

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
BAJA CALIFORNIA**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN PROCESOS INDUSTRIALES**

### **TESIS:**

***"DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA  
PARA ENFRIAMIENTO RECIRCULANTE ABIERTO"***

**PRESENTA:**

**ING. HÉCTOR MUÑIZ VALDEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. BENJAMÍN VALDEZ SALAS**

**MEXICALI, B.C.**

**NOVIEMBRE DE 2005**

## **RESUMEN**

Las torres de enfriamiento son equipos muy utilizados en los procesos de transferencia de calor. Este trabajo presenta una propuesta de un sistema de tratamiento de agua para torre de enfriamiento. El proyecto fue financiado por la empresa IAASE, S.A. de C.V., debido al interés de desarrollarse en esta área, contándose con la asesoría y dirección del laboratorio de Corrosión y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UABC.

Para el diseño del prototipo, primeramente se plantean los diferentes factores que intervienen en los sistemas de tratamiento de agua del tipo recirculante abierto, y posteriormente se consideran las condiciones de operación del sistema, tomando como base la cantidad de sólidos totales disueltos en el agua, de los cuales se llevó registro por un periodo aproximado de mes y medio.

Finalmente se presentan los resultados obtenidos operando las torres de enfriamiento a las condiciones propuestas y se hace un análisis de los mismos para llegar a las conclusiones del trabajo ejecutado.

## ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Título   | Página |
|--------|--|--------|
| 1      | Habilidades distintivas de la Ventaja Competitiva  | 10     |
| 2      | Condiciones para el logro del Éxito Competitivo  | 11     |
| 3      | Elementos que conforman la Ventaja Competitiva   | 12     |
| 4      | Recorrido del agua de enfriamiento   | 21     |
| 5      | Torre de Enfriamiento a Contraflujo  | 23     |
| 6      | Torre de Enfriamiento de flujo Cruzado   | 24     |
| 7      | Solubilidad del carbonato y sulfato de calcio en ausencia de tratamiento químico                             | 29     |
| 8      | Índice de estabilidad de Ryznar comparado con resultado de incrustaciones. (Nalco Chemical Co., Chicago Ill) | 31     |
| 9      | Aspectos influyentes en las condiciones del agua de las torres de enfriamientos                              | 33     |
| 10     | Factores que afectan la incidencia de corrosión en sistemas de enfriamiento recirculante abiertos            | 36     |
| 11     | Factores que influyen en la depositación de sólidos en sistemas de enfriamiento recirculante abiertos        | 37     |
| 12     | Ejemplo de cálculo de los ciclos de concentración del agua recirculante                                      | 42     |
| 13     | Vista lateral de la torre de enfriamiento  | 45     |
| 14     | Cuarto de Maquinas   | 48     |
| 15     | Tuberías de conducción de agua de condensación   | 49     |
| 16     | Presencia de incrustación en torre de enfriamiento   | 52     |
| 17     | Formación de lama por crecimiento bacteriológico   | 53     |
| 18     | Diagrama Esquemático del Sistema de Enfriamiento y Tratamiento de Agua                                       | 55     |

## ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Título   | Página     |
|-------|--|------------|
| 1.1   | Generación de Habilidades en la Innovación   | 14         |
| 4.1   | Resultado del Análisis físico-químico del agua en la torre de enfriamiento         | 46         |
| 4.2   | Ciclos de concentración para diferentes componentes químicos                       | 50         |
| 4.3   | Costos del sistema de tratamiento de agua  | 57         |
| 5.1   | Resultados obtenidos del registro de Sólidos Totales (ppm) en el agua recirculante | 59         |
| A4-1  | Efecto del Calcio y Alcalinidad  | 75         |
| A4-2  | Efecto de la temperatura y Sólidos totales Disueltos                               | 76         |
| A5.1  | Cationes y Aniones constituyentes comunes en el tratamiento de agua                | 77         |
| A9    | Resultados obtenidos de concentración de sólidos totales disueltos torre 1         | 98<br>99   |
| A9    | Resultados obtenidos de concentración de sólidos totales disueltos torre 2         | 100<br>101 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

| Gráfica | Titulo  | Página |
|---------|---|--------|
| 5.1     | Concentración de sólidos totales disueltos en la torre 1, a lo largo del periodo de evaluación (STD en ppm) | 60     |
| 5.2     | Concentración de sólidos totales disueltos en la torre 2, a lo largo del periodo de evaluación (STD en ppm) | 60     |

## GLOSARIO DE TERMINOS

|     |   |
|-----|---|
| BD  | Gasto de agua de la purga del sistema                 |
| BRS | Bacterias reductoras de sulfato                       |
| CC  | Ciclos de concentración del agua                      |
| CIM | Corrosión inducida por microorganismos                |
| E   | Pérdida de agua por evaporación                       |
| IR  | Índice de estabilidad de Ryznar                       |
| ISL | Índice de saturación para carbonato de calcio         |
| MU  | Gasto del agua de reemplazo                           |
| pH  | Alcalinidad   |
| pHs | Alcalinidad del agua saturada con carbonato de calcio |
| ppm | Partes por millón                                     |
| Q   | Calor removido por el sistema en el condensador       |
| RR  | Gasto del agua recirculante en el sistema             |
| SS  | Sólidos suspendidos                                   |
| STD | Sólidos totales disueltos                             |

## TESIS:

# “DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA ENFRIAMIENTO RECIRCULANTE ABIERTO”

| CONTENIDO:  | página |
|---|--------|
| <b>RESUMEN</b>  | 1      |
| <b>FIGURAS, TABLAS Y GRÁFICAS</b>                       | 2      |
| <b>GLOSARIO</b>   | 3      |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                                     | 6      |
| <b>CAPITULO 1</b>                                       |        |
| <b>“ENFOQUE ESTRATÉGICO DEL PROYECTO”</b>               |        |
| 1.1. NATURALEZA DE LA VENTAJA COMPETITIVA               | 9      |
| 1.2. HABILIDADES DISTINTIVAS DE LA VENTAJA COMPETITIVA  | 10     |
| 1.2.1. ALTA EFICIENCIA                                  | 11     |
| 1.2.2. PRODUCTOS DE ALTA CALIDAD                        | 11     |
| 1.2.3. INNOVACIÓN                                       | 11     |
| 1.2.4. SATISFACCIÓN DEL CLIENTE                         | 12     |
| 1.3. INNOVACIÓN Y GENERACIÓN DE HABILIDADES             | 13     |
| 1.4. APLICACIÓN AL CASO IAASE, S.A. DE C.V.             | 15     |
| 1.4.1. MISIÓN Y VISIÓN DE LA EMPRESA                    | 15     |
| 1.4.2. ANÁLISIS DEL AMBIENTE INTERNO                    | 16     |
| 1.4.2.1. FORTALEZAS                                     | 16     |
| 1.4.2.2. DEBILIDADES                                    | 17     |
| 1.4.3. ANÁLISIS DEL AMBIENTE EXTERNO                    | 17     |
| 1.4.3.1. OPORTUNIDADES                                  | 18     |
| 1.4.3.2. AMENAZAS                                       | 18     |
| 1.4.4. OBJETIVOS Y ALCANCES DEL PROYECTO                | 19     |
| <b>CAPITULO 2</b>                                       |        |
| <b>“DEFINICIÓN DE CONCEPTOS FUNDAMENTALES”</b>          |        |
| 2.1. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL AGUA                    | 21     |
| 2.2. TORRES DE ENFRIAMIENTO                             | 22     |
| 2.2.1. ENFRIAMIENTO A CONTRAFLUJO                       | 22     |
| 2.2.2. ENFRIAMIENTO POR FLUJO CRUZADO                   | 24     |
| 2.3. COMPORTAMIENTO QUÍMICO DEL AGUA                    | 25     |
| 2.3.1. ALCALINIDAD                                      | 26     |
| 2.3.2. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y SUSPENDIDOS          | 27     |
| 2.3.3. SOLUBILIDAD Y CONDUCTIVIDAD                      | 28     |
| 2.3.4. ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE RYZNAR                  | 29     |
| <b>CAPITULO 3</b>                                       |        |
| <b>“PLANTEAMIENTO TÉCNICO DEL PROYECTO”</b>             |        |
| 3.1. CONDICIONES DEL AGUA EN LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO | 32     |
| 3.2. FACTORES BÁSICOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA         | 33     |
| 3.2.1. CORROSIÓN  | 33     |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 3.2.2.   | INCRUSTACIÓN  | 35 |
| 3.2.3.   | SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS   | 38 |
| 3.2.4.   | FACTOR BIOLÓGICO  | 38 |
| 3.3.   | CICLOS DE CONCENTRACIÓN DEL AGUA  | 40 |
| <br>   |   |    |
| <b>CAPITULO 4</b>  |   |    |
| <b>“DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA”</b>                   |   |    |
| <br>   |   |    |
| 4.1.   | CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN   | 44 |
| 4.1.1.   | CARACTERÍSTICAS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO   | 44 |
| 4.1.2.   | ANÁLISIS QUÍMICO DEL AGUA   | 45 |
| 4.1.2.1.   | AGUA DE REEMPLAZO   | 45 |
| 4.1.2.2.   | AGUA RECIRCULANTE   | 46 |
| 4.1.2.3.   | COMPONENTES DE LA PURGA DEL SISTEMA   | 47 |
| 4.2.   | CÁLCULO DE LA PURGA REQUERIDA DEL SISTEMA   | 48 |
| 4.3.   | CALOR REMOVIDO EN EL CONDENSADOR  | 51 |
| 4.4.   | DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO   | 51 |
| 4.4.1.   | COMPUESTOS QUÍMICOS A UTILIZAR  | 51 |
| 4.4.2.   | SUMINISTRO DE TRATAMIENTO QUÍMICO   | 54 |
| 4.4.3.   | MONITOREO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN   | 56 |
| 4.5.   | COSTO DE SUMINISTRO Y OPERACIÓN DEL SISTEMA   | 56 |
| <br>   |   |    |
| <b>CAPITULO 5</b>  |   |    |
| <b>“ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE OPERACIÓN DEL SISTEMA”</b> |   |    |
| <br>   |   |    |
| 5.1.   | REGISTRO DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS   | 58 |
| 5.2.   | GRÁFICAS DE RESULTADOS  | 58 |
| 5.3.   | ANÁLISIS DE RESULTADOS  | 61 |
| 5.4.   | PROPUESTA DE OPERACIÓN DEL SISTEMA  | 62 |
| 5.5.   | AHORRO ESTIMADO EN CONSUMO DE AGUA  | 63 |
| <br>   |   |    |
| <b>CAPITULO 6</b>  |   |    |
| <b>“OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES”</b>                                |   |    |
| <br>   |   |    |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>  |   |    |
| <br>   |   |    |
| ANEXO 1  | Recomendaciones básicas de M. Godet para realizar diagnósticos estratégicos en el desarrollo de estudios prospectivos | 68 |
| ANEXO 2  | Composición de la Alcalinidad   | 72 |
| ANEXO 3  | Conductividad de compuestos solubles en agua  | 73 |
| ANEXO 4  | Ejemplo de cálculo del PHs e índice de RYZNAR   | 74 |
| ANEXO 5  | Cationes y aniones constituyentes comunes en el tratamiento de agua   | 77 |
| ANEXO 6  | Corrosión   | 80 |
| ANEXO 7  | Especificaciones de la torre de enfriamiento  | 91 |
| ANEXO 8  | Análisis Físico-Químico del agua  | 94 |
| ANEXO 9  | Resultados obtenidos de concentración de sólidos totales disueltos  |    |

## 97 **INTRODUCCIÓN**

Es común que la mayoría de los procesos industriales y los sistemas de acondicionamiento del aire, generen calor. Este debe ser removido y disipado, por lo que

generalmente el agua es utilizada como medio de transferencia.

En ésta región los sistemas de aire acondicionado enfriados por agua son lo más utilizados, debido a que los sistemas enfriados por aire no son factibles económica ni operativamente, por las condiciones climáticas que prevalecen en ésta región.

Las torres de enfriamiento son comúnmente utilizadas para remover y disipar el calor de los sistemas de refrigeración, aire acondicionado y procesos industriales, proporcionando un método económico de operar, y un impacto ecológico mínimo (1). Cabe mencionar que no sólo el sector productivo utiliza estos equipos de enfriamiento, sino también varias instituciones gubernamentales y educativas; sin embargo la mayoría no cuentan con un sistema de tratamiento de agua como lo es el caso del sistema de enfriamiento de la UABC campus mexicali. Mantener en forma adecuada las condiciones químicas del agua para operar eficientemente los sistemas de enfriamiento y demás equipo y accesorios que tienen contacto con el agua, requiere de un estudio previo de condiciones de operación y del conocimiento necesario para diseñar los mecanismos de tratamiento de la misma.

Para la ejecución del proyecto se contempla la participación del Instituto de Ingeniería de la UABC a través del Laboratorio de Corrosión y Materiales, así como de la empresa “IAASE, S.A. de C.V.”, la cual tiene como giro comercial el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de aire acondicionado y sistemas de enfriamiento para proceso, lo cual pone de manifiesto la importancia de la vinculación entre la Universidad y su entorno.

En la actualidad, la planeación y administración estratégicas son técnicas empleadas por muchas empresas e instituciones con la finalidad de lograr los objetivos a mediano y

largo plazo, por ello son herramientas de gran utilidad para este trabajo. Posteriormente desde un punto de vista técnico, se contempla la aplicación de los diferentes conceptos y fenómenos que se presentan en el tratamiento de agua, que en éste caso es para un “Sistema de Enfriamiento Recirculante Abierto”. Finalmente, se presenta la propuesta del prototipo experimental resultante, así como el aspecto que concierne al monitoreo y evaluación correspondiente.

Un punto importante de tomar en cuenta es la dependencia que se tiene hacia el extranjero, en cuanto al suministro de sistemas de tratamiento de agua y refacciones para los mismos; por lo cual, las empresas que requieren de éste tipo de servicio, así como las empresas locales y regionales que ofrecen mantenimiento en este tipo de aplicaciones, requieren ampliar sus alternativas de solución al caso.

Debido a las políticas nacionales de desarrollo industrial que consisten en facilitar y atraer la inversión de origen extranjero, particularmente en nuestra región en los últimos años se ha generado un incremento notable en el asentamiento de empresas maquiladoras, las cuales utilizan sistemas o procesos que requieren del tratamiento de agua, provocando de esta manera un incremento en la demanda hacia éste tipo de servicio. Cabe mencionar que más del 90% de los clientes de la empresa IAASE, carece de un sistema de tratamiento de agua, y los que lo tienen contratan el servicio al extranjero. De acuerdo a lo anterior y en función del marco de desarrollo tecnológico que rige en la actualidad a la zona fronteriza y resto del país, se debe tener cuidado en que la transferencia de tecnología sea deficiente ó genere dependencia tecnológica por parte de los usuarios. Por el contrario, de acuerdo a las políticas de cambio tecnológico y económico de nuestro país, las pequeñas y medianas empresas deben considerarse como una fuente de

regeneración económica regional y de crecimiento de las tasas nacionales de innovación tecnológica.

## **CAPÍTULO 1**

## **ENFOQUE ESTRATÉGICO DEL PROYECTO**

La razón por la cual un consejo administrativo decide implantar un plan estratégico en su empresa, es básicamente para formarse una idea de “lo que es y lo que quiere llegar a ser”, aplicando la planeación y administración estratégica para establecer los mecanismos que garanticen que las actividades y actitudes vayan dirigidas conforme a objetivos, proporcionando también la factibilidad de cambio y los medios de evaluación y control, para lograr el avance hacia las metas establecidas.

En esta ocasión se considera que el proyecto por realizar, generará un nuevo ambiente dentro de la empresa y repercutirá en la ventaja competitiva de la misma.

Se considera que una empresa tiene una ventaja competitiva cuando su índice de utilidad es mayor que el promedio de sus competidores en el ramo correspondiente, y esto está muy ligado a las fortalezas y debilidades de la misma, así como del ambiente externo que la rodea.

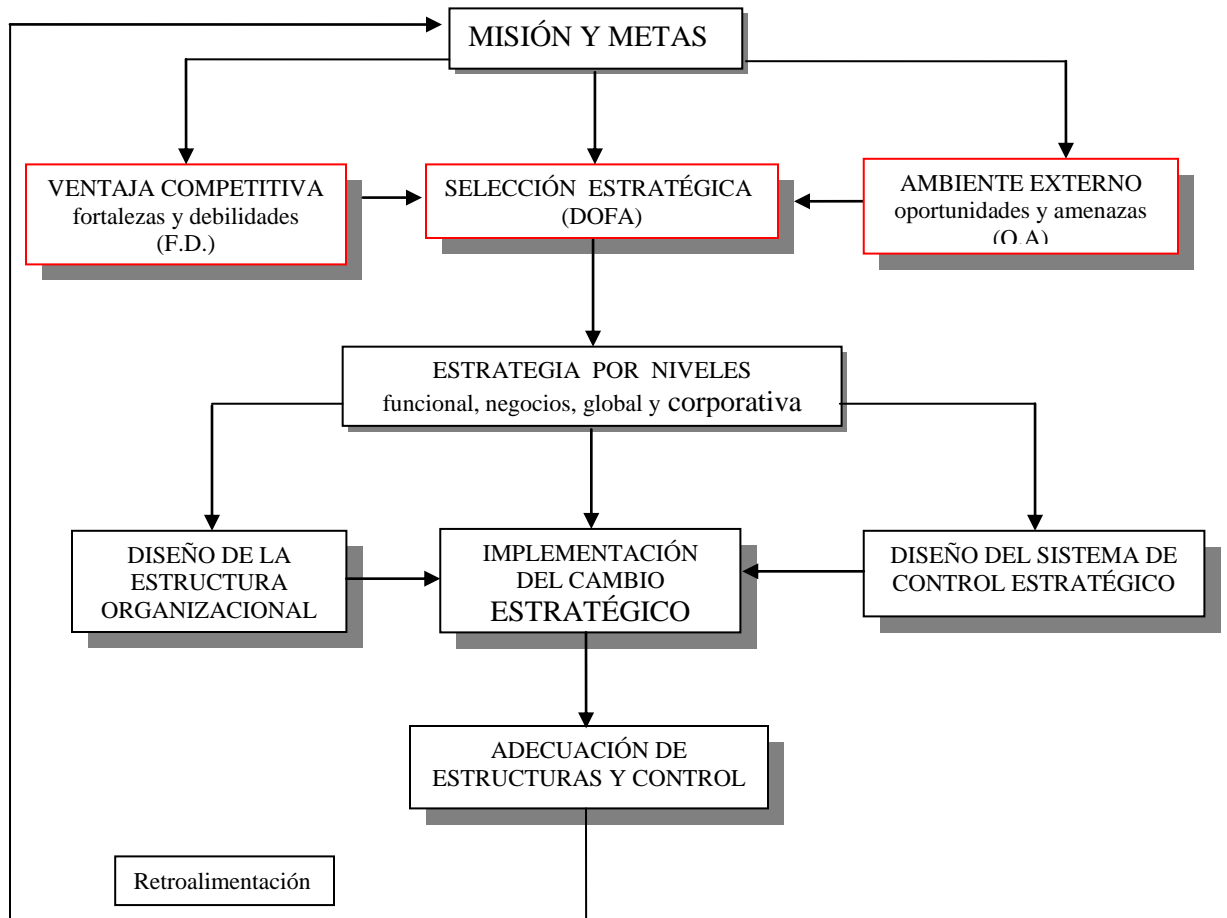
### **1.1 NATURALEZA DE LA VENTAJA COMPETITIVA**

En función de la declaración de la misión y metas principales de la organización, se prosigue a evaluar las condiciones del entorno; es decir, realizar un análisis del ambiente interno y externo, proporcionando como resultado la definición de fortalezas y oportunidades con las que se cuentan, así como las debilidades y amenazas que deberá enfrentar la organización.

Con la finalidad de evitar errores en los diagnósticos estratégicos, M. Godet (6) plantea diez recomendaciones básicas a considerar (anexo 1).

Analizando los pasos anteriormente mencionados, se puede llegar a definir la

estrategia a seguir (ver figura 1), para posteriormente hacer su aplicación en los diferentes niveles: corporativo, de negocios y funcional.



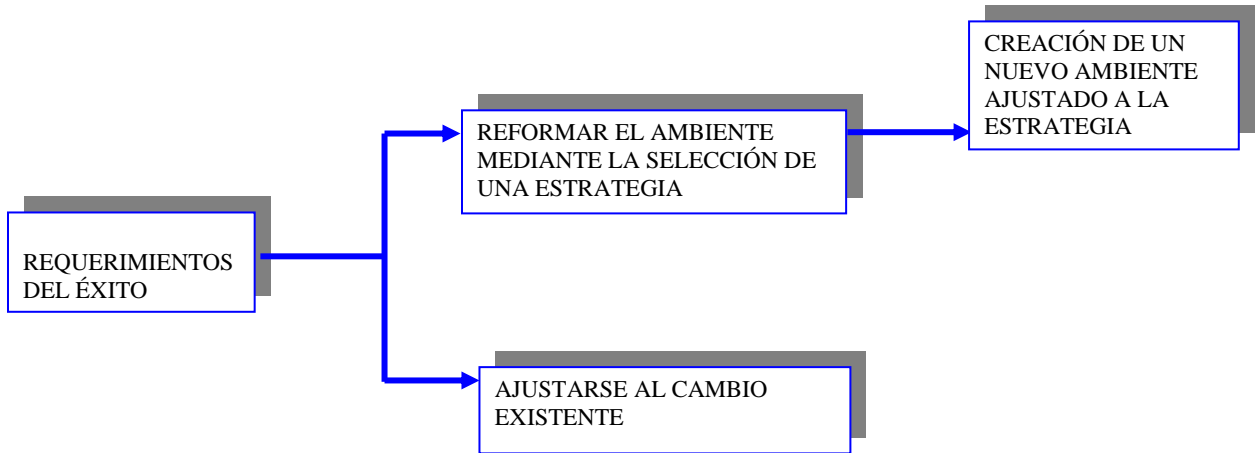
*Figura 1. Naturaleza de la Ventaja Competitiva*

## 1.2 HABILIDADES DISTINTIVAS DE LA VENTAJA COMPETITIVA

Tomando en consideración que el proyecto por realizar tiende a modificar el ambiente

(figura 2), buscando sustituir la dependencia al extranjero y dando respuesta a las

necesidades del cliente a través de una aplicación de innovación tecnológica en los sistemas de tratamiento de agua para torres de enfriamiento, se espera aportar las condiciones necesarias para apoyar a la empresa a lograr el éxito competitivo.



*Figura 2. Condiciones para el logro del Éxito Competitivo*

La ventaja competitiva proviene de desarrollar ciertas “habilidades distintivas”, las cuales se centran en:

➤ **Alta eficiencia.** Habilidad para lograr la disminución de costos mediante la operación eficiente dentro de la organización, posibilitando a la empresa a tener mejores rendimientos.

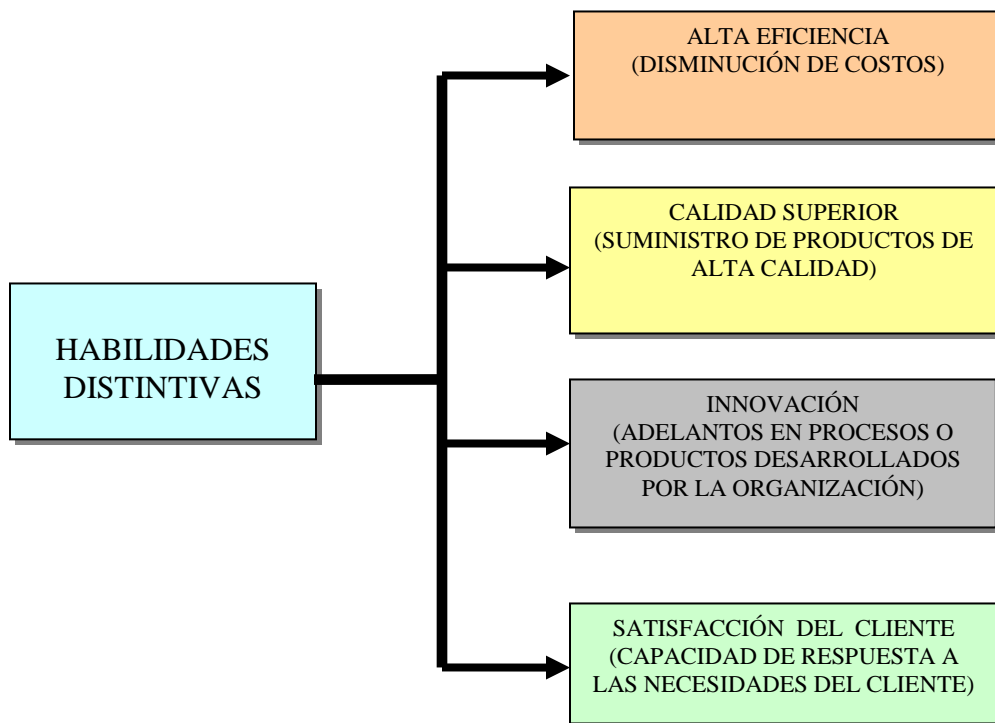
➤ **Productos de alta calidad.** Esta habilidad consiste en el suministro de productos de alta calidad que satisfaga los requerimientos del cliente y que debido a sus características pueda cobrar un precio mayor por ellos.

➤ **Innovación.** Contempla la actividad necesaria para lograr el liderazgo tecnológico

del mercado, a través de la aplicación de los adelantos de la técnica, tanto en servicio como productos desarrollados por la organización. De la misma manera que el punto anterior, esto permite elevar el precio del producto y a la vez puede disminuir los costos unitarios.

➤ **Satisfacción del cliente.** Capacidad que desarrolla la empresa para dar a tiempo correcta respuesta a las necesidades del cliente, generando un ambiente de “lealtad” hacia la empresa por parte de los mismos.

Estos cuatro componentes básicos de la ventaja competitiva (véase figura 3), están relacionados con las fortalezas de la organización, que le permiten lograr condiciones superiores de eficiencia, calidad, innovación tecnológica o capacidad de satisfacción del cliente; por lo tanto, puede ofrecer un índice de utilidad considerablemente mayor al promedio industrial.



*Figura 3. Elementos que conforman la Ventaja Competitiva*

### **1.3 INNOVACIÓN Y GENERACIÓN DE HABILIDADES**

Particularmente dentro de la generación de habilidades, la innovación requiere de atención a ciertas actividades, que funcionando integralmente logran conducir el proceso de innovación tecnológica de manera efectiva (tabla 1.1). Es decir, que la innovación por sí sola no garantiza el éxito competitivo si no se integra a otras acciones como: identificación de las necesidades del cliente, desarrollo de procesos de fabricación adecuados, minimizar el tiempo de lanzamiento al mercado y asegurar la correcta administración de proyectos.

Debe considerarse lo siguiente, las habilidades distintivas emanan de dos fuentes complementarias: los recursos y capacidades (8).

Los recursos pueden ser tangibles (bienes inmuebles, maquinaria y equipo), o bien intangibles (patentes, marcas, reputación y el “know-how” tecnológico o de marketing). Para desarrollar una habilidad distintiva los recursos deben ser únicos; es decir, que ninguna otra compañía los posee.

En cuanto a capacidades se refiere, estas son las habilidades que tiene una organización para administrar sus recursos y orientarlos a una utilización productiva a través de la toma de decisiones y de las rutinas con las que la empresa maneja sus procesos internos, con la finalidad de alcanzar los objetivos organizacionales.

Cabe mencionar que por la propia naturaleza de las organizaciones, la política de formulación e implementación de estrategias debe considerar la necesidad de posibles cambios dentro del sistema administrativo, que garanticen y reorienten las acciones y procedimientos, para lograr las metas establecidas. El cambio organizacional es el proceso por el cual una empresa altera su estrategia y estructura para mejorar su

desempeño.

Las empresas consideradas como más exitosas son aquellas donde el cambio se considera como una norma. Existen también los cambios competitivos que generan la evolución de la industria. La solidez y naturaleza de las fuerzas competitivas debida a los competidores potenciales y la rivalidad, dan lugar a oportunidades y amenazas en cada etapa de la evolución industrial. Una de las tareas de los gerentes es la de formular y anticipar estrategias para sacar ventaja de las oportunidades cuando se presenten y enfrentar las amenazas a medida que estas surjan.

Para lograr lo anterior, es necesario que la estructura organizacional cuente con un sistema de control, tanto para el proceso de administración como del comportamiento del recurso humano, dando oportunidad a la retroalimentación en el proceso, debido a que la toma de decisiones organizacionales son una combinación de procesos racionales y políticos, en los cuales influyen distintos intereses, grupos y percepciones del medio.

| <b>ACTIVIDAD</b>   | <b>FUNCIÓN</b>   |
|--|--|
| INVESTIGACIÓN BÁSICA Y APLICADA                          | Establecer un ambiente de trabajo que motive la creatividad  |
| INTEGRAR INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO CON COMERCIALIZACIÓN | Identificar las necesidades del cliente y empatarlas con el desarrollo de productos  |
| INTEGRAR FABRICACIÓN E I&D                               | Innovación consistente en diseño de nuevos productos fáciles de producir   |
| REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LANZAMIENTO AL MERCADO           | Mantener el liderazgo tecnológico ante los competidores, integrando I&D, fabricación y comercialización                        |
| ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS                              | Conducción del proceso de innovación desde la generación de ideas hasta su ejecución e introducción del producto en el mercado |

*Tabla 1.1 Generación de Habilidades en la Innovación*

#### **1.4 APLICACIÓN AL CASO IAASE, S.A. DE C.V.**

En esta sección se presenta la aplicación de los conceptos mencionados de planeación estratégica, en cuanto a la misión y visión de la empresa se refiere, así como al análisis del ambiente y los objetivos a mediano y largo plazo de la empresa, en función del proyecto por realizar, así como los posibles alcances del mismo.

##### **1.4.1 MISIÓN Y VISIÓN DE LA EMPRESA.**

A continuación se presentan las declaratorias de la Misión y Visión de la empresa:

##### **MISIÓN:**

***"Satisfacer las expectativas del cliente mediante una atención continua y profesional, basándose en un ámbito de valores que permitan también el desarrollo integral de nuestro personal y la mejora continua de la empresa".***

##### **VISIÓN:**

***"Ser una empresa líder regional en el sector de mercado correspondiente al diseño, instalación, venta y servicio de mantenimiento de sistemas de acondicionamiento de aire industrial y servicios, soportado a través de un equipo de trabajo caracterizado por***

***el dominio de la tecnología, así como de la aplicación de estándares y normas internacionales, herramientas con las cuales se desarrollará un proceso de mejora continua en toda la organización”.***

#### **1.4.2 ANÁLISIS DEL AMBIENTE INTERNO.**

Dentro del análisis del ambiente interno se consideran factores como cambios en la estructura, cultura, ambiente de trabajo y funcionamiento. También se incluyen las estructuras y sistemas utilizados cotidianamente en la planeación y evaluación dentro de las empresas, definiendo por ejemplo: requerimientos de personal, instalaciones y calidad de la educación impartida. De lo anterior se definen las “fortalezas y debilidades” de la organización.

##### **1.4.2.1 FORTALEZAS:**

➤ **Tiempo de Permanencia en el Giro Empresarial.** La empresa cuenta con 15 años de permanecer en el mercado del aire acondicionado a nivel industrial, puede considerarse que goza de excelente reputación en el mismo.

➤ **Actitud de Actualización Tecnológica Constante.** Es reconocida la compañía por utilizar en los proyectos e instalaciones, las normas, equipo e instrumentación, más recientes en el mercado en cuestión.

➤ **Empresa Convencida de la Importancia de la Capacitación y Desarrollo de Personal.** La empresa favorece un ambiente en el cual el empleado recibe capacitación, ya sea por decisión de la propia compañía, o bien por solicitud del trabajador en todos los niveles de la organización.

➤ **Estructura Organizacional Flexible.** La empresa cuenta con una estructura

flexible que permite la realización de proyectos que tiendan a llevarla al logro de sus metas, tal y como se menciona en la declaratoria de la misión de la compañía.

➤ **Capacidad de Innovación.** Se cuenta con un ambiente que permite desarrollar la investigación, misma que en éste caso en particular se desarrollará de manera conjunta con la UABC, demostrando así que la estructura de la organización promueve los proyectos de vinculación con el sector educativo.

#### **1.4.2.2 DEBILIDADES:**

➤ **Recurso Humano Especializado.** Se debe enfatizar que en este punto se está considerando exclusivamente el hecho de personal especializado en el tratamiento de agua. La razón de no contar con profesionales especializados en el área correspondiente, lleva a la empresa a buscar el apoyo a través de la UABC.

➤ **Velocidad de Respuesta al Cliente.** La necesidad de los clientes en cuanto al diseño e instalación de sistemas de tratamiento de agua, no es reciente; por lo anterior se puede decir que se tiene en éste caso una lenta respuesta a sus necesidades.

➤ **Dependencia Tecnológica.** Los productos químicos, instrumentación y servicio de mantenimiento que se requiere para el sistema en cuestión, provienen generalmente del extranjero, poniendo de manifiesto una dependencia tecnológica en el ramo.

#### **1.4.3 ANÁLISIS DEL AMBIENTE EXTERNO.**

La estrategia de una organización debe considerar, y en su caso ajustarse, a las

condiciones del ambiente externo. Se puede tener la capacidad de reformarlo para obtener sus propias ventajas y aprovechar las oportunidades que se presenten. Por otro lado, generalmente las empresas fracasan cuando su estrategia no es compatible con el ambiente donde operan, razón por la cual es importante identificar las amenazas a las cuales se debe hacer frente.

#### **1.4.3.1 OPORTUNIDADES:**

➤ **Exclusividad en el Mercado Local y Regional.** Hasta el momento no se tiene conocimiento de que alguna empresa de la competencia esté desarrollando algún trabajo similar; por el contrario, se sabe que las compañías locales que ofrecen el servicio de tratamiento de agua, lo hacen subcontratando a empresas extranjeras. Debido a lo anterior se puede decir, que al menos por un tiempo la empresa IAASE, S.A. de C.V., tendría la ventaja en cuanto al mercado se refiere.

➤ **Vinculación con la UABC.** Si bien es cierto que actualmente la empresa no cuenta con personal especializado en el ramo en cuestión, se presenta la oportunidad de realizar un proyecto en conjunto con la UABC a través de la Facultad de Ingeniería y del Laboratorio de Corrosión y Materiales del Instituto de Ingeniería.

#### **1.4.3.2 AMENAZAS:**

➤ **Imitación de los Competidores.** Este es un riesgo que frecuentemente tienen que enfrentar las organizaciones que desarrollan innovación en sus procesos ó productos, así como las que utilizan tecnologías de reciente aplicación. Este caso ya se ha presentado en la empresa cuando inició con los proyectos de agua helada y posteriormente con los sistemas de control.

➤ **Información de Distribuidores.** Cada uno de los proveedores extranjeros defiende la marca que distribuye, es muy posible que la información que se pueda recibir de parte de estos no sea del todo confiable, debiendo tener precaución en la selección e interpretación de la misma.

#### **1.4.4 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO**

##### **1.4.4.1 OBJETIVOS:**

➤ **Diseño de Prototipo.** El objetivo más importante del proyecto es diseñar un sistema de tratamiento para crear un prototipo experimental; y posteriormente, una vez que sea probado su eficiente funcionamiento, satisfaga la demanda y sustituya la dependencia al extranjero.

➤ **Apoyo a la Empresa Regional.** Este es un objetivo correspondiente a la UABC, la cual de acuerdo a sus funciones de extensión, debe apoyar a la empresa regional a mantener un desarrollo sostenido mediante proyectos de innovación tecnológica, a través de los cuales se beneficien ambas partes.

➤ **Instalación de Sistema.** Este puede considerarse como un objetivo específico, el cual contempla la instalación de un sistema de tratamiento de agua para la torre de enfriamiento de una empresa local, actualmente en funcionamiento.

##### **1.4.4.2 ALCANCE:**

➤ **Creación de Nuevo Departamento.** Desarrollar estratégicamente en la empresa un nuevo departamento dedicado específicamente al diseño, instalación y mantenimiento

de sistemas de tratamiento de agua, tanto para aplicaciones de aire acondicionado como de procesos industriales.

➤ **Formación de Recursos Humanos.** Generar información técnica suficiente y experiencia de los resultados obtenidos de la realización del proyecto, para la formación de recursos humanos en el área, tanto de la UABC como de la empresa.

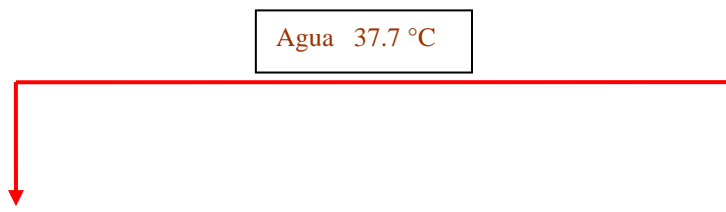
➤ **Impacto en la UABC.** Cubrir las necesidades de las instalaciones de aire acondicionado la UABC, que requieren del suministro de sistemas de tratamiento de agua para las torres de enfriamiento.

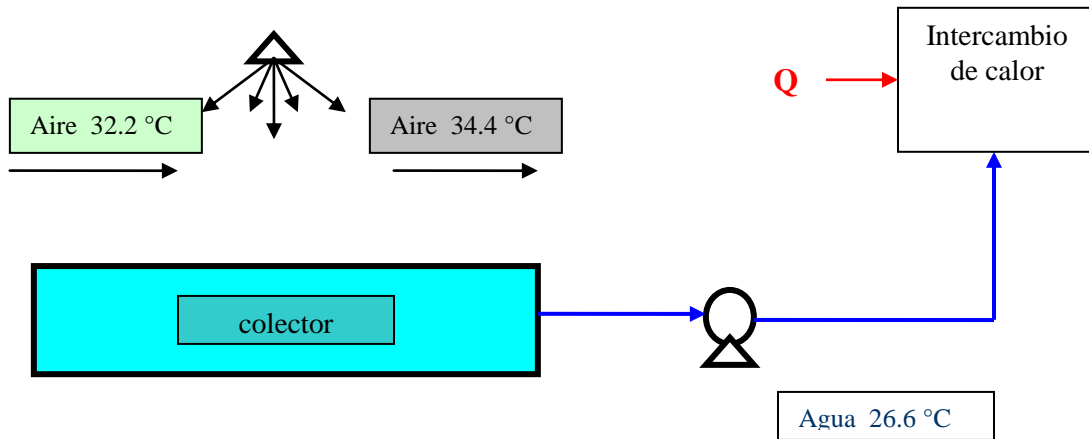
## CAPÍTULO 2

### DEFINICIÓN DE CONCEPTOS FUNDAMENTALES

#### 2.1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL AGUA

Al hacerse pasar agua caliente a través del aire mediante un rociador, el agua se enfría y disminuye su temperatura como resultado de la evaporación de un pequeño porcentaje de la misma, tal y como se muestra en el esquema de la figura 4.





*Figura 4. Recorrido del agua de enfriamiento*

Una pequeña porción de agua se evapora y el resto disminuye su temperatura. La evaporación que se presenta está entre el 1 y el 3 % del flujo de agua caliente y puede disminuir la temperatura del resto del flujo hasta por 15 °C. Lo anterior está en función de otro factor importante que es la humedad relativa del aire, debido a que se pudiera tener una saturación de humedad del mismo. Es conveniente tener condiciones ambientales cercanas al 40 % de humedad relativa para lograr un adecuado desempeño de las funciones de la torre de enfriamiento.

## **2.2 TORRES DE ENFRIAMIENTO**

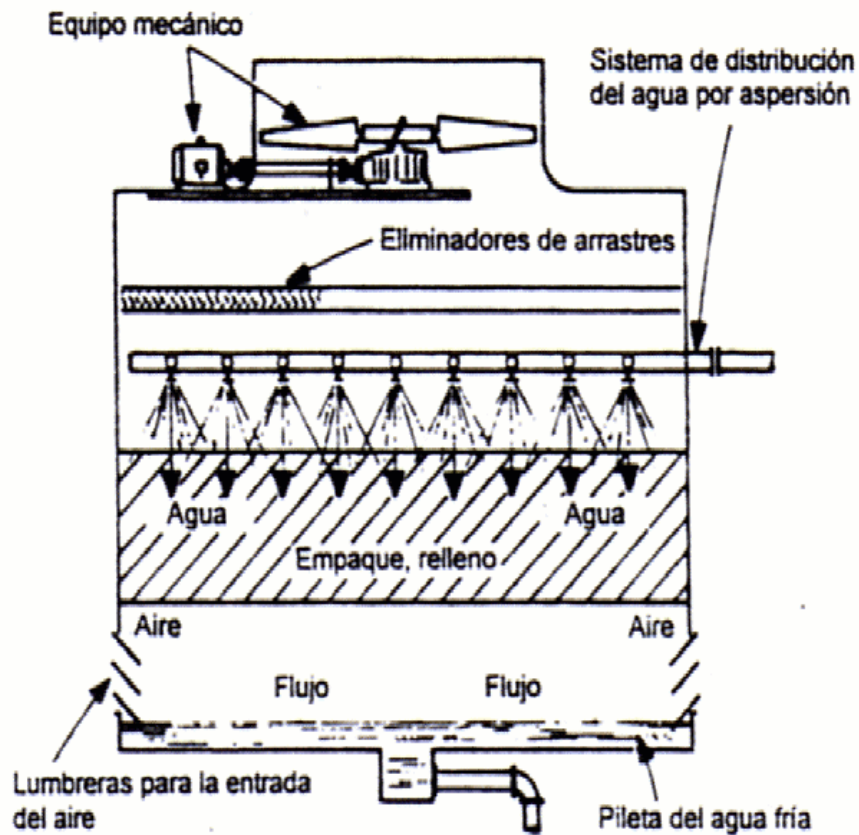
La función de la torre de enfriamiento es disminuir la temperatura que gana el agua en el intercambio de calor requerido para la disipación del mismo, en los diferentes procesos de fabricación, generación de energía eléctrica y acondicionamiento de aire.

En las aplicaciones de aire acondicionado, el agua se recircula por la torre y se utiliza para la condensación del refrigerante utilizado por el sistema. Generalmente en enfriamiento para proceso, el agua de la torre se usa para enfriamiento directo, haciendo fluir el agua a través de intercambiadores de calor. Su utilización se considera un método económico y sencillo para obtener agua enfriada por evaporación. Emplear agua de enfriamiento de un solo paso es una práctica común en lugares donde se tiene disponibilidad abundante; y por lo tanto un barato suministro de agua de reemplazo. Sin embargo, en la mayoría de los casos el agua en lugar de pasar una sola vez por el sistema y desecharse, corre a través de las torres de enfriamiento.

El diseño se hace de tal forma que estos equipos ofrezcan al agua un máximo de superficie evaporativa en su recorrido hacia abajo a través de los orificios en la mesa de distribución, sobre el "relleno" y dentro de la pileta de almacenamiento (véanse figuras 5 y 6). Aproximadamente el 1.2% del flujo de agua se evapora en su paso por la torre por cada 5.5 °C que disminuya su temperatura. Se estima que el 75% del enfriamiento es debido a la liberación del calor latente de vaporización, el resto se debe al intercambio de calor sensible (14).

### **2.2.1 ENFRIAMIENTO A CONTRAFLUJO**

El enfriamiento a “contraflujo” es el que se da cuando el aire se hace pasar por el relleno de la torre en sentido contrario a la dirección del flujo de agua. Lo anterior se logra cuando las mamparas para la entrada de aire se encuentran en la parte inferior de la torre por encima del colector o pileta de la misma, tal y como se muestra en la figura 5.



*Figura 5. Torre de Enfriamiento a Contraflujo*

Se define como "rango" a la disminución de la temperatura del agua conforme pasa por la torre. El "acercamiento" al bulbo húmedo, es la diferencia entre la temperatura del efluente y la de bulbo húmedo.

El relleno de las torres de enfriamiento está formado por tablillas de madera o plástico. Es muy probable que no existan superficies considerables de acero, salvo partes estructurales, las cuales deben tener un recubrimiento protector que requiere ser integral para evitar partes metálicas desnudas susceptibles a sufrir corrosión por picaduras.

### **2.2.2 ENFRIAMIENTO POR FLUJO CRUZADO**

Las torres de enfriamiento del tipo “flujo cruzado”, son aquellas en las que las mamparas de aire abarcan la altura total de la torre y están ubicadas a los costados de la misma. Como se muestra en la figura 6, el flujo de aire es inducido por un ventilador instalado en la parte superior y central de la torre.

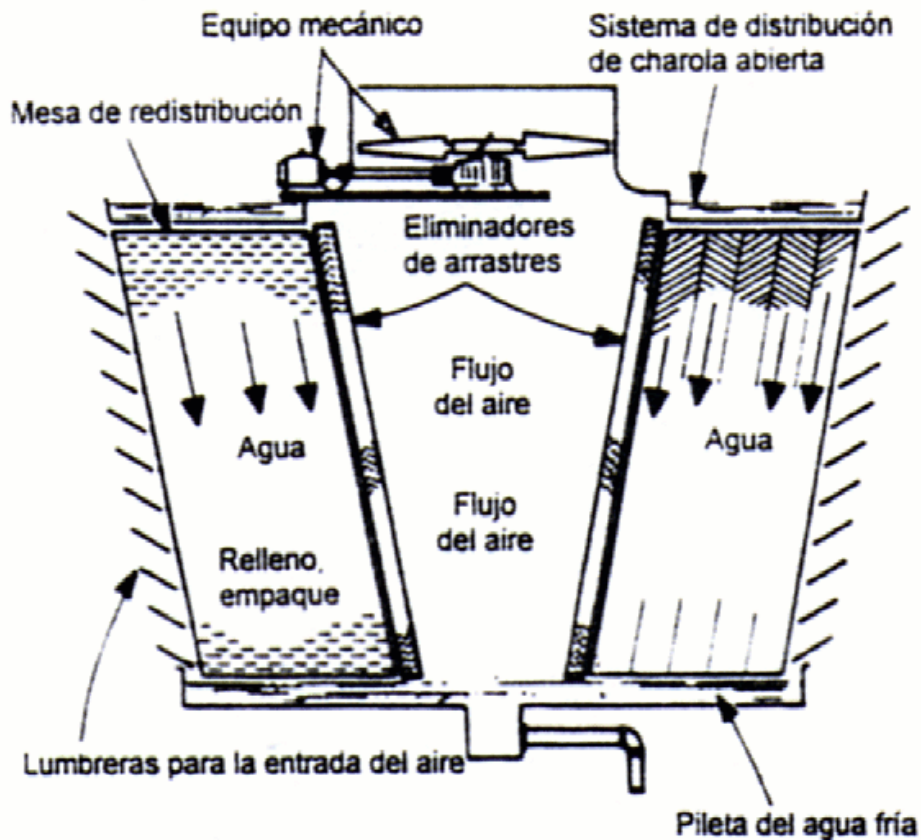


Figura 6. Torre de Enfriamiento de Flujo Cruzado

Al igual que el caso descrito en el inciso anterior, generalmente el relleno de las torres de enfriamiento está formado por material plástico, y las partes estructurales tienen recubrimiento para evitar que se presente corrosión por picaduras. Cabe mencionar que

un factor importante es el lugar donde estén instaladas las torres de enfriamiento; las emanaciones de industrias cercanas o de las instalaciones propias (humos, gases, etc.) pueden contaminar el aire circundante que penetra a la torre, con vapores ácidos, alcalinos, con alto contenido de grasa o carbono, o que contengan materia en suspensión que fomente el incremento de microorganismos y bacterias en el agua, propiciando procesos de bioensuciamiento que disminuyen la eficiencia de intercambio de calor.

### **2.3 COMPORTAMIENTO QUÍMICO DEL AGUA**

Es necesario determinar las condiciones con las que se deben operar el sistema, en estudio debido a que al utilizar agua para aplicaciones industriales o comerciales puede presentarse el caso de que esta sea naturalmente corrosiva o bien, que tenga la tendencia a la formación de incrustaciones.

Se deben hacer pruebas en campo sencillas pero efectivas, para determinar con buena aproximación las condiciones químicas del fluido; de esta manera, se determinará el poder corrosivo y/o incrustante del agua.

Existen cinco parámetros que deben definirse para hacer una correcta evaluación de las condiciones prevalecientes en campo, estos son: pH, concentración de calcio, alcalinidad, sólidos totales disueltos (STD) y la temperatura. Al combinar el efecto de los cinco parámetros mencionados se puede realizar una predicción del comportamiento químico del agua.

Los profesionales en el área de tratamiento de agua para torres de enfriamiento, deben poseer los conocimientos y entrenamiento necesario con la finalidad de poder pronosticar y controlar el comportamiento químico del agua en función de la combinación de los diferentes parámetros anteriormente mencionados.

Si se presentan disminuciones representativas en los valores del pH del agua se tendrán tendencias corrosivas; en caso contrario, al aumentarse las tendencias serán incrustantes. La concentración de calcio presenta un comportamiento similar, la tendencia corrosiva se presenta alrededor de las 15 ppm, el efecto incrustante se presentará alrededor de las 2000 ppm.

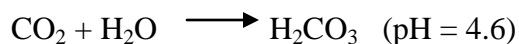
### **2.3.1 ALCALINIDAD**

La alcalinidad puede ser definida como el componente aniónico en el agua que absorbe el ácido; existen tres componentes naturales de la alcalinidad: carbonatos, bicarbonatos y los hidróxidos.

La alcalinidad es un parámetro muy importante en el tratamiento de agua para sistemas de enfriamiento. Esta se comporta de la misma forma que el pH; es decir, una alcalinidad baja dará como resultado que se puedan presentar problemas de corrosión en el sistema. Por ejemplo, una alcalinidad de 3 puede dar como resultado que no se tenga formación de incrustaciones, pero puede permitir que se presente corrosión.

La alcalinidad se caracteriza por los compuestos que se forman por la reacción de dos simples sustancias en el agua: el CO<sub>2</sub> y OH.

Cuando el agua esta saturada con CO<sub>2</sub>, tal saturación se presenta como ácido carbónico, lo anterior se expresa de la siguiente manera:

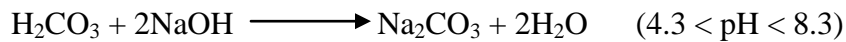


Para este caso, la alcalinidad deberá ser 0, puesto que ya no tiene capacidad para absorber ningún ácido, debido a que la solución esta saturada. Por tal razón en el punto de

la saturación del ácido carbónico (pH = 4.6) se considera la línea base para una alcalinidad igual a 0.

La alcalinidad es medida en función de la adición de un ácido fuerte hasta que el punto de pH de 4.6 es alcanzado. El papel indicador de pH cambia de color (anaranjado metilo) cerca del 4.6 en las mediciones que frecuentemente se hacen en campo.

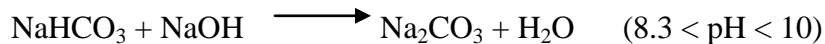
La segunda línea base es cuando el H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (ácido carbónico) es convertido en bicarbonato; lo anterior se representa de la siguiente manera:



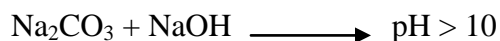
El valor de 8.3 de pH se puede alcanzar cuando se agrega suficiente compuesto cáustico para neutralizar al H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Esta referencia es utilizada por que es el punto cero para el carbonato y el hidróxido. Nuevamente el papel indicador seleccionado cambiará de color para valores cercanos al 8.3 (color rosado, fenolftaleína).

Otras reacciones comunes son las que se presentan a continuación.

El bicarbonato reacciona con hidróxido en el agua:



Más hidróxido (compuesto cáustico) es agregado:



En el anexo 2 se muestra una representación gráfica de la composición de la alcalinidad y de los niveles de la misma explicados anteriormente.

### **2.3.2 SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y SUSPENDIDOS**

Los sólidos totales disueltos (STD) afectan a las tendencias corrosivas e incrustantes en función del tipo de compuesto al que pertenezcan. Si los STD se componen de sal el agua es corrosiva (como el agua de mar). Sin embargo si está en forma de Calcio,

entonces formará incrustación cuando este en altos niveles. Generalmente es de esperarse valores entre 20 y 400 ppm en el agua de suministro para enfriamiento.

La temperatura afecta al grado de corrosión y la formación de incrustaciones, debido a su efecto en función de los sólidos totales disueltos.

Los cloruros contenidos en el agua se presentan generalmente en forma de cloruro de sodio, calcio o de magnesio. El agua de río o de pozo tiene aproximadamente de 10 a 50 ppm de cloruros, en el agua de mar este valor se dispara debido al alto contenido de sal.

De la misma manera que los cloruros, los sulfatos se presentan generalmente como sulfatos de sodio, calcio y/o magnesio. Los cloruros y sulfatos incrementan la naturaleza corrosiva del agua. Rangos entre 10 y 30 ppm son concentraciones comunes de sulfato en aguas de río y de pozo. Los sólidos suspendidos (SS) son el total de sólidos que no están disueltos. Los valores típicos del agua sin tratar están entre 10 y 200 ppm.

La dureza en su mayor parte se conforma por el total de calcio y magnesio contenido en el agua. Es común encontrar valores entre 10 y 300 ppm.

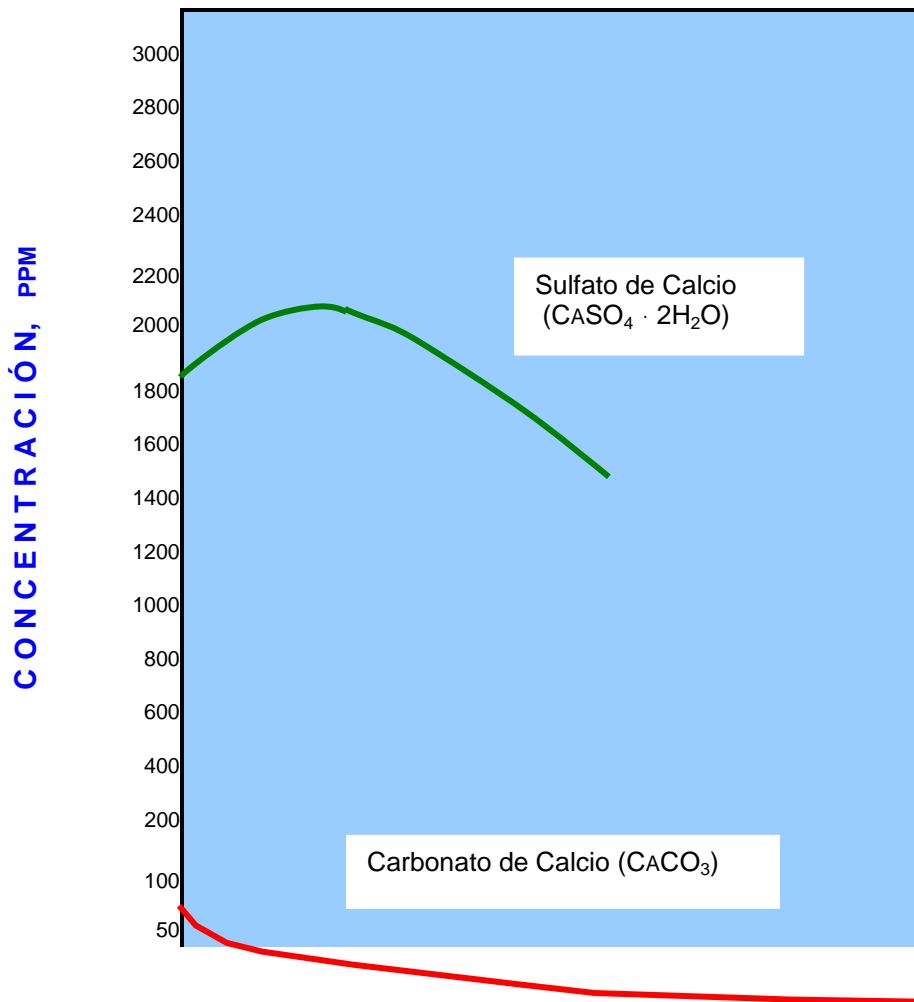
### **2.3.3 SOLUBILIDAD Y CONDUCTIVIDAD**

Los compuestos solubles en el agua son los que proporcionan la capacidad de la conductancia eléctrica del líquido. Para el caso en estudio, la solubilidad del calcio es la que tiene mayor importancia, y ésta varía en función de la temperatura del agua. En la gráfica de la figura 7, se puede apreciar el comportamiento de la concentración en ppm de los compuestos de calcio, en función de la temperatura.

La conductividad es medida por un simple circuito eléctrico de corriente directa y expresada en micro mhos. Esta propiedad es muy cercana al valor numérico de las ppm

de algunos sólidos disueltos. En promedio se puede decir que 1 ppm de sólidos disueltos proporcionan 1.4 micro mhos de conductividad, en comparación con algunos compuestos que imparten 4 ó 5 micro mhos por cada ppm en la solución.

La gráfica que se presenta en el anexo 3, ilustra la relación entre la conductividad y los sólidos disueltos en ppm, que más comúnmente se presentan en el tratamiento de agua para sistemas de enfriamiento.



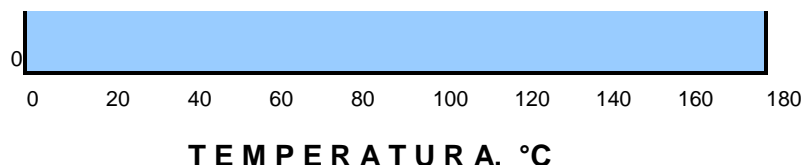


Figura 7. Solubilidad del carbonato y sulfato de calcio en ausencia de tratamiento químico.

### 2.3.4 ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE RYZNAR (IR)

Existen índices para evaluar las tendencias corrosivas e incrustantes del agua. Langelier (17) propuso el índice de saturación (ISL) para carbonato de calcio como la diferencia entre el pH real del suministro de agua y el  $pH_s$ , es decir:  $ISL = pH - pH_s$ , donde  $pH_s$  representa al pH del agua saturada con  $CaCO_3$ , y se determina a partir de la siguiente relación:

$$pH_s = A + B - \log Ca^{2+} - \log M$$

donde: A = temperatura ( $^{\circ}F$  ó  $^{\circ}C$ )

B = sólidos totales disueltos del suministro de agua (mg/l)

$Ca^{2+}$  = concentración de calcio (como  $CaCO_3$ )

M = alcalinidad al anaranjado de metilo (como  $Ca CO_3$ )

Cabe mencionar que el índice de saturación de Langelier sólo muestra tendencia, pero no ofrece una evaluación cuantitativa de las incrustaciones esperadas.

El índice de estabilidad de Ryznar(18), se determina por la siguiente relación:

$$IR = (2 \times pH_s) - pH$$

Este índice puede ser utilizado para calcular la cantidad de incrustaciones mediante las siguientes relaciones:

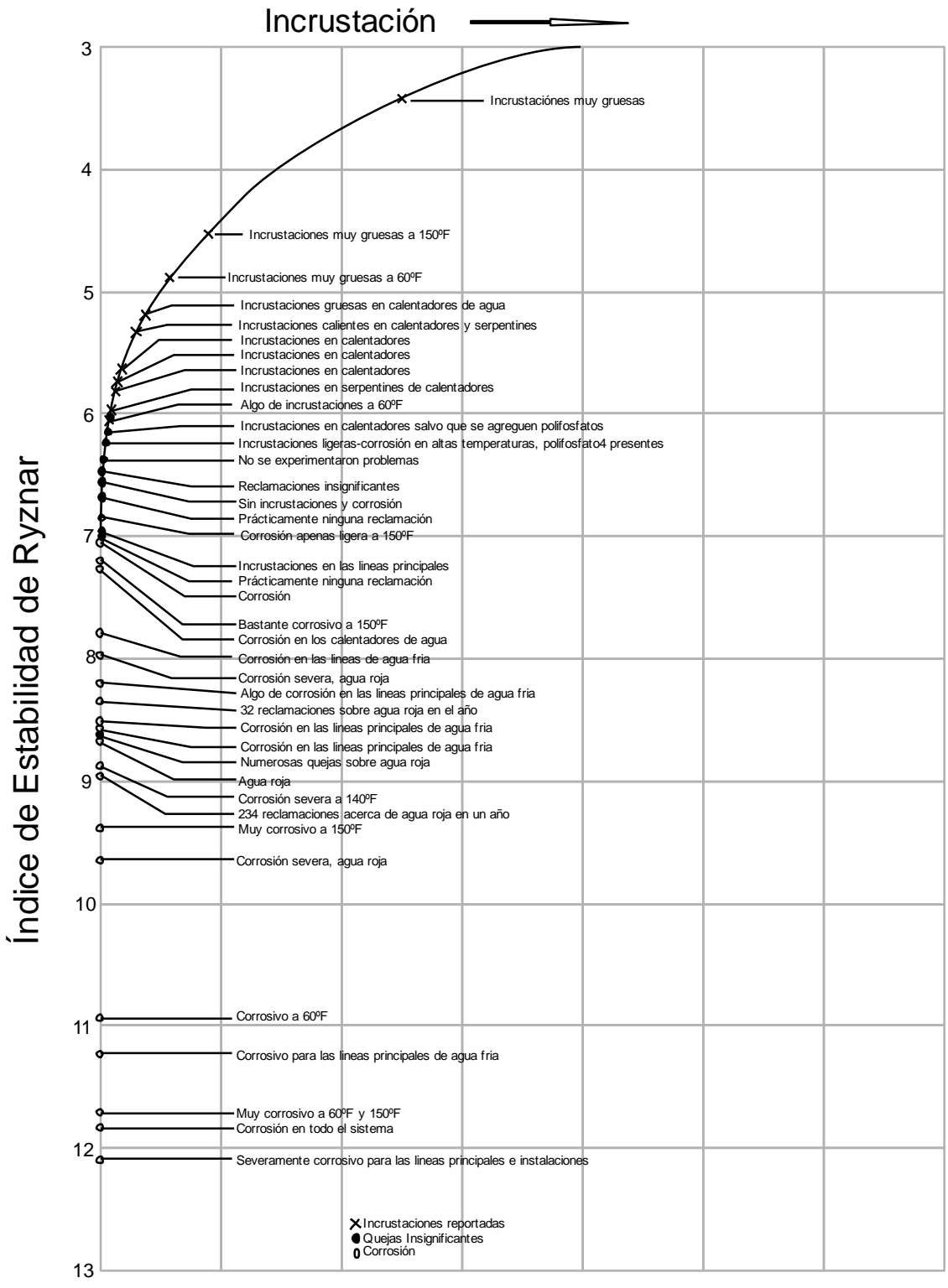
miligramos de incrustación =  $44\ 700 / \text{IR}^{4.73}$  para  $2 \leq \text{IR} \leq 7$

miligramos de incrustación =  $631\ 000 / \text{IR}^{8.65}$  para  $2 \leq \text{IR} \leq 4$  y con  
presencia de polifosfatos  
 $\text{Na}_9\text{P}_7\text{O}_{22}$ .

El pHs se determina en función de los efectos que producen: la concentración del calcio, la alcalinidad y el efecto de los sólidos totales disueltos y la temperatura. Una vez determinado el pH de saturación se calcula el índice de estabilidad de Ryznar. En el anexo 4, se presenta un ejemplo de cálculo de lo anteriormente mencionado.

En la figura 8 se puede apreciar la relación entre el índice de Ryznar con las condiciones incrustantes observadas, a valores inferiores de 6.0 corresponden tendencias incrustantes; la tendencia a disolver el  $\text{CaCO}_3$  lo indican valores por arriba de 6.0.

El índice de estabilidad de Ryznar, es utilizado ampliamente para predecir el comportamiento químico del agua. Valores correspondientes entre 6 y 6.5 darían una posición neutral del fluido, si el índice disminuyera a 3.0, es de esperarse bajo índice de corrosión pero un alto riesgo de incrustación por carbonato de calcio. Es aquí cuando es necesario contemplar la adición de ciertos aditivos químicos con la finalidad de mejorar el comportamiento químico y los niveles corrosivos e incrustantes del agua.



*FIGURA 8. ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE RYZNAR COMPARADO CON RESULTADO DE INCRUSTACIONES. (NALCO CHEMICAL CO., CHICAGO ILL.)*

# CAPÍTULO 3

## PLANTEAMIENTO TÉCNICO DEL PROYECTO

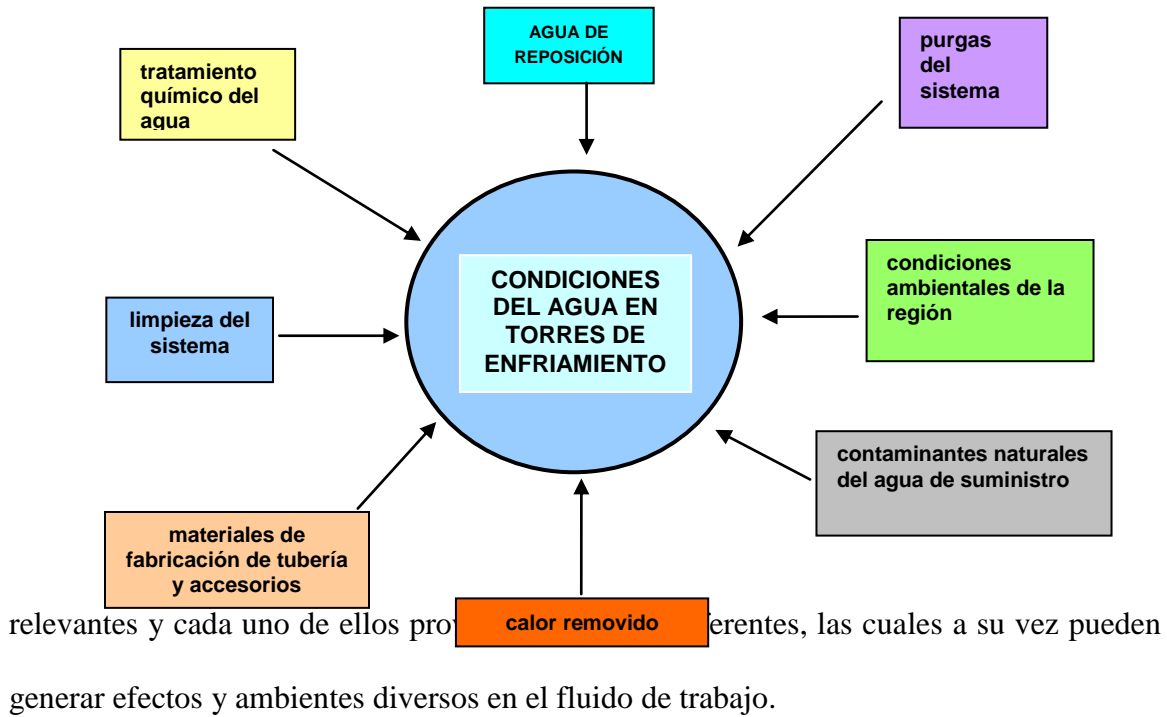
El agua utilizada y las instalaciones hidráulicas, ya sean para procesos industriales, acondicionamiento del aire, redes contra incendio ó consumo en edificios, deben reunir ciertas características según el tipo de aplicación para el cual es destinada.

Los sistemas de enfriamiento y calefacción, pueden resultar particularmente complejos, ya que estos pueden ser sistemas de intercambio de calor del tipo abiertos ó cerrados; por lo tanto, cada uno debe considerar de manera específica la selección de materiales para el suministro de la instalación, así como el procedimiento para el tratamiento de agua requerido en cada caso; lo anterior con la finalidad de tener condiciones de operación óptimas y alargar la vida útil del sistema, controlando básicamente los factores que propician la corrosión y las incrustaciones.

El estudio de este tipo de casos involucra las características químicas del agua, aspectos de ingeniería y economía; así como el diseño, instalación y operación del sistema de tratamiento de agua, debido a que generalmente se tiene más de una posible solución a un mismo caso.

### 3.1 CONDICIONES DEL AGUA EN LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

Los sistemas de enfriamiento recirculantes del tipo abierto, contemplan una serie de aspectos que influyen determinantemente en su operación; en lo que se refiere a las condiciones del agua de la torre de enfriamiento, el siguiente esquema muestra los más



### 3.2 FACTORES BÁSICOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

Comúnmente se consideran cuatro aspectos básicos en los sistemas de tratamiento de agua para torres de enfriamiento: la corrosión, formación de incrustaciones, concentración de sólidos totales disueltos y suspendidos, así como el control microbiológico. Estos deben ser atendidos puesto que influyen reduciendo la eficiencia en los sistemas de transferencia de calor y provocando fallas prematuras en los equipos

*Figura 9. Aspectos influyentes en las condiciones del agua de las torres de enfriamiento.*

#### 3.2.1 CORROSIÓN

La corrosión es un fenómeno definido como la degradación de un metal debido a la interacción de éste con el medio que le rodea, comúnmente a través de una reacción electroquímica. El caso más común se presenta cuando se unen dos metales diferentes (acero y cobre por ejemplo), en el cual uno funciona como ánodo (acero), y el otro como cátodo (cobre), resultando el acero corroído y el cobre protegido. Es decir, el ánodo es el electrodo donde ocurre la pérdida de electrones, generando el flujo eléctrico, y por tanto es el metal que se sacrifica e inhibe la corrosión del cátodo.

En el caso de la tubería de acero galvanizado, el zinc actúa como ánodo, porque inhibe la corrosión del acero. En el anexo 5 se pueden apreciar los cationes y aniones comunes en el tratamiento de agua, así como los compuestos comunes a partir de la combinación de iones.

Para que exista la corrosión es necesaria la presencia de un electrólito, que en éste caso es el agua, el cual funciona como medio para la conducción iónica.

La apariencia de los productos comunes de la corrosión, son el óxido de hierro café ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , hematita) y el óxido de hierro negro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , magnetita), en la corrosión del acero. Los metales que contienen cobre suelen presentar óxidos de cobre azules, ó bien de azules-verdosos a negros.

Existen varios tipos de corrosión (véase anexo 6), y es un problema en las instalaciones de la región según las apreciaciones realizadas en campo, debido a las características del agua de suministro de la red municipal. Este problema ha sido solucionado en parte con el uso de tubería de PVC para la conducción del agua, la cual se ha venido utilizando desde hace varios años con buenos resultados. Sin embargo, es una práctica común utilizar inhibidores de la corrosión para proteger los accesorios y

componentes del sistema fabricados en diferentes materiales (acero, acero galvanizado, aluminio, cobre y latón), así como en los intercambiadores de calor. Estos inhibidores pueden ser anódicos, que como su nombre lo indica, controlan la corrosión mediante la inhibición en el ánodo, generalmente se utilizan: cromatos, nitritos, fosfonatos, ortofosfatos, azoles y molibdatos. Los polifosfatos y el zinc, son utilizados como inhibidores catódicos de la corrosión.

Es común emplear inhibidores de la corrosión combinados con dispersantes en la tecnología actual del tratamiento de agua para torres de enfriamiento, lo anterior ha demostrado ser una práctica eficiente para lograr el control de la corrosión y las incrustaciones.

En las figuras 5, 10 y 11 se aprecia la influencia de diferentes factores que intervienen en el desarrollo de los fenómenos de corrosión y la depositación de sólidos, que en este caso se aplica a sistemas de enfriamiento recirculante abierto.

### **3.2.2 INCRUSTACIÓN**

La incrustación son los depósitos de mineral adheridos a la superficie del metal o de intercambio de calor. Generalmente se refiere a la deposición del carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  (aunque puede presentarse el sulfato y fosfato), el cual se precipita de la solución debido a las características y condiciones de calidad del agua (dureza, alcalinidad y pH) al elevarse la temperatura de ésta.

La dureza es la suma de los iones de calcio y magnesio del agua. Conocer el grado de dureza de un suministro de agua puede revelar que su uso en procesos industriales podría producir incrustaciones considerables. Es común utilizar al carbonato de calcio para

referirse a la dureza, pero las denominaciones específicas pueden ser bicarbonato de calcio, bicarbonato de magnesio, sulfato de calcio, cloruro de magnesio, entre otras.

La apariencia de las incrustaciones es como un material duro de color casi blanco y cristalino, alojado sobre la superficie de la tubería, accesorios de conducción y del sistema que están en contacto con el agua.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el índice de estabilidad de Ryznar es comúnmente utilizado para evaluar las condiciones incrustantes y corrosivas del agua; en éste trabajo será de utilidad su aplicación para determinar el estado incrustante del fluido de trabajo.

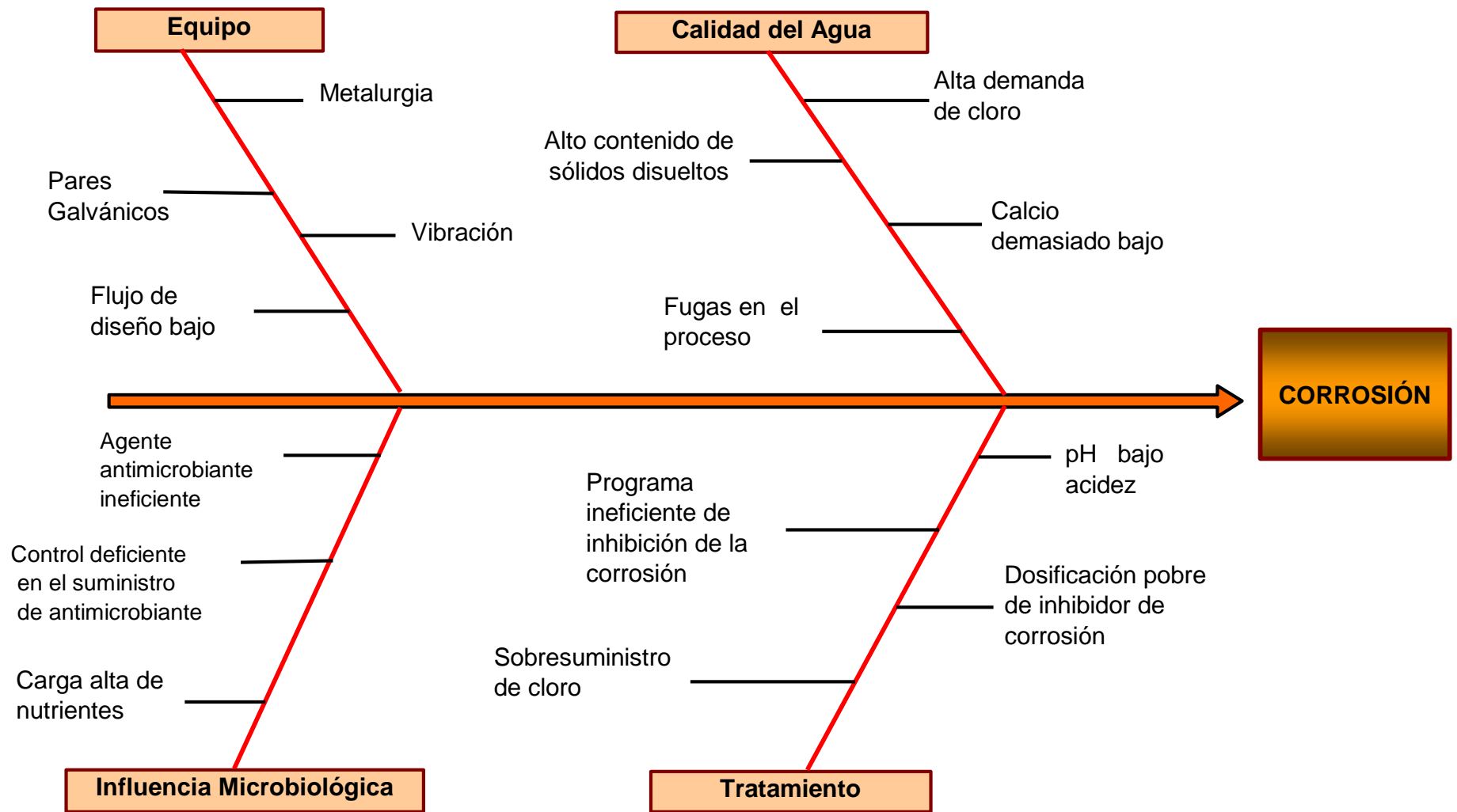


Figura 10. Factores que afectan la incidencia de corrosión en sistemas de enfriamiento recirculante abiertos.

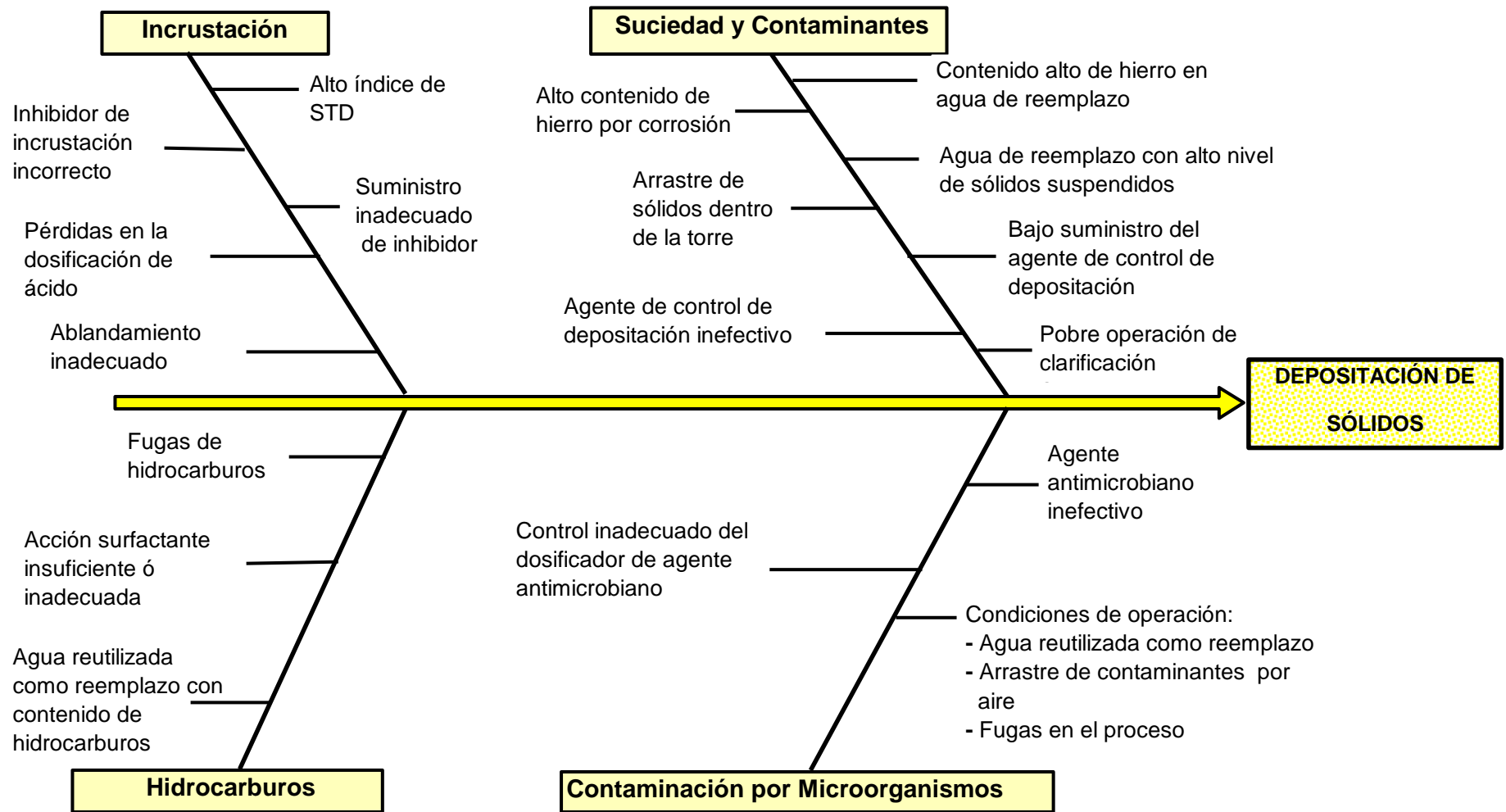


Figura 11. Factores que influyen en la deposición de sólidos en sistemas de enfriamiento recirculante abiertos.

### **3.2.3 SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD)**

La cantidad de sólidos totales disueltos en el agua, también influyen en el proceso de corrosión y formación de las incrustaciones. Una baja concentración de sólidos generalmente indica que se tiene agua corrosiva, aunque se tenga una tendencia menor a la deposición de las incrustaciones. En el caso de tener agua con alta concentración de sólidos pero no incrustantes, ésta puede provocar una corrosión más intensa, debido a la alta conductividad (1).

La conductividad específica es la medida de la capacidad del agua para conducir electricidad. La conductividad se incrementa conforme aumentan los STD; por lo tanto, la conductividad específica es utilizada para estimar los sólidos disueltos en el agua. Se debe recordar que la concentración de STD aumenta debido al fenómeno de evaporación que se presenta en las torres de enfriamiento, razón por la cual el control de las purgas es de relevada importancia.

Las aguas que presentan un alto contenido de sólidos disueltos y grandes cantidades de cloruros y/o sulfatos, pueden causar severos daños por corrosión galvánica entre las cuerdas de tubería galvanizada y válvulas de latón antes de los 5 años, mientras que aguas con baja conductividad no tendrían probabilidad de provocar tales fallas antes de los 20 años.

### **3.2.4 FACTOR BIOLÓGICO**

Las torres de enfriamiento también presentan problemas debido al ensuciamiento del agua debido al crecimiento de bacterias y microorganismos que pueden derivarse del hierro, del cieno o de materia orgánica que es común en el agua de reemplazo. Las torres

son un incubador ideal para microorganismos, debido a su temperatura de operación (27 a 49°C). En los sistemas abiertos con presencia de luz solar, oxígeno del aire y nutrientes como fósforo, nitrógeno, sulfatos y bióxido de carbono, es muy normal que las algas crezcan con abundancia.

En estas instalaciones de intercambio de calor también se presentan las babazas bacterianas anaeróbicas que no requieren de oxígeno ni luz solar, pero que crecen dentro de los intercambiadores.

Se clasifican en tres clases fundamentales los microorganismos que pueden existir en los sistemas recirculantes de agua de enfriamiento, los cuales son:

- **Algas.** Aquí se contemplan desde plantas unicelulares hasta especies multicelulares, los cuales contienen pigmentos de color, como la clorofila; éstas se desarrollan en superficies húmedas donde hay luz solar.
- **Hongos.** Son organismos similares a las algas, pero estos no contienen clorofila ni requieren de luz solar, pero si de humedad y aire.
- **Bacterias.** Son organismos microscópicos semejantes a las plantas; carecen de clorofila y tienen aspectos diferentes: en forma esférica, espiral y de bastones.

La formación de biopelículas que se acumula en los equipos y tuberías, promueven el crecimiento de microorganismos, esto reduce la rapidez de la transferencia de calor en los intercambiadores. Las biopelículas proveen un ambiente ideal para que las bacterias reductoras de sulfato (BRS) y aeróbicas del azufre puedan generar ácidos y causar una grave corrosión, denominada: corrosión inducida por microorganismos (CIM).

Para mantener las condiciones adecuadas para operar la torre de enfriamiento protegida contra la acción de microorganismos, es necesario llevar un monitoreo de recuentos bacterianos, BRS y crecimiento de babazas, además de la aplicación de cantidades apropiadas de biocidas en lugar e intervalos apropiados.

Un caso muy particular es el de la bacteria *Legionella Pneumophila*, que se encuentra por lo común en los suministros de agua superficiales; ésta bacteria ha ocasionado muertes en algunas partes del mundo, debido a infecciones contagiadas por inhalación de aspersiones en forma de neblina o acarreo de agua de las torres de enfriamiento, que al parecer son una posible y seria fuente para la formación de este organismo patógeno. Sin embargo, se sabe que no han ocurrido brotes de *Legionella* en torres de enfriamiento controladas biológicamente y que cuentan con un adecuado programa de mantenimiento.

### **3.3 CICLOS DE CONCENTRACIÓN DEL AGUA**

El agua proveniente de los intercambiadores de calor generado en el proceso, es a lo que se denomina gasto recirculante (recirculation rate, RR por sus siglas en inglés). Cierta cantidad de esta agua se pierde por evaporación en el proceso de enfriamiento a través de la torre, y otra parte (no evaporativa), por los efectos de arrastre, viento y fugas o filtraciones. Debido a lo anterior, debe agregarse al sistema la cantidad de agua necesaria para reponer las pérdidas, esto se logra suministrado agua de reemplazo.

Para evaluar la cantidad de agua evaporada es necesario definir el factor “F” de evaporación; se dice que F es igual a 1, si todo el enfriamiento se debe a la evaporación; sin embargo lo anterior depende de la variación de la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco del aire. Generalmente suelen utilizarse valores del coeficiente de

evaporación entre 0.75 y 1; sin embargo, puede disminuir hasta 0.6 cuando el agua a su llegada a la torre se encuentra relativamente fría.

El agua evaporada es pura, por lo que el gasto recirculante vá incrementando sus niveles de concentración de STD. Considerando que la purga tiene prácticamente la misma composición química que el flujo recirculante, los ciclos de concentración se definen como la relación que existe entre la concentración de sólidos disueltos (en ppm), de la purga del sistema y la concentración del agua de reemplazo.

A tres ciclos de concentración, la purga tiene el triple de sólidos disueltos que el agua de reemplazo.

Con la finalidad de ilustrar lo anterior, la figura 12 presenta un ejemplo de cálculo.

Los ciclos de concentración también pueden definirse a partir de la siguiente relación:

Donde: 
$$\text{Ciclos} = \frac{\text{MU}}{\text{BD}}$$

MU = gasto del agua de reemplazo o reposición en gpm.

BD = gasto calculado del total de purgas en gpm.

De lo anterior puede notarse que la relación basada en el flujo en galones por minuto, es el inverso de la relación en función de la concentración en ppm.

Si se considera que:

$$E + BD = MU$$

Los ciclos de concentración también pueden definirse como:

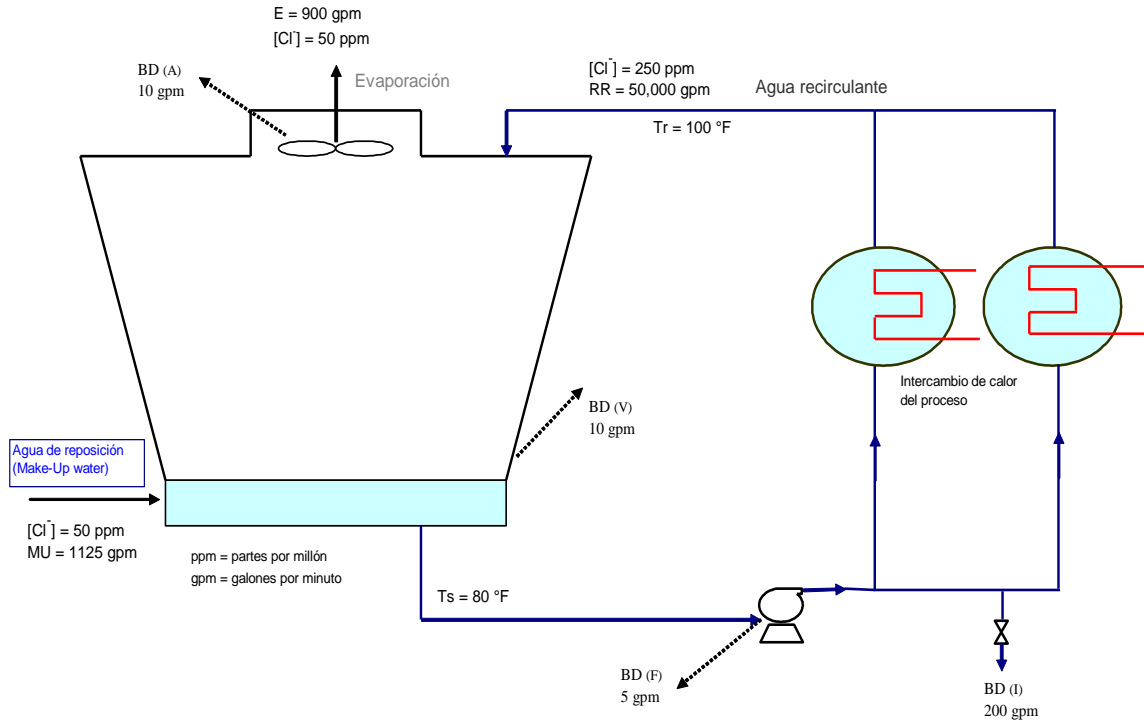
$$\text{Ciclos} = \frac{E + BD}{BD}$$

Donde:

E = evaporación (gpm)

El gasto de la purga calculada puede obtenerse a partir de la siguiente relación:

$$BD = E / (\text{Ciclos} - 1)$$



$$dT = Tr - Ts = 20 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$E = \frac{RR \times dT \times "F"}{1,000} = 900 \text{ gpm}$$

$$\text{Ciclos} = \frac{[Cl]_{BD}}{[Cl]_{MU}} = \frac{250}{50} = 5$$

$$BD = \frac{E}{(\text{ciclos} - 1)} = 225 \text{ gpm}$$

BD = Purga + pérdidas de agua (no evaporativas)

$$MU = E + BD = 1125 \text{ gpm}$$

Nomenclatura:

MU = gasto de agua de reemplazo.

BD = gasto total de la purga (calculada).

BD<sub>(t)</sub> = purga intencional (regulada).

BD<sub>(A)</sub> = pérdidas por arrastre ó acarreo.

BD<sub>(V)</sub> = pérdidas por efecto del viento.

BD<sub>(F)</sub> = pérdidas por fugas y filtraciones.

dT = diferencia de temperatura del agua a la entrada y salida de la torre.

Tr = temperatura del agua recirculante a la salida del intercambiador de calor.

Ts = temperatura del agua recirculante a la entrada del intercambiador de calor.

E = cantidad de agua consumida por evaporación.

RR = gasto de agua recirculante.

F = factor de evaporación de la torre de enfriamiento.

*Figura 12. Ejemplo de cálculo de los ciclos de concentración del agua recirculante.*

La ecuación anterior que define la purga requerida en función de los ciclos de concentración, es muy utilizada en el tratamiento de agua. Después de determinar los ciclos de concentración a partir de las concentraciones del agua de reposición (MU) y del gasto recirculante (RR), las pérdidas de agua y la purga intencional requerida, pueden ser calculadas para mantener el sistema al número de ciclos de concentración deseado.

Existen dos factores básicos que limitan el número de ciclos; el primero es el referente a las pérdidas de agua del sistema las cuales provocan que aumente la concentración de sólidos disueltos; sin embargo, en las torres de enfriamiento modernas lo anterior no representa gran problema. El segundo punto a considerar son las limitaciones químicas, debido a que el incremento en los niveles de sólidos suspendidos y disueltos en el agua, aumentan las tendencias incrustantes y corrosivas. Lo anterior debido a que la corrosión es una reacción electroquímica, y la alta conductividad provocada por la alta concentración de sólidos disueltos, incrementa la capacidad corrosiva; del mismo modo, un aumento en la concentración provoca incremento del pH, generando tendencias a la precipitación e incrustaciones dentro del sistema. Nuevamente el índice de estabilidad de Ryznar, cobra importancia al relacionar el pH de saturación (referido al carbonato de calcio), y el pH actual del agua.

Con ó sin tratamiento químico del agua de enfriamiento, los ciclos de concentración pueden utilizarse eventualmente para establecer los límites en la prevención de incrustaciones.

# CAPÍTULO 4

## DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA

### 4.1 CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN

Para diseñar adecuadamente el método de tratamiento de agua recirculante de la torre de enfriamiento, es necesario contar con información de las características de operación del sistema en cuestión. En este capítulo se presentan los aspectos más relevantes y necesarios para la toma de decisiones que tendrán como objetivo la propuesta de solución del caso.

#### 4.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

La torre es del tipo de enfriamiento a flujo cruzado y como se muestra en la figura 13, el sistema cuenta con dos módulos cada uno de los cuales tiene dos motores en el ventilador de 20 y 5 hp respectivamente. La función del motor de menor capacidad es que opera cuando las condiciones de enfriamiento son de poca demanda, y se reserva la utilización del motor de 20 hp para condiciones normales ó de máxima capacidad. La operación de dichos motores está en función de la temperatura del agua recirculante y está controlada automáticamente.

Cabe mencionar que en este trabajo sólo contempla el análisis de un módulo, por lo que el gasto recirculante a considerar, serán la mitad (600 gpm) que los que reporta el fabricante de la torre, según las especificaciones del anexo 10.

La pileta ó colector de la torre y sus partes estructurales son de acero galvanizado Z700, los componentes interiores son de material plástico y las mamparas de aire de plástico y fibra de vidrio reforzada.



*Figura 13. Vista lateral de la torre de enfriamiento.*

#### **4.1.2 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA**

Para la determinación de las condiciones químicas del agua, se tomaron tres muestras correspondientes al agua de suministro ó de reemplazo, agua recirculante y a la purga del sistema. Tales muestras se analizaron en un laboratorio particular de la localidad, obteniéndose los resultados que aparecen en el anexo 8.

##### **4.1.2.1 AGUA DE REEMPLAZO**

El sistema cuenta con suministro de agua de reemplazo el cual proviene de la red de abastecimiento municipal, las características más importantes del fluido se presentan en la tabla 4.1. El gasto de reemplazo (**MU**), tiene como función la reposición de agua que se pierde por el fenómeno de la evaporación que a su vez provoca el enfriamiento, y por las pérdidas y purga en el sistema. En el momento de la toma de las muestras de agua, se registró un gasto **MU** = 46 lts/min (12.2 gpm), a una temperatura de 22 °C (72 °F). Las condiciones ambientales del aire fueron las siguientes: temperatura de bulbo seco  $T_{bs}$  = 24.3 °C (75.7 °F), y temperatura de bulbo húmedo  $T_{bh}$  = 12.5 °C (54.5 °F), lo cual corresponde a una humedad relativa del 48% aproximadamente.

| <b>PARÁMETRO</b>                | <b>Agua de Reemplazo<br/>(MU)</b> | <b>Agua Recirculante<br/>(RR)</b> | <b>Purga<br/>(BD)</b> |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Conductividad eléctrica         | 1 376 µmhos/cm                    | 1 727 µmhos/cm                    | 1 690 µmhos/cm        |
| PH                              | 7.45 U                            | 7.50 U                            | 7.95 U                |
| Alcalinidad                     | 160 mg/lt                         | 144 mg/lt                         | 148 mg/lt             |
| Sólidos totales disueltos (STD) | 954 mg/lt                         | 1 162 mg/lt                       | 1 152 mg/lt           |
| Dureza de calcio                | 260 mg/lt                         | 284 mg/lt                         | 264 mg/lt             |
| Dureza de magnesio              | 80 mg/lt                          | 172 mg/lt                         | 108 mg/lt             |
| Sílice                          | 8.3 mg/lt                         | 12.8 mg/lt                        | 12.1 mg/lt            |
| Cloruros                        | 210 mg/lt                         | 251 mg/lt                         | 227 mg/lt             |
| Sulfatos                        | 270 mg/lt                         | 400 mg/lt                         | 390 mg/lt             |
| Índice de Langelier             | 0.17                              | 0.29                              | 0.70                  |
| Índice de Ryznar                | 7.1                               | 6.9                               | 6.5                   |

*Tabla 4.1. Resultado del análisis físico-químico del agua en la torre de enfriamiento.*

El agua de reemplazo es suministrada mediante una válvula de bronce, la cual a su vez está regulada por la acción de un flotador de material plástico, mismo que se ajusta para mantener el nivel de agua deseado en la pileta de la torre de enfriamiento.

#### **4.1.2.2 AGUA RECIRCULANTE**

La cantidad de flujo recirculante (**RR**) es considerado en función de la capacidad del enfriador de agua (chiller), del cual proviene el refrigerante que ha de condensarse. Es una práctica común considerar 3 gpm por cada tonelada de enfriamiento del chiller; por lo que para este caso, debido a que los enfriadores de agua tienen una capacidad de 200 toneladas, el gasto recirculante **RR**= 2.271 m<sup>3</sup>/min (600 gpm).

También es común considerar que la composición química del agua recirculante de la torre, es igual que la de la purga. En la tabla 4.1 se pueden apreciar algunos valores similares en los análisis realizados.

#### **4.1.2.3 COMPONENTES DE LA PURGA DEL SISTEMA**

La purga total **BD** se determina por la suma de la purga regulada ó intencional ( $BD_I$ ), más los efectos de las pérdidas no evaporativas por concepto de arrastre ( $BD_A$ ), viento ( $BD_V$ ) y fugas ó filtraciones ( $BD_F$ ).

Puesto que el arrastre contiene sólidos disueltos, debe considerarse como una porción de la purga, a diferencia de la evaporación, la cual se compone de vapor de agua puro, aumentando la concentración de los STD del agua restante. Las pérdidas por arrastre y viento, son gotas que escapan como niebla a través de la torre de enfriamiento, estas pueden considerarse como el 0.05% de pérdida basada en la tasa de recirculación; por lo tanto, para este caso es de esperarse valores por los efectos del arrastre y viento, alrededor de los 1.13 lts/min (0.3 gpm).

Las pérdidas de agua por fugas generalmente se deben a filtraciones en la bomba, válvulas y accesorios; ó bien, cualquier unión ó equipo por el que circule agua. Es difícil evaluar las pérdidas por filtraciones, pero en un sistema con buenas condiciones de operación no deben exceder del 0.01% del gasto recirculante.

En sistemas de enfriamiento recirculante abierto que no cuentan con tratamiento de agua, la purga puede ser utilizada para mantener condiciones aceptables de operación en función de los ciclos de concentración, con el objeto de evitar la corrosión e incrustación, por el aumento en la concentración de sólidos; sin embargo, esta práctica puede resultar costosa debido a los altos consumos de agua de reemplazo.

## 4.2 CÁLCULO DE PURGA REQUERIDA POR EL SISTEMA

Inicialmente se determinará una aproximación de la cantidad de evaporación a partir de la siguiente ecuación:

$$E = RR \frac{(T_2 - T_1)}{560}$$

Donde:

E = gasto de evaporación ( $m^3/min$ )

RR = gasto recirculante ( $m^3/min$ )

$T_2$  = temperatura del agua a la salida del condensador ( $^{\circ}C$ )

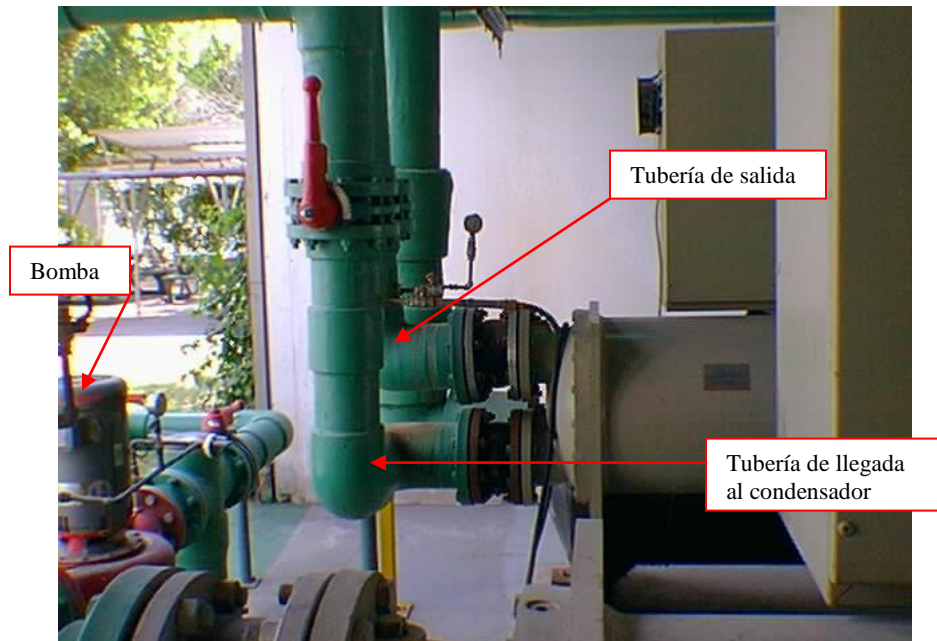
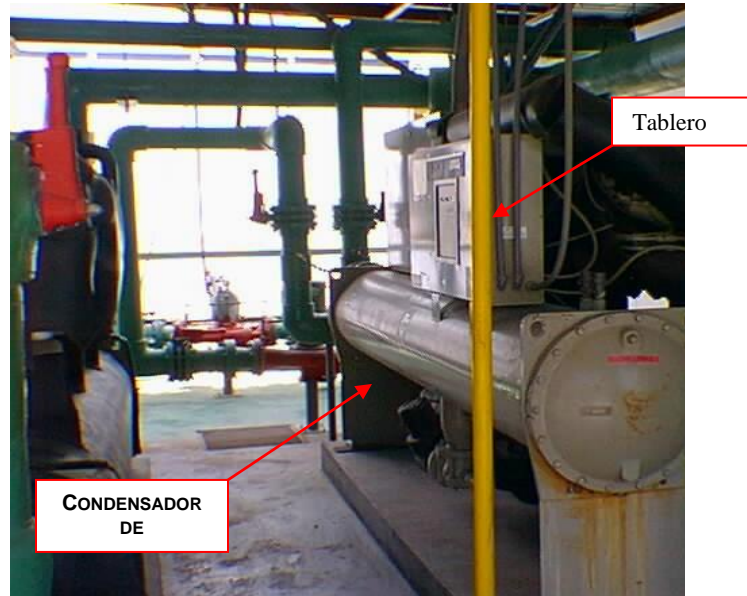
$T_1$  = temperatura del agua a la llegada al condensador ( $^{\circ}C$ )

Sustituyendo los valores de estos parámetros en la ecuación anterior:

$$E = 2.271 \frac{(25.1 - 22.7)}{560} = 0.0097 m^3/min \approx 10 \text{ lts/min}$$

Las lecturas de temperatura del agua se toman directamente del tablero del equipo, el cual puede apreciarse en la figura 14. En la figura 15 se muestran las tuberías de llegada y salida del agua de condensación.

*Figura 14.*  
*Cuarto de máquinas*



*Figura 15. Tuberías de conducción de agua de condensación*

En segundo término, se calcula el número de ciclos de concentración (CC) del sistema, el cual se obtiene por la relación de concentraciones (en ppm ó mg/lit) entre el agua de la purga y la de reemplazo, que se determinaron mediante el análisis químico, por lo tanto:

$$CC = \frac{\text{ppm en BD}}{\text{ppm en MU}}$$

Es recomendable obtener el valor de los ciclos para varios elementos y/o compuestos en el agua, con la finalidad de evitar interferencias en los resultados. Utilizando los datos de la tabla 4.1, se calculan los ciclos de concentración para diferentes compuestos y se obtienen los resultados que se enlistan en la tabla 4.2.

Es importante señalar que inclusive utilizando un pequeño índice de concentración, se reduce en gran medida la demanda de agua; de tal forma que mientras mayor es CC, menor es la demanda de MU, conforme se aproxima a la tasa de evaporación como límite.

| <b>Componente</b>                   | <b>Ciclos de concentración<br/>CC</b> |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Cloruros                            | 1.08                                  |
| Sulfatos                            | 1.44                                  |
| Calcio (como Ca CO <sub>3</sub> )   | 1.01                                  |
| Magnesio (como Ca CO <sub>3</sub> ) | 1.35                                  |
| Sílice                              | 1.45                                  |

*Tabla 4.2. Ciclos de concentración para diferentes componentes químicos.*

Cuando se tiene algún tipo de tratamiento de agua en el sistema o existen incrustaciones ó precipitaciones de algún compuesto, es posible que los resultados obtenidos de los ciclos de concentración se vean afectados, éste tipo de condiciones no se observaron al momento del muestreo. Por lo anterior, calculando un promedio de los resultados de la tabla 4.2, se obtiene una CC = 1.26.

Se recomienda utilizar como práctica común la relación de concentraciones de los sulfatos o cloruros para el cálculo de CC 15. Observando los resultados en la tabla

anterior y tomando el promedio entre cloruros y sulfatos, se obtendría el mismo valor de 1.26 como ciclos de concentración.

La cantidad de purga requerida para mantener el sistema a esas condiciones de concentración, se obtiene de la siguiente manera:

$$BD = MU - E = 46 - 10 = 36 \text{ lts/min}$$

O bien:

$$BD = MU / CC = 46 / 1.26 = 36.5 \text{ lts/min}$$

Lo anterior corroboraría los datos de gasto de agua de reemplazo y la de ciclos de concentración obtenidos en campo.

### 4.3 CALOR REMOVIDO EN EL CONDENSADOR

Debido al fenómeno de intercambio de calor, el agua que proviene de la torre de enfriamiento incrementa su temperatura en su paso por el condensador de refrigerante. Como ya se mencionó anteriormente, los registros de temperatura muestran un aumento de 2.4 °C, que para efectos de cálculo será el mismo incremento en la escala de temperatura absoluta (°K).

La cantidad de calor removido se calcula a partir de la siguiente relación:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$

Donde:

Q = calor removido (kW)

m = flujo de agua (kg/seg)

c = calor específico del agua (k joule/ kg °K)

$\Delta t$  = incremento de temperatura (°K)

Considerando que el flujo recirculante es de 37.85 kg/seg (600gpm), y que el valor promedio de c es 4.18 en las unidades referidas anteriormente, se obtiene:

$$Q = 37.85 \times 4.18 \times 2.4 \approx 380 \text{ kW}$$

### 4.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Una vez que se han determinado las condiciones de operación, y las del agua de reemplazo y recirculante del sistema de enfriamiento, se procede a dar la propuesta de

compuestos químicos a utilizar, su dosificación y forma de suministro a las torres de enfriamiento.

#### 4.4.1 COMPUESTOS QUÍMICOS A UTILIZAR

Debido a las características del agua de reemplazo, en cuanto a su alto contenido de STD (tabla 4.1), se propone utilizar un dispersante (agente tensoactivo) polimérico concentrado, biodegradable y de peso molecular bajo, con la finalidad de controlar los depósitos de tierra en la tina colectora de las torres de enfriamiento. El dispersante es un producto químico que tiene como función mantener las partículas presentes en suspensión debido a la acción surfactante del mismo; en este caso también deberá impedir la cristalización principalmente del carbonato y sulfato de calcio, así como de otras especies formadoras de incrustación a nivel umbral.

El agente dispersante permitirá operar a condiciones de “sobresaturación”, y debido a que interfiere en la formación de cristales, inhibe el fenómeno de incrustación que tal y como se muestra en la figura 16, comúnmente afecta a los sistemas de enfriamiento de ésta región geográfica,

Se recomienda una dosificación inicial de 15 ppm durante los primeros cinco días de tratamiento, para posteriormente mantener la dosis a 10 ppm en función del gasto de agua de reposición del sistema. Es recomendable instalar un flujómetro para determinar correctamente el gasto del agua de reemplazo.



*Figura 16. Presencia de incrustación en torre de enfriamiento.*

La vida microbológica afecta a todo, incluyendo a este proceso de enfriamiento. La figura 17 muestra la formación de lama observada en las torres de enfriamiento en cuestión, antes de iniciar el tratamiento bacteriológico de las mismas.



*Figura 17. Formación de lama por crecimiento bacteriológico.*

Para evitar la presencia y actividad de los microorganismos y por lo tanto la corrosión y biodeterioro de materiales asociada a la existencia de los microbios dentro del sistema, se optó por utilizar microbiocida a base de isotiazolina, ya que es una sustancia recomendada para uso en el tratamiento de aguas de enfriamiento. El producto cuenta con una eficacia especial para el control de bacterias formadoras de espuma, algas y hongos de efecto conocido en el bioensuciamiento de equipos industriales de intercambio de calor, funcionando adecuadamente en un rango amplio de pH y composiciones químicas de agua.

La dosificación recomendada es de 1 ppm del volumen total recirculante del sistema, la cual deberá ser suministrada dos veces por semana.

#### **4.4.2 SUMINISTRO DE TRATAMIENTO QUÍMICO**

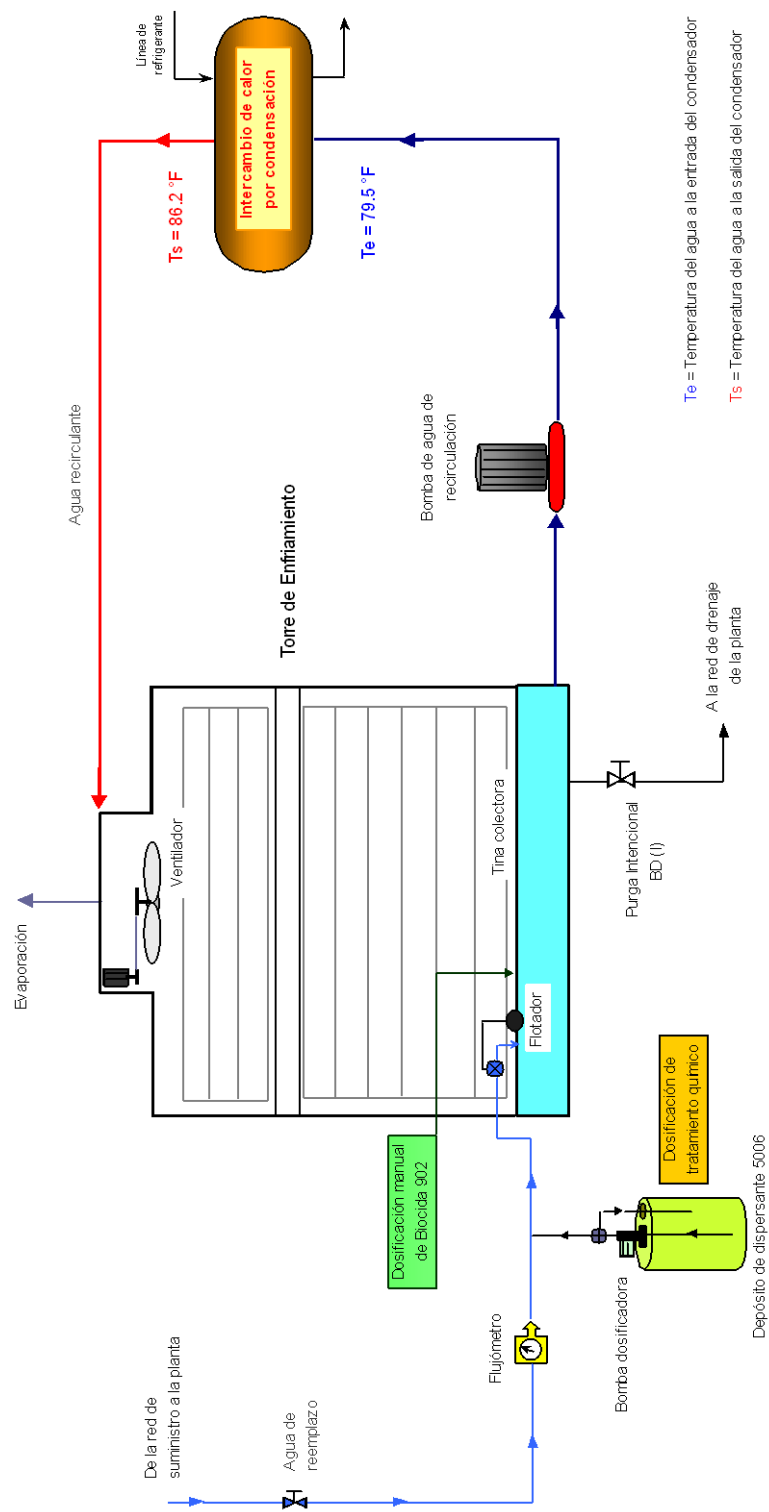
Una componente importante del sistema de tratamiento de agua es el mecanismo de alimentación del producto químico, puesto que de éste depende en buena medida la efectividad del mismo y los costos asociados a su funcionamiento e instalación.

El sistema de dosificación debe asegurar que los requerimientos de compuesto químico sean suministrados correctamente. Si el tratamiento se alimenta en cantidades menores a lo establecido, entonces se presentarán problemas de incrustación y corrosión en el sistema de enfriamiento; por el contrario, si el suministro de producto químico está sobre-dosificado, el consumo de tratamiento será excesivo y provocará un incremento en los costos de operación del sistema de tratamiento de agua.

Una correcta selección de la bomba de suministro del producto químico a utilizar en el tratamiento, debe ayudar a mantener las condiciones del agua y del proceso de enfriamiento dentro de condiciones de operación aceptables.

Para el caso en estudio se propone utilizar una bomba de diafragma para la alimentación del compuesto dispersante, la cual tiene la capacidad de modificar su capacidad de flujo, ajustando previamente la frecuencia del impulso y el desplazamiento de la acción recíproca del elemento que actúa sobre el diafragma. El rango de ajuste varía entre el 10 y 100% de su máxima capacidad, permitiendo así el control del suministro en función del gasto de agua de reemplazo. Las especificaciones del equipo mencionado se presentan en el anexo 10.

La cantidad requerida de biocida es de 4 mililitros dos veces por semana; debido a que es una dosis muy pequeña y constante, se propone sea suministrada manualmente por el personal de mantenimiento de la empresa. La figura 18 representa esquemáticamente el equipo de tratamiento y su punto de colocación dentro del sistema de enfriamiento.



$T_e$  = Temperatura del agua a la entrada del condensador  
 $T_s$  = Temperatura del agua a la salida del condensador

Figura 18. Diagrama Esquemático del Sistema de Enfriamiento y Tratamiento de Agua

#### 4.4.3 MONITOREO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

El seguimiento de las condiciones del agua recirculante en el sistema de enfriamiento, se realizará mediante el monitoreo de la cantidad de sólidos totales disueltos, al menos dos veces por semana.

Es recomendable tomar las lecturas de diferencia de temperatura del agua a la entrada y salida del condensador, las cuales se obtienen directamente del tablero de control del chiller.

En la temporada de verano, que es cuando el crecimiento de microorganismos y bacterias se facilita, se deberán realizar análisis de recuento bacteriológico mensuales para dar seguimiento al control microbiano del sistema; este tipo de análisis deberá ser contratado a un laboratorio de análisis químicos especializado.

Es recomendable realizar un examen físico-químico completo del agua al finalizar cada estación del año para analizar las variaciones en el comportamiento del sistema.

Se podría entonces automatizar el sistema de dosificación de químico dispersante mediante un pequeño tablero de control y un sistema de adquisición de datos en una PC remota.

#### 4.5 COSTO DE SUMINISTRO Y OPERACIÓN DEL SISTEMA

En realidad el sistema propuesto es muy sencillo, ya que de inicio no se propone la utilización de algún tipo de controlador, sino simplemente considerar el suministro de compuesto químico en función del gasto de agua de reemplazo para mantener condiciones adecuadas de funcionamiento. Por lo anterior, los gastos en los que se incurre por concepto de adquisición, puesta en marcha y seguimiento ó supervisión técnica del sistema, son los siguientes:

| CONCEPTO                    | Cantidad | Importe (dls) |
|-----------------------------|----------|---------------|
| <b>Equipo y Materiales:</b> |          |               |

|  |              |                 |
|--|--------------|-----------------|
| Flujómetro ¾" capacidad máx. 20 gpm.                                   | 1            | 170.76          |
| Bomba de dosificación, cap. 22 gpd. 7 bar                              | 1            | 327.60          |
| Recipiente para almacenamiento de compuesto químico, capacidad 15 gal. | 1            | 114.46          |
| Probeta dosificadora de biocida  | 1            | 25.50           |
| Tubería de pvc y accesorios  | 1 lote       | 52.30           |
| Compuesto químico dispersante 5006 (tabor de 55 galones)               | 1            | 2,760.53        |
| Compuesto Biocida 902 (1 gal.)   | 2            | 98.75           |
| <b>Honorarios y Mano de Obra:</b>                                      |              |                 |
| Mano de obra por instalación   | 1            | 184.60          |
| Seguimiento técnico (por año)  | 1            | 1,200.00        |
|  | <b>TOTAL</b> | <b>4,934.50</b> |

### Costos del sistema de tratamiento de agua

En la cotización anterior las cantidades propuestas de compuestos químicos garantizan la demanda de consumo anual y posiblemente más, según sea la demanda de enfriamiento del chiller y las condiciones del clima bajo las cuales esté operando la torre de enfriamiento. El propósito de dar seguimiento técnico por periodo de un año, es con la finalidad de recabar información durante todas las estaciones del año y de ésta manera optimizar el consumo de compuesto químico, mismo que representa el 58% del costo inicial; para tiempos posteriores, será un balance entre el consumo de agua de reemplazo y el de producto químico, lo que determine el costo de operación del sistema de tratamiento de agua.

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

#### 5.1 REGISTROS DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS

El monitoreo de la cantidad de sólidos totales disueltos se llevó a cabo mediante lecturas tomadas por un periodo aproximado de seis semanas, comprendido del 7 de agosto al 19 de septiembre de 2003; generalmente se tomaron a cada torre de enfriamiento cuatro lecturas por día, correspondientes a las 7:00, 10:00, 13:00 y 16:00 hrs. respectivamente, con la finalidad de contar con información que permitiera un mejor análisis del caso.

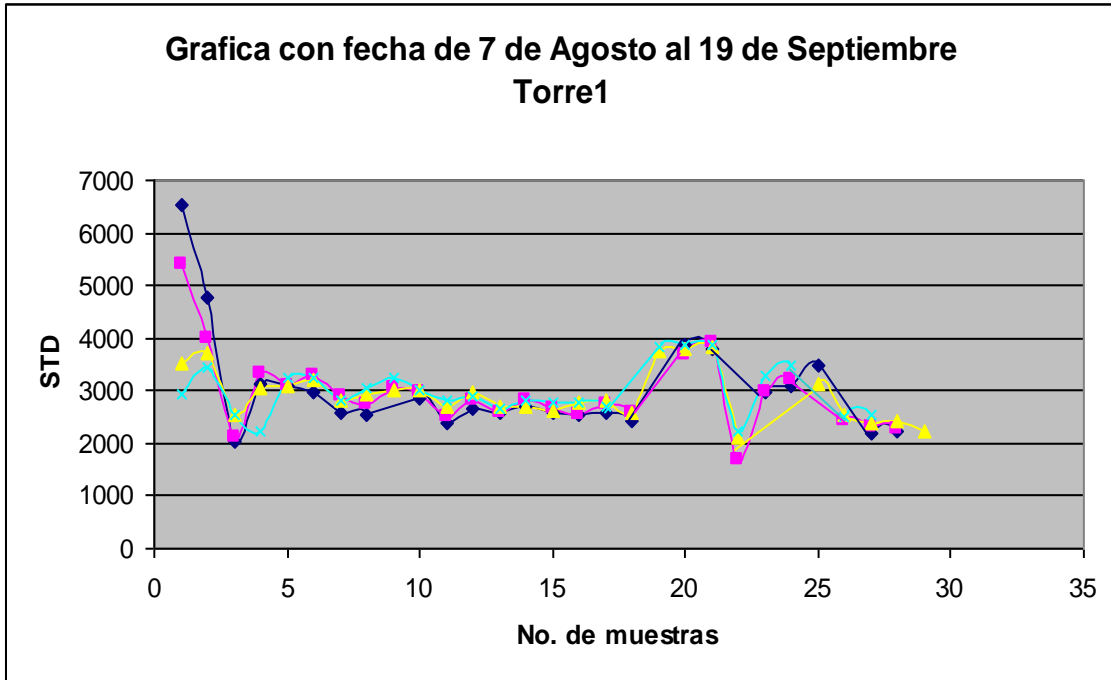
Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.1. Los casos en los que aparece una letra “x” corresponden a eventos en los que no fue posible tomar registro de los STD del sistema. El dispositivo utilizado tiene capacidad para medir la cantidad de sólidos totales disueltos en el rango de 10 a 19,990 miligramos/litro (ppm), con una exactitud de 0.5%, con calibración y compensación manual por temperatura de 0 a 100 °C.

## **5.2 GRÁFICAS DE RESULTADOS**

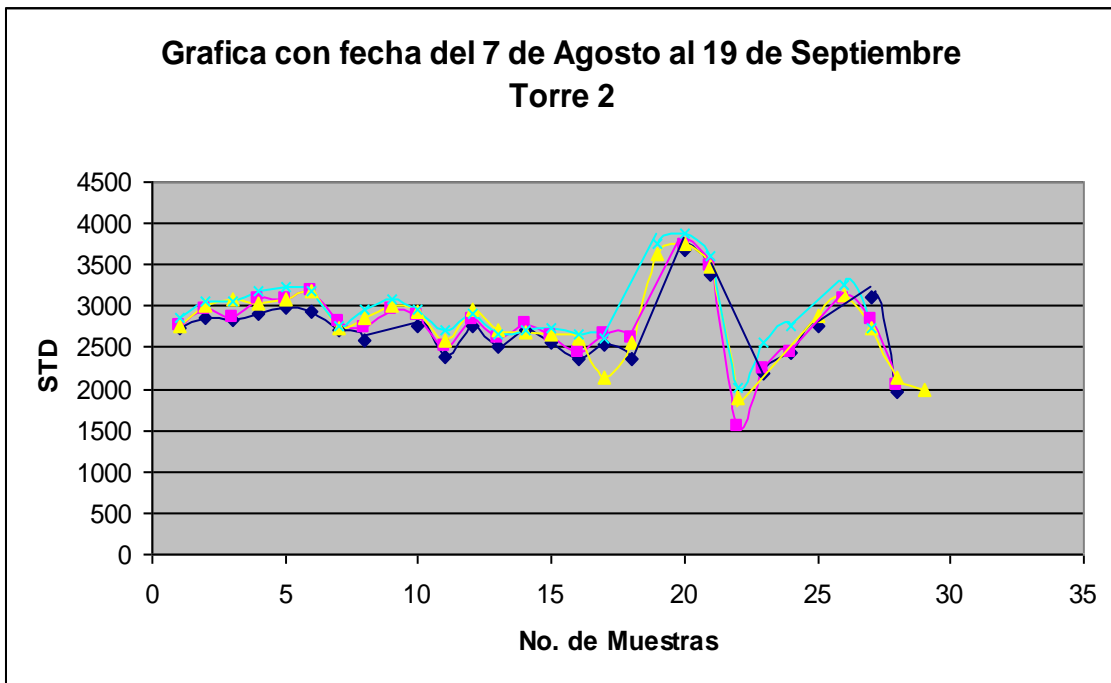
De los resultados obtenidos se elaboraron las gráficas que representan el comportamiento de la concentración de los sólidos totales disueltos en el periodo evaluado para cada una de las torres de enfriamiento y según la hora del día en la que se tomaron las lecturas, estas gráficas se muestran en el anexo 9. Posteriormente se elaboraron los concentrados de los resultados y se presentan en las gráficas 5.1 y 5.2, en las que puede observarse la totalidad de las muestras efectuadas en cada torre.

|    | FECHA    | TORRE 1   |            |            |            | TORRE 2   |            |            |            |
|----|----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
|    |          | 7:00 hrs. | 10:00 hrs. | 13:00 hrs. | 16:00 hrs. | 7:00 hrs. | 10:00 hrs. | 13:00 hrs. | 16:00 hrs. |
| 1  | 07/08/03 | 6530      | 5400       | 3520       | 2940       | 2730      | 2750       | 2760       | 2860       |
| 2  | 08/08/03 | 4760      | 3980       | 3720       | 3430       | 2850      | 2970       | 3010       | 3070       |
| 3  | 11/08/03 | 2050      | 2110       | 2550       | 2560       | 2840      | 2860       | 3090       | 3050       |
| 4  | 12/08/03 | 3140      | 3330       | 3050       | 3230       | 2920      | 3090       | 3040       | 3170       |
| 5  | 13/08/03 | 3080      | 3080       | 3070       | 3240       | 2980      | 3080       | 3090       | 3220       |
| 6  | 14/08/03 | 2980      | 3280       | 3220       | 3240       | 2940      | 3180       | 3170       | 3180       |
| 7  | 15/08/03 | 2600      | 2910       | 2800       | 2830       | 2700      | 2810       | 2730       | 2750       |
| 8  | 18/08/03 | 2540      | 2750       | 2950       | 3050       | 2590      | 2730       | 2850       | 2950       |
| 9  | 19/08/03 | X         | 3060       | 3010       | 3230       | X         | 2960       | 3010       | 3080       |
| 10 | 20/08/03 | 2850      | 2980       | 3030       | 3000       | 2750      | 2880       | 2930       | 2950       |
| 11 | 21/08/03 | 2400      | 2500       | 2680       | 2820       | 2390      | 2500       | 2580       | 2700       |
| 12 | 22/08/03 | 2660      | 2800       | 2990       | 2880       | 2760      | 2840       | 2950       | 2900       |
| 13 | 25/08/03 | 2600      | 2600       | 2700       | 2660       | 2500      | 2600       | 2700       | 2660       |
| 14 | 26/08/03 | 2700      | 2800       | 2680       | 2800       | 2700      | 2780       | 2680       | 2710       |
| 15 | 27/08/03 | 2600      | 2660       | 2630       | 2770       | 2550      | 2630       | 2670       | 2730       |
| 16 | 28/08/03 | 2600      | 2660       | 2630       | 2770       | 2550      | 2630       | 2670       | 2730       |
| 17 | 29/08/03 | 2600      | 2740       | 2820       | 2680       | 2530      | 2650       | 2130       | 2600       |
| 18 | 01/09/03 | 2440      | 2600       | 2570       | X          | 2350      | 2620       | 2550       | X          |
| 19 | 03/09/03 | X         | X          | 3757       | 3840       | X         | X          | 3633       | 3761       |
| 20 | 04/09/03 | 3888      | 3666       | 3777       | 3888       | 3688      | 3740       | 3765       | 3870       |
| 21 | 05/09/03 | 3809      | 3918       | 3833       | 3870       | 3385      | 3482       | 3477       | 3600       |
| 22 | 08/09/03 | X         | 1670       | 2096       | 2231       | X         | 1532       | 1884       | 2004       |
| 23 | 09/09/03 | 2958      | 2990       | X          | 3300       | 2181      | 2247       | X          | 2555       |
| 24 | 11/09/03 | 3103      | 3222       | X          | 3500       | 2432      | 2447       | 2770       | X          |
| 25 | 12/09/03 | 3472      | X          | 3113       | X          | 2764      | X          | 2887       | X          |
| 26 | 15/09/03 | X         | 2409       | 2528       | 2520       | X         | 3076       | 3137       | 3260       |
| 27 | 17/09/03 | 2204      | 2290       | 2380       | 2588       | 3117      | 2841       | 2744       | 2724       |
| 28 | 18/09/03 | 2211      | 2277       | 2444       | X          | 1970      | 2040       | 2140       | X          |
| 29 | 19/09/03 | X         | X          | 2222       | X          | X         | X          | 1995       | X          |

*Tabla 5.1. Resultados obtenidos del registro de Sólidos Totales Disueltos (ppm) en el agua recirculante.*



*Gráfica 5.1. Concentraciones de sólidos totales disueltos en la torre 1, a lo largo del periodo de evaluación (STD en ppm).*



*Gráfica 5.2. Concentraciones de sólidos totales disueltos en la torre 2, a lo largo del periodo de evaluación, (STD en ppm).*

### **5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

De la tabla y gráficas de resultados presentadas en éste capítulo, básicamente se puede observar que los índices de concentración de los sólidos totales disueltos en el sistema se mantuvieron en un rango aproximado de 2500 a 3200 ppm., para ambas torres.

En la gráfica 5.1 se puede observar que los niveles de STD están muy por encima de lo normal en la primer lectura de la torre 1, correspondiente a las 7:00 hrs., sin embargo los niveles descienden a lo largo del día. Lo anterior fue consecuencia de tener casi cerrada la válvula de purga del sistema, además de haber disminuido el gasto de agua de reemplazo; según el personal de mantenimiento de la planta, habían recibido instrucciones de llevar a cabo esas acciones con la finalidad de disminuir el consumo de agua. Una vez que se posiciona adecuadamente la válvula de purga, y por otro lado se recuperan los niveles de agua en la tina, puede observarse posteriormente un comportamiento normal. En la otra torre no se presenta lo anterior puesto que no tienen la misma demanda de enfriamiento ni operan siempre simultáneamente.

Los valores medios fueron de 2981 mg/l (ppm) para la torre 1 y de 2811 ms/l para la torre 2.

Otro aspecto relevante es que para ambas torres los índices más elevados de STD, se obtuvieron por la tarde casi en su totalidad, en los registros correspondientes a las 16:00 hrs.

Puede observarse en las gráficas 5.1 y 5.2 que el aumento de los sólidos totales disueltos es gradual a lo largo del día; lo anterior hace pensar que si las condiciones de demanda de enfriamiento permanecen relativamente estables, la evaporación juega un papel importante en el comportamiento de los índices de STD, particularmente para el caso y periodo en estudio.

### **5.4 PROPUESTA DE OPERACIÓN DEL SISTEMA**

En función del comportamiento observado de la concentración de sólidos disueltos en el periodo monitoreado, se recomienda mantener los niveles de STD alrededor de las 3000 ppm., debido a que no se presentaron problemas críticos de incrustación posteriores al inicio del tratamiento recomendado.

Es importante recalcar que la cantidad de sólidos totales disueltos del agua de reemplazo proveniente de la red de suministro municipal tiene cerca de 1000 ppm., razón por la cual los ciclos de concentración no pueden ser muy elevados, puesto que se llegaría a manejar el sistema con altos niveles de concentración de STD.

Por lo anterior se propone mantener los ciclos de concentración en un valor de 3. Si se toman los valores promedio de STD en el agua recirculante y la de reemplazo, se obtiene:

La diferencia de temperatura  $CC = 2900 / 950 = 3.05$  en el intercambiador fue de 4.5 °C. Tal y como se presentó en el capítulo anterior, el gasto correspondiente a la evaporación se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$E = 2.271 \frac{(4.5)}{560} = 0.018 \text{ m}^3/\text{min} = 18 \text{ lts}/\text{min}$$

La purga requerida por el sistema bajo estas condiciones resulta ser:

$$BD_{\text{req}} = \frac{E}{CC - 1} = \frac{18}{3 - 1} = 9 \text{ lts}/\text{min}$$

Finalmente el gasto de agua de reemplazo será:

$$MU = E + BD = 18 + 9 = 27 \text{ lts}/\text{min}$$

El nuevo valor del gasto de agua de reemplazo es significativamente menor que el anterior.

Para el control del crecimiento bacteriano se propone iniciar con una dosis de choque de 20 ppm en cada tina, que para este caso serían 160 ml por torre. Posteriormente continuar con el suministro de biocida a razón de 2 ppm todos los días en ambas torres.

## 5.5 AHORRO ESTIMADO EN CONSUMO DE AGUA

El gasto de agua de reemplazo registrado al inicio fue de 46 lts/min., si se compara con el calculado anteriormente se obtiene una diferencia de 19 lts/min., equivalentes a 27.3 metros cúbicos por día de operación, que representan el 41.3 % de

disminución en el consumo. Es evidente que como consecuencia de la disminución del gasto de agua de reemplazo se tendrá un considerable ahorro de dinero.

Considerando que en la temporada de verano la evaporación es el principal mecanismo de enfriamiento, y que por tanto es también la mayor componente en las necesidades de agua de reemplazo, si solo en el periodo de junio a septiembre se mantuvieran las condiciones de operación propuestas anteriormente, el ahorro total sería de 3280 m<sup>3</sup>, lo cual representa un importe total aproximado a los \$ 5,400 USD., el cual supera al costo inicial y de operación del sistema propuesto de tratamiento de agua.

## CAPÍTULO 6

### OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra resultados los cuales se obtuvieron al establecer un programa de dosificación de tratamiento químico de manera manual, el sistema de tratamiento propuesto se basa en los resultados obtenidos en un periodo de cuatro meses.

El suministro de producto químico para el control de las incrustaciones, fue a partir de la primera semana del mes de junio y concluyó a finales del mes de septiembre, tiempo durante el cual la dosis diaria se suministró en tres partes iguales al inicio de cada turno de 8 horas. Cabe mencionar que los días domingo no se dosificaba el sistema por que no se tenía disposición de personal de mantenimiento capacitado para ello. Lo anterior puede verse reflejado en variaciones de la concentración de dispersante dentro del sistema.

Otro aspecto relevante es que en varias ocasiones se encontró la purga casi totalmente cerrada, y como consecuencia de ello posteriormente se registraban valores altos en la concentración de sólidos totales disueltos.

Iniciando el mes de julio comienza el tratamiento con biocida (4 ml por torre), al principio se notó un cambio en el color de la lama, tornándose a un color café más claro que el aspecto original; debe reconocerse que la presencia bacteriológica se manifestó posteriormente debido a que no se suministró dosis de choque inicial, lo cual se hizo hasta principios del mes de septiembre, debido a que anteriormente no se tenía suficiente cantidad de producto.

Del 21 al 24 de junio no se agregó tratamiento químico con agente dispersante debido a que se agotó la existencia de producto, reiniciándose posteriormente de manera regular. En el periodo anteriormente referido se dio la instrucción de purgar mayor cantidad de agua al sistema para mantener niveles aceptables de STD, aunque lo anterior provoca un aumento en el consumo de agua de reemplazo.

A finales del mes de junio se tuvo registro de altos niveles de espuma en la tina de las torres de enfriamiento; lo anterior fue debido a se tuvieron problemas de baja presión en el suministro de agua de la red municipal que abastece la planta, provocando que el gasto de agua de reemplazo disminuya casi el 50%, y esto a su vez genera una alta concentración de producto químico para el control de las incrustaciones, manifestándose como espuma debido a sus propiedades surfactantes.

Se puede concluir que el control de la condiciones del agua de enfriamiento en un sistema recirculante abierto, aunque depende de muchas variables, puede lograrse una vez que se tiene amplio conocimiento del sistema a tratar. Finalmente se propone operar

el sistema a tres ciclos de concentración, pero quizás pueda aumentarse ese valor, siempre y cuando se lleve seguimiento y se tengan elementos suficientes para aprobar en su caso. Para lograr lo anterior, es posible utilizar un controlador que registre la cantidad de STD del sistema, y en función de esto haga actuar la purga del sistema a través de una válvula solenoide.

Es concluyente que la purga del sistema tiene relevada importancia en el funcionamiento apropiado del sistema de enfriamiento y de su costo de operación, porque además de tener relación directa con los consumos de agua y los ciclos de concentración, es el único mecanismo por el cual se pierde producto químico de tratamiento, debido a que la evaporación en el sistema es considerada como agua pura.

Con respecto al control del crecimiento de bacterias y microorganismos, se concluye que la dosis de choque debió haberse suministrado desde el principio del tratamiento, ya que el sistema en cuestión no es nuevo, y la tendencia al crecimiento bacteriano es mayor en sistemas usados o no tratados previamente.

Al operar el sistema a tres ciclos de concentración y reponiendo los consumos por pérdidas y evaporación, el gasto de agua de reemplazo resulta ser de 26.6 lts/min, lo cual representa un ahorro del 42% con respecto a las condiciones originales, en consecuencia mensualmente se tendría un abatimiento del 32.3% del costo total del sistema supuesto.

Existen dos aspectos relevantes en cuanto a los logros principales alcanzados con el presente proyecto. En primer lugar debe mencionarse la generación de información técnica obtenida directamente en campo referente a los índices de concentración de los sólidos totales disueltos representada en el anexo 9, la cual refleja el comportamiento del sistema de enfriamiento en estudio y proporciona evidencia de las condiciones de

operación durante el periodo de seguimiento. Otro aspecto importante es la formación de recurso humano en el área, que da como resultado la capacidad de diseñar el sistema de tratamiento y la experiencia para evaluar condiciones futuras y generar propuestas de mejora al sistema, extendiéndose lo anterior a cualquier otro sistema de enfriamiento del tipo recirculante abierto que se presente.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ASHRAE Handbook. "HVAC Systems and Equipment", Cap. 37, pp 10, I-P Editions, 1996.
2. ASHRAE Handbook. "HVAC Applications", Cap. 43, pp 1-17, I-P Editions, 1991.
3. Association of Water Technologies, Inc., "The Analyst Winter 2001", Vol. VIII, Number 1.
4. APHA, "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater", American Public Health Association, Washington D.C., 17<sup>th</sup> Ed., 1989.
5. ASTM, "Manual of Water", STP 442a., American Society for Testing and Materials, Pa., 1978.
6. M. Godet. "Effective Strategic Management: The Prospective Approach", Technology Analysis and Strategic Management, 1989.
7. Milkos, Tomas y María Elena Tello. "Planeación Prospectiva", Ed. Limusa, 1999.
8. Charles W.L. Hill, Gareth R. Jones. "Administración Estratégica: Un Enfoque Integrado", Ed. Mc. Graw Hill, 3era. Edición, 1996.
9. 3er. Seminario Nacional, Territorio-Industria-Tecnología. "Experiencias, Retos y Oportunidades Regionales en la Innovación Tecnológica", Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca Hgo., 1999.
10. C. Braun. "Innovación Industrial". Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, 1997.
11. R.W. Lane, C. H. Neff. "Indices for Estimating Corrosive and Scale Tendencies of Water", Journal of AMW, Urbana Ill., 1990.
12. National Association of Corrosion Engineers. "Standard Recommended Practice On-line Monitoring of Cooling Waters", Materials Protection, April 1990.
13. National Association of Corrosion Engineers. "Cooling Water Treatment Manual", TPC Publication 1, 3<sup>th</sup> Ed., Houston 1990.
14. Association of Water Technologies, Jesse Jefferies. "The Mentor-Cooling Water Training Program", AWT multi-media training program 1998.
15. Betz Laboratories Inc. "Betz Handbook of Industrial Water Conditioning", 9<sup>th</sup> Ed., Trevese Pa., 1991.
16. Russel W. Lane. "Control de Incrustaciones y Corrosión en Instalaciones Hidráulicas de Edificios", Ed. Mc. Graw Hill, 1995.
17. Robert R. Cavano, Scranton Associates Inc. "Phosponates for Cooling Water Treatment", Association of Water Technologies, Inc., February 2000.
18. S.G. Choudhary, Tata Chemicals Ltd. "Emerging microbial control issues in cooling water systems", Heat Transfer, Hydrocarbon Processing, May 1998.
19. American Water Works Association Research Foundation. "Lead Control Strategies", Denver, 1990.
20. R. Burger. "Cooling Water Technology", Burger & Associates, 3d. printing, Dallas, Tex., 1979.
21. W.F. Langelier, "The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment", Journal of the American Water Works Association., vol. 28, October 1936
22. J.W. Ryznar. "A New Index for Determining Amount of Calcium Carbonate Scale Formed by a Water", Journal of the American Water Works Association, vol. 36, April 1994, p.472.

23. NALCO Chem. Co., Frank N. Kemmer, John McCallion. “Manual del Agua: Su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones”, Ed. Mc.Graw Hill, 1995.

## **REVISIÓN EN WEBSITE:**

1. [www.alken-murray.com/327.htm](http://www.alken-murray.com/327.htm)
2. [www.awt.org](http://www.awt.org)
3. [www.baltaircoil.com](http://www.baltaircoil.com)
4. [www.willainic.com/InspectionBody.htm](http://www.willainic.com/InspectionBody.htm)
5. [www.gebetz.com](http://www.gebetz.com)

# **Anexo 1**

## **Recomendaciones básicas de M.Godet <sup>(6)</sup> para realizar diagnósticos estratégicos en el desarrollo de estudios prospectivos:**

### **1. Iluminar la acción presente a la luz del futuro posible, múltiple e incierto.**

En un mundo caracterizado por la creciente incertidumbre y la presencia de discontinuidades y rupturas, no habrá que esperar la aparición de desastres, crisis o emergencias para promover diversas acciones.

### **2. Adoptar una visión global y sistémica.**

El pensamiento prospectivo debe necesariamente ser global. Difícilmente existen problemas aislados, por el contrario, en estos momentos somos testigos de una creciente interdependencia de problemas, por lo cual no podemos esperar soluciones más que totales. Por lo tanto es recomendable el empleo de técnicas y métodos inspirados en el análisis de sistemas.

### **3. Consideración de elementos cualitativos y las estrategias de los actores.**

Se requiere incorporar elementos cualitativos como planes, comportamiento de los actores y aspectos socio-culturales. Esta consideración cualitativa debe ser priorizada, revirtiendo el esquema característico de los clásicos modelos econométricos en los que no es posible incorporar parámetros cualitativos o no cuantificables. En vez de utilizar modelos para determinar variables, la prospectiva requiere de un inicio basado en la conformación de escenarios, con la finalidad de construir modelos apropiados que representen los desarrollos que desean explorar. Es decir, se debe someter los modelos a la realidad y no al revés.

4. **Hacer uso de las lecciones del pasado y no subestimar los factores inerciales.**

Se considera que un buen estudio prospectivo implica casi siempre un esfuerzo considerable de análisis retrospectivo y reflexión. Este “ver hacia el pasado”, es tarea difícil debido a que implica una labor de reconstrucción y el manejo de información “controvertida”, puesto que se puede interpretar de diferentes maneras. Por otra parte, hay que considerar que las grandes organizaciones se caracterizan por una fuerte inercia y por lo tanto los cambios son marcadamente lentos. Por lo anterior se debe promover la preparación para los cambios anticipadamente.

5. **Interpretar la información a la luz de los juegos de poder.**

En ocasiones la información debiera ser entendida como un juego de declaraciones, en el cual el póker, es “el bluff” es a menudo más importante que la realidad. La información es un producto extraño, su comunicación e intercambio no constituyen procesos libres ni neutrales.

**6. Desconfiar de la “sabiduría” recibida.**

Las costumbres del presente o ideas de moda, deben ser consideradas con cierta desconfianza, debido a que generalmente son fuente de error en el análisis y el pronóstico.

Para ver las cosas claramente y solicitar los datos adecuados, el investigador no debe dudar en pensar diferente. Es necesario mantener una actitud crítica y de búsqueda.

**7. Contar con el cambio social para permitir el cambio tecnológico.**

Se puede decir que en realidad hay pocos cambios sin crisis, ya que son pocos los sistemas capaces de autotransformarse anticipadamente. Es recomendable atender las estructuras, comportamiento y calidad de personal, para entender la situación de las organizaciones con problemas.

Basado en lo anterior, ¿cómo podría explicarse el hecho de que otras compañías tengan éxito, bajo las mismas condiciones del entorno?. Se debe considerar la importancia relativa de las situaciones técnicas, económicas y financieras en las estrategias de desarrollo; sin embargo, cualquier alternativa centrada solamente en la modernización tecnológica, no es del todo segura.

Fundamentalmente, no es tanto el nivel de inversión material y su efectividad lo más importante, se debe enfatizar tanto en la capacitación y el desarrollo del personal como en la investigación.

**8. Transformar estructuras y comportamiento.**

Los cambios del entorno requieren una mayor capacidad de respuesta y flexibilidad, cualidades que dependen en gran medida de las estructuras organizacionales. En esta perspectiva, las estrategias no sólo tendrán que adaptarse al desarrollo del entorno sino anticiparse, por lo que el futuro seguramente será de aquellas estructuras flexibles logradas y proyectos autónomos.

Para lograr lo anterior se requieren nuevas cualidades por parte de los trabajadores y directivos, esto implica que los colaboradores de una compañía o institución, deben sufrir una genuina “revolución” en el sentido de basar su autoridad en la competencia, capacidad de animación y promoción.

**9. Movilizar la inteligencia de la organización.**

La productividad por sí sola no es garantía de competitividad. La calidad y la innovación son elementos que también se requieren y que dependen principalmente de la conducta y de la iniciativa e imaginación de cada colaborador, a todos los niveles de la empresa.

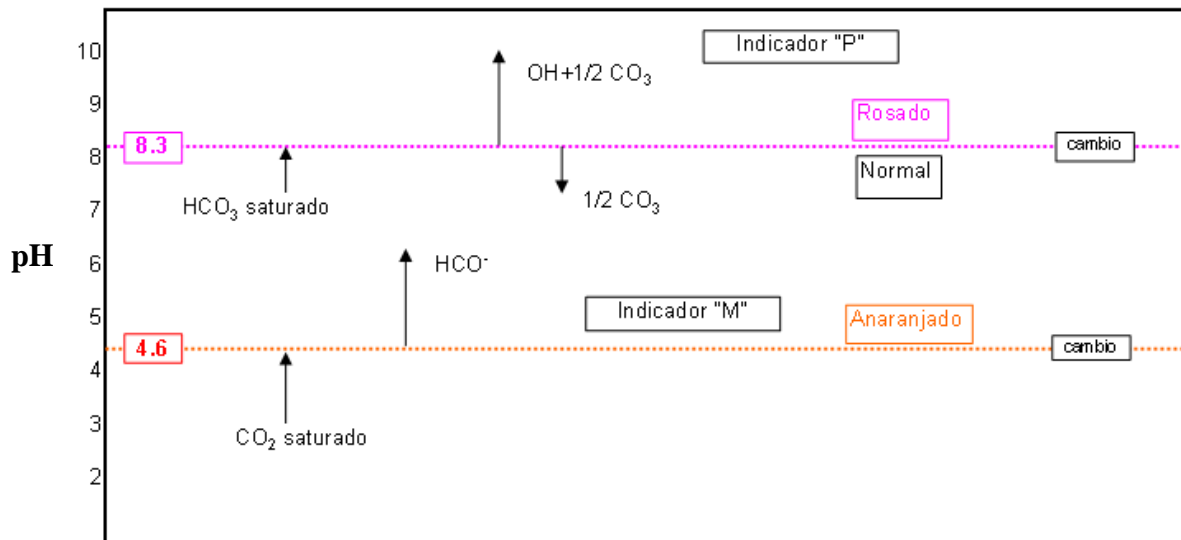
La visión prospectiva, la resolución estratégica y la movilización colectiva, constituyen las tres “reglas de oro” de la cultura estratégica.

**10. Considerar los métodos como herramientas para la reflexión y comunicación.**

La imperfección de las herramientas, inexactitud de datos y subjetividad de las interpretaciones, son realidades inevitables. El objetivo principal de los métodos no sólo es el proveer resultados, sino también el impulsar el pensamiento estructurado, lo cual genera un cambio en las mentes de los involucrados en la investigación.

## Anexo 2

### COMPOSICIÓN DE LA ALCALINIDAD



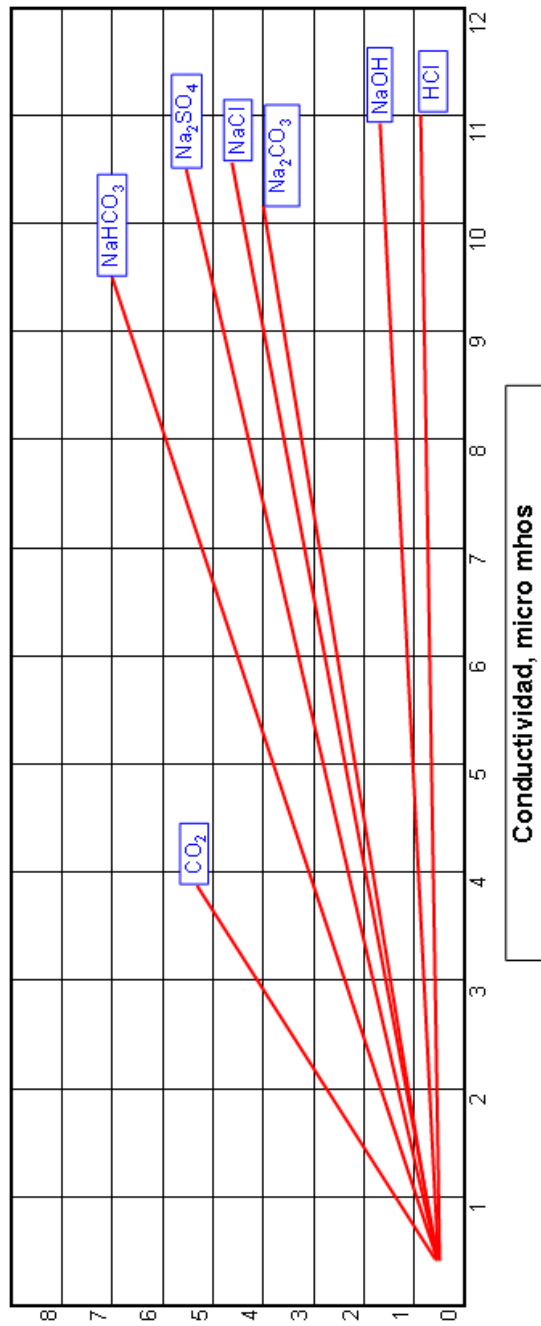
“P” determina:  $\frac{1}{2} \text{CO}_3 + \text{OH}$

“M” determina:  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3 + \text{OH}$

$2P - M = \text{OH}$

# Anexo 3

## CONDUCTIVIDAD DE COMPUESTOS SOLUBLES EN AGUA



## Anexo 4

### EJEMPLO DE CÁLCULO DEL $pH_s$ E ÍNDICE DE RYZNAR

El  $pH$  de saturación de una solución se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$pH_s = 9.3 + \text{Efecto del calcio} + \text{Efecto de la alcalinidad} + \text{Efecto de STD} \quad \text{y temperatura}$$

#### Datos:

Calcio : 80 ppm

$pH$  (real) = 7.5

Alcalinidad = 70 ppm

STD = 290 ppm

Temp. = 26.6 °C

#### Solución:

El efecto de la concentración del calcio y la alcalinidad se obtiene de las Tabla A4-1.

Efecto del calcio: -1.5

Efecto de la alcalinidad: -1.84 (interpolando entre 60 y 80 ppm)

El efecto de la concentración de los STD en función de la temperatura se obtiene de la tabla A4-2.

Efecto de STD y temperatura: 2.06

$$pH_s = 9.3 - 1.5 - 1.84 + 2.06 = 8.02$$

Determinación del índice de Ryznar:

$$IR = 2pH_s - pH = (2 \times 8.02) - 7.5 = 8.9$$

## Tabla A4-1

### EFECTO DEL CALCIO Y ALCALINIDAD

| PPM                     | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 80    |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CaCO <sub>3</sub> , ppm | -1.60 | -1.90 | -1.08 | -1.70 | -1.30 | -1.38 | -1.50 |
| Alcalinidad, ppm        | -1.00 | -1.30 | -1.48 | -1.60 | -1.70 | -1.78 | -1.90 |

| PPM                     | 100   | 120   | 130   | 140   | 160   | 180   | 200   |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CaCO <sub>3</sub> , ppm | -1.60 | -1.68 | -1.71 | -1.75 | -1.80 | -1.86 | -1.90 |
| Alcalinidad, ppm        | -2.00 | -2.08 | -2.11 | -2.15 | -2.20 | -2.26 | -2.30 |

| PPM                     | 230   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CaCO <sub>3</sub> , ppm | -1.90 | -2.08 | -2.20 | -2.30 | -2.38 | -2.45 | -2.50 |
| Alcalinidad, ppm        | -2.30 | -2.48 | -2.60 | -2.70 | -2.78 | -2.85 | -2.90 |

| PPM                     | 900   | 1000  | 1100  | 1200  | 1300  | 1400  | 1500  |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CaCO <sub>3</sub> , ppm | -2.55 | -2.60 | -2.64 | -2.68 | -2.71 | -2.75 | -2.78 |
| Alcalinidad, ppm        | -2.95 | -3.00 | -3.04 | -3.08 | -3.11 | -3.15 | -3.18 |

## Tabla A4-2

EFECTO DE LA TEMPERATURA Y SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS

STD, ppm

TEMPERATURA  
°C

|      | 10   | 20   | 30   | 50   | 100  | 200  | 300  | 500  | 1000 | 2000 | 3000 | 5000 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 10   | 2.16 | 2.19 | 2.21 | 2.23 | 2.26 | 2.29 | 2.31 | 2.33 | 2.38 | 2.39 | 2.41 | 2.43 |
| 15.5 | 2.08 | 2.11 | 2.12 | 2.15 | 2.18 | 2.21 | 2.22 | 2.25 | 2.28 | 2.31 | 2.32 | 2.35 |
| 21.1 | 1.99 | 2.02 | 2.04 | 2.08 | 2.09 | 2.12 | 2.14 | 2.18 | 2.19 | 2.22 | 2.24 | 2.26 |
| 26.6 | 1.91 | 1.94 | 1.96 | 1.98 | 2.01 | 2.04 | 2.06 | 2.08 | 2.11 | 2.14 | 2.16 | 2.18 |
| 32.2 | 1.82 | 1.85 | 1.87 | 1.89 | 1.92 | 1.95 | 1.97 | 1.99 | 2.02 | 2.05 | 2.07 | 2.09 |
| 37.7 | 1.74 | 1.77 | 1.79 | 1.81 | 1.84 | 1.87 | 1.89 | 1.91 | 1.94 | 1.97 | 1.99 | 2.01 |
| 43.3 | 1.66 | 1.69 | 1.70 | 1.73 | 1.76 | 1.79 | 1.80 | 1.83 | 1.88 | 1.89 | 1.90 | 1.93 |
| 48.8 | 1.57 | 1.60 | 1.62 | 1.64 | 1.67 | 1.70 | 1.72 | 1.74 | 1.77 | 1.80 | 1.82 | 1.84 |
| 54.4 | 1.49 | 1.52 | 1.54 | 1.58 | 1.59 | 1.62 | 1.64 | 1.66 | 1.69 | 1.72 | 1.74 | 1.76 |
| 60.0 | 1.40 | 1.43 | 1.45 | 1.47 | 1.50 | 1.53 | 1.55 | 1.57 | 1.60 | 1.63 | 1.65 | 1.67 |
| 65.5 | 1.32 | 1.35 | 1.37 | 1.39 | 1.42 | 1.45 | 1.47 | 1.49 | 1.52 | 1.55 | 1.57 | 1.59 |
| 71.1 | 1.24 | 1.27 | 1.28 | 1.31 | 1.34 | 1.37 | 1.38 | 1.41 | 1.44 | 1.47 | 1.48 | 1.51 |
| 76.6 | 1.15 | 1.18 | 1.20 | 1.22 | 1.25 | 1.28 | 1.30 | 1.32 | 1.35 | 1.38 | 1.40 | 1.42 |
| 82.2 | 1.07 | 1.10 | 1.12 | 1.14 | 1.17 | 1.20 | 1.22 | 1.24 | 1.27 | 1.30 | 1.32 | 1.34 |
| 87.7 | 0.98 | 1.01 | 1.03 | 1.05 | 1.08 | 1.11 | 1.13 | 1.15 | 1.18 | 1.21 | 1.23 | 1.25 |
| 93.3 | 0.90 | 0.93 | 0.95 | 0.97 | 1.00 | 1.03 | 1.05 | 1.07 | 1.10 | 1.13 | 1.15 | 1.17 |

## Anexo 5

### CATIONES Y ANIONES CONSTITUYENTES COMUNES EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

| <b>Cationes</b><br>Iones cargados positivamente |           | <b>Aniones</b><br>Iones cargados negativamente |             |
|---|-----------|--|-------------|
| Hidrógeno                                       | $H^+$     | $OH^-$   | Hidróxido   |
| Sodio   | $Na^+$    | $Cl^-$   | Cloruro     |
| Calcio  | $Ca^{2+}$ | $HCO_3^-$                                      | Bicarbonato |
| Magnesio  | $Mg^{2+}$ | $CO_3^{2-}$                                    | Carbonato   |
| Aluminio  | $Al^{3+}$ | $SO_4^{2-}$                                    | Sulfato     |
| Fe (Ferroso)                                    | $Fe^{2+}$ | $NO_3^-$                                       | Nitrato     |
| Fe (Férrico)                                    | $Fe^{3+}$ | $PO_4^{3-}$                                    | Fosfato     |

## COMPUESTOS COMUNES A PARTIR DE LA COMBINACIÓN DE IONES

Los cationes y aniones se combinan y pueden formar compuestos que son de gran importancia en el tratamiento de agua.

|                  |                    |
|------------------|--------------------|
| $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{SO}_4^{2-}$ |
|------------------|--------------------|

|              |                    |
|--------------|--------------------|
| $\text{H}^+$ | $\text{SO}_4^{2-}$ |
| $\text{H}^+$ |                    |

Los cationes de hidrógeno forman agua al combinarse con los aniones de Hidróxido.

|                  |                    |
|------------------|--------------------|
| $\text{Al}^{3+}$ | $\text{SO}_4^{2-}$ |
| $\text{Al}^{3+}$ | $\text{SO}_4^{2-}$ |
|                  | $\text{SO}_4^{2-}$ |

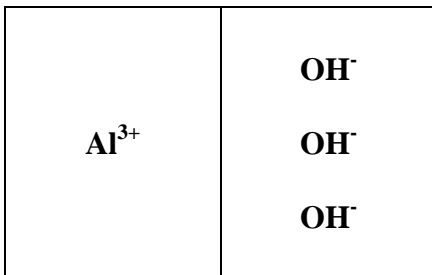
Al combinarse el Hidrógeno con el Sulfato forman ácido sulfúrico, el cual puede ser utilizado en tratamiento de agua para ajustar la alcalinidad.

|               |                    |
|---------------|--------------------|
| $\text{Na}^+$ | $\text{SO}_3^{2-}$ |
| $\text{Na}^+$ |                    |

Los iones de Aluminio y Sulfato combinados conforman el sulfato de aluminio, el cual puede utilizarse como coagulante en el tratamiento de agua, con la finalidad de remover los sólidos suspendidos.

Dos iones de Sodio combinados con Sulfito, forman el sulfito de sodio, éste remueve químicamente el oxígeno del agua.

Los iones ferrosos y el sulfato, forman el sulfato ferroso, que es un coagulante común del Hierro.



Los iones de aluminio e hidróxido, al combinarse forman un coágulo denso que es útil para los procesos de coagulación.



# Anexo 6

## CORROSION

La corrosión es un proceso natural que se sucede en forma espontánea, que lleva a un metal puro a su estado mineral, por interacción con el medio ambiente. Por esto una de las definiciones más claras de la corrosión está basada sobre la base de la formación sucesiva de los minerales, a partir de la reacción de sus respectivos metales con el medio ambiente en que se encuentren; lo que corresponde al proceso inverso de la metalurgia extractiva.

Los metales se encuentran en la naturaleza, en su mayoría, en forma de óxidos, sulfuros u otros compuestos minerales, y para poder utilizarlos, deben de ser sometidos a operaciones de beneficio, al final de las cuales se obtiene el metal puro. Para lograr esto, es necesario invertir altos niveles de energía, lo que significa que el metal, como tal, tenderá a un nivel energético menor, es decir, a la forma química estable que originalmente tenía en la naturaleza. Esto se lleva a cabo a través de un proceso conocido como *corrosión*.

Los profesionales de la ingeniería, la química y la física, tienen contacto frecuente con los medios ambientes más agresivos que se pueden manejar; por lo que se considera importante fomentar una colaboración multidisciplinaria, auxiliándose de otras áreas para seleccionar materiales y construir equipos que lleven a tener un proceso de trabajo industrial, seguro y confiable.

Por sus propiedades físicas y mecánicas excelentes, los metales son todavía, los materiales más utilizados para la construcción de plantas industriales, edificios de todo tipo, puentes, medios de transporte, maquinaria, entre otros.

Cuando una pieza o estructura metálica falla por corrosión, puede en el mejor de los casos, solo ocasionar grandes pérdidas económicas y materiales. Sin embargo, en algunas circunstancias, lo anterior puede provocar la pérdida de vidas humanas, lo que es irreparable.

Este curso, tiene como objetivo principal el poder ejemplificar de una manera sencilla los fenómenos de corrosión para que los estudiantes puedan conocer los principios básicos de la corrosión sin necesidad de ir al sitio donde dichos procesos se presentan.

## **1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE CORROSIÓN**

Para explicar el fenómeno de la corrosión, se puede decir que es aquel proceso de desintegración que se lleva a cabo en una pieza o superficie metálica como la del hierro o acero, formando el conocido óxido, orín o herrumbre, de color amarillo rojizo. A este proceso se le llama *oxidación*.

La corrosión es un fenómeno que se lleva a cabo en forma espontánea e irreversible, como resultado de un descenso de la energía libre de todo el sistema. Por lo tanto, la corrosión puede considerarse como el deterioro de cualquier material sólido, originado por la naturaleza de la interacción de ese material y el medio ambiente en que se encuentre.

La razón por la cual los metales puros o aleados, como es el caso del hierro en el acero se corroen, es que el metal tiende a volver a su estado original en la naturaleza.

La corrosión, es un proceso de deterioro continuo de los metales ferrosos y no ferrosos. Representa un serio problema que debe ser considerado con toda atención, amplitud y dedicación; debido a que sus resultados son la destrucción de equipo, alto

costo de mantenimiento y reposición, contaminación de productos, pérdida de propiedades mecánicas, condiciones inseguras al personal, apariencia indeseable en los equipos, etc.

La corrosión en el hierro y el acero, es importante debido a que estos materiales son los que se emplean más en la construcción de sistemas mecánicos, tanques, piezas estructurales, maquinaria y equipo, etc.

El fenómeno consiste esencialmente en las reacciones de óxido-reducción que se producen por la pérdida o ganancia de las propiedades físicas y químicas del metal, sumadas a las existentes en el medio ambiente y a las propiedades físicas y químicas del producto de las reacciones entre el metal y el medio que lo afecta. La corrosión de un metal implica su oxidación; por ejemplo, el hierro se desintegra o se convierte en polvo (óxido) amarillo-rojizo, su forma más estable debido a la acción del oxígeno del aire en forma directa y de la humedad existente en el medio ambiente. La oxidación puede producirse por dos caminos: *químico y electroquímico*.

# CORROSIÓN=ATAQUE QUÍMICO

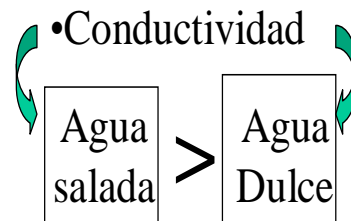
(Normalmente en medio humedo)

Aquí

Necesarios: **ANODO** + *CATODO* + *ELECTROLITO*

**Superficies metálicas**

- Deformación en el metal.
- Contacto de metales diferentes.
- Corrosión por efecto Evans (incrustaciones).



## Esquema del proceso de corrosión

Es *químico* cuando una sustancia cualquiera ataca y produce la desintegración del metal y *electroquímico* cuando en presencia de otro metal o de las imperfecciones del mismo, produce corrientes eléctricas internas y externas que favorecen la corrosión de ciertas áreas del mismo metal. Tales imperfecciones producen fuerzas localizadas y una de las más comunes, son las producidas por los procesos de laminación de los metales.

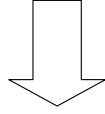
El proceso de la transformación del hierro metálico en un óxido es de carácter *electroquímico*. En este, intervienen varios factores como son: el metal, el oxígeno, la humedad o agua del ambiente y las sales en solución. La corrosión no se lleva a cabo en el metal si algunos de los factores anteriores están ausentes en el medio ambiente en donde esté situado el metal.

Para llevarse a cabo el proceso *electroquímico*, se necesita que haya un **ánodo**, un **cátodo** y un **electrolito** o solución acuosa. Los ánodos y cátodos existen en todas las piezas del metal, causados por las imperfecciones de la superficie, la orientación de las partículas, falta de homogeneidad del metal, la presencia de fuerzas localizadas como el caso producido por las escamas de laminación. Así, la corrosión se desarrolla entre el ánodo y el cátodo a través de un electrolito, en donde el oxígeno del aire se disuelve y se favorece por la contaminación que pudiera traer la humedad ambiental, se forma así un puente eléctrico o flujo de corriente entre el ánodo y el cátodo. El ánodo es la parte del metal que se desintegra o corroe formando el óxido, el cátodo es la parte del metal que no se daña y queda intacta.

En la figura 6.1 a, b, c y d, se esquematizan algunas de las formas más comunes de la corrosión.

### Corrosión Uniforme:

- Extensión Homogénea.
- Penetración parecida



Relación directa entre pérdida del material, reducción del espesor y gravedad del fenómeno



### Corrosión Ínter granular:

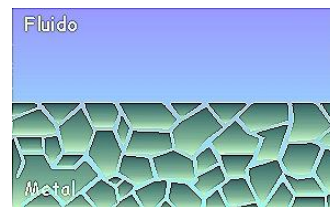
Situada en los límites de grano.



Perdida de coherencia entre granos.

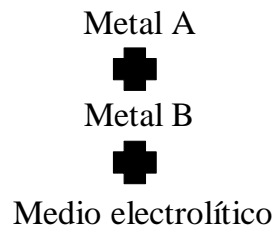


Reducción de características mecánicas



**Figura 6.1 a.- Corrosión uniforme y corrosión intreganular**

### Corrosión Galvánica:



### Corrosión en resquicio:

- En uniones, intersticiones, zonas de solape, zonas roscadas..
- En general zonas mal aireadas
- Renovación del medio corrosivo regida por difusión
- Formación de pilas de aireación diferencial.

Figura 6.1 b.- Corrosión galvánica y por hendiduras o resquicios

### Corrosión por picadura:

- Muy localizada 1 ó 2 mm
- Forma túneles hacia el interior.
- Avanza con rapidez.



### Corrosión erosión:

- Causado por fluidos.
- Desplazamiento por encima de un umbral de velocidad.
- Aumenta con la velocidad
- En el fondo es levantamiento por erosión de capas del metal.

**Figura 6.1 c.- Corrosión por picaduras y erosión**

**Corrosión por fatiga:**

**Tres condiciones:**

- Medio específico.
- Fuerza Periódica.
- Metal sensible.

**Ejemplos:**

- Latón con amoníaco.
- Aceros en presencia de cloruros.
- Acero en soluciones cáusticas.

**Corrosión biológica:**

- Por bacterias.

**Ejemplo: Bacterias anaerobias**

- Organismos sulfato-productores.
- Consumen Hidrógeno.



Perdida de polarización en superficie



Rompen la protección catódica

**Figura 6.1 d.- Corrosión por fatiga y microbiológica**

## **CORROSIÓN LOCALIZADA**

Es un ataque selectivo sobre un metal, que se manifiesta por corrosión en áreas pequeñas, especiales o zonas sobre la superficie del metal en contacto con el ambiente. El proceso ocurre usualmente bajo condiciones donde la gran parte de la superficie original no se afecta o bien, es atacada pero en grado mucho menor que en los sitios locales.

El tipo más común de corrosión localizada es por picaduras, el proceso origina que los volúmenes de metal afectado se eliminen por corrosión de áreas en la superficie para producir huecos. La corrosión por picaduras ocurre sobre la superficie del metal en un líquido estancado o en movimiento lento. Esto algunas veces está relacionado con

corrosión por hendiduras, corrosión por depósitos de otros metales o suciedad, cavitación y corrosión por fricción.

Otro tipo de daño, es la corrosión intergranular, a veces llamada corrosión intercrystalina; en esta forma, un pequeño volumen de metal se elimina por la trayectoria que siguen los límites de los granos, apareciendo fisuras o grietas. La misma clase de fisuras subsuperficiales puede ser causada por corrosión transgranular, a veces llamada corrosión transcristalina. En ésta, una pequeña cantidad de metal se elimina por trayectorias preferentes que siguen a través o por los granos. Esto ocurre solamente bajo ciertas condiciones y con ciertas aleaciones.

La corrosión intergranular y transgranular a veces se aceleran por fuerzas de tensión mecánica. En casos extremos, los rompimientos continúan enteramente a través del metal, causando ruptura o perforación. Esta condición se conoce como agrietamiento por corrosión bajo tensión.

Las grietas de la subsuperficie intergranular y transgranular también se pueden producir por la presencia de hidrógeno. La fragilización cáustica y la corrosión por fatiga, son otros dos mecanismos de deterioro del metal donde se forman fisuras por encima o bajo la superficie.

Las formas diversas de corrosión, se pueden dividir en tres grupos:

1. Las reconocibles a simple vista.
2. Las que son más fácilmente percibidas con ayuda específica de colorantes, partículas magnéticas o con microscopio óptico de bajo poder.
3. Las que pueden ser solamente identificadas por microscopio óptico o electrónico.

## **FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN**

La velocidad y extensión de la corrosión depende de las propiedades del metal y la naturaleza del medio ambiente. De este, las características que influyen principalmente en la corrosión son:

- 1) La humedad relativa, que es la cantidad de agua que está dispersa en el medio ambiente como vapor, humedad, rocío, etc.
- 2) El pH, es decir, la cantidad de acidez o alcalinidad que el medio ambiente presenta.
- 3) La concentración del oxígeno disuelto en el agua.
- 4) La conductividad, que en conjunto con las sales de contaminación, oxígeno disuelto y otros productos generan a través del agua ambiental.
- 5) Los iones ya sean aniones como cloruros, sulfatos, fosfatos, etc. o cationes como hierro, aluminio, cobre, etc., que estén presentes en el proceso electroquímico.
- 6) La temperatura del medio ambiente. A mayor temperatura mayor concentración de oxígeno y mayor conductividad del electrolito, aumentando así la velocidad de corrosión.
- 7) La velocidad de flujo, al aumentarla se provoca una mayor concentración de oxígeno y una mayor concentración de sólidos totales en contacto con el ánodo.

Los factores más importantes del metal que intervienen en la corrosión son:

- 1) Su potencial de oxidación, la diferencia de corriente eléctrica entre el ánodo y el cátodo.
- 2) La presencia de diferentes metales en relación con el hierro tales como aluminio, cobre, magnesio, etc.
- 3) La sobretensión, la velocidad de desplazamiento del hidrógeno que se produce en la reacción de oxidación.
- 4) La pureza del metal, algunos metales puros se pueden considerar casi no corroíbles; sin embargo, el uso de ellos demanda mejores propiedades, por lo que regularmente se utilizan en forma de aleación, lo que modifica su comportamiento frente a la corrosión.
- 5) El estado físico de un metal influye en la velocidad de corrosión; básicamente el tamaño de los granos y la orientación de los mismos en el metal.
- 6) Las áreas relativas entre el ánodo y el cátodo, es decir, la corrosión se hace presente cuando el área del ánodo es menor que la del cátodo.
- 7) La solubilidad de los productos de corrosión. Si los productos son insolubles en el agua, se formará una película protectora, disminuyendo así el efecto de la corrosión. De lo contrario, la velocidad de corrosión se verá afectada por el grado de la solubilidad.

# **Anexo 7**

## **ESPECIFICACIONES DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO**



**BALTIMORE AIRCOIL**  
 ONE OF THE  
**Amsted**  
 INDUSTRIES

# SUBMITTAL DATA FORM

|                                 |  |   |  |
|---------------------------------|--|---|--|
| C<br>S<br>T<br>O<br>M<br>E<br>R | SM INGENIERIA<br>P.O. BOX 2083<br>CALEXICO, CA 92231 | DATE<br>P.O. NO.<br>B.A.C. NO.<br>MODEL NO. | 6/23/98<br>SIGNED PROPOSAL<br>E97226021<br>15270-2WX |
|---------------------------------|--|---|--|

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| PROJECT:<br>ENGINEER:<br>B.A.C. REP: | SM INGENIERA<br><br>S A MEIER COMPANY, INC - ESCONDIDO, CA |
|--------------------------------------|--|

SERIES 1500 COOLING TOWER

ALL INFORMATION IS PER UNIT

CERTIFIED CAPACITY: 1200 USGPM OF WATER FROM 95 F TO 85 F AT 81 F ENTERING WET BULB

FAN MOTOR(S): (2) 20 HP & (2) 5 HP, 1800 RPM, 3 PHASE, 60 HERTZ, 230/460 VOLTS, STANDARD TEAO ENCLOSURE.

NOTE: Two speed fan motors and/or Energy Miser Fan Systems require a starter that incorporates a 15 second time delay when switching from high to low speed.

6 COPIES OF SUBMITTAL DATA FOR APPROVAL

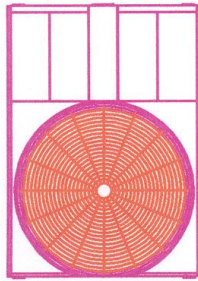
| FEATURE                          | FEATURE                  |
|----------------------------------|--------------------------|
| UNIT DIMENSIONS & SUPPORT DATA   | BAC-16531A<br>BAC-16543A |
| MECHANICAL SPECIFICATIONS        |                          |
| STAINLESS STEEL COLD WATER BASIN |                          |
| ENERGY MISER® FAN SYSTEM         | BAC-7092A                |
| RECOMMENDED CONDUIT INSTALLATION | BAC-16525A               |

THANK YOU FOR YOUR ORDER ACCEPTED AT THE B.A.C. MADERA, CA PLANT ON: JUNE 18, 1998.

FURTHER PROCESSING OF THIS ORDER IS CONTINGENT UPON RECEIPT OF APPROVED SUBMITTALS. SHIPMENT WILL BE APPROXIMATELY 6-7 WEEKS FROM RECEIPT OF A FIRM RELEASE.

P.O. BOX 7322, BALTIMORE, MARYLAND 21227 / TELE: (410) 799-6200 / FAX: 410-799-6416  
 P.O. BOX 960, MADERA, CALIFORNIA 93639 / TELE: (209) 673-9231 / FAX: 209-673-5095  
 P.O. BOX 317, PAXTON, ILLINOIS 60957 / TELE: (217) 379-2311 / FAX: 217-379-3522  
 P.O. BOX 402, MILFORD, DELAWARE 19963 / TELE: (302) 422-3061 / FAX: 1-800-695-4329

[C062398]

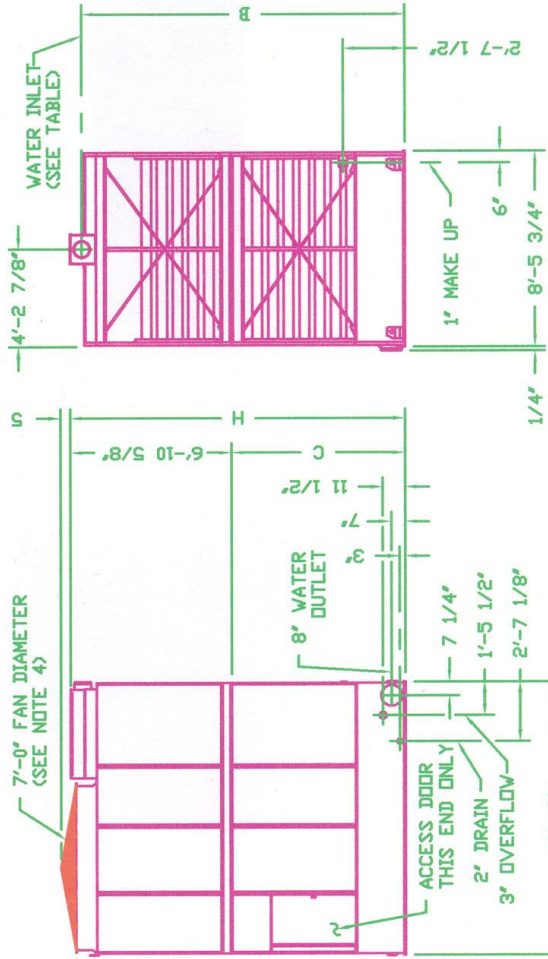


PLAN VIEW

| MODEL NUMBER | SHIPPING WEIGHT | FLOW RATE (USGPM) |              | OPER. WEIGHT @ |         | HEAVIEST SECTION# | B          | C         | H          |
|--------------|-----------------|-------------------|--------------|----------------|---------|-------------------|------------|-----------|------------|
|              |                 | NOMINAL FLOW      | MAXIMUM FLOW | NOMINAL        | MAXIMUM |                   |            |           |            |
| 15200        | 5350            | 600               | 958          | 9840           | 11430   | (U) 2770          | 13'-9 1/4" | 7'-4 3/4" | 14'-3 3/8" |
| 15227        | 5410            | 681               | 1083         | 10100          | 11490   | (U) 2780          | 13'-9 1/4" | 7'-4 3/4" | 14'-3 3/8" |
| 15250        | 5430            | 750               | 1190         | 10280          | 11510   | (U) 2800          | 13'-9 1/4" | 7'-4 3/4" | 14'-3 3/8" |
| 15214        | 5640            | 642               | 1032         | 10440          | 12450   | (L) 2920          | 15'-1 1/4" | 8'-8 3/4" | 15'-7 3/8" |
| 15245        | 5700            | 735               | 1177         | 10730          | 12510   | (L) 2920          | 15'-1 1/4" | 8'-8 3/4" | 15'-7 3/8" |
| 15270        | 5720            | 810               | 1293         | 10940          | 12530   | (L) 2920          | 15'-1 1/4" | 8'-8 3/4" | 15'-7 3/8" |
| 15282        | 5800            | 846               | 1349         | 11120          | 12610   | (L) 2920          | 15'-1 1/4" | 8'-8 3/4" | 15'-7 3/8" |

#U = UPPER SECTION  
L = LOWER SECTION

| WATER INLET SIZING |                  |
|--------------------|------------------|
| FLOW RANGE         | WATER INLET SIZE |
| 350-850            | 6"               |
| 851-1350           | 8"               |



- NOTES:
1. CONNECTIONS 3' & SMALLER ARE MPT, CONNECTIONS 4' & LARGER ARE GROOVED TO SUIT A MECHANICAL COUPLING AND BEVELED FOR WELDING.
  2. ALL DIMENSIONS ARE IN FEET AND INCHES. WEIGHTS ARE IN POUNDS.
  3. FOR WEIGHT LOADING AND SUPPORT REQUIREMENTS REFER TO THE SUGGESTED STEEL SUPPORT DRAWING.
  4. THE AREA ABOVE THE DISCHARGE OF THE FAN MUST BE UNOBSTRUCTED.
  5. FOR ACTUAL OPERATING WEIGHT INTERPOLATE BETWEEN FLOW RATES GIVEN.

END ELEVATION

SIDE ELEVATION

B.A.C. ORDER NO: / / DATE: / /



BALTIMORE AIRCOIL COMPANY

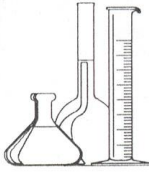
SERIES 1500 COOLING TOWER

DRAWING NUMBER: BAC-16501A

[ RH UNIT ]

# **Anexo 8**

**ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DEL AGUA**



# LABORATORIO "SINALOA"

ANÁLISIS QUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS DE AGUAS, SUELOS Y ALIMENTOS

Mexicali Baja California, Abril 11 de 2003

IAASE, S.A. DE C.V.  
AT'N ING. HECTOR MUÑIZ VALDEZ  
P R E S E N T E .-

Análisis Físico-Químico en tres muestras de agua recibidas en este Laboratorio el día 05, para la determinación de los Parámetros comunes para aguas industriales y de servicio, las cuales se identificaron de la siguiente manera: MUESTRA UNO (AGUA DE LA RED MUNICIPAL), MUESTRA DOS (AGUA DE LA PURGA) y MUESTRA TRES (AGUA DE LA TORRE). Una vez analizadas estos son sus resultados:

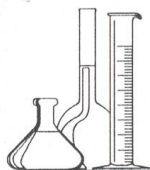
## MUESTRA UNO (AGUA DE LA RED MUNICIPAL)

### ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE AGUA

| PARÁMETROS:              | RESULTADOS:          |
|--------------------------|----------------------|
| COLOR:                   | 0 U. ESC. PLA/COB.   |
| TURBIEDAD:               | 0 U. Turbidimétricas |
| PH:                      | 7.45 U.              |
| CONDUCTIVIDAD ELECTRICA: | 1,376 mcmhos/cm.     |
| SOLIDOS DISUELTOS:       | 954 mg/l.            |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS:     | 0.0 mg/l.            |
| SOLIDOS TOTALES:         | 954 mg/l.            |
| ALCALINIDAD:             | 160 mg/l.            |
| CALCIO:                  | 104 mg/l.            |
| CLORO LIBRE RESIDUAL:    | 0.3 mg/l.            |
| CLORUROS:                | 210 mg/l.            |
| DUREZA DE CALCIO:        | 260 mg/l.            |
| DUREZA DE MAGNESIO:      | 80 mg/l.             |
| DUREZA TOTAL:            | 340 mg/l.            |
| MAGNESIO:                | 19.2 mg/l.           |
| SILICE:                  | 8.3 mg/l.            |
| SULFATOS:                | 270 mg/l.            |

ATENTAMENTE  
Q.F.B. Raul Torres Arroyo  
No. de Reg. DGE-LAMB-004/98

1-2



# LABORATORIO "SINALOA"

ANÁLISIS QUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS DE AGUAS, SUELOS Y ALIMENTOS

Mexicali Baja California, Abril 11 de 2003

## MUESTRA DOS (AGUA DE LA PURGA)

### ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE AGUA

| PARÁMETROS:              | RESULTADOS:          |
|--------------------------|----------------------|
| COLOR:                   | 0 U. ESC. PLA/COB.   |
| TURBIEDAD:               | 1 U. Turbidimétricas |
| PH:                      | 7.95 U.              |
| CONDUCTIVIDAD ELECTRICA: | 1,690 mcmhos/cm.     |
| SOLIDOS DISUELTOS:       | 1,152 mg/l.          |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS:     | 0.8 mg/l.            |
| SOLIDOS TOTALES:         | 1,152.8 mg/l.        |
| ALCALINIDAD:             | 148 mg/l.            |
| CALCIO:                  | 105.6 mg/l.          |
| CLORO LIBRE RESIDUAL:    | < 0.1 mg/l.          |
| CLORUROS:                | 227 mg/l.            |
| DUREZA DE CALCIO:        | 264 mg/l.            |
| DUREZA DE MAGNESIO:      | 108 mg/l.            |
| DUREZA TOTAL:            | 372 mg/l.            |
| MAGNESIO:                | 25.9 mg/l.           |
| SILICE:                  | 12.1 mg/l.           |
| SULFATOS:                | 390 mg/l.            |

## MUESTRA UNO (AGUA DE LA TORRE)

### ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE AGUA

| PARÁMETROS:              | RESULTADOS:          |
|--------------------------|----------------------|
| COLOR:                   | 0 U. ESC. PLA/COB.   |
| TURBIEDAD:               | 0 U. Turbidimétricas |
| PH:                      | 7.50 U.              |
| CONDUCTIVIDAD ELECTRICA: | 1,727 mcmhos/cm.     |
| SOLIDOS DISUELTOS:       | 1,162 mg/l.          |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS:     | 0.0 mg/l.            |
| SOLIDOS TOTALES:         | 1,162 mg/l.          |
| ALCALINIDAD:             | 144 mg/l.            |
| CALCIO:                  | 113.6 mg/l.          |
| CLORO LIBRE RESIDUAL:    | < 0.1 mg/l.          |
| CLORUROS:                | 251 mg/l.            |
| DUREZA DE CALCIO:        | 284 mg/l.            |
| DUREZA DE MAGNESIO:      | 172 mg/l.            |
| DUREZA TOTAL:            | 456 mg/l.            |
| MAGNESIO:                | 41.3 mg/l.           |
| SILICE:                  | 12.8 mg/l.           |
| SULFATOS:                | 400 mg/l.            |

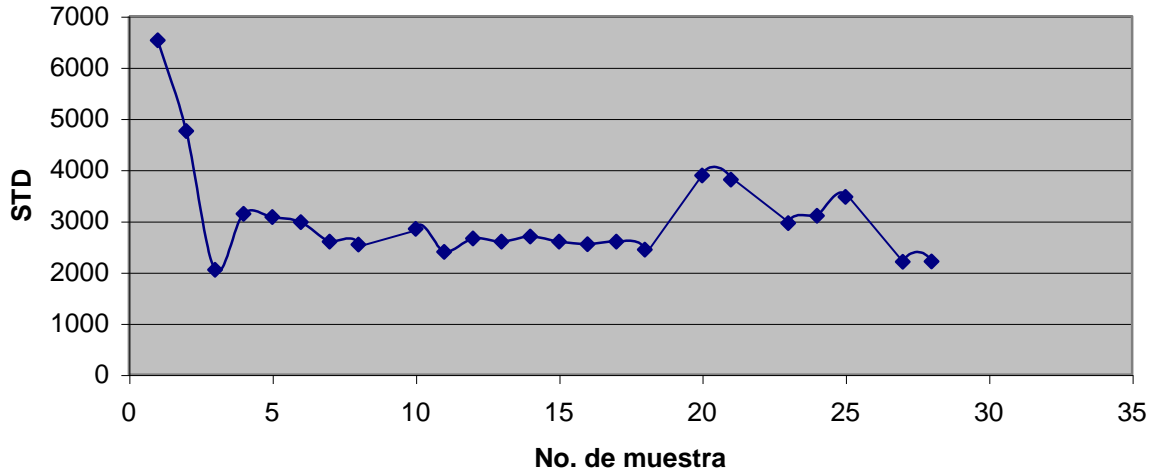
  
ATENTAMENTE  
Q.F.B. Raul Torres Arroyo  
No. de Reg. DGE-LAMB-004/98

2-2

# **Anexo 9**

**RESULTADOS OBTENIDOS DE CONCENTRACIÓN  
DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS**

### Torre 1 7:00 hrs.



### Torre 1 10:00 hrs

