumentar o disminuir el caudal de purga, habrá que reajustar todas las concentraciones críticas del sistema fuera del intervalo prescrito.

2.8.2. Medidas críticas y control de sistemas de enfriamiento.

Cuando se diseña un programa de tratamiento de agua para un sistema de enfriamiento, se deben especificar las dosis, los puntos de suministro y los intervalos de suministros correctos. Una vez que haya empezado el programa, se deben seguir cuidadosamente dichas especificaciones. Además, se deben monitorear las concentraciones químicas del agua y mantenerse dentro de intervalos específicos. Un programa eficaz depende de estos ajustes. Algunas de las condiciones críticas del agua de enfriamiento que requieren monitoreo y control son:

- pH del sistema
- alcalinidad
- conductividad
- dureza
- crecimiento microbiano
- contenido de cloro o bromo
- concentración del agente químico de tratamiento

2.8.2.1. El pH y la alcalinidad

Monitoreo. El pH del agua de enfriamiento es una medida del equilibrio ácido/base. Es uno de los factores más importantes de un programa de control del sistema de enfriamiento. La adición de ácido disminuye el pH, y la adición de líquidos alcalinos lo aumenta. Un pH igual a 7 es "neutro". La eficacia de un programa de tratamiento de agua depende de un control constante del pH y de la alcalinidad.

El monitoreo del pH es sencillo con ayuda de un medidor de pH. La importancia de este parámetro del agua de enfriamiento obliga a monitorearlo casi continuamente.

Control. Las grandes variaciones del pH de un sistema indican un desequilibrio peligroso de ácidos productores de corrosión y minerales productores de incrustaciones. En la mayoría de los casos, se debe agregar ácido para mantener el pH dentro del intervalo de control recomendado, ya que la concentración de minerales alcalinos en el agua de recirculación aumenta en la torre de enfriamiento durante el proceso de evaporación. Para controlar esta acumulación, se agrega continuamente un ácido apropiado tal como ácido sulfúrico a fin de contrarrestar los aumentos de pH y alcalinidad. No obstante, este caudal de suministro debe controlarse cuidadosamente ya que una descarga accidental de ácido puede causar una baja súbita de pH. Dicho descenso producirá una corrosión grave, ya que se eliminaría la película protectora de las superficies de metal, exponiendo la superficie a condiciones muy corrosivas.

2.8.2.2. Conductividad y dureza

Monitoreo. Al aumentar la concentración de sólidos disueltos en un sistema de recirculación abierto, también aumentarán las lecturas de conductividad. Si no se controla, esta condición puede producir la subsiguiente formación de incrustaciones, reducción de la transferencia de calor y un desperdicio de energía. La conductividad se mide con un medidor electrónico.

La cantidad de dureza (calcio y magnesio) se mide mediante un método sencillo de titulación. Todos los programas de agua de enfriamiento están diseñados para que funcionen dentro de los intervalos específicos de dureza, por lo que es importante que se lleve

a cabo la prueba de dureza y se controlen las concentraciones de dureza del sistema.

Control. Los intervalos correctos de conductividad y dureza se mantienen normalmente aumentando o disminuyendo el caudal de purga. Cuando las concentraciones son demasiado bajas, se reduce la purga. Cuando las concentraciones son demasiado altas, se aumenta el mismo.

2.8.2.3. Concentración de oxidantes

Monitoreo. Históricamente el cloro ha sido el oxidante más común usado para el control microbiano. No obstante, si se agrega una cantidad errónea de cloro u otro oxidante se pueden provocar nuevos problemas en el sistema que pueden ser peores que las bacterias mismas. Por ejemplo, una cantidad de oxidante demasiado pequeña no destruirá todos los microbios del sistema y puede crear un problema enorme de babazas. Una cantidad excesiva de oxidante puede empezar a dañar la madera de una torre de enfriamiento mediante un proceso llamado deslignificación. Gracias a una prueba química sencilla se puede determinar el contenido de cloro u oxidante de un sistema. Los oxidantes deben estar comprendidos en el intervalo recomendado para controlar la población microbiana en un sistema de enfriamiento sin dañar otros equipos, También se dispone de monitores continuos en línea.

Control. El primer paso para controlar el cloro u otros oxidantes es asegurarse de que el suministro de oxidante esté bien conectado y suministre la cantidad adecuada. La cantidad de oxidante de un sistema se controla normalmente ajustando simplemente su caudal de suministro según los resultados obtenidos durante las pruebas normales de oxidantes.

2.8.2.4. Concentración de agentes químicos de tratamiento

La mayoría de los programas de tratamiento de agua incluyen una serie de agentes químicos para tratar la corrosión, incrustaciones, ensuciamiento y problemas microbiológicos. Estos agentes químicos se prescriben para cada sistema individual, basándose en sus características exclusivas. Estos agentes químicos deben agregarse en las dosis exactas prescritas, y sus concentraciones en el agua de recirculación deben comprobarse de forma frecuente y regular. Una cantidad excesiva de uno u otra cantidad demasiado pequeña de otro causará la falla del programa.

Monitoreo. Generalmente se usan pruebas sencillas para comprobar la concentración de cada agente químico de tratamiento en un programa. Siempre que las concentraciones sobrepasen los límites superior e inferior de los intervalos adecuados, será necesario hacer ajustes en el caudal de purga o caudal de suministro de agentes químicos. La tecnología más reciente proporciona materiales indicadores incluidos de los agentes químicos de tratamiento, haciendo más exacto y preciso el monitoreo de las dosis y concentraciones. El control más riguroso de las concentraciones de los agentes químicos proporcionará mejores resultados a un costo mínimo.

Control. Para monitorear y controlar los programas de tratamiento de agua de forma más sencilla y eficaz, se dispone de sistemas de control mecánico que miden y ajustan automáticamente las concentraciones químicas del agua en el sistema de enfriamiento. Estos sistemas de control están diseñados especialmente para ajustar automáticamente las concentraciones de agentes químicos, caudal de purga y caudales de suministro de agentes químicos para dar los mejores resultados a un costo mínimo. Se dispone de una gran variedad de sistemas, desde el más sencillo, donde sólo se mide la conductividad por medio de una

purga automática, hasta otros muy complejos. En los sistemas más complejos, se añaden ácidos y bases para controlar el pH, y la conductividad se ajusta mediante una purga automática. Los agentes químicos se agregan basándose en el agua de reposición o de purga medida.

III. DESARROLLO DEL TEMA

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El cloruro de hidrógeno se produce por la reacción directa de hidrógeno y cloro, por la reacción de cloruros de metal y ácidos, y como un derivado de muchos procesos industriales químicos como los hidrocarburos clorados.

Síntesis a partir del Cloro e Hidrógeno.

La planta química que es tema de nuestro estudio, emplea la síntesis del Hidrógeno (Desamalgamadores) y Cloro (Compresores), como fuente de producción total de ácido clorhídrico .

El Hidrógeno para su uso es previamente almacenado en un gasómetro y luego es alimentado mediante compresoras hacia la producción de síntesis de cloruro de hidrógeno.



Debido a que esta reacción es altamente exotérmica, la temperatura de llama de equilibrio para la reacción adiabática con proporciones estequiométricas de hidrógeno y cloro pueden alcanzar temperaturas superiores a 2490°C, para darse la reacción completa debe existir un exceso de hidrógeno. Por lo tanto si se controla la mezcla de gas de alimento apropiadamente, el gas del quemador puede contener más del 99% HCl en el proceso de producción. El gas formado entonces en la cámara de combustión fluye a través de un absorbedor/enfriador para producir un ácido con concentraciones del 30-35%. A su vez los absorbedores son refrigerados con agua enfriada procedente del sistema general de enfriamiento de planta. El HCl producto de este proceso es conocido como el ácido del quemador.

La planta de producción de HCl cuenta con cinco hornos de reacción tipo CARBONE LORAINE, dispuestos en paralelo los hornos 1, 2, 3 y 5, encontrándose en Stand By el horno 4, el cual no se emplea y será retirado de

planta. La producción actual de la planta es de 140 t/día, distribuidos de la siguiente manera:

Horno 5 : 80 t/día.

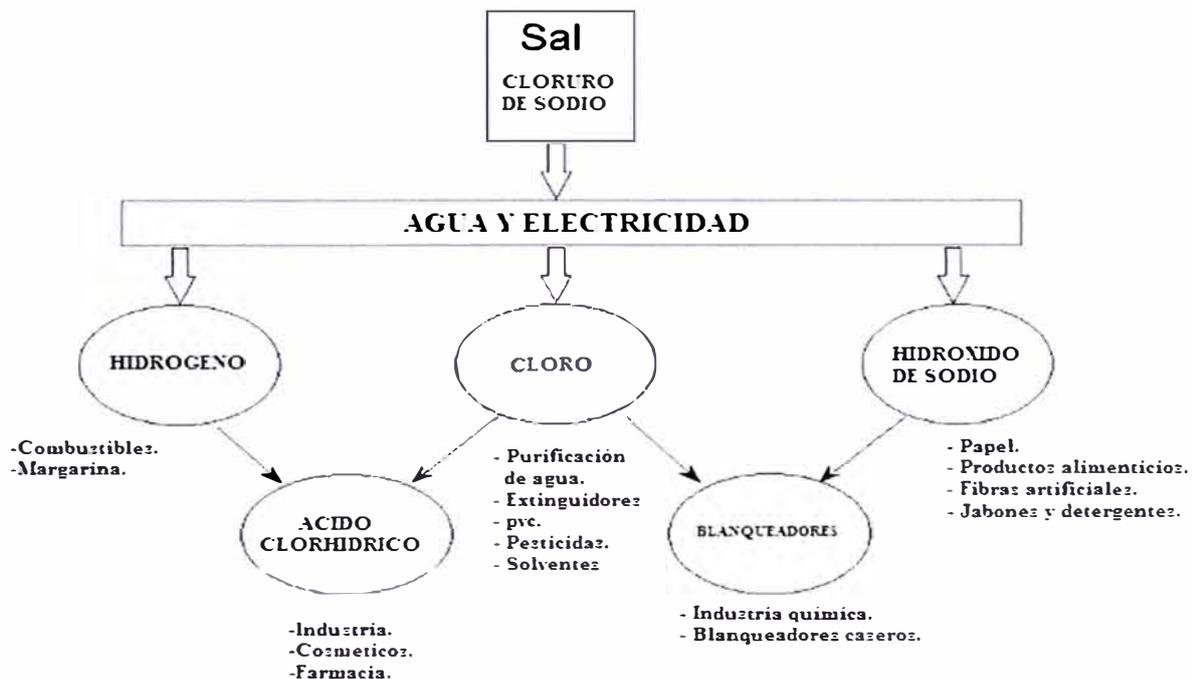
Horno 1,2 y 3 : 20 t/día.

3.2. DIAGRAMA DEL PROCESO

Se indica a continuación un esquema resumido de la obtención de ácido clorhídrico a partir de Cloro Gas e Hidrógeno (Figura 1), se anexa el proceso esquematizado de la planta que es materia de estudio (Ver Anexo 1).

FIGURA-1
DIAGRAMA DEL PROCESO
FORMA GENERAL ESQUEMATIZADA.
(Ver Anexo 1 – Diagrama de Planta)

EMPLEO DE PRODUCTOS QUÍMICOS DERIVADOS DE LA SAL



3.3.PROBLEMÁTICA ACTUAL DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE HORNOS

3.3.1. Objetivo

Efectuar un diagnóstico de la calidad de agua y su caracterización dentro de los sistemas de enfriamiento de la planta que es motivo de estudio, con la finalidad de poder conocer cuales son los problemas potenciales que se pueden presentar en la situación actual, y más adelante poder recomendar un programa de tratamiento que permita un control adecuado del sistema.

3.3.2. Descripción del sistema

La fuente de aprovisionamiento de agua lo constituyen 02 pozos ubicados dentro de los límites de las instalaciones de la planta aproximadamente a 300 metros hacia el Este. Los pozos en referencia son el pozo 10 y el pozo 11 y ambos están equipados con bombas de 400 GPM cada uno. Durante el proceso de levantamiento de información sólo uno de los pozos estaba operativo (Pozo 11).

Los pozos descargan mediante tuberías independientes de 8"0 para cada pozo hacia una cisterna cubicada, que sirve como pozo de almacenamiento del agua para su posterior distribución a los diferentes procesos de la planta.

La cisterna está construida bajo el nivel del suelo y es de concreto armado. En la parte lateral de la cisterna y en el subsuelo existen tres bombas para la distribución del agua a los diferentes servicios.

3.3.3. Distribución del agua

El agua de la cisterna se emplea para los diferentes procesos de la planta, siendo esta distribución de la siguiente manera (Ver tabla III).

Tabla III:

PROCESO	CAUDAL (m³/h)
Reposición Torre Sicrea	32
Reposición Torre Marley	15
Agua desmineralizada	12
Agua para otros procesos (agua recirculante)	800
Agua para hornos H1, H2, H3, H4* y H5 (agua recirculante)	600

(*) Horno H4 parado.

Torre Sicrea

Su diseño tiene la capacidad de prestar servicio de enfriamiento a los hornos H1, H2, H3, H4 y H5. Durante el estudio del sistema, la torre estaba prestando servicio a los hornos H3 y H5 únicamente.

Torre Marley

Da servicio a los Hornos H1, H2, Rectificadores, Chiller, D/B (Condensadores de Cloro), compresores de cloro, enfriadores de ácido sulfúrico, enfriadores de Soda y enfriadores de agua con soda.

Agua desmineralizada.

El agua de pozo es agua fuente para la producción de agua desmineralizada, que luego es empleada en al fabricación de Hipoclorito de Sodio (4-6 m³/h) y agua de proceso para la fabricación del HCl en los absorbedores (6-8 m³/h). Siendo aproximadamente un total de 12 m³/h, de acuerdo como se indicó en la Tabla 3.

3.3.4. Caracterización del agua del sistema

1. Fuente de suministro

(Fuente Control de Calidad – Planta)

(20.01.2003)

Tabla IV:

PROPIEDAD	UNIDAD	POZO 10	POZO 11
Temperatura	° C	23	22
PH	Unidad	7,12	7,21
Sólidos Totales	ppm	810	780
SiO ₂	ppm	26	27
CO ₂	ppm	25	26
Dureza Total	ppm CaCO ₃	450	445
Cl ₂ Residual	ppm Cl ₂	0	0
CO ₃ ⁼ Carbonatos	ppm CaCO ₃	0	0
HCO ⁻ Bicarbonatos	ppm CaCO ₃	245	245
Cl ⁻ (Cloruros)	ppm NaCl	120	110
Fe Total	ppm	0,01	0,01
Ca ⁺⁺ Calcio	ppm CaCO ₃	360	350
Mg ⁺⁺ Magnesio	ppm CaCO ₃	90	95
Conductividad	µs/cm	1068	1090
Sulfatos	ppm	130	148

2. Agua de Cisterna (Reposición) y Torres
 (Fuente Control de Calidad – Planta)
 (20.10.2003)

Tabla V:

PROPIEDAD	UNIDAD	CISTERNA	TORRE SICREA	
			ENTRADA	SALIDA
Temperatura	° C	23,8	38	32
pH	Unidad	7,37	7,68	7,57
Sólidos Totales	ppm	760	980	1120
SiO ₂	ppm	27	41,1	41,7
CO ₂	ppm	16	2.9	2.9
Dureza Total	ppm CaCO ₃	450	585	610
Cl ₂ Residual	ppm Cl ₂	0	0,7	0,7
CO ₃ ⁼ Carbonatos	ppm CaCO ₃	0	0	0
HCO ⁻ Bicarbonatos	ppm CaCO ₃	245	92	98
Cl ⁻ (Cloruros)	Ppm NaCl	110	380	440
Fe Total	ppm	0,05	0,6	0,7
Ca ⁺⁺ Calcio	ppm CaCO ₃	350	455	470
Mg ⁺⁺ Magnesio	ppm CaCO ₃	90	130	140
Conductividad	µs/cm	1075	1555	1780
Sulfatos	ppm	135	178	210

Tabla VI:

PROPIEDAD	UNIDAD	CISTERNA	TORRE MARLEY	
			ENTRADA	SALIDA
Temperatura	° C	23.8	36	30
PH	Unidad	7,37	7,6	7,7
Sólidos Totales	ppm	760	1150	1250
SiO ₂	ppm	27	46,7	46,6
CO ₂	ppm	16	2,1	1,9
Dureza Total	ppm CaCO ₃	450	680	740
Cl ₂ Residual	ppm Cl ₂	0	0,9	0,8
CO ₃ ⁼ Carbonatos	ppm CaCO ₃	0	0	0
HCO ⁻ Bicarbonatos	ppm CaCO ₃	245	86	80
Cl ⁻ (Cloruros)	ppm NaCl	110	480	490
Fe Total	ppm	0,05	0,7	0,7
Ca ⁺⁺ Calcio	ppm CaCO ₃	350	530	580
Mg ⁺⁺ Magnesio	ppm CaCO ₃	90	150	160
Conductividad	µs/cm	1075	1825	1984
Sulfatos	ppm	135	215	245

3.3.5. Diagnóstico del sistema.

De los análisis realizados a las fuentes de agua del sistema de enfriamiento y de la propia agua de cada sistema se puede establecer lo siguiente:

Ciclos de Concentración del sistema.

La relación de concentración de un ión transportado en un sistema de recirculación es simplemente la concentración de ese ión en el agua de recirculación dividido por la concentración del ión en el agua de reposición. A los ciclos de concentración también se le denomina Relación de Concentración.

CC = (Concentración del ión en la Recirculación/ Conc. del ión en la reposición)

Si analizamos los dos sistemas se tendrá lo siguiente:

Nota: Se está considerando la data de las tablas V y VI.

	CC (Dureza Total)	CC (Sílice)	CC (promedio)
Torre Sicrea	1,35	1,54	1,45
Torre Marley	1,64	1,72	1,68

- Se han considerado las especies con menos probabilidad de afectarse.
- No se considera Alcalinidad debido a que se aplica ácido al sistema para control de pH.
- No se considera cloruros ya que se emplea HCl como químico para reducir alcalinidad.

1. Índices de estabilidad de las aguas del sistema.

Como parte del diagnóstico del sistema analizaremos los índices de estabilidad del agua del proceso, tanto el agua de reposición como el agua de las correspondientes torres. Para tal análisis recurrimos al programa de predicción **W-Index** de Marvin Silver and Associates Versión 4.0 (Se anexa información técnica referida al programa empleado para la determinación de índices. Ver anexo N° 7).

Data requerida para determinación de índices.

Tabla VII:

	CISTERNA	SICREA	MARLEY
Temperatura ° C	23,8	39	36
STD (ppm)	760	1120	1250
Alcalinidad M (ppm CaCO ₃)	245	98	80
Alcalinidad P (ppm CaCO ₃)	0	0	0
Dureza Ca (ppm CaCO ₃)	350	470	580
Cloruro (ppm NaCl)	110	440	490
Sulfato (ppm SO ₄)	135	210	245
pH	7,37	7,57	7,7

Tabla VIII. (Resultado de índices)

	CISTERNA	SICREA	MARLEY
Ryznard	5,48	5,89	5,77
Langelier	0,94	0,84	0,96
Larson Skold	0,92	7,44	10,22

Nota: Cada índice tiene un rango de comportamiento, de acuerdo a como se indica a continuación.

Ryznard : RSI>6 (Corrosivo), RSI<6 (Incrustante), RSI=6 (Estable)

Langelier : LSI<0 (Corrosivo), LSI > 0 (incrustante).

Larson Skold: LSKI<< 0,8 (No corrosivo para el acero al carbono)

LSKI<0.8 – 1.2> (Corrosivo para el acero al carbono).

LSKI >> 1.2 (Corrosión por picado en acero al carbono).

El índice de Skold sólo es aplicable para rango de pH entre 6,5 y 8,5.

3.3.6. Problemas Actuales en Planta

Desde el año 1999 la empresa cambió de tratamiento químico para el sistema de enfriamiento, que en un principio era suministrado por la empresa CALGON, el tratamiento que se suministro en aquella oportunidad constaba de la aplicación de un tratamiento multifuncional a base de inhibidores de corrosión y dispersantes de dureza. Por los comentarios recibidos de la planta los problemas de corrosión e incrustaciones eran controlados en su totalidad.

El tratamiento que la empresa aplicó a partir de 1999 hasta el 2003 era suministrado por una empresa local, el producto también era uno multifuncional con inhibidores de corrosión y dispersantes, según lo indicado por el fabricante. Los problemas se han venido presentando frecuentemente, y se indican a continuación:

Paradas cada 3 meses del horno H5 para limpieza, por depósitos de naturaleza cálcica. El periodo de mantenimiento es de 2 días con una inversión de 5000 US\$ por el mantenimiento.

Limpieza de la torre cada semana, debido al excesivo nivel de sólidos en suspensión, el agua en general tiene una apariencia turbia rojiza. Esto obliga a cambiar todo el agua cada semana.

Niveles altos de corrosión en tuberías, lo cual fue comprobado con la instalación de cupones de corrosión por un periodo de 50 días en ambos sistemas, siendo los resultados los indicados en la Tabla IX.

TABLA IX:

TORRE	Corrosión (mpy) Noviembre 2003	Depósitos mg/(cm² x día) Noviembre 2003
MARLEY	25,32	1,11
SICREA	26,06	1,31

Valores aceptables. Los valores recomendados de control se indican en la Tabla X (Información tomada del “Guidelines for assessing corrosion” – Energy mangement – Power, March 1982 – Valores aceptables de corrosión en aguas de torres de enfriamiento para diferentes materiales).

Tabla X:

Metal	Velocidad de corrosión (mpy)	Observación
Acero al carbono	0 – 2	Excelente resistencia a la corrosión.
	2 – 3	Generalmente aceptable.
	3 – 5	Pobre resistencia. Aceptable con dispersante de Hierro.
	5 - 10	No aceptable.

3.3.7. Conclusiones del Diagnóstico

De los análisis realizados se diagnostica lo siguiente:

- a. Bajos ciclos de concentración para ambas torres de enfriamiento, esto representa mayores niveles de consumo de agua y químicos del tratamiento debido a los elevados niveles de purga. Para sistemas con torres de enfriamiento es recomendable trabajar entre 3 a 5 ciclos de concentración, siendo 5 el valor óptimo. El poder alcanzar este nivel (5 ciclos) va a depender de las características iniciales del agua.
- b. La concentración por sílice no coincide con la concentración por dureza, lo que significa que esta especie se está quedando en el sistema, como material precipitado.
- c. Las salidas de dureza total no coinciden con las entradas de la misma especie dentro del sistema, lo cual también nos hace suponer deposición de Carbonato de Calcio.
- d. Se observa la coloración del agua del sistema de ambas torres de tonalidad rojiza, lo cual puede estar indicando también un proceso

corrosivo. Situación que se ha comprobado con la correspondiente evaluación con cupones de corrosión.

- e. Elevadas tasas de corrosión y depósitos en el sistema, lo que hace necesario un tratamiento que permita el control adecuado de estos problemas.
- f. Paradas inadecuadas para mantenimiento de las chaquetas en los Hornos, encarece aun más el tratamiento.
- g. El sistema presenta un comportamiento dual, lo cual significa que es incrustante y corrosivo a la vez, por lo que es más recomendable tratar cada problema por separado.

3.4. SISTEMA ACTUAL DE CONTROL QUÍMICO Y MONITOREO

El sistema actual de Control químico y monitoreo se puede resumir de la siguiente manera:

3.4.1. Tratamiento Químico Actual

Producto aplicado.

Se emplea un producto multifuncional denominado FORMULA 450 de producción local. El producto es una mezcla de polifosfatos e inhibidores de corrosión catódicos.

Al ser una planta de producción de Hipoclorito de sodio, el tratamiento de microorganismos es llevado a cabo mediante la aplicación de este producto lo que permite que las aguas del proceso alcancen niveles de cloro del orden de 0,7 a 1,0 ppm, suficiente para controlar nivel de crecimiento bacteriano.

Sistema de aplicación.

No se cuenta con un sistema de aplicación automático del producto químico, inhibidor de corrosión e incrustaciones. La forma de aplicar el producto es manual, todos los días a las 08:00 am el operador de la planta

agrega una cantidad establecida de producto en cada poza de la torre, cantidad que ha sido recomendada por el proveedor del tratamiento.

3.4.2. Control del Tratamiento Químico - Resultados

El tratamiento Químico que se viene aplicando debe ser controlado de dos formas, que permitan alcanzar los objetivos buscados en cuanto a corrosión e incrustaciones. En tal sentido se puede mencionar lo siguiente de acuerdo a la revisión efectuada del sistema.

Monitoreo de Corrosión e Incrustaciones.

Los sistemas de enfriamiento deben contar con técnicas físicas que permitan conocer la performance del tratamiento que se esta llevando a cabo, en tal sentido se emplea los denominados cupones de incrustación y corrosión (Testigos), que permiten tener un conocimiento más real del grado de corrosión ó incrustaciones que se pueden presentar en los sistemas como consecuencia de la característica de un proceso y del agua.

En toda la etapa de suministro del actual programa de tratamiento químico se puede mencionar que no se cuenta con SISTEMAS DE MONITOREO de corrosión e incrustaciones.

Monitoreo químico del tratamiento.

El control químico es de suma importancia para todo programa de tratamiento que se implemente en una planta, todo programa trabaja en base a límites de control lo que hace que su performance sea la más adecuada, en tal sentido el tratamiento actual es controlado por el departamento de control de calidad bajo los siguientes indicadores de control, ver la Tabla XI donde se indican los límites de trabajo recomendados por el proveedor inicial.

TABLA XI:

Límites de Control – Tratamiento Formula 450	
Dureza Cálcica ppm CaCO₃	< 500
PH	7.0 – 8.0
CC – Ciclos de concentración	1.5 – 2.0
Residual de producto	No se recomienda
Frecuencia	1 vez x semana

Como se puede apreciar el programa de tratamiento actual no recomienda análisis de activo del producto que actuará directamente sobre el control de la corrosión e incrustaciones.

Los análisis que son recomendados por el proveedor son realizados por el laboratorio de control de calidad y son complementados con otros análisis que se efectúan diariamente y que son reportados en el formato de **Análisis de Aguas**.

3.4.3. Servicio de Campo

El servicio de campo es llevado a cabo con la finalidad de poder analizar in situ los resultados del tratamiento, poder conocer las variaciones que se presentan y tomar acciones correctivas a fin de que el tratamiento no se perjudique.

Las visitas técnicas son parte importante del programa y debe ser establecida para que se realice con cierta periodicidad, durante cada visita se debe realizar lo siguiente:

- Análisis químico del sistema.
- Revisión de la aplicación de productos.
- Retiro e instalación de cupones de incrustación y corrosión.
- Tomar acciones correctivas ante cambios de las variables del proceso, relacionados con el sistema de enfriamiento.
- Reunión de coordinación con los encargados del manejo del sistema.

Reporte de la visita con las recomendaciones del caso.

Actualmente **NO SE REALIZA VISITA TÉCNICA** que cumpla con los objetivos técnicos de control y monitoreo del sistema.

3.4.4. Sistemas Automáticos de Control

Automatización

La planta actualmente no cuenta con sistema automático de control, que permita manejar los parámetros críticos del sistema, que en este caso son la conductividad y el pH.

Medida de la conductividad

La medida de la conductividad es llevada a cabo en el laboratorio de la planta, personal de control de calidad toma la muestra cada día en la mañana y le determina las características, entre ellas la conductividad. El equipo empleado es un medidor de conductividad portátil marca OAKTON.

Los resultados del análisis son enviados al jefe del departamento, quien luego transfiere los mismos al jefe de planta para la acción correctiva, el análisis es realizado de 08:00 a 10:00 am y cualquier corrección se efectúa luego de recibido el reporte por parte de planta y de acuerdo a disponibilidad del personal.

Medida del pH

La determinación del pH es realizado de forma similar que en el caso de la conductividad, lo cual significa que la muestra es tomada por un responsable de control de calidad para su respectivo análisis, el equipo empleado en un pH-meter de laboratorio marca ORION. Una vez analizado el pH se reporta al jefe de planta y se toma la acción correctiva, mediante la aplicación de HCl al 35 %, la aplicación de ácido es en forma manual mediante una línea de 1" de PVC , con su respectiva válvula.

3.4.5. Conclusiones del Sistema Actual de Control y Monitoreo

Las conclusiones actuales son las siguientes:

- a. Las acciones correctivas que se están tomando no son en tiempo real, debido a que la muestra demora en ser analizada y luego interpretada para la correspondiente acción.
- b. Los parámetros críticos del sistema, como lo son el pH y la conductividad no cuentan con un control adecuado que nos permita tener el sistema dentro de especificaciones.

3.5. PROPUESTA PARA OPTIMIZAR EL CONTROL QUÍMICO Y MONITOREO DEL AGUA MEDIANTE UN PROGRAMA DE TRATAMIENTO QUÍMICO Y SISTEMAS DE CONTROL EN LINEA

Luego de analizado el sistema actual, desde el punto de vista químico, físico y de control automático se establecerán la siguientes recomendaciones, que involucra un tratamiento químico para la calidad del agua existente, que permita un buen control de la corrosión e incrustaciones. De igual forma estableceremos la recomendación de un control automático de purgas y de pH, lo cual garantizará que el tratamiento recomendado cumpla con las expectativas deseadas.

3.5.1. Programa de Tratamiento Actual

1. Situación Actual

En la actualidad, la empresa Química que es tema de nuestro estudio emplea un programa que tratamiento que podemos resumir de la siguiente manera:

- **Inhibidor de Corrosión y Dispersante.-**

Producto polifuncional inhibidor de corrosión y dispersante simultáneamente. Que debe controlar la corrosión y formación de depósitos a los niveles de 5,0 mpy y 2,0 mg/(cm² x día)

respectivamente. Límites que nunca fueron alcanzados por el tratamiento.

- **Biocida-Algicida.-**

Se emplea Hipoclorito de Sodio como tratamiento Biocida.

Recomendación: Se requiere un tratamiento químico polifuncional: Inhibidor de Corrosión y Dispersante. La calidad del tratamiento será realizado monitoreando la performance de los cupones de corrosión y evaluando la operatividad de determinados equipos, en este caso los hornos de síntesis de ácido clorhídrico.

2. Características del Sistema

El sistema de agua de enfriamiento actual (Enero 2004) consta de un sistema de enfriamiento SICREA de 6 cuerpos, con 3 pozas de recepción de agua fría completamente interconectadas, la torre Marley ha salido fuera de funcionamiento.

El sistema emplea como agua de reposición agua de pozo sin tratamiento, el agua de enfriamiento circula a través de los siguientes sistemas:

- Chaquetas de los Hornos de Síntesis – Carbón Loraine (600 m³/h).
- Sistemas de transformadores y rectificadores (350 m³/h).
- Planta de Cloro (150 m³/h).
- Intercambiadores de ácido sulfúrico. (150 m³/h).
- Enfriamiento de Hidrógeno (150 m³/h)

3. Condiciones para el diseño del programa

Para poder definir un programa de tratamiento es necesario conocer cierta data mecánica y química que permitirá la selección del mejor tratamiento, para tal efecto hemos considerado la información de la Tabla XII.

(Fecha 23.01.2004)

TABLA XII : (Datos mecánicos de la Torre)

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	VALOR
Volumen estático	m ³	1200
Caudal circulante	m ³ /h	1400 Actual 2000 Máximo
Temperatura de entrada	°C	36
Temperatura de salida	°C	28
Pérdida por Evaporación	m ³ /h	17
Make up	m ³ /h	45
Ciclos de concentración	Unidades	1,6
Purga	m ³ /h	28,6
Torre	Tipo	Sicrea
Número de celdas	Unidades	6

(23.01.2004 – Características promedio del agua del sistema de enfriamiento)

Tabla XIII: (Datos químicos del agua de reposición)

PROPIEDAD	UNIDAD	CISTERNA	TORRE SICREA	
			ENTRADA	SALIDA
Temperatura	° C	24	38	32
pH	Unidad	7,41	7,62	7,61
Sólidos Totales	ppm	770	985	1150
SiO ₂	ppm	26	40,9	41,8
CO ₂	ppm	19	4,5	4,5
Dureza Total	ppm CaCO ₃	445	590	620
Cl ₂ Residual	ppm Cl ₂	0	0.6	0.6
CO ₃ ⁻ Carbonatos	ppm CaCO ₃	0	0	0
HCO ⁻ Bicarbonatos	ppm CaCO ₃	255	90	95
Cl ⁻ (Cloruros)	ppm NaCl	105	395	410
Fe Total	ppm	0.05	0.35	0.40
Ca ⁺⁺ Calcio	ppm CaCO ₃	355	460	480
Mg ⁺⁺ Magnesio	ppm CaCO ₃	85	135	140
Conductividad	µs/cm	1080	1680	1810
Sulfatos	ppm	125	190	205
Ciclos de concentración	Unidad	--	1,57 (Sílice)	1,60 (Sílice)

Nota : Los ciclos de concentración se mantienen constantes a 1,6, similar a los análisis anteriormente realizados. Existe una purga continua, lo cual hace que el sistema se comporte de esta manera.

3.5.2. Programa Integral para el Tratamiento de Agua Propuesto

A efectos de cumplir con los requisitos establecidos de control de incrustaciones y corrosión, se propone el siguiente Programa Integral de Control de Corrosión e incrustaciones.

Al preparar las recomendaciones técnico económicas que se consignan en este documento para el tratamiento químico del agua de las torres de enfriamiento y control automático del mismo se han tenido en cuenta los siguientes aspectos que consideramos fundamentales para el éxito del programa de tratamiento:

- Evaluaciones periódicas, para revisar constantemente el grado de precipitación de especies químicas en el sistema y tomar los correctivos anticipados.
- Control estricto de los parámetros de control recomendados.
- Revisión de los sistemas de control automático.

Indicamos tener en cuenta estos aspectos técnicos muy importantes dentro de la planta, con el fin de garantizar una estabilidad operativa en el sistema y lograr los mejores resultados técnicos y económicos a corto plazo.

Programa de tratamiento propuesto

De acuerdo a la línea de productos NALCO, se ha seleccionado los siguientes productos para la implementación total del programa de tratamiento químico para el circuito de refrigeración:

- **INHIBIDOR DE CORROSIÓN E INCRUSTACIONES:
NALCO X745**

Características

- ✓ Producto desarrollado para prevenir la corrosión en los metales de los sistemas de agua de enfriamiento abiertos y cerrados.
- ✓ Inhibidor basado en el uso de Fosfonatos e inhibidores catódicos.
- ✓ Contiene en su formulación inhibidores de metales amarillos.
- ✓ Se complementa con un tratamiento antincrustante para ofrecer una protección total del sistema.
- ✓ **Nalco X745** es de fácil manejo para la aplicación en sistemas de enfriamiento.
- ✓ Opera en un amplio rango de pH, lo cual permite manejarse adecuadamente en aguas alcalinas y ácidas.
- ✓ Es totalmente compatible con la metalurgia de los equipos, accesorios y líneas de la unidad.

Propiedades Físicas

- ✓ Forma : Líquida.
- ✓ Color : Incoloro
- ✓ Densidad : 1,41 g/cm³.
- ✓ Punto de Chispa : No detectado.
- ✓ Solubilidad en Agua : Soluble.
- ✓ pH (solución al 1%) : 2,1
- ✓ Viscosidad a 77°F : 10 cp

- **DISPERSANTE:
NALCO X746.**

Características:

- ✓ Excelente producto para estabilización de calcio.
- ✓ Efectivo dispersante de Zinc en programas alcalinos.
- ✓ Es muy efectivo en dispersar hierro y sílice.

- ✓ Puede tolerar durezas e el agua del sistema de hasta 2000 ppm como CaCO₃.
- ✓ El Producto Nalco X746 es completamente compatible con las demás aplicaciones y con la metalurgia de los equipos.
- ✓ Nalco X746 es completamente resistente a altas tasas de transferencia de calor.

Propiedades Físicas

- ✓ Forma : Líquida.
- ✓ Densidad : 1,12 g/cm³.
- ✓ Punto de Congelamiento : -3,89 ° C.
- ✓ Punto de Inflamación : Ninguno.
- ✓ pH (puro) : 13,2
- ✓ pH (al 1%) : 11,4
- ✓ Viscosidad a 23.3 ° C : 7 cp

3.5.3. Dosis Recomendadas y puntos de Aplicación del Programa Propuesto

A continuación se detallan las dosis de producto químico recomendadas para el tratamiento (Intervalo de dosificación y dosis media) y punto de inyección, ver Tabla XIV:

Tabla XIV: (Dosificación)

Producto	Punto de dosificación	Dosis media (ppm)	Intervalo (ppm)
Nalco X745 (Inhibidor de Corrosión)	Poza de Torre de Enfriamiento	120	110-130
Nalco X746 (Dispersante)	Poza de Torre de Enfriamiento	80	70-90

Consumo de químicos ofertados

Bases de cálculo:

Para Inhibidores de Corrosión y Dispersantes.

- Flujo de Purga : 8,57 m³/h

Tabla XV: (Consumos de productos químicos)

Producto	Dosis media(ppm)	kg/día	kg/mes
Nalco X745	120	24,68	740,4
Nalco X746	80	16,45	493,5

3.5.4. Control y Monitoreo

Determinaciones Analíticas

Las determinaciones analíticas requeridas para el buen control del programa de tratamiento se indican en la Tabla XVI.

Tabla XVI:

Punto de Monitoreo	Determinación	Frecuencia
Agua de Reposición	pH	1 semanal
	Si	1 semanal
	STD	1 semanal
	Dureza Total	1 semanal
	Dureza Cálcica	1 semanal
	Alcalinidad P/M	1 semanal
AGUA DE RECIRCULACIÓN	pH	1 semanal
	Cloruros	1 semanal
	Si	1 semanal
	STD	1 semanal
	Dureza Total	1 semanal
	Dureza Cálcica	1 semanal
	Alcalinidad P/M	1 semanal
	Residual Inhib.	1 semanal

Monitoreo de los Procesos

A continuación se detallan los puntos de monitoreo, métodos, frecuencia de ensayo y lectura de tasas de corrosión, propuestos con el Programa de Control de Corrosión con los productos ofrecido por NALCO, considerando las facilidades existentes, ver Tabla XVII.

Tabla XVII:

Punto de Monitoreo	Ensayo	Método de lectura	Frecuencia
Línea de agua de Retorno	Tasa de Corrosión e incrustación	Cupón de Corrosión e incrustación	30 – 60 días
Salida de los Hornos (más crítico)	Tasa de Corrosión e incrustación	Cupón de Corrosión e incrustación	30 – 60 días
Salida de compresores (más crítico)	Tasa de Corrosión e incrustación	Cupón de Corrosión e incrustación	30 – 60 días
Pozas de agua de enfriamiento	Conteo de Bacterias	Sistemas Sani Check	30 días

Parámetros de control

De acuerdo al programa establecido se establecen los siguientes parámetros de control en el sistema, para garantizar los resultados del programa de tratamiento químico ofrecido según Tabla XVIII.

Tabla XVIII:

Punto de Monitoreo	Determinación	Parámetro
Agua de Reposición	pH	7,0 – 7,8
	Si	< 30 ppm
	STD	< 770 ppm
	Dureza Total	< 450 ppm
	Dureza Cálcica	< 350 ppm
	Alcalinidad P/M	0/260 ppm CaCO ₃
AGUA DE RECIRCULACIÓN	pH	7,0 – 7,8
	Dureza Total	< 1500 ppm CaCO ₃
	Cloruros	< 600 ppm
	STD	2200 - 2400 ppm 3300 - 3600 µmhos
	Alcalinidad M	< 200 ppm
	Cloro Libre	0,2 – 0,5
	Residual Inh.	3 – 4 ppm
	Corrosión en acero al carbono (mpy)	< 3 mpy
	Velocidad de ensuciamiento mg/(cm ² xdía)	< 0,7
	Microorganismos, UFC/ml	< 10 ⁴

Servicio Técnico

El servicio técnico asociado al Programa Integral de Control de Corrosión, propuesto para el sistema de enfriamiento debe contemplar:

- **Servicio de Campo.**
 - ✓ Revisión y ajuste, cuando fuere necesario, de la dosificación de productos químicos, todos los días hábiles de la semana, de acuerdo a variables operativas de control.
 - ✓ Revisión de variables de proceso y operativas críticas.

- ✓ Seguimiento de resultados del plan analítico realizado por la empresa química.
- ✓ Lecturas de tasas de corrosión de acuerdo a la frecuencia y métodos indicados en el ítem 2,3 (Monitoreo de los Procesos Corrosivos).
- ✓ Control de Stock de Productos Químicos en planta (diario).
- ✓ Emisión de Reporte Personal de Servicio (1 vez por semana).
- ✓ Emisión de Informe Mensual.

- **Cursos de Capacitación.**

La capacitación es importante en todo programa de tratamiento propuesto, en tal sentido es necesario que se considere los siguientes tópicos de capacitación.

- ✓ Manejo del tratamiento Químico propuesto.
- ✓ Procesos de satisfacción al cliente.
- ✓ Cooling System Dynamics.
- ✓ Control estadístico del proceso.

La supervisión del tratamiento, debe estar enmarcada en un servicio global de asistencia, basada en la amplia e importante experiencia del proveedor, en este caso NALCO, en este tipo de Programas de Control.

La Supervisión del tratamiento debe ser realizada por personal técnico especializado y con experiencia demostrada.

3.5.5. Sistemas Automáticos de Control

Sistemas automáticos de Control.

El control automático de procesos es parte del progreso industrial desarrollado durante lo que ahora se conoce como la segunda revolución industrial. El uso intensivo de la ciencia de control automático es producto

de una evolución que es consecuencia del uso difundido de las técnicas de medición y control. Su estudio intensivo ha contribuido al reconocimiento universal de sus ventajas.

El control automático de procesos se usa fundamentalmente porque reduce el costo de los procesos industriales, lo que compensa con creces la inversión en equipo de control. Además hay muchas ganancias intangibles, como por ejemplo la eliminación de mano de obra pasiva, la cual provoca una demanda equivalente de trabajo especializado. La eliminación de errores es otra contribución positiva del uso del control automático.

El principio del control automático o sea el empleo de una realimentación o medición para accionar un mecanismo de control, es muy simple. El mismo principio del control automático se usa en diversos campos, como control de procesos químicos y del petróleo, control de hornos en la fabricación del acero, control de máquinas herramientas, y en el control y trayectoria de un proyectil.

El uso de las computadoras analógicas y digitales ha posibilitado la aplicación de ideas de control automático a sistemas físicos que hace apenas pocos años eran imposibles de analizar o controlar.

Es necesaria la comprensión del principio del control automático en la ingeniería moderna, por ser su uso tan común como el uso de los principios de electricidad o termodinámica, siendo por lo tanto, una parte de primordial importancia dentro de la esfera del conocimiento de ingeniería. El programa de tratamiento químico recomendado debe ser aplicado y controlado en sus parámetros de forma estricta, lo cual permitirá cumplir con los objetivos de tratamiento buscados, en tal sentido se recomienda lo siguiente:

Aplicación de productos Químicos.

Se recomienda la instalación de Bombas dosificadoras automáticas para la aplicación de cada uno de los productos químicos, de acuerdo a las características químicas del producto. El equipo dosificador debe cumplir con las siguientes características de acuerdo al producto que se selecciona.

- **Producto X745 (Producto ácido ver características)**
 - ✓ Bomba cuerpo de polipropileno.
 - ✓ Cabezal polipropileno, viton ó neoprene. Con resistencia a medio ácido.
 - ✓ Manguera de polipropileno. Con resistencia a medio ácido.
 - ✓ Bomba con resistencia para trabajar en condiciones severas de ambiente corrosivo.
 - ✓ Presión de descarga a la atmósfera.
 - ✓ Recomendación. Bomba de Diafragma marca PROMINET ó PULSAFEEDER.

- **Producto X746. (Producto alcalino ver características)**
 - ✓ Bomba cuerpo de polipropileno.
 - ✓ Cabezal polipropileno, viton ó neoprene. Con resistencia a medio ácido.
 - ✓ Manguera de polipropileno. Con resistencia a medio ácido.
 - ✓ Bomba con resistencia para trabajar en condiciones severas de ambiente corrosivo.
 - ✓ Presión de descarga a la atmósfera.
 - ✓ Recomendación: Bomba de Diafragma marca PROMINET ó PULSAFEEDER.

Controles en línea.

Los controles en línea permitirán que los parámetros de control recomendados se cumplan, con la finalidad que el programa de tratamiento

recomendado cumpla con los objetivos de control de corrosión e incrustaciones. En tal sentido es importante definir los parámetros críticos que deben ser controlados en forma automática.

Parámetros críticos.

Son aquellos que definirán el éxito o fracaso del programa recomendado, en tal sentido se mencionan los siguientes:

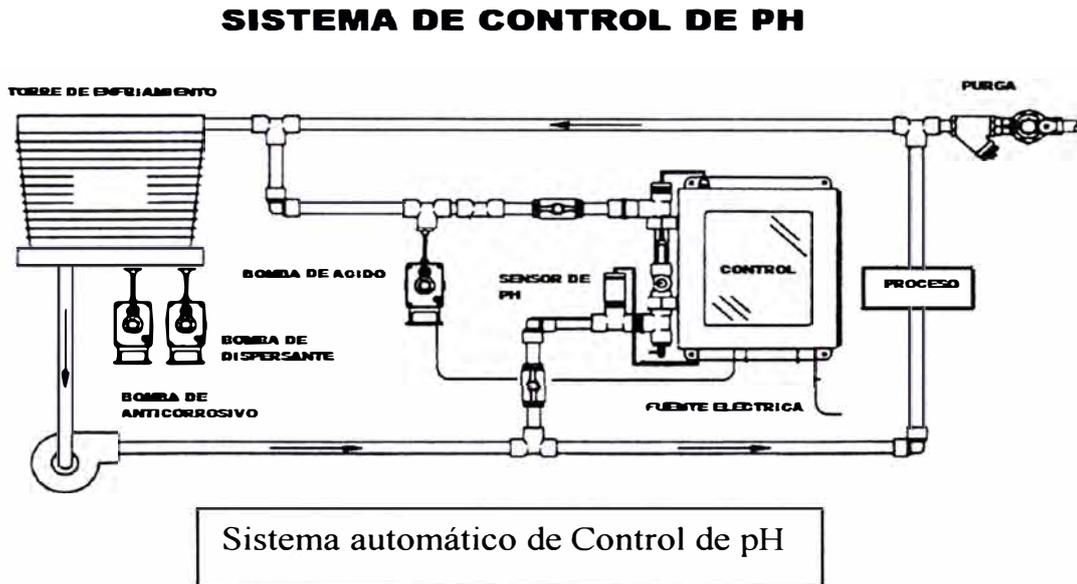
- **pH (Ver figura 2)**

El pH del sistema es de vital importancia debido a que el incremento del mismo incrementaría el grado de incrustaciones del sistema y problemas más agresivos en el lado de chaquetas de Hornos. El pH del sistema se controla con la aplicación manual de ácido clorhídrico, que presenta la desventaja de alcanzar los ajustes deseados, presentándose por lo tanto gran variabilidad del parámetro indicado, lo que ha originado problemas de corrosión, principalmente, debido a muy bajo pH y de incrustaciones en la zona de Hornos debido a la falta de aplicación del reductor de alcalinidad.

Control propuesto

Se propone para el respectivo control de Ph lo siguiente:

- ✓ Sensor (Electrodo) para determinar en línea del valor de Ph.
- ✓ Controlador para recibir señal del electrodo.
- ✓ Transmisor de señal al equipo de acción y alarma del sistema.
- ✓ Equipo receptor de señal transmitida, en este caso válvula solenoide
- ✓ El sistema de control obedece a un sistema ON/OFF.
- ✓ Marcas propuestas PULSAFEEDER, PROMINENT E IWAKEE.

FIGURA 2

- **Conductividad (Ver Figura 3)**

La medida de la conductividad es una medida indirecta de los sólidos en el sistema, los cuales debemos controlar con la finalidad de mantener el sistema dentro de control en cuanto a Dureza y Sílice, especies que pueden causar problemas severos de incrustación. El mantener los sólidos totales dentro de los parámetros recomendados garantizan la fiabilidad y éxito del programa propuesto. En tal sentido el objetivo de este control será el mantener las especies dentro de control a fin de evitar problemas de deposición por sobre concentración y optimizar los consumos de agua del proceso.

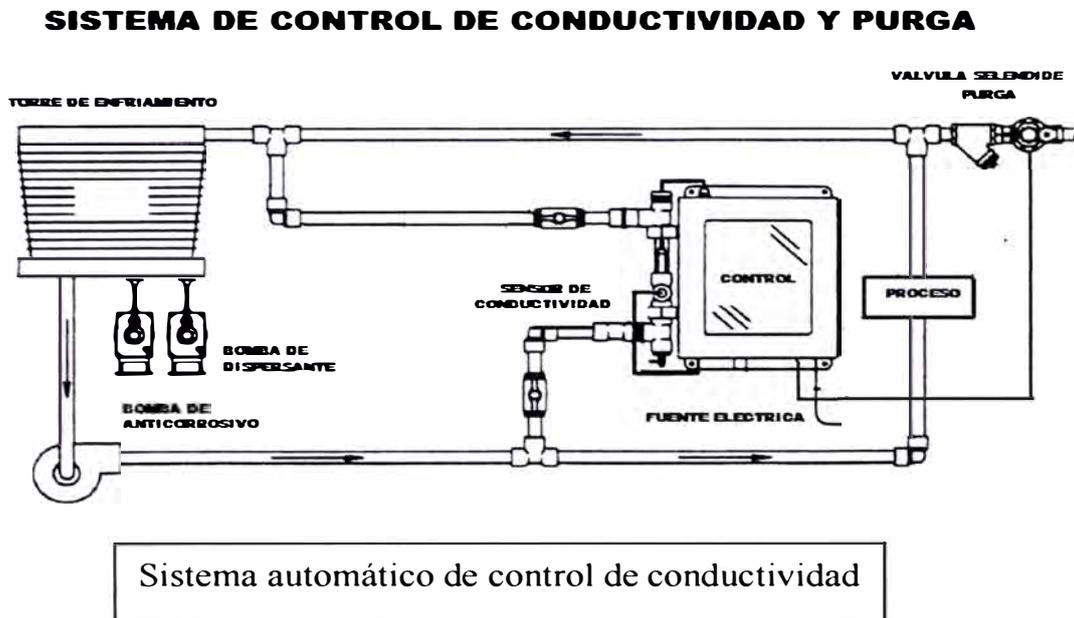
Control propuesto.

Se propone para el respectivo control de la conductividad lo siguiente:

- ✓ Sensor para determinación en línea de la conductividad del agua del sistema.
- ✓ Control para recibir señal del sensor.

- ✓ Equipo receptor de señal transmitida del controlador, válvula solenoide
- ✓ El sistema control obedece a un sistema ON/OFF.
- ✓ Marcas de sistemas de control propuestos son PULSAFEEDER, PROMINENT E IWAKEE.

FIGURA 3



3.6.IMPLEMENTACIÓN E INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL EN LÍNEA.

El programa de tratamiento recomendado y la instalación de los sistemas de control en línea siguieron dos etapas de implementación, las cuales podemos indicar de la siguiente manera.

3.6.1. Etapa I (Ver anexo 2)

Suministro y aplicación del nuevo programa de tratamiento químico ofertado por el nuevo suministrador, en este caso Nalco Chemical. Esta etapa se inició en la quincena de Febrero hasta la fecha. La Etapa I a su

vez estuvo conformada de pasos, que permitieron concretar el proceso de aplicación del producto químico, pasos que se mencionan a continuación.

Paso 1. Ubicación más adecuada de la aplicación del producto químico.

En este caso se seleccionó la poza de agua fría de la torre de enfriamiento, el producto se aplicará por gravedad a la poza.

Paso 2. Selección de Bombas dosificadoras.

De acuerdo a las características de los producto se han seleccionado dos Bombas dosificadoras.

Dispersante : Bomba Pulsafeeder.

Inh. Corrosión : Bomba Prominent.

(Las bombas son recomendadas por el proveedor de acuerdo a las especificaciones del producto).

Paso 3. Ubicación e instalación de las Bombas dosificadoras.

Se ubicaron las bombas en la zona más cercana a la poza de enfriamiento, la idea es no tener mucha longitud de manguera desde el punto de succión al punto de aplicación del producto.

La instalación de los sistemas es por cuenta de la planta, el proveedor recomienda el punto más adecuado. Esta instalación inicialmente es temporal, que se hará fija tan pronto se tengan resultados del nuevo tratamiento.

3.6.2. Etapa II (Ver anexo 3).

Instalación de los sistemas de control automático para el control adecuado de los parámetros críticos del agua del proceso, en este caso la instalación de los equipos fue realizada por la empresa que es tema de estudio y en coordinación con la empresa suministradora de los equipos, que en este caso es (PROYECTOS TECNICOS Y COMERCIALIZADORA S.A.C.).

PROYECTOS TÉCNICOS Y COMERCIALIZADORA SAC recomendó los equipos más adecuados para el control requerido. En este caso se han recomendado los sistemas DULCOMETER de PROMINENT.

Paso 1. (Selección de controladores)

De acuerdo a las necesidades de control del sistema, los equipos seleccionados son los DULCOMETER D1C, para control de pH y Conductividad respectivamente. Los controladores son de marca PROMINENT de Alemania y cuentan con sus respectivos sensores.

Paso 2. (Selección de los puntos de ubicación del sistema de control).

En este paso se consideran los punto de ubicación de los controladores, para el adecuado monitoreo del sistema. La ubicación de ambos controladores esta supeditado a un área poco expuesta al medio ambiente ó protegida, que permita protección de los sistemas electrónicos del equipo. En este caso el equipo está ubicado en la zona de Bombas de retorno de agua al sistema de enfriamiento, se cuenta con conexiones eléctricas y posibilidades de cableado.

Paso 3. (Ubicación de los sensores de monitoreo – Elementos primarios).

Los sensores se ubicarán en los puntos más representativos para el monitoreo, en este caso el retorno de agua de los hornos 1, 2, 3 y 5 al sistema de enfriamiento. Los sensores se adaptaran a tuberías de PVC sumergidas completamente en el agua de retorno.

Paso 4. (Ubicación de los elementos de control final)

Los elementos de control final serán ubicados en aquellas zonas donde el ajuste del parámetro de control pueda alcanzarse de manera óptima y rápida. En tal sentido los elementos de control final se instalaran en los siguientes lugares.

Control de conductividad

A través de una electro válvula instalada en una línea de 1", dicha línea sale de una troncal de 6" de diámetro por la que circula agua de enfriamiento de chaquetas del horno 5. Esta agua retorna a la torre con el valor más alto de temperatura.

Control de pH.

El control de pH se efectúa mediante la adición de ácido clorhídrico al 35 % en la poza de agua fría, lo más cercana posible al agua de reposición. El elemento de control final es un actuador con válvula de plástico, quien se apertura cuando el pH se encuentra por encima de los valores establecidos como parámetros de control y se cierran cuando se encuentra por debajo del valor límite inferior recomendado. La señal que apertura la válvula es neumática proveniente de una solenoide quien recibe la señal del controlador.

3.6.3. Etapa III (Puesta en marcha - Evaluación)

La tercera etapa del proceso de implementación e instalación de los sistemas de control consiste en la puesta en marcha de los equipos instalados, mediante la calibración inicial de los equipos y determinación de los set points de control, siendo los valores fijados de control los siguientes:

Conductividad

- Límite superior : 3500 μ mhos
- Límite inferior : 3400 μ mhos

pH

- Límite superior : 7,6
- Límite inferior : 7,2

Los resultados obtenidos se mostraran en la correspondiente etapa de resultados.

3.6.4. Evaluación a Nivel de Planta.

La evaluación se inicio en el mes de Marzo por un periodo de 30 días, con el nuevo programa de tratamiento y con los respectivos sistemas de control automáticos puestos en funcionamiento.

Controles de la evaluación

Los controles estarán enfocados a cumplir objetivos puntuales tales como:

- Mantener el sistema con 3 ciclos de concentración.
- Obtener resultados de corrosión e incrustaciones de acuerdo a los estándares de control recomendados.
- Ahorros económicos con el nuevo tratamiento propuesto.

Resultados

- Ciclos de concentración con sistemas de automatización. Observar Anexo 4.
- Resultados de corrosión e incrustaciones con el nuevo tratamiento. Observar Anexo 5.
- Ahorros económicos con el nuevo tratamiento. Observar Anexo 6.

IV. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se derivan del siguiente informe son los siguientes:

4.1. Los sistemas automáticos de control de purga y pH han permitido establecer un control más ajustado del sistema en cuanto a los límites fijados de control para el éxito del tratamiento recomendado. En tal sentido queda demostrada la eficacia del control en línea para optimizar el control del proceso. Ver Anexo 4.

FIGURA 4

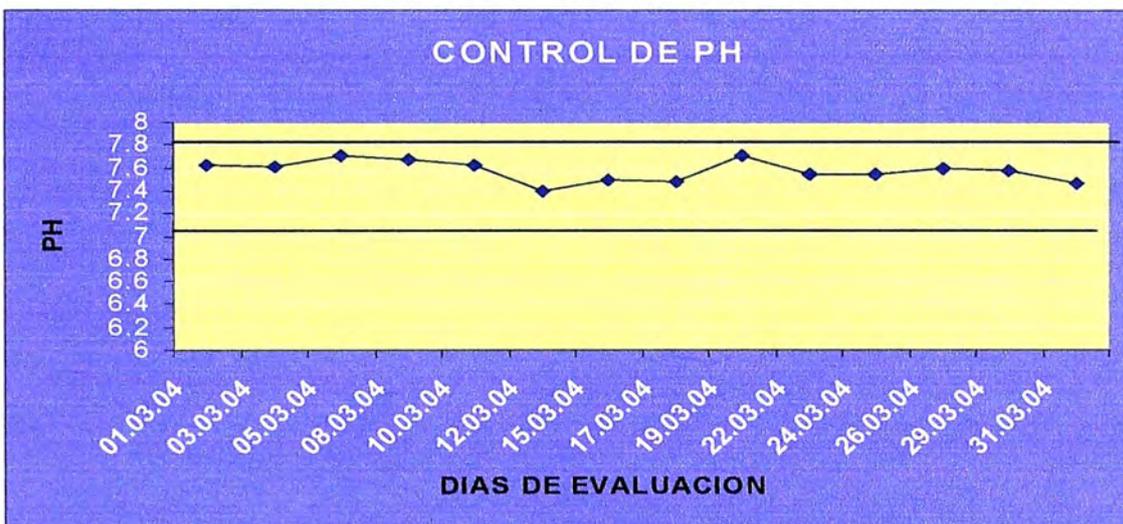


FIGURA 5



4.2. El nuevo tratamiento recomendado ha cumplido satisfactoriamente los objetivos de control buscados en cuanto a la inhibición de incrustaciones y corrosión. En tal sentido el tratamiento anterior ha sido superado satisfactoriamente según se indica a continuación. Ver Tabla XIX y Anexo 5.

Tabla XIX:

EVALUACIÓN	SICREA ANTIGUO	MARLEY ANTIGUO	MARLEY
Fecha Instalación	05.05.03	05.05.03	01.03.04
Fecha de Retiro	05.06.03	25.06.03	31.03.04
Perdida Peso (mg)	1,0749	1,2686	0,1241
Depósitos (mg)	1,3407	1,3798	0,0884
Corrosión (mpy)	25,32	26,06	2,78
Incrustaciones mg/(cm ² x día)	1,11	1,31	0,21

4.3. Es de gran importancia el diagnostico preliminar de un sistema de agua de enfriamiento antes de emitir una recomendación que involucre un programa de tratamiento químico. Las evaluaciones preliminares permitirán conocer la situación actual del sistema y los problemas potenciales que deben ser atacados con productos específicos y de marcas reconocidas.

4.4. El tratamiento propuesto ha logrado controlar el sistema con un manejo de ciclos de concentración de 2,9, contra 1,6 que correspondía al tratamiento anterior. Lo cual ha mostrado un ahorro en los siguientes aspectos que se resumen en la Tabla XX.

Tabla XX:

PARÁMETRO	PROGRAMA ANTIGUO	PROGRAMA NUEVO	AHORRO
Ciclos de Concentración	1,6	2,9	--
Evaporación (m ³ /h)	17,14	17,14	--
Reposición (m ³ /h)	45,70	25,92	19,78
Purga (m ³ /h)	28,56	8,79	19,77
Costo/mes (US\$/MES)	7896	3644	4252 US\$

Como se puede apreciar se ha observado un ahorro de 4252.0 US\$/mes, lo cual significa un total de 51024 US\$/AÑO. Sin considerar los ahorros de agua en el sistema.

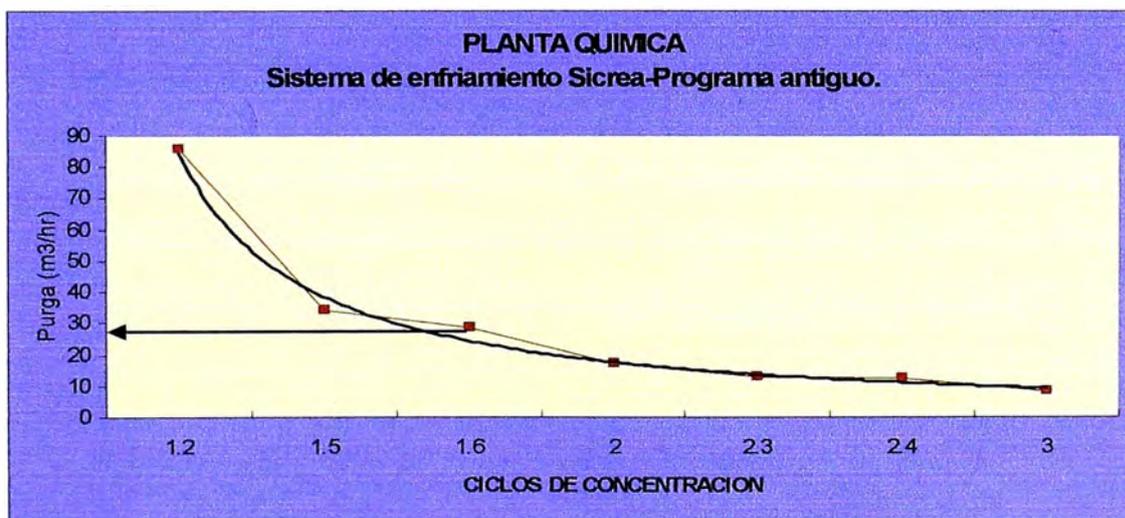
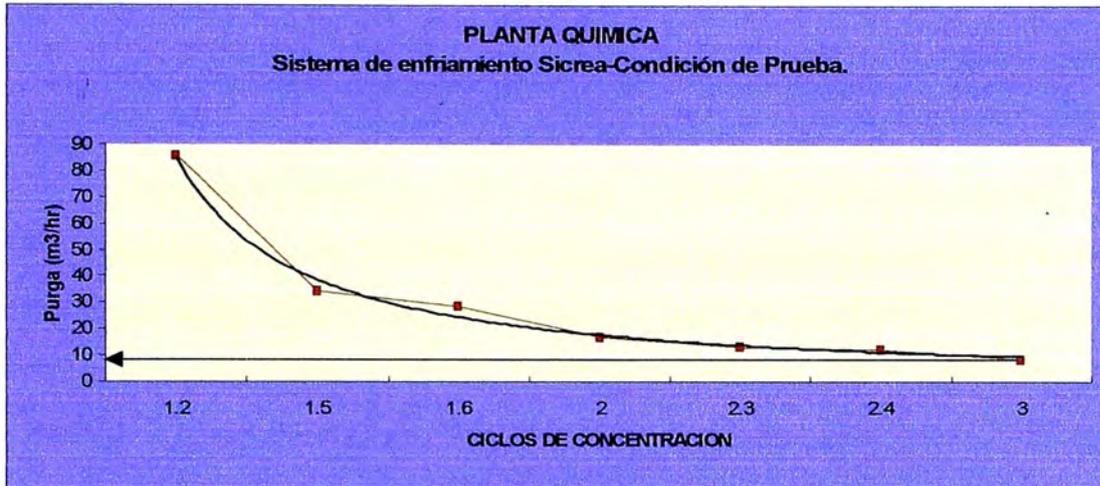
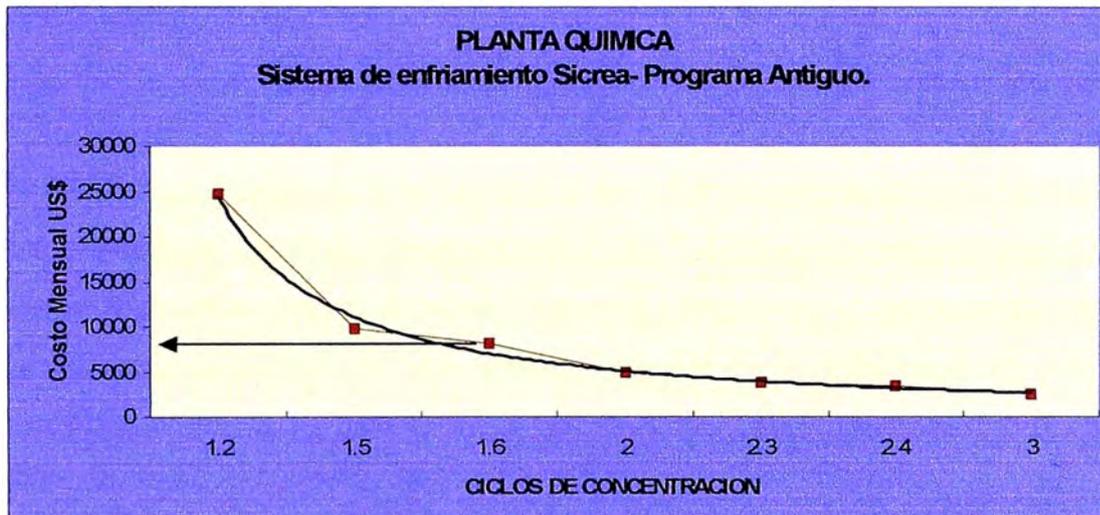
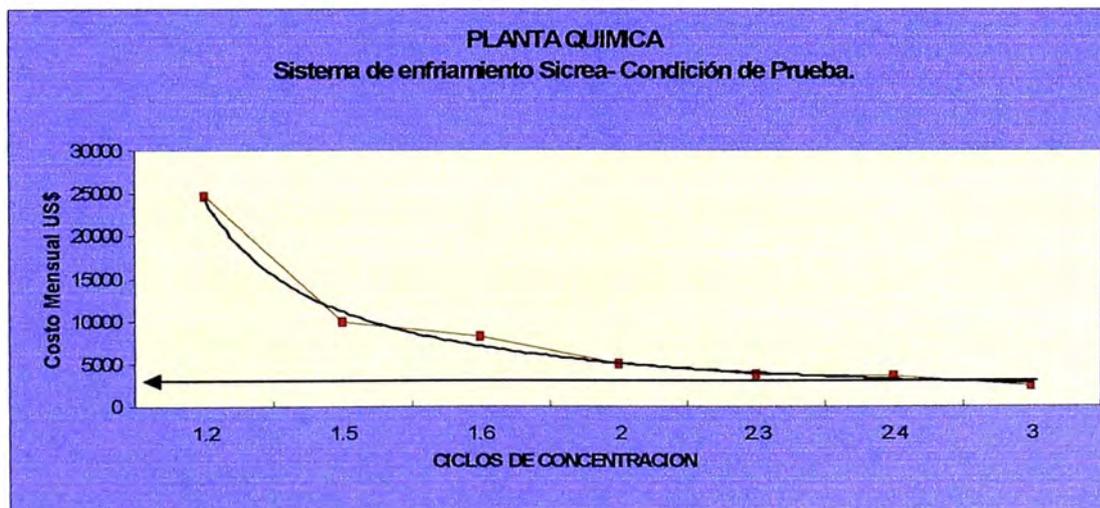
FIGURA 6

FIGURA 7**FIGURA 8****FIGURA 9**

V. RECOMENDACIONES.

Las recomendaciones que podemos establecer y que permitan lograr optimizar el proceso de enfriamiento son las siguientes:

5.1. Continuar con los monitoreos de corrosión e incrustaciones en el sistema de enfriamiento. Debe implementarse un plan de monitoreo de 1 cupón cada 2 meses, esto permitirá conocer el comportamiento del tratamiento con el tiempo.

5.2. Establecer un cronograma de mantenimiento de los equipos de control instalados en el sistema de enfriamiento, cada mes deben limpiarse y calibrarse sensores.

5.3. Se recomienda la instalación de probetas de calibración en los sistemas de dosificación actual, con la finalidad de poder conocer los consumos exactos de productos químicos.

5.4. Analizar el comportamiento de las especies de mayor peligrosidad dentro del tratamiento, esto es Calcio y Sílice, como principales especies formadoras de depósitos que pueden afectar la transferencia de calor. Se recomienda en tal sentido analizar estas especies en la poza de la torre y en la línea de retorno, observar las caídas o diferenciales existentes.

5.5. Instalar en el futuro medidores en línea de iones selectivos en este caso, calcio y sílice, ver la factibilidad técnica y/o económica.

VI. BIBLIOGRAFÍAS.

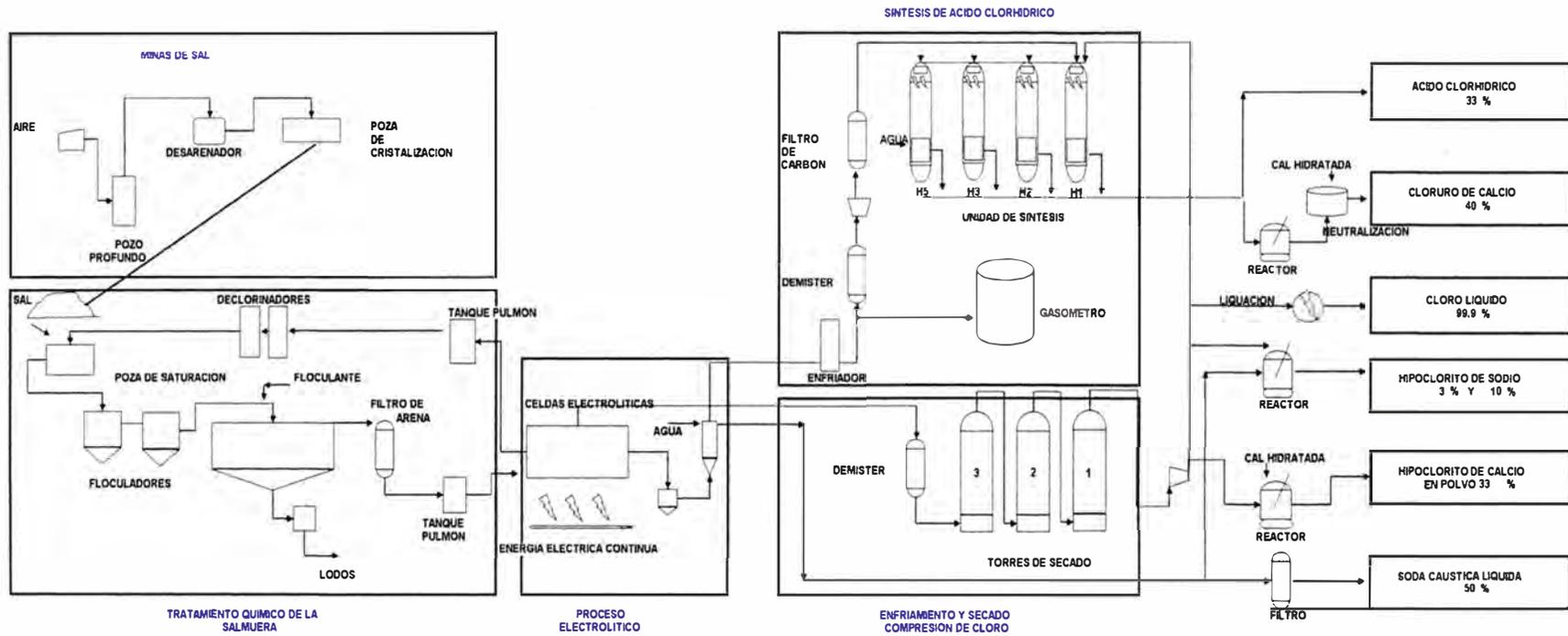
- Franco R, Ensuring succes for your cooling-water treatment program. Power Magazine March 1982.
- Nalco Chemical Company, Evaluating corrosion in cooling water and condensate systems. TECHNIFAX TF 37 – Nalco 1983.
- Kemmer F, Mc Callion J. Manual del Agua –Nalco, Tercera Edición, Mc Graw Hill (Mexico)1989. Cap 20(1-4), (21-22), Cap 38(21-25).
- Nalco Chemical, Manual técnico del Agua de enfriamiento. Naclo USA (1989). Sección 3.2.1 (Pag 1-4) – Sección 3.4.1 (Pag 1-6)(Pag 15-17) – Sección 3.4 .2 (Pag 1-2) – Sección 3..1 (Pag 15).

VII. APÉNDICE

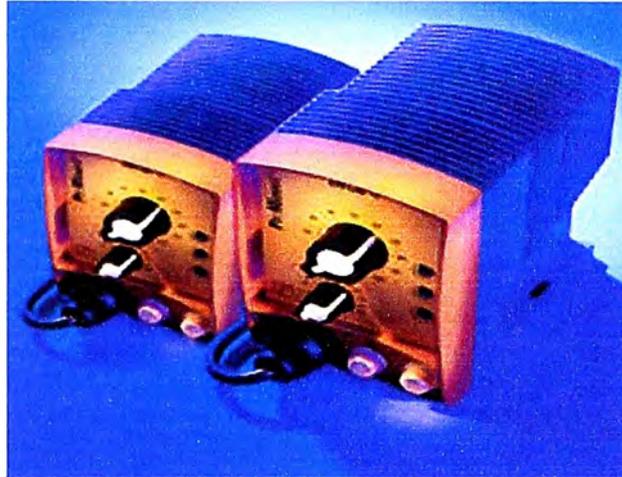
- ANEXO 1: Diagrama general del proceso.
- ANEXO 2: Implementación del sistema de control automático (Etapa I).
- ANEXO 3: Implementación del sistema del control automático (Etapa II).
- ANEXO 4: Resultados de la evaluación.
- ANEXO 5: Evaluación de corrosión e incrustaciones.
- ANEXO 6 A : Cálculos del sistema de enfriamiento – Inicial.
- ANEXO 6 B: Cálculos del sistema de enfriamiento – Resultado.
- ANEXO 6 C: Fórmulas empleadas.
- ANEXO 7 : Manual de W-Idex (Cálculos de índices de estabilidad).

ANEXO 1

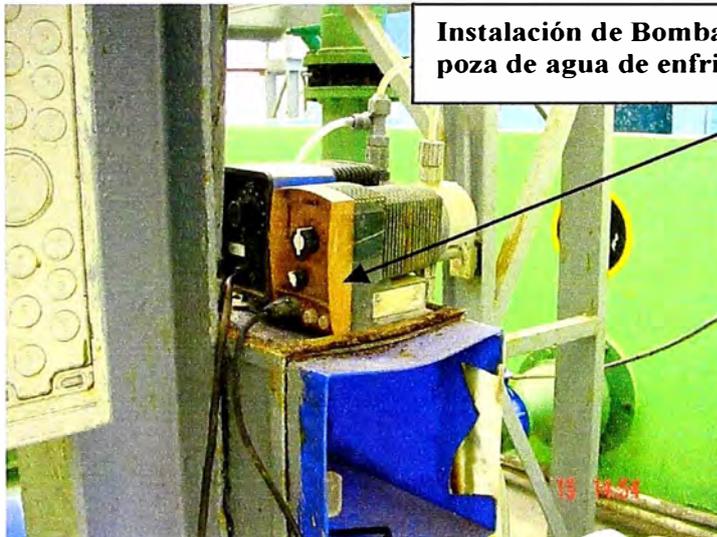
DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO



ANEXO 2.
IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL
AUTOMÁTICO (ETAPA I)



Selección de Bombas Dosificadoras



Instalación de Bombas dosificadoras cerca de la poza de agua de enfriamiento.

Sistema de inyectores para la aplicación de químicos.



ANEXO 3. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO (ETAPA II)



Selección de los elementos primarios de control y el sistema controlador



**Elemento de control primario.
Electrodo de pH**



**Elementos de control primario
instalados en línea.**

ANEXO 3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO (ETAPA II)

**Elemento de control primario
con sus sistema de protección.**



**Controladores del sistema.
Conductividad y pH.**

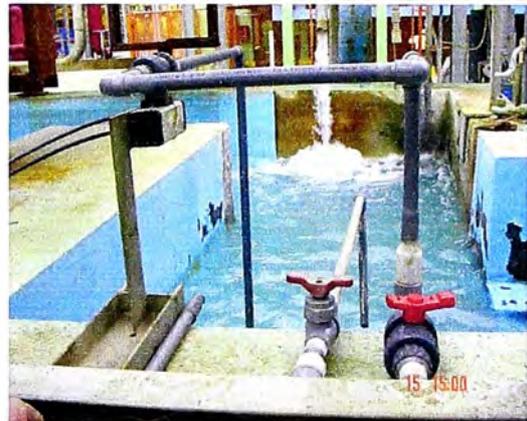
**Estableciendo los parámetros de
control. (Set points)**



ANEXO 3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO (ETAPA II)



**Elementos de Control Final.
Para el control de PH
mediante la adición de HCL**

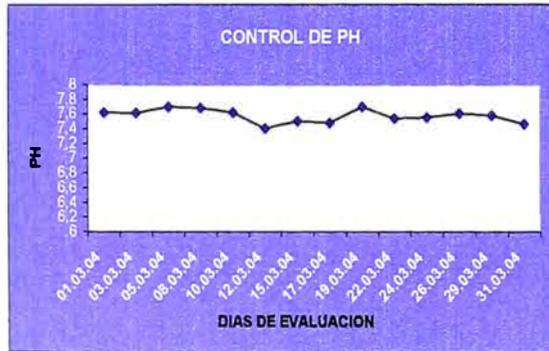


**Elementos de Control Final.
Para el control de
conductividad mediante
purgas.**



**ANEXO 4
RESULTADOS DE EVALUACION**

PROPIEDAD	UNIDAD	PROMEDIO																		
		CISTERNA	01.03.04	03.03.04	05.03.04	08.03.04	10.03.04	12.03.04	15.03.04	17.03.04	19.03.04	22.03.04	24.03.04	26.03.04	29.03.04	31.03.04	PROMEDIO			
Temperatura	° C	25	37	37	38	36	37	38	36	37	38	38	38	37	38	37	38	37	37	
Temperatura Salida	° C	--	30	29	29	28	29	30	29	28	29	30	29	30	29	30	29	30	29	29
Ph	Unidad	7.38	7.62	7.61	7.7	7.68	7.62	7.4	7.5	7.48	7.7	7.54	7.55	7.6	7.58	7.46	7.46	7.46	7.46	7.6
Sólidos Totales	ppm	760	2100	2050	2100	2100	2150	2250	2300	2350	2410	2380	2350	2250	2300	2350	2350	2350	2350	2246
SiO2	ppm	25	70	72	68	71	72	79	75	74	78	79	82	81	80	80	80	80	80	76
CO2	ppm	12	NR	NR																
Dureza Total	ppm CaCO3	450	1080	1110	1300	1220	1380	1350	1300	1280	1390	1375	1300	1360	1370	1375	1375	1375	1375	1299
Cl2 Residual	ppm Cl2	0	0.6	0.6	0.4	NR	NR	0.5	NR	NR	0.5	NR	NR	0.4	NR	NR	NR	NR	NR	0.5
CO3= Carbonatos	ppm CaCO3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO- Bicarbonatos	ppm CaCO3	248	90	85	90	95	90	78	95	89	85	90	85	92	90	80	80	80	80	88
Cl- (Cloruros)	Ppm NaCL	110	450	480	450	460	490	450	480	470	460	460	480	475	460	480	480	480	480	468
Fe Total	Ppm	0.03	0.6	0.1	0.12	0.13	0.1	0.09	0.09	0.12	0.11	0.12	0.15	0.09	0.08	0.1	0.1	0.1	0.1	0
Ca ++ Calcio	ppm CaCO3	360	840	888	1040	1094	1104	1080	1040	1024	1112	1100	1040	1088	1096	1100	1100	1100	1100	1046
Mg++ Magnesio	ppm CaCO3	90	240	222	260	126	276	270	260	256	278	275	260	272	274	275	275	275	275	253
Conductividad	Us/cm	1190	3134	3060	3134	3134	3209	3358	3433	3507	3597	3552	3507	3358	3433	3507	3507	3507	3507	3352
Sulfatos	ppm SO4	120	280	360	350	360	320	345	356	360	370	370	368	375	368	370	370	370	370	354
Residual Inhibidor	ppm Zinc	--	2.50	3.00	2.80	3.50	3.20	3.00	3.00	2.70	2.80	3.00	3.20	3.00	3.50	3.40	3.40	3.40	3.40	3.0
CC (Ciclos de concent)	Unidad	--	2.8	2.7	2.8	2.8	2.8	3.0	3.0	3.1	3.2	3.1	3.1	3.0	3.0	3.1	3.0	3.1	3.1	2.95



ANEXO 5

EVALUACION DE CORROSION E INCRUSTACIONES

SEÑORES ATENCION ASUNTO	PLANTA QUIMICA
	A QUIEN CORRESPONDA
	RATE DE CORROSION Y DEPOSITOS

TIPO DE CUPON	MILD STEEL
UBICACION	MARLEY
CODIGO	GE0789
TRATAMIENTO	X745/X746

FECHA DE INSTALACION	01.03.04	
FECHA DE RETIRO	31.03.04	
PESO INICIAL DEL CUPON (g)	10,8624	
PESO DEL CUPON SUCIO (g)	10,9865	
PESO DEL CUPON LIMPIO (g)	10,7680	
PESO DE DEPOSITOS (g)	0,1241	
PERDIDA DE PESO (g)	0,0944	
PERDIDA DE PESO POR LIMPIEZA CON ACIDO (g)	0,006	
PESO CORREGIDO (g)	0,0884	
DIAS DE EXPOSICION (días)	30	
AREA DE EXPOSICION (g)	0,1936	
DENSIDAD (g)	7,87	
TASA DE DEPOSICION (mg/cm²x día)	0,21	
mpy	2,78	

ANEXO 6A
CALCULOS PARA SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO - INICIAL

CLIENTE: PLANTA QUIMICA
SISTEMA: TORRE DE ENFRIAMIENTO SICREA.

PARAMETROS: VOLUMEN TOTAL (M3) = 1.200,00
FLUJ DE CIRC.(M3/HR) = 1.400,00
DIF. TEMPERATURA (°C) = 8,00
DIAS DE OPERACION = 30,00
HORAS DE OPERACION = 24,00

CALCULOS:

CICLOS DE CONC.	1,20	1,50	1,60	2,00	2,30	2,40	3,00
EVAPORACION (M3/HR)	17,14	17,14	17,14	17,14	17,14	17,14	17,14
REPOSICION (M3/HR)	102,82	51,41	45,70	34,27	30,32	29,38	25,70
PURGA (M3/HR)	85,68	34,27	28,56	17,14	13,18	12,24	8,57

	CICLOS	D.TOTAL	D.CALC.	ALK M	CL	STD	SI02
MAKE UP	1,00	445,00	355,00	200,00	300,00	730,00	15,00
SISTEMA	1,20	534,00	426,00	240,00	360,00	876,00	18,00
SISTEMA	1,50	667,50	532,50	300,00	450,00	1095,00	22,50
SISTEMA	1,60	712,00	568,00	320,00	480,00	1168,00	24,00
SISTEMA	2,00	890,00	710,00	400,00	600,00	1460,00	30,00
SISTEMA	2,30	1023,50	816,50	460,00	690,00	1679,00	34,50
SISTEMA	2,40	1068,00	852,00	480,00	720,00	1752,00	36,00
SISTEMA	3,00	1335,00	1065,00	600,00	900,00	2190,00	45,00

PRODUCTO	PPM	PRECIO US\$/KG
FORMULA 450	80,00	4,80

FORMULA 450 (KG/DIA)	164,51	65,80	54,84	32,90	25,31	23,50	16,45
----------------------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

FORMULA 450 (US\$/MES)	23688,81	9475,52	7896,27	4737,76	3644,43	3384,12	2368,88
------------------------	----------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

TOTAL. PROGR US\$/MES	23688,81	9475,52	7896,27	4737,76	3644,43	3384,12	2368,88
-----------------------	----------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

ANEXO 6B
CALCULOS PARA SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO - RESULTADO

CLIENTE: PLANTA QUIMICA
 SISTEMA: TORRE DE ENFRIAMIENTO SICREA.

PARAMETROS: VOLUMEN TOTAL (M3) = 1.200,00
 FLUJ DE CIRC.(M3/HR) = 1.400,00
 DIF. TEMPERATURA (°C) = 8,00
 DIAS DE OPERACION = 30,00
 HORAS DE OPERACION = 24,00

CALCULOS:

CICLOS DE CONC.	1,20	1,50	1,60	2,00	2,30	2,40	2,95
EVAPORACION (M3/HR)	17,14	17,14	17,14	17,14	17,14	17,14	17,14
REPOSICION (M3/HR)	102,82	51,41	45,70	34,27	30,32	29,38	25,92
PURGA (M3/HR)	85,68	34,27	28,56	17,14	13,18	12,24	8,79

	CICLOS	D.TOTAL	D.CALC.	ALK M	CL	STD	SIO2
MAKE UP	1,00	450,00	360,00	255,00	105,00	760,00	25,00
SISTEMA	1,60	720,00	576,00	408,00	168,00	1216,00	40,00
SISTEMA	1,85	832,50	666,00	471,75	194,25	1406,00	46,25
SISTEMA	1,90	855,00	684,00	484,50	199,50	1444,00	47,50
SISTEMA	2,00	900,00	720,00	510,00	210,00	1520,00	50,00
SISTEMA	2,10	945,00	756,00	535,50	220,50	1596,00	52,50
SISTEMA	2,95	1327,50	1062,00	752,25	309,75	2242,00	73,75
SISTEMA	4,00	1800,00	1440,00	1020,00	420,00	3040,00	100,00

PRODUCTO	PPM	PRECIO US\$/KG
NALCO X745	120,00	2,80
NALCO X746	80,00	3,00

NALCO X745(KG/DIA)	246,76	98,70	82,25	49,35	37,96	35,25	25,31
NALCO X746(KG/DIA)	164,51	65,80	54,84	32,90	25,31	23,50	16,87

NALCO X745 (US\$/MES)	20727,71	8291,08	6909,24	4145,54	3188,88	2961,10	2125,92
NALCO X746 (US\$/MES)	14805,50	5922,20	4935,17	2961,10	2277,77	2115,07	1518,51

TOTAL. PROGR US\$/MES	35533,21	14213,28	11844,40	7106,64	5466,65	5076,17	3644,43
-----------------------	----------	----------	----------	---------	---------	---------	---------

ANEXO 6 C

FORMULAS EMPLEADAS

$$\text{EVAPORACION (E)} = \frac{\text{Flujo de Recirculación} \times 0.85 \times \text{dT F}}{1000,00}$$

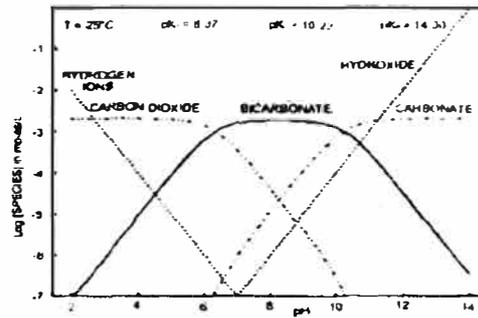
$$\text{REPOSICION (R)} = \frac{\text{Evaporación} \times \text{Ciclos de concentración}}{(\text{Ciclos de concentración} - 1)}$$

$$\text{PURGA (P)} = \text{REPOSICION} - \text{EVAPORACION}$$

$$\text{PURGA (P)} = \frac{\text{Evaporación}}{(\text{Ciclos de concentración} - 1)}$$

ANEXU 7

MANUAL DE W - INDEX



W-INDEX

Water INDEX calculations
Version 4.0 for Windows

(c)1989-99

MARVIN SILBERT and ASSOCIATES

23 Glenella Avenue, Willowdale, Ontario, Canada, M2M 2K6

Telephone and FAX: (416) 225-4541

Internet: marv@silbert.org

W-INDEX

W-index is a contraction of **W**ater scaling **I**ND **E**X calculations. This program can estimate variations with water temperature and its concentration. This latest version has extended the concentration variations to include both cooling towers and RO reject. Unlike similar programs, W-index, has the capability to do the calculations for those high-pH situations where other calculations fail. W-index uses several calculations taken from the open literature, in particular the pioneering work of Langelier in the USA and Loewenthal and Marais in South Africa. To fully interpret the results, it should be noted that conditions within a given cooling system may differ from those on which the calculations are based due to factors related to local conditions or sampling-and-analysis problems. The calculations do give a reasonable approximation; however, the authors can assume no responsibility for any decision based upon the results of the calculations.

An Quick Introduction to Marvin Silbert and Associates

In spite of the potential risk, water chemistry tends to get a low priority in many industrial plants. MS&A began with the goal of providing plant operators objective audits of system performance to minimize costs and optimize the various processes or to perform those special projects that are needed, but not performed due to restrictions in staff availability. We give industrial plants the opportunity to *time share* their own Chemist and/or Chemical Engineer.

Over the years we have performed a wide range of industrial water-treatment projects ranging from building HVAC systems to nuclear steam-supply systems. We look at water systems from the point the water enters the plant until it is discharged. This ability to see the overview comes from a background of direct *hands-on* experience and gives us a distinct advantage as we can look for ways to reduce effluents and conserve energy by improving control on the influent and process water systems. We also assess the various environmental and safety aspects and can prepare audits.

Marvin Silbert and Associates are prepared to undertake any projects you might have related to water systems, environmental releases, safety and environmental audits. We cover the entire spectrum from small HVAC systems to the biggest industrial systems in the country. We have experience in the following areas. Under NAFTA, we are now able to work on both sides of the Canada-USA border.

- Troubleshooting industrial plants/commercial properties
- Optimization of chemical treatment equipment and programs including the development of standardized supplier contracts
- Environmental, safety and legal analyses, audits and support
- Specialized studies and R&D Projects
- Computer applications including the development of water-treatment software
- Training courses, seminars and workshops in water treatment and applied statistical process control

For more details contact:

Marvin Silbert and Associates
23 Glenella Avenue
Toronto, ON, Canada, M2M 2K6
Tel/FAX: (416) 225-4541
E-mail: marvin@silbert.org

or visit our Web Site at:

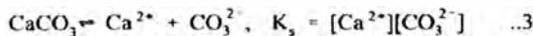
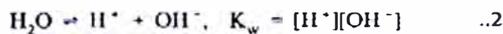
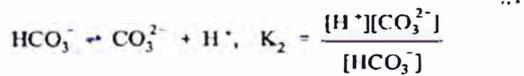
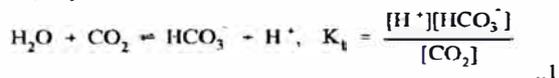
<http://www.silbert.org/~silbert/>

W-INDEX - Scaling Index calculations

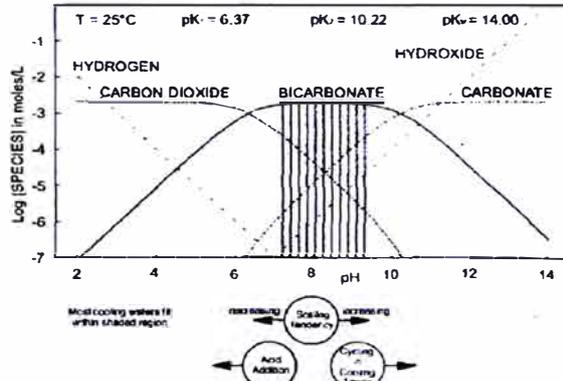
Carbonate Equilibria in Water Systems

The presence of combinations of calcium, magnesium and alkalinity (carbon dioxide) that produce "hardness" in the water can lead to scale formation, particularly on heat-transfer surfaces. *Scaling* or precipitation fouling is a frequent problem in cooling systems. The evaporation and/or heating that takes place within the system converts relatively soluble alkalinity and calcium from the raw water into insoluble calcium carbonate. If flowrates are high, calcium carbonate could be carried in suspension through the system before it settles. Given the right conditions, it could settle in the cooling tower sump or be lost through the bleedoff system or by filtration. On the other hand, the flow in the boundary layer adjacent to the tube surface will be low and allow some settling. As cooling towers are outside and to some extent act as *air washers*, there is a likelihood of microbiological fouling occurring simultaneously. The slime forming bacteria provide an additional attachment mechanism that helps bond solid material to the walls. As the solid builds up, the ability of the system to cool critical components is lost.

When a single material such as calcium carbonate deposits on the walls of heat transfer surfaces, the resultant crystals tend to be very hard. In the equilibrium between carbon dioxide gas (from the air) and water, calcium carbonate will be the insoluble product. The equilibria in naturally occurring waters include the various carbonate species (equation 1), the self dissociation of water (equation 2) and the solubility of calcium carbonate (calcite) (equation 3):



The figure on the following page is derived from equations 1-3 and shows the relative abundance of the various carbonate species as a function of pH. In the pH 7-8 range, typical of most raw waters, the main species is the bicarbonate ion. In a cooling tower, there is a concentrating mechanism which results in increased pH and the accompanying conversion of bicarbonate to carbonate ion.



Carbonate Equilibrium Diagram for Cooling Water

In the language of the water-treatment industry, *alkalinity* refers to both the carbonate species and the hydroxide. The total alkalinity in the system will be the sum of the individual species:

$$\text{ALK} = 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{OH}^-] \quad ..4$$

Substituting the various equilibria into equation 4 and multiplying by $[\text{H}^+]_s$ (the hydrogen ion concentration at saturation) gives a *standard* quadratic equation that can be solved for $[\text{H}^+]_s$.

$$\frac{K_s}{[\text{Ca}^{2+}]K_2}[\text{H}^+]_s^2 + \left(\frac{2K_s}{[\text{Ca}^{2+}]} - \text{ALK} \right) [\text{H}^+]_s + K_w = 0 \quad ..5$$

pH is defined as the negative logarithm of $[\text{H}^+]$ to the base 10; pH_s , the pH at saturation, then would be $-\log [\text{H}^+]_s$.

Scaling Index Calculations

The **Langelier Stability Index** or **LSI** (Langelier 1946) is the difference between the actual system pH (the measured value) and the saturation pH_s . **This index provides a simple criterion by which the likelihood of scaling can be predicted.**

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad ..6$$

A positive LSI value indicates a potential for scale formation and a negative LSI value indicates that scaling is unlikely. In fact, a negative value would tend to imply that any existing scale

is likely to be removed over time. An LSI value of zero indicates that the system is in equilibrium and that scaling is unlikely; it is also unlikely that existing scale would be removed. This is what is meant by corrosive with respect to the LSI; it has nothing to do with corrosion of carbon steel.

The LSI value of Lake Ontario is close to zero as it comes into the system as makeup. With the heating or concentrating that occurs within the cooling system, the LSI moves into the scaling region, i.e., to an increasing positive value as shown in Table 1, calculated using W-index for Lake Ontario water. It should be noted that the temperature effect is much smaller than the concentration effect. Combining the two effects, e.g., concentrating at a higher temperature, would further aggravate the situation.

Experience has shown that many systems do not scale just because the LSI is positive. Various authors have suggested adjustments. One example is Feitler's pH_c or critical pH. He found that few systems scaled unless the LSI was greater than +0.6 to +1.0. This is an empirical correction with no theoretical basis. W-index has included a user selectable value. When shipped, it is set at 0.6. The graphs are colour coded to show whether the LSI is within or above this value.

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
pH	8.10	7.96	7.83	7.76	7.69	7.64	7.61	7.59	7.59	7.60	7.62
LSI	-0.06	-0.03	0.02	0.06	0.12	0.22	0.34	0.48	0.63	0.79	0.97

COC	RAW	Equal	~2	~1	~.4	~.1	~.6	~7	~8	~9	~10
pH	7.80	7.47	7.91	8.17	8.35	8.49	8.61	8.71	8.79	8.87	8.94
LSI	0.01	-0.02	0.04	1.44	1.86	2.19	2.46	2.69	2.89	3.06	3.22

RAW is the water used for makeup. Equal is after equilibration with atmospheric CO₂.

As the full solution to the carbonate equilibria is a quadratic equation, it will have two solutions. Generally one of them (it's sometimes hard to decide which) appears valid while the other appears to be almost absurd. Here, the positive root is valid below the bicarbonate-carbonate equivalence point, i.e., a pH of 10.3 which covers essentially all cooling waters. Above this point, there is a turnaround. The negative root is used for high-pH applications, e.g., mining, ash-transport and basic-oxygen processes. The LSI definition actually reverses for the calculation with the negative root.

$$LSI = pH_c - pH \quad \dots 7$$

W-index calculates both roots to the equation and the pH_c and LSI values for both. A flag on the table will indicate which applies. In the pH 10.3 region, it may become a judgement call.

The Ryznar and Puckorius Indices are favoured by many. Unlike the Langelier Index, these are based upon empirical data. The relationship for the Ryznar Stability Index is:

$$RSI = 2pH_c (\text{saturation pH}) - pH_c (\text{measured pH})$$

with values greater than 6 indicating no scale and less than 6 indicating scale. The relationship for the Puckorius Practical Index is similar:

$$PSI = 2pH_c (\text{saturation pH}) - pH_c (\text{equilibrium pH})$$

The equilibrium value is based upon a relationship between pH and alkalinity derived from a large number of samples.

$$pH_c = 1.485 \log(\text{Total Alkalinity}) + 4.54$$

The criterion is the same as for the RSI with values greater than 6 indicating no scale and less than 6 indicating scale. It should be noted that the calculated pH_c is independent of temperature. As this imposes some limitations on the use of the PSI, it is not used by W-index for all applications.

W-index calculates both the RSI and PSI. User inputs are provided in the Setup screen to set two levels of warning on the scaling criteria. They are initially set at 6.0 for scaling possible and 5.0 for scaling likely. The graphs are colour coded to make these distinctions visible.

Other Indices Calculated by W-index

Calcite Saturation Level: The simple ratio, IAP/K_s, relates the ion activity product to the solubility product constant to give a rough indication of the degree of supersaturation. The relationship is given by:

$$\frac{[CO_3^{2-}] \alpha_{[CO_3^{2-}]} \times [Ca] \alpha_{[Ca]}}{K_s \text{ for } CaCO_3}$$

where a value of:
< 1 indicates undersaturation
= 0 indicates equilibrium and
> 1 indicates supersaturation.

In a typical system, a value of 1.2 to 1.5 can often be achieved before scaling occurs.

Skillman Sulfate Index: This calculation comes from work by Skillman with oil-field brines. Generally sulfate is of no great concern as the solubility of calcium sulfate is two orders of magnitude higher than that of calcium carbonate. The calculation requires:

- The ionic strength of the solution. This term is also already used by W-index for the calcium carbonate scaling indices.
- The calcium sulfate solubility-product constant, K_{sp} . W-index uses a polynomial approximation.
- The excess common-ion concentration of the calcium and sulfate ions. This is defined using the formula below using the data input to W-index with the concentration expressed in moles/L.

$$X = 2.5 \times [Ca^{2+}] - 1.04 \times [SO_4^{2-}] \times 10^{-5} \text{ moles/L}$$

The theoretical calcium sulfate concentration is then defined as:

$$S_{\text{theoretical}} = 1000 \times \left(\sqrt{X^2 + 4K_s} - X \right)$$

The value calculated for the Skillman Index is the ratio of $S(\text{actual})/S(\text{solubility(theoretical)})$ for the calcium or sulfate, whichever is the limiting species.

Larson-Skold Index: This provides a simple assessment of the potential for corrosion based upon a simple relation between the Chloride and Sulfate with the alkalinity in the system. The relationship is:

$$\text{Larson-Skold Index} = \frac{[\text{Chlorine}] + [\text{Sulfate}]}{\text{Alkalinity}}$$

with the chloride and sulfate being in meq/L.

The Larson-Skold index is valid only for the pH range from 6.5 to 8.5 and was initially established for water in the Canadian/US Great Lakes. If the value is less than 0.1, the water is considered as being non-corrosive with respect to carbon steel, and corrosive is above 0.1. If it goes much above 0.1 expect pitting to occur.

Installation and Operation

Installation

- W-index can be installed from floppies using the install program. Insert the first floppy and Run A:SETUP
- We chose a 16-bit approach as that enables its installation and operation on any Windows system.
- There are no entries to the Registry nor other files located in hard to find places. To deinstall, simply remove the entire

directory and the files within it along with any shortcuts or icons used for startup.

- The program is password protected to minimize the proliferation of unauthorized copies. Until the password is entered, the program is in the DEMO mode with the printing and graphing routines disabled. Once entered, the printing and graphing routines are enabled. The BWB file should be saved and it will be unnecessary to enter it again. Note that the password is case sensitive.
- Those with DEMO versions can quickly upgrade to the full version when they make their payment as the required password can be sent by telephone, FAX or e-mail.

Startup

- When W-index starts, it sets all screens to their home position and then displays the **setup** screen. Below the log-on message, there are places to establish the operating parameter options including:

Setup

- **Scaling Criteria:** The graphs for the scaling indices are colour coded to indicate, **safe**, **caution** and **danger** states. When shipped, the criteria used for the Langelier and the Puckorius-Ryznar criteria are preset at 0.0/6.0 for possible scaling and 0.6/5.0 for likely scaling. These can be altered to meet the users experience.
- **Footnote for graphs:** This is preset as a copyright notice for MS&A, but can be changed to provide information related to the time of the analysis or other user identifier. The text is aligned from the right and the amount of information provided is limited only by the space available.
- **Source of the Constants:** The curves used to fit the equilibrium constants used for pK_{s1} , pK_{s2} and pK_w come from *Standard Methods*. A second set of data for pK_{s1} and pK_{s2} can be toggled to use values published by the AWWA.

Keyboard Shortcuts

- **Ctrl-I** returns (initializes) all screens to their *home* or *startup* positions.
- **Ctrl-R** does a manual recalculation. There are a few conditions where this may be needed and it will be indicated by the word *CALC* appearing on the status bar.
- **Ctrl-P** brings up the print menu.
- **Ctrl-G** brings up the graph menu.
- **Ctrl-L** brings up a sample graph, when in DEMO mode.

Protected and Unprotected Cells

- The calculations are protected and you can not make any entry into these cells by error.
- Data can be entered only into those cells provided for the purpose. These are in the **input** and **setup** screens.

System Requirements

- A PC-compatible system running Windows version 3.1 or higher.
- A minimum of a 80486 with 4 MB of RAM.
- The output is compatible with all printers or monitors normally used with Windows.
- A colour monitor is required to differentiate between protected and unprotected cells.
- A high-resolution monitor at 1024 x 768 resolution is desirable to appreciate the graphics.

Saving and Exiting

- When you exit the program at the end of your session, a prompt will come up asking if you wish to save the current BWB file. This is an automatic response if you have changed any variables. Making changes is part of the normal operations. Unless there is a reason to do so, there is no need to save the changes.
- If you want to save a file with the parameters for a particular system, you may select the usual File and Save as options. Once started, you can Open and operate with other BWB files and switch back and forth using the Window menu.

Data Entry

- Data can be entered only into the appropriate *unprotected* cells, which are coloured blue. To change the units go to the setup screen.
- **Graph/Table labels:** Enter the text that will be used as a title all graphs and tables. Both will be combined into a single title for the graphs.
- **Sample ID:** This cell provides the label for tables and graphs. The term "SAMPLE ID" can be changed as can the label.
- **Temperature:** This is the actual temperature at which the measurement is made and can be entered as °C or °F. Enter a numerical value in the first cell and either an upper or lower case C/F in the second. A warning appears if an invalid character is entered.
- **Alkalinity:** Methyl orange (M) and phenolphthalein (P) alkalinities are entered in units of ppm as CaCO₃. An error message will appear if the alkalinity and pH combinations are invalid. M-ALK is used to determine the scaling indices. The P-ALK is required to make a high-pH correction to the equilibrium diagram. A value for the P-ALK is expected if the pH is greater than 8.00.
- **Calcium Hardness:** The value is required in ppm as CaCO₃ for the calculation. If your value is in mg/L as Ca, multiply the value in mg/L by 2.5 before entering it.
- **pH:** This is the measured pH at the temperature specified above.
- **Chloride:** The chloride is required in mg/L as Cl. This value is used for calculating the Larson-Skold Index.

- **Sulfate:** The sulfate is also in mg/L as SO₄²⁻. It is used to calculate the Skillman Sulfate Index and with the chloride for the Larson-Skold Index.

Saving Input Data

- A special saving option using the File and Version options allows you to save only that data input for a specific sample or system.
- Selecting Put allows you to save the data. It is recommended that you select the Input Cells option from the dialogue box. You are asked to choose a filename with the .BDT extension. You can retrieve an earlier set of data by selecting the Get version.

Table Notes

- Three lines are provided at the bottom of each table for entering notes that will appear in the printed version. Below this there is a one-line space and an additional three lines for notes that will appear on screen, but not on the printed version.
- The leftmost set is carried through to all screens. All other cells are available for user entries if the notes differ from those in the input screen. Note that:
- Any note string can run the width of the table, from the point of entry, until it is terminated by a user entry.
- The initial set of notes in the leftmost column can be erased or modified.
- The notes will be included in the Put version.

Data Output

- **Input-Output:** This provides data specific to the sample under its specific sampling temperature. This table calculates all the indices that apply. Some warnings are given based upon input data and the potential for scale formation.
- **Temperature Effects:** Pushing the Temperature Tab brings up two tables showing variations with two ranges are provided:
 - pH < 10.3: for most cooling, domestic waters
 - pH > 10.3: for ash systems, mining, basic oxygen scrubbers.

It is interesting to note that the scaling potential changes very little with temperature over the ΔT common to most cooling systems. A 10 C° temperature range changes the LSI by about 0.2. This is hardly enough to promote scaling. In designing a system or treatment program, it should be recognized that if a water is already scaling, it will tend to drop out calcium carbonate at the hottest surface. It should also be noted that the ΔT of the system is an averaged temperature rise. A given heat exchange surface may be much higher, e.g., the surface of the mould in a continuous casting machine for steel production may be as high as 120-140°C in spite of the overall cooling water stream having a ΔT of 5-10 C°.

- **Concentration Effects:** Tables are provided for two applications where water can be concentrated. Use the **Setup** to select which mode is in use.
 - **Cooling Towers and Evaporators:** This option operates from two to ten cycles of concentration. As the first step, the system is equilibrated with the carbon dioxide in the atmosphere.
 - **Reverse Osmosis Reject:** This operates in the same way as the evaporation, except that it is in terms of **Permeate Recovery**. The calculation is performed at the raw water temperature.
- **Composition:** This table provides the composition with respect to the three carbonate species and the hydrogen and hydroxide ions from self ionization of water. They are provided in several units over the range specified in the setup menu.

Printing

- The printing menu is provided by pressing **Ctrl-P**. The individual tables can be selected for printing if you desire or all can be printed.
- Selecting page setup allows you to format the page to accommodate your printer, to select either portrait or landscape modes and to change the information included within the header and footer lines. W-index will remember your last setup or you can save named ranges for recall. The default named setting will print vertically on either the 8.5 x 11 inch / 217 x 279 mm North American standard or 210 x 297 mm A4 metric standard pages. If you wish to change this (e.g., to a landscape mode), you can either set-up the page and update the default values or save a new named configuration under a new name. You may use as many named configurations as you wish, but you must select the appropriate one before printing or the last named configuration will be used.

Graphing Data

- The graphing menu showing the available graph options is called up by pressing **Ctrl-G**. Selecting from the list brings up the chosen graph. The graphs are designed to show over any other screens. To get back to the main W-index screens, it is necessary to minimize or exit the graph.
- To print a graph, take one of the following options:
 - The default is set at portrait, full size. This does not give a good representation of a horizontal page. It is recommended that you choose landscape full or portrait half.
 - **Page Setup** provides the choice of printing the graphs as full pages in landscape and portrait modes or half pages in vertical mode. Custom sizes can also be selected. Select **Print** to print.
 - Select **edit** and **copy** to insert the graph into other Windows applications, e.g., a word processor or

graphics package. The sample graphs in this manual were printed this way. (Note that the common **Ctrl-C** command does not function; however, **Ctrl-V** does function in the application receiving the graph.)

- As one of the major roles for W-index is comparing one set of operating conditions with another, the graphing program works to support that type of role. Each graph operates as a separate and *permanent* file once created. You can graph the data under one set of conditions, then minimize the graph and go back to the main program and change the conditions and make another graph as many times as you wish. The individual graphs can then be accessed via the Windows taskbar or by pressing the **Alt-Tab** keys. They must also be exited individually.

Technical Support

- Telephone or FAX: 1-416-225-4541
- E-mail: marvin@silbert.org
- WWW: on-line technical support and registration is available at <http://www.silbert.org/~silbert>.
- Don't forget to send in the registration form (or use the on-line form). This qualifies you for free technical support and upgrades.

FAQs

This section is a summary of questions that have popped up over the years. Users are encouraged to supply additional questions as the user is the one with the questions. The developer tends to see things in their sleep and can miss some critical points.

- **Why do these values differ from some others?**

There are two reasons:

 - W-index does a rigorous calculation using the detailed quadratic equation that relates the various carbonate equilibria. Many other calculations are based upon approximations to simplify the calculations. These may or may not be totally valid.
 - The end result is dependent upon the nature of the polynomials used to fit the various constants. When W-index was updated to version 4.0, the polynomials were updated to those recommended in *Standard Methods*. The provision was included to include a switch that would also allow substituting some of the constants to match those issued with an AWWA publication. There are, of course, others.
- **My LSI, RSI and PSI don't agree. Which should I believe?**

The LSI calculates the potential for scaling based upon thermodynamics. There is a kinetic factor that determines whether or not it actually does scale. That is almost impossible to predict. The RSI and PSI are based upon experience. Will your system behave in the same manner? Not necessarily. Don't read too much into the results.

- **What is the difference between Save and Put?**
Save should be used once to establish a standard with a standard set of notes and data. Put should be used to save each set of data (including notes) for records or reuse. The resulting BDT file from the Put command is much smaller than that from the BWB produced by a save, typically 3 kB vs. 300-400 kB.
- **I also have C-tower and the files look similar. Could I install both in the same directory?**
Yes. Most of the files, e.g., the DLLs, are identical and they could be placed in the same subdirectory. W-index.exe is able to run the C-tower.bwb file and vice versa. We suggest separate installations only to avoid confusion.

Sample Output

- **Sample printouts of W-index tables and setup page:** The originals were printed directly using the default settings, but have undergone some changes for presentation and printing in this manual.
- **Samples of graphical output:** These were displayed on screen and then copied to WordPerfect for inclusion in this manual.

W - INDEX
Water INDEX calculations, ver. 4.01, (C) 1990, 94, 98

Developed by **MARVIN SILBERT and ASSOCIATES**
21 Glenella Avenue Willowdale, ON, Canada M2M 2K6
Tel/FAX (416) 225 4541, e-mail: marvin@silbert.org

W-index uses calculations found in the literature to determine the various scaling indices. To interpret the results, it should be recognized that these are based upon thermodynamic principles. These may provide the driving force, but unless the kinetics "cooperate", the process may not move.

This copy licensed to: Enter User's Name here
Enter User's Affiliation here

Serial Number: 4810000
Note: This license prohibits making copies other than for backup purposes or operating on more than

SETUP Enter appropriate values ONLY in the blocks provided below
Do not enter values in any other location

Keyboard: Ctrl-R... Recalc table
Ctrl-P... Print menu
Ctrl-G... Graph menu
Ctrl-F... Initialize to start positions

Remember: shows that scale does not always form when the LSI exceeds 0. Values of 0.5, 1.0 have been suggested. You may enter your choice in the boxes on the right:

	CaSO ₄	CaCO ₃
LSI	0.00	0.60
NSI	8.00	3.00

Kernel Factors: (C) 1990, Marvin Silbert and Associates

	MW	ppm to CaCO ₃	ppm to CaCO ₃
		to ppm	to ppm
HYDROGEN	1.008	50	0.02
CARBON DIOXIDE	44.010	1.140	0.443
BICARBONATE	61.017	0.820	1.220
CARBONATE	60.009	1.660	0.600
HYDROXIDE	17.008	2.940	0.250

Estimation by SOCMEM: 1. 1. Log Standard Methods for Water and Wastewater
2. Use AWWA values for Ca₂ and SO₄

Equation used for log CaCO₃: 1. 1. Puckorius 1.465 log(M.A.S.) + 4.54
2. Kuntz 1.60 log(M.A.S.) + 4.44
3. Sauer 1.645 log(M.A.S.) + 4.477

Concentration unit for: 1. 1. Calcium Direct Estimator
2. Reverse Osmosis Reject
2. Decimal points to be displayed

Concentration units: 3. Minimum CaCO₃ for scaling lower
0.25 Step
3.00 End CaCO₃

Temperature range: 15. Starting Temperature 15.0 Internal
5. Step 5.0 Scale
Sample Temp. 23.00 C 65. End Temperature 65.0 in deg. C
5. End of "2" Basic Units Display Del.

pH range: 3.00 Starting pH
Sample pH: 7.00 Step
13.0 End pH
5. Display points to be displayed

Password: DE-NO made, Puckorius and Sauer displayed

W-Index Calcium Carbonate Scaling Index Calcis
Sample ID... **Lake Ontario**

INPUT DATA					
Temperature	25	C			
TDS	180	ppm			
M - Alkalinity	100	ppm CaCO3			
P - Alkalinity	0	ppm CaCO3			
Ca Hardness	100	ppm CaCO3			
pH @ Temperature	7.8		pH < 10.3	Positive Root Applies	
Chloride	28	mg/L Cl			
Sulfate	32	mg/L SO4			
Ionic Strength	0.0045	Moles/L			
DISTRIBUTION					
	Traditional as ppm	Moles/L	mg/L	ppm	Mole %
Hydrogen ions		1.6E-008	0.00	0.00	0.00
Carbon Dioxide		7.1E-005	3.12	3.56	3.54
Bicarbonate	100	M	117.97	98.24	98.14
Carbonate		5.7E-008	0.34	0.57	0.28
Hydroxide ions		6.4E-007	0.01	0.03	0.03
INDICES					
	Positive Root	Negative Root			
pHs	7.54	11.29			
Langlier Saturation	0.16	CAUTION	3.49		
Ryznar Stability	7.49	-NA-			
Puckorius Practical	7.82	-NA-			
IAP/Ksp		0.96	Undersaturated		
Caplan pH		7.77			
Kunz		7.64			
Puckorius Equilib pH		7.47			
Stollman Sulfate		0.03	Undersaturated		
Larson-Stoid		0.56	** CARBON STEEL		
CONSTANTS					
		K	pK		
Disassociation of Water		Kw	1.0E-14	13.99	
Solubility Product for Calcite		Ks	3.3E-09	8.48	
Carbon Dioxide - Bicarbonate Equivalence		K1	4.4E-07	6.35	
Bicarbonate - Carbonate Equivalence		K2	4.7E-11	10.33	

W-Index Calcium Carbonate Scaling Index Calcis
Sample ID... **Ash-Transport Water**

INPUT DATA					
Temperature	12	C			
TDS	2000	ppm			
M - Alkalinity	486	ppm CaCO3			
P - Alkalinity	405	ppm CaCO3			
Ca Hardness	585	ppm CaCO3			
pH @ Temperature	12.6		pH > 10.3	** Negative Root Applies **	
Chloride	15	mg/L Cl			
Sulfate	325	mg/L SO4			
Ionic Strength	0.05	Moles/L			
DISTRIBUTION					
	Traditional as ppm	Moles/L	mg/L	ppm	Mole %
Hydrogen ions		2.5E-13	0.00	0.00	0.00
Carbon Dioxide		1.9E-11	0.00	0.00	0.00
Bicarbonate		2.6E-05	1.59	1.30	0.15
Carbonate	180	2(M - P)	3.6E-03	214.47	356.02
Hydroxide ions	315	2P - M	1.4E-02	236.81	686.23
					79.46
INDICES					
	Positive Root	Negative Root			
pHs	6.53	12.45			
Langlier Saturation	6.07	DANGER	-0.15		
Ryznar Stability	0.47	DANGER	-NA-		
Puckorius Practical	4.98	DANGER	-NA-		
IAP/Ksp		1168.49	**OVERSATURATED**		
Caplan pH		8.91			
Kunz		8.76			
Puckorius Equilib pH		8.40			
Stollman Sulfate		0.24	Undersaturated		
Larson-Stoid		-NA-			
CONSTANTS					
		K	pK		
Disassociation of Water		Kw	3.5E-15	14.46	
Solubility Product for Calcite		Ks	3.8E-09	8.42	
Carbon Dioxide - Bicarbonate Equivalence		K1	3.6E-07	6.44	
Bicarbonate - Carbonate Equivalence		K2	3.4E-11	10.46	

W-index Temp. Effects Upon Scaling Indices
Sample ID... **Lake Ontario**

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

Temp (C)	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
pH	7.8	7.85	7.90	7.76	7.72	7.69	7.67	7.65	7.63	7.62	7.61
pHs	7.79	7.72	7.64	7.57	7.51	7.44	7.38	7.31	7.25	7.19	7.13
LSI	0.11	0.13	0.16	0.18	0.22	0.25	0.29	0.33	0.38	0.43	0.48
RSI	7.69	7.59	7.49	7.38	7.28	7.19	7.08	6.98	6.87	6.76	6.65

TEMPERATURE EFFECTS - from negative root and valid for pH > 10.3

Temp (C)	10	15	25	30	35	40	45	50	55	60	65
pH	8.15	7.97	7.80	7.64	7.48	7.34	7.20	7.07	6.94	6.82	6.71
pHs	11.64	11.46	11.29	11.13	10.98	10.83	10.69	10.56	10.43	10.32	10.20
LSI	3.49	3.49	3.48	3.49	3.49	3.49	3.49	3.49	3.49	3.49	3.49

Sample Temperature = 25 C

W-index Conc. Effects Upon Scaling Indices
Sample ID... **Lake Ontario**

EFFECTS OF CONCENTRATING WATER IN REVERSE OSMOSIS

Valid for pH 7-10
Sample Temperature = 25 C

REJECT

R ₁	Eq	RO Recovery Rate									
		W	br	10	20	30	40	50	60	70	80
TDS	18	18	200	225	257	300	360	450	600	900	1800
Ca	10	10	111	125	143	167	200	250	333	500	1000
alk	10	10	111	125	143	167	200	250	333	500	1000
pH	7.8	7.7	7.84	7.83	8.02	8.13	8.28	8.42	8.63	8.92	9.41
pHs	7.6	7.6	7.56	7.46	7.35	7.23	7.08	6.90	6.67	6.34	6.80
LSI	0.1	0.1	0.28	0.47	0.67	0.91	1.19	1.52	1.96	2.57	3.61
RSI	7.4	7.5	7.28	7.00	6.68	6.32	5.89	5.37	4.70	3.77	2.2

NOTE: Equilibrium of the water with any given system will be dependent upon the rate of carbon dioxide transfer. This will vary with flow velocity, flow design and weather. The values shown are to be considered as approximations. For more precise work, measurements should be made under a variety of operating conditions if scaling is indicated, the addition of acid or a crystal inhibitor to the feed stream may be required.

W-index **Comp. of Carbonate Species vs. pH**
Sample ID... **Lake Ontario**

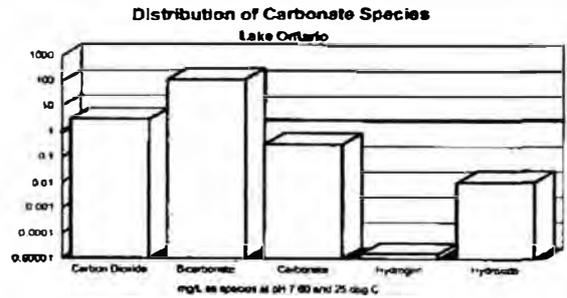
pH		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Log	Carbon Dioxide	-2.7	-2.7	-2.7	-2.9	-3.4	-4.3	-5.4	-6.5	-8.1	-10.0	-12.0
	Bicarbonate	-8.1	-5.1	-4.1	-3.2	-2.8	-2.7	-2.7	-2.9	-3.6	-4.4	-5.4
	Carbonate	-13.4	-11.4	-9.4	-7.5	-5.1	-5.0	-4.0	-3.2	-2.8	-2.7	-2.7
	Hydrogen ions	-3.0	-4.0	-5.0	-6.0	-7.0	-8.0	-9.0	-10.0	-11.0	-12.0	-13.0
	Hydroxide	-11.0	-10.0	-9.0	-8.0	-7.0	-6.0	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0

Moles/L	Carbon Dioxide	2.0E-1	2.0E-1	1.9E-1	1.4E-1	3.8E-2	4.5E-3	4.4E-4	3.2E-5	8.2E-7	9.7E-9	9.9E-11
	Bicarbonate	8.6E-2	8.6E-2	8.3E-2	6.0E-2	1.6E-1	1.9E-1	1.9E-1	1.4E-1	3.5E-1	4.2E-1	4.3E-1
	Carbonate	4.0E-11	4.0E-11	3.0E-11	2.8E-11	7.6E-11	9.1E-11	8.9E-11	8.4E-11	1.6E-10	2.0E-10	2.0E-10
	Hydrogen ions	1.0E-13										
Moles %	Carbon Dioxide	99.98	99.97	99.87	89.91	18.84	2.29	0.22	0.02	0.00	0.00	0.00
	Bicarbonate	0.04	0.43	4.13	30.09	81.11	97.23	91.83	64.78	11.68	8.38	0.00
	Carbonate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.46	4.45	30.38	54.72	18.14	1.93
	Hydroxide	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.50	4.62	33.62	83.61	98.06

Moles %	Carbon Dioxide	99.98	99.97	99.87	89.91	18.84	2.29	0.22	0.02	0.00	0.00	0.00
	Bicarbonate	0.04	0.43	4.13	30.09	81.11	97.23	91.83	64.78	11.68	8.38	0.00
	Carbonate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.46	4.45	30.38	54.72	18.14	1.93
	Hydroxide	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.50	4.62	33.62	83.61	98.06

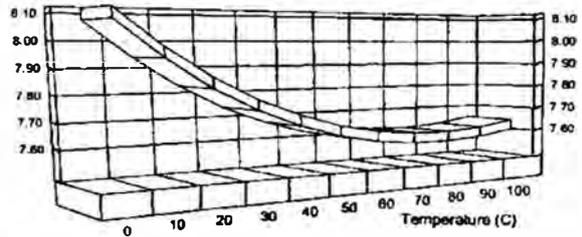
ppm as CaCO3	Carbon Dioxide	99.98	99.97	99.87	89.91	18.84	2.29	0.22	0.02	0.00	0.00	0.00
	Bicarbonate	0.04	0.43	4.13	30.09	81.11	97.23	91.83	64.78	11.68	8.38	0.21
	Carbonate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.91	8.91	63.80	184.22	165.07	198.81
	Hydroxide	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.51	5.97	59.85	506.51	5065.0

ppm as species	Carbon Dioxide	97.98	97.84	94.38	61.53	16.59	1.90	0.19	0.01	0.00	0.00	0.00
	Bicarbonate	0.05	0.52	5.04	56.72	98.99	118.72	116.31	83.08	21.44	2.55	0.26
	Carbonate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.55	5.37	38.32	98.83	117.81	119.78
	Hydroxide	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.17	1.72	17.23	172.28	1722.8



© 1998, Mettler-Toledo Inc.

pH vs. Temperature
Lake Ontario



© 1998, Mettler-Toledo Inc.