

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**SELECCIÓN DE UNA TECNOLOGÍA PARA LA  
AUTOMATIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL**

Presentado por:

**ANA KARINA VILLAFANA MALAVE**

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como  
requisito parcial para optar al título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Barcelona, junio de 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**SELECCIÓN DE UNA TECNOLOGÍA PARA LA  
AUTOMATIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL**

**ASESORES**

---

Ing. Quím. Yraima Salas, M. Sc  
Asesor Académico

---

Ing. Quím. Eliezer Robles, M. Sc  
Asesor Industrial

Barcelona, junio de 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**SELECCIÓN DE UNA TECNOLOGÍA PARA LA  
AUTOMATIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL**

**JURADOS**

---

Ing. Quím. Yraima Salas, M. Sc  
Asesor Académico

---

Ing. Quím. Alexis Cova, M. Sc  
Jurado principal

---

Ing. Quím. Héctor Silva, M. Sc  
Jurado principal

Barcelona, junio de 2010

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, el cual participará al consejo universitario”



## DEDICATORIA

A mi abuelito Pedro Villafaña, porque siempre deseé poder compartir esta meta contigo y aunque no estás presente este logro también es para ti. Viejito por ser tu muchachita bonita.

A mi mami Oneida Malave de Villafaña, porque eres mi base, por siempre apoyarme, por regalarme la vida, por quererme tanto y simplemente por hacerme sentir que eres la mejor madre de este mundo.

A mi papá Jesús Omar Villafaña, por tu cariño, por estar siempre presente en mi vida, por todo lo que he aprendido de ti, lo que me hace ser quien soy hoy en día.

A mis hermanos: Adriana porque a pesar de todas las diferencias siempre estas allí y sé que te sientes orgullosa de tener una hermana como yo y porque quiero que sigas mi ejemplo, este proyecto también es para ti. Jesús Felipe, porque siempre serás mi hermanito, por todo tu cariño, por ser como eres, por siempre hacerme reír. A ustedes dos porque son súper importantes en mi vida y porque deseo que logren todo lo que quieran.

A mi sobrina Arianna Villafaña, mi chiquitica, mi niña hermosa, porque eres una de las cosas más lindas que me ha pasado en la vida, por iluminar nuestras vidas. Porque en el futuro cuando tengas conciencia de todo, te des cuenta que tu tiita siempre te adorará.

A mi tía Loraine Villafaña, por creer en mí, por ofrecerme tu apoyo y porque ha futuro todo este esfuerzo habrá valido la pena. A mi tío Didier Villafaña, por formar

parte de mi vida y también por siempre estar presente. A mi tía Lucia Villafaña, por ser tan linda y tía por todo el cariño que me has ofrecido.

A mi abuela María Sucre, y a sus hijos Claudia, Jorge, Ma. Elena y Siria. Porque en este momento también forman parte de mis logros importantes. A mi prima Ma. José y a sus hijos Ceci y José Rafael por el apoyo y las sonrisas constantes. Los quiero mucho.

A quien considero mi segunda madre Odalis Sucre, por siempre cuidar de mí, por todo el cariño que desde que nací he recibido de ti. A mi prima Angela Guzmán, porque eres simplemente mi hermana, por los inagotables momentos agradables que hemos vivido y por los que vendrán. Gerardo Guzmán, primo por siempre ayudarme, por todo el cariño y por contar siempre contigo. También a Emmery y Daniel Guzmán, por ser parte de mi familia desde muy pequeños, porque son mis hermanos también.

A Yanny Rodríguez, por todo el apoyo y el cariño. A toda mi familia, porque somos muchos y no puedo nombrarlos a todos en estas cortas líneas. Esto es para todos ustedes.

Los quiero mucho

Ana Karina Villafaña Malave

## AGRADECIMIENTOS

Para poder lograr las metas que nos planteamos, siempre se requiere perseverancia, constancia, voluntad y disciplina, pero no sólo eso hace que una persona logre lo que se propone, también se necesita de personas que te apoyen como familiares y amigos. En un proyecto como este también se involucran profesores y compañeros de trabajo con los cuales compartes el día a día. Incluso a veces es necesario creer en la ayuda divina. Sin todos estos factores una meta como esta no se lograría o simplemente no sería la misma, todo ello es necesario para convertirse en una persona y profesional de calidad.

A DIOS, por no abandonarme y por sentir siempre su presencia tanto en los momentos buenos como en los difíciles. Por sentir siempre tu bendición Diosito.

A ti mamita por nunca dejarme desfallecer, por siempre creer en mí y por apoyarme en los momentos críticos durante estos años y también por disfrutar las victorias en las pequeñas batallas en las cuales se convirtieron algunas materias, hoy estamos cerca de lograr la victoria que marcará el principio de muchas. Papá por tu apoyo, tu presencia y por ser tal cual cómo eres, porque me identifico mucho contigo. Los amos son la fuente de mi vida.

A ti tía Loraine, porque simplemente sin ti, no lograría esta meta, siempre tendré presente toda la ayuda, los consejos y en la medida de lo posible trataré de recompensar todo lo que has hecho por mí. A mis demás familiares, porque siempre los necesitare conmigo como hasta el momento. Los adoro y no sería la persona que soy sin tener a la familia que tengo.

A la Universidad de Oriente y profesores, Núcleo Anzoátegui, por ser la cuna de nuevos conocimientos, porque gracias a esta casa de estudio ahora soy Ingeniero Químico.

A las amigas que no se han alejado de mí, a las que me soportan a pesar de las diferencias. A ti negris Anyelis González, eres toda una locura, una persona increíble, de unos sentimientos maravillosos. Mi Bar, Bárbara Freites, por considerarme tu amiga, por esa personalidad arrolladora que te caracteriza con la cual irradas a todos los que te rodeamos. A Luz Martínez, porque a pesar de la distancia formas parte de este círculo de amigas que la vida me regalo. Las quiero mucho, siempre será y ha sido así.

A Laurimar Luvo (Lalita), que bueno que la vida y la universidad me regalo una amiga como tú, eres una persona genial con la cual no fue difícil convivir durante todos estos años, te convertiste en parte de mi familia. A tus padres y hermanas por hacerme sentir en familia, por ayudarme y apoyarme. Gracias Sr. José, Sra. Gilda, Laura y Mariana.

A los amig@s que encontré durante estos años y que perdurarán en mi vida. Isabella Mallón, men estos años no serían los mismos sin tus ocurrencias y obviamente sin tu cariño, defines perfectamente lo que engloba la palabra amistad. Ariana Salazar, artista por ser incondicional, por los excelentes momentos, por ser una persona que define equilibrio y calma, de la cual es grato aprender. Carlos David Galantón, puros conocimientos, excelente contar con una persona que siempre entendía todo y al que además puedo llamar amigo. Felaurys Vásquez, Felita, mi Merce, tu personalidad envuelve tantas cualidades maravillosas, eres una persona súper noble, inteligente, ocurrente, sabes que te quiero más que un poquito. Scarlet Guerra, porque compartir contigo siempre es algo nuevo, por lo buena gente y amiga que eres. Mis compañeros incondicionales semestre a semestre muchas gracias por

todo lo que he aprendido de cada uno de ustedes, son el complemento perfecto del grupo que formamos. Los adoro a todos.

Dariana Gómez, amiga eres una loquita muy querida, gracias por tu amistad. Diego Páez, gracias por brindarme tu amistad y por ser incondicional. A José Luis Barrios y Carlos Marín, por todos los buenos momentos que vivimos en la universidad y fuera de ella, por ser excelentes compañeros. Los quiero mucho.

A la ingeniero Yraima Salas, por guiar este proyecto, por aportar conocimientos y por apoyar esta causa.

A mi primo Pedro Sucre, porque gracias a ti primo pude comenzar este proyecto. Gracias por esa ayuda incondicional y desinteresada.

Este proyecto no sería el mismo sin la experiencia y conocimientos del ingeniero Eliezer Robles, por ser sencillamente una fuente de conocimientos que parecen no agotarse. Gracias por haber podido adquirir un porcentaje de toda esa sabiduría y por ser un excelente profesional y compañero de trabajo.

A mis compañeras del día a día durante mi pasantía Eliana Velásquez y Etny Malave. Por ayudarme siempre, por aprender de sus conocimientos y porque me ofrecieron su amistad.

Al ingeniero Jorvic Vital, por su ayuda y principalmente por adquirir múltiples conocimientos que fundamentan este proyecto. Mil gracias a ti.

A Manuel Mejías, por la ayuda desinteresada y por soportar tantas preguntas. Gracias por transferirme parte de tu conocimiento.

A los profesionales que forman parte de METOR y que de una manera u otra se involucraron en este proyecto, Matilde Luna, Gisela De López, Wilmer Calderón, Héctor Rodríguez, Franco Groves, José Herrera y Ernesto Silva. Gracias también a mis compañeros de transporte: Benito Piñero, Frank Muñoz, Antonio Guarache y Omar Pérez .Gracias a todos por su ayuda.

## **RESUMEN**

El objetivo de estudio del presente proyecto abarcó la selección de una tecnología para la automatización de los sistemas de tratamiento químico de agua, para generación de vapor (BFW) y agua de enfriamiento (CW) de una planta de producción de metanol. Para ello, se realizó un estudio de las tecnologías disponibles en el mercado para la automatización de este tipo de sistemas, estudiándose tres opciones. Cuyo estudio comprendió la identificación de las variables claves en los sistemas estudiados. Posteriormente se realizó la selección de la tecnología basándose en las ventajas y desventajas que presentan las mismas. Arrojando que tanto para el sistema de generación de vapor como para el sistema de enfriamiento la mejor opción es la propuesta que plantea la opción dos, para BFW la tecnología se basa en la medición de las condiciones oxidantes y reductoras del agua de alimentación de calderas a las condiciones reales del proceso (AT-ORP) y para CW se basa en la medición de los parámetros claves del tratamiento a través de fluorescencia. Finalmente se plantearon los cambios que se requiere realizar tanto a BFW como a CW para que el tratamiento químico sea dosificado de forma automatizada, resaltándose que para el sistema BFW son requeridos tres equipos controladores para la automatización completa del sistemas incluyendo el tratamiento interno de las calderas de media presión, sin embargo para el sistema CW es necesario el uso de un sólo equipo controlador.

# ÍNDICE

RESOLUCIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vii
RESUMEN.....	xi
ÍNDICE .....	xii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
CAPÍTULO I.....	17
EL PROBLEMA .....	17
1.1. Breve Reseña de la Empresa.....	17
1.2. Planteamiento del Problema .....	18
1.3. Objetivos.....	20
1.3.1. Objetivo General .....	20
1.3.2. Objetivos Específicos.....	20
CAPÍTULO II .....	22
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	22
2.1. Antecedentes .....	22
2.2. Características del Agua Utilizada en la Sección 600 de METOR S.A.....	23
2.2.1. Origen del Agua .....	23
2.2.2. Calidad del Agua Industrial Empleada por METOR S.A.....	25
2.3. Calderas.....	27
2.3.1. Necesidad de Tratamiento de Aguas para Calderas.....	28
2.3.2. Problemas Relacionados con el Agua Para Calderas.....	30
2.3.3. Tratamiento Interno de Agua para Calderas .....	35
2.3.4. Descripción del Proceso de Generación de Vapor en METOR, S.A.....	38



2.4. Sistemas de Enfriamiento por Agua.....	40
2.4.1. Torres de Enfriamiento .....	40
2.4.2. Problemas Relacionados con el Agua de Enfriamiento .....	41
2.4.3. Descripción del Sistema de Enfriamiento de METOR S.A. ....	61
2.5 Fundamentos de Control Automático de Diferentes Tecnologías Disponibles en el Mercado para la Automatización de los Sistemas BFW y CW.....	63
2.5.1. Equipo Controlador que Opera en Calderas de Diferentes Niveles de Presión y en Torres de Enfriamiento.....	63
2.5.2. Equipo Controlador que Basa su Operación en la Medición de las Condiciones Reductoras y Oxidantes del Agua de Alimentación a Temperatura y Presión Real del Sistema (AT-ORP) Calderas de Alta y Media Presión.....	65
2.5.3. Equipo Controlador que Basa su Operación en la Medición por Fluorescencia en Sistemas de Enfriamiento.....	66
2.6. Fundamentos de Control Predictivo.....	67
2.6.1. Estrategia de los Controladores.....	68
2.6.2. Ventajas y Desventajas del Control Predictivo.....	70
2.6.3. Elementos del Control Predictivo .....	71
CAPÍTULO III.....	73
DESARROLLO DEL PROYECTO .....	73
3.1. Identificación de las Variables Claves para el Control y Regulación de los Procesos de Estudio .....	73
3.2 Evaluación Técnica de las Tecnologías Usadas en el Tratamiento Químico del Agua que Soporte la Selección de la Mejor Opción .....	77
3.2.1. Identificación de Tecnologías Disponibles en el Mercado para la Automatización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas. ....	77
3.2.2. Selección Preliminar de Tecnologías .....	77
3.2.3. Ventajas y Desventajas de las Opciones Preseleccionadas.....	78
3.2.4. Evaluación Técnica.....	84
3.2.5. Ponderación y Calificación de la Matriz de Evaluación.....	90

3.3. Propuestas de las Modificaciones Adecuadas para Mejoras del Sistema de Tratamiento Actual, Empleando un Sistema Automatizado .....	92
CAPÍTULO IV .....	94
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	94
4.1. Discusión de Resultados .....	94
4.1.1. Identificación de las Variables Claves para el Control y Regulación del Sistema BFW .....	94
4.1.2. Identificación de las Variables Claves en el Control y Regulación del Tratamiento Químico de CW .....	97
4.1.3. Evaluación Técnica de las Tecnologías Usadas en el Tratamiento Químico del Agua que Soporte la Selección de la Mejor Opción .....	100
4.1.4 Propuesta de las Modificaciones Adecuadas para Mejoras del Sistema de Tratamiento Actual, Empleando un Sistema Automatizado .....	107
4.2. Conclusiones .....	114
4.3. Recomendaciones.....	115
BIBLIOGRAFÍA .....	116
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO .....	119

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características fisicoquímicas del agua proveniente de PEQUIVEN <sup>5</sup> .....	26
Tabla 2. Características del agua para calderas <sup>6</sup> y <sup>7</sup> .....	26
Tabla 3. Calidad del agua de recirculación del sistema de enfriamiento (CW) <sup>5</sup> .....	27
Tabla 4. Tipo, función y nombres químicos típicos del tratamiento químico de calderas <sup>8</sup> .....	37
Tabla 5. Problemas que ocurren en sistemas de agua de enfriamiento y sus causas <sup>8</sup> .	42
Tabla 6. Matriz de evaluación general. ....	92
Tabla 7. Matriz de evaluación para el sistema BFW .....	101
Tabla 8. Matriz de evaluación para el sistema CW.....	102
Tabla 9. Lista de materiales y equipos que se requieren para la automatización de BFW. ....	110
Tabla 10. Lista de materiales y equipos que se requieren para la automatización de CW. ....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de las instalaciones de METOR, S.A.....	17
Figura 2. Procedencia del agua industrial. ....	24
Figura 3. Fuente de agua industrial para METOR S.A. ....	25
Figura 4. Modelo de caldera acuotubular.....	28
Figura 5. Corrosión en sistemas de tuberías. ....	32
Figura 6. Diagrama del sistema de generación de vapor de METOR S.A. <sup>6</sup> .....	39
Figura 7. Intercambiador de calor que presenta problemas de depósitos. ....	49
Figura 8. Diagrama del sistema de enfriamiento de METOR S.A.....	62
Figura 9. Estrategia del control predictivo.....	68
Figura 10. Estructura básica del MPC.....	70
Figura 11. Esquema general del proceso de tratamiento de BFW .....	75
Figura 12. Esquema general del proceso de tratamiento de CW. ....	76
Figura 13. Lazos de control abiertos y cerrados presentes en el sistema CW .....	76
Figura 14. Diagrama del sistema de tratamiento automatizado para BFW.....	108
Figura 15. Diagrama del sistema automatizado para CW.....	112

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1. Breve Reseña de la Empresa

Metanol de Oriente (METOR, S.A.), es una empresa dedicada a la producción y comercialización del producto químico metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) utilizado ampliamente en la industria química y petroquímica.

La planta METOR, S.A., se encuentra ubicada en el “Complejo Petroquímico e Industrial General de División José Antonio Anzoátegui” (Jose), entre las poblaciones de Puerto Píritu y Barcelona, en la costa norte del estado Anzoátegui. La figura 1.1 muestra la localización geográfica de METOR, S.A.



**Figura 1.** Localización geográfica de las instalaciones de METOR, S.A.

METOR, S.A., es una empresa de capital mixto conformado por: PEQUIVEN con 37,50%, *Mitsubishi Corporation* y *Mitsubishi Gas Chemical* con un 23,75% cada una, *International Petrochemical Holding* con 10% e *International Finance Corporation* con 5%.

La planta tiene capacidad instalada para producir 750 toneladas métricas anuales (TMA) de metanol que cumple con las especificaciones federales de grado AA (superior a 99,85%).

En los objetivos principales de la empresa METOR, S.A., se destacan los siguientes:

- Procesar gas natural para la obtención de metanol.
- Proporcionar un empuje a la industria petroquímica venezolana al momento de participar en los mercados internacionales.

## **1.2. Planteamiento del Problema**

El proceso para la obtención de metanol de METOR S.A., fue desarrollado por *Mitsubishi Gas Chemical Company* (Japón). Utiliza gas natural y vapor de agua como materias primas, y se lleva a cabo a través de una secuencia de unidades de procesos interrelacionadas, que van desde la recepción e hidrodesulfuración del gas natural, pasando por las secciones de reformación, compresión, síntesis, hasta destilación, donde se obtiene el producto metanol. Además se tienen unidades de servicios industriales, tratamientos de efluentes y almacenamiento y despacho de producto.

La sección de servicios industriales (Sección 600), se compone principalmente de las unidades de agua desmineralizada (DMW, por sus siglas en inglés

*demineralized water*), agua de enfriamiento (CW, por sus siglas en inglés *cooling water*) y agua de alimentación a calderas (BFW, por sus siglas en inglés *boiler feed water*), las cuales reciben como alimentación el agua industrial cruda suministrada por PEQUIVEN.

En las unidades de tratamiento de CW y BFW, se dosifican una serie de productos químicos con el objetivo de proteger los sistemas de tuberías y equipos en los que estos fluidos actúan. Estos productos incluyen inhibidores de corrosión y de depósitos, biocida, biodispersantes, secuestrantes de oxígeno y estabilizadores.

La dosificación se realiza a través de bombas dosificadoras de ajuste manual. Esto acarrea una serie de inconvenientes, ya que las dosis deben ajustarse dependiendo de las características del agua de reposición de cada sistema y de la carga del proceso, así como de otros factores externos, entre ellos los ambientales. Sin embargo, al tratarse de una operación manual, conlleva a la sobredosificación o sub-dosificación de los químicos, haciendo difícil el control óptimo de los procesos y repercutiendo en los costos operacionales de la planta.

Por tal motivo, en este proyecto se evaluaron las opciones presentes en el mercado, para realizar el tratamiento químico de forma automatizada, cuya evaluación implicó el estudio de todos los aspectos de procesos, operacionales y de mantenimiento para la aplicación de las tecnologías a estudiar en los sistemas de CW y BFW en METOR.

Para realizar la evaluación de la propuesta de automatización de los tratamientos químicos, se evaluaron los sistemas y sus componentes, específicamente de las unidades de CW y de BFW, y se revisaron los procedimientos operacionales para comprender las variables de control y los métodos de regulación de éstas. Por su parte se realizó la búsqueda y recolección de información relacionada con el proyecto

a través de visitas a la planta, entrevistas a operadores e ingenieros involucrados con el proceso y uso de la aplicación computacional de manejo de información de planta.

Se realizó una selección de tecnología, con el fin de escoger la que se adaptará mejor a la planta y ofrezca mayores ventajas técnicas que garanticen un riguroso control automático de las variables claves de los procesos de tratamiento, manteniéndolas dentro de sus respectivos rangos de control.

El empleo de un sistema automatizado implica la reducción del riesgo de fallas o daños prematuros en equipos de las unidades que usan CW y BFW, al mejorar el control de los parámetros claves de los procesos, a la vez que permite optimizar el consumo de productos químicos de tratamiento para cada condición, entre otros beneficios, incluso el ahorro en el consumo total de agua industrial.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Seleccionar una tecnología para la automatización del sistema de tratamiento químico del agua, en la torre de enfriamiento y calderas de media presión en la planta Metanol de Oriente S.A.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Identificar las variables claves para el control y regulación de los procesos de estudio.
2. Realizar una evaluación técnica de las tecnologías usadas en el tratamiento químico del agua que soporte la selección de la mejor opción.



3. Proponer las modificaciones adecuadas para mejoras del sistema de tratamiento actual, empleando un sistema automatizado.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1. Antecedentes

**Cova** (1999) recomendó dos propuestas descritas por las empresas proveedoras, BetzDearborn y Nalco, las cuales establecen aplicaciones de un sistema de control y automatización de la dosificación del producto coagulante en la empresa Polar de Oriente en la ciudad de Barcelona, estado Anzoátegui. El sistema propuesto por BetzDearborn se basó en un ajuste de la dosificación del coagulante basado en los cambios de las características del agua cruda presentadas. Mediante este sistema de control de forma automática, la concentración del coagulante está determinada en partes por millón (ppm) y es controlado de manera precisa. Esto es ejecutado a través de una combinación de circuitos de control por retroalimentación que se encuentran conectados en red a un cerebro electrónico. El sistema propuesto por Nalco fue similar al descrito anteriormente, pero un poco más simplificado.<sup>1</sup>

**Noriega** (2000) evaluó la dosificación y el sistema de purgas automáticas de las calderas, debido a las continuas desviaciones de conductividad presentes en la misma. Así como también inicio la operación de un sistema de recirculación de agua para el sistema de enfriamiento donde logro la homogeneización de las aguas de cada uno de los condensadores evaporativos pero a pesar de esto, hoy en día se requiere del control automático de la purga de dichos equipos para evitar que los parámetros fisicoquímicos se salgan de los niveles establecidos. En cuanto al sistema de generación de vapor en la actualidad existe la necesidad de evaluar nuevamente dicho sistema, debido a que ha experimentado cambios tanto en los productos utilizados como en el sistema de purga continua. Además se requiere que los operadores de sala

de maquinas encargados de la manipulación del sistema adquieran el conocimiento sobre el manejo adecuado del mismo, debido a que las mayores fallas se deben a la parte humana.<sup>2</sup>

**Toews** (2009) planteo un sistema del tratamiento de agua para calderas automatizado basado en un controlador lógico programable monitoreado por una computadora capaz de dosificar productos químicos con el menor error posible y generar todos los datos necesarios para este tipo d tratamientos. Implementando este sistema, la planta de tratamiento de agua utilizará los recursos de una manera más eficiente, optimizando la calidad del agua tratada con el fin de bajar el costo operativo de la caldera.<sup>3</sup>

En este proyecto se procedió a evaluar las diferentes tecnologías para la dosificación de químicos en agua para calderas de diferentes niveles de presión y también en el sistema de enfriamiento. Debido a esto, los estudios anteriormente citados fueron tomados como referencia para el desarrollo del proyecto.

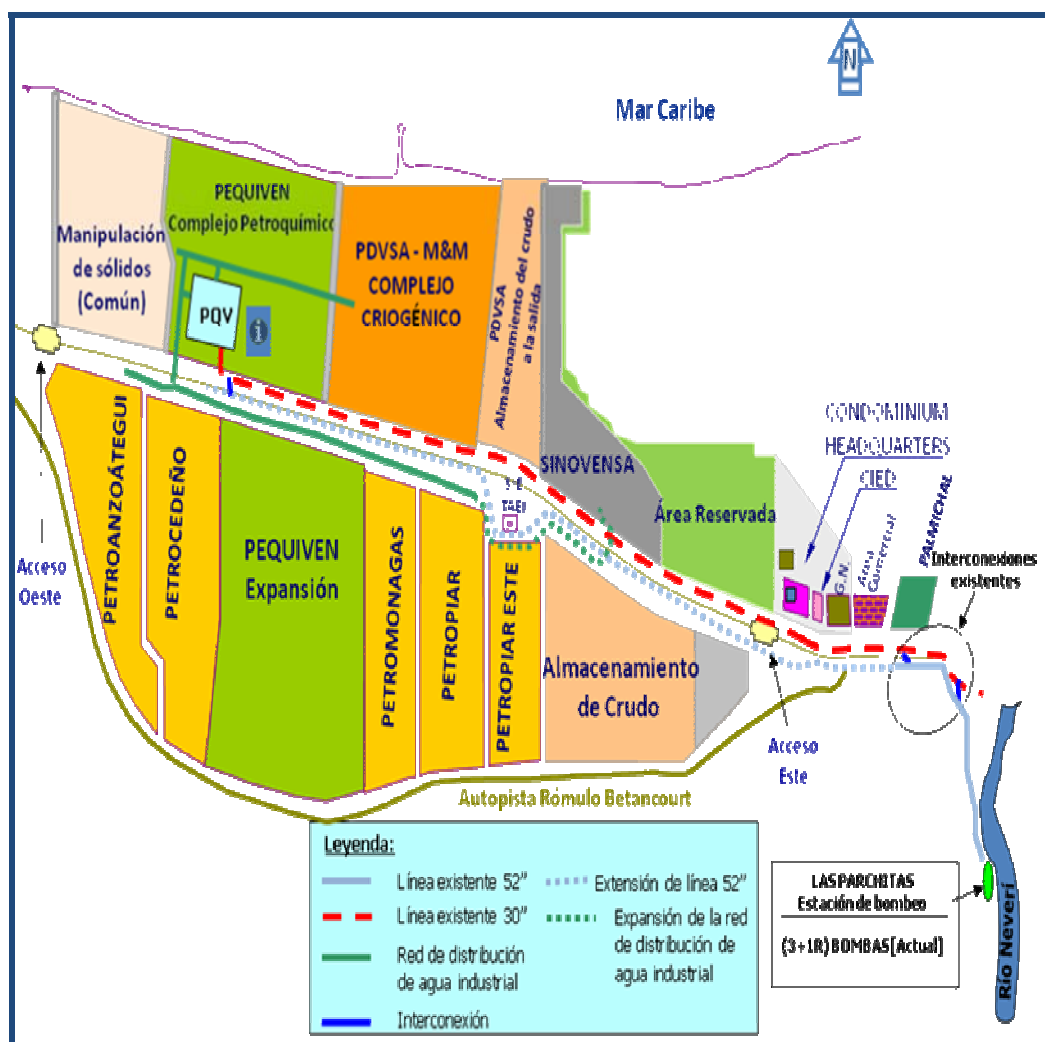
## **2.2. Características del Agua Utilizada en la Sección 600 de METOR S.A.**

### **2.2.1. Origen del Agua**

El agua empleada por METOR S.A., en el área de servicios industriales (Sección 600) es suministrada por PEQUIVEN a una presión de 3,85 kg/cm<sup>2</sup> y a una temperatura ambiente de aproximadamente 34 °C, a través de la línea existente de 20" que se interconecta con la línea 10"-FTW-1001-LC1 perteneciente a la planta.

El agua que suministra PEQUIVEN proviene de la estación de captación y bombeo Las Parchitas, ubicada en el río Neverí, estado Anzoátegui. El recorrido del agua desde Las Parchitas hasta PEQUIVEN se observa en la figura 2.

El agua proveniente de la estación Las Parchitas es almacenada en lagunas de agua cruda que se encuentra en las instalaciones de PEQUIVEN, luego se realiza un proceso de tratamiento para posteriormente ser almacenada en los tanques de almacenamiento de agua industrial y finalmente se distribuye a los diferentes consumidores de agua industrial del Complejo Petroquímico, entre los cuales se encuentra METOR S.A. En la figura 3., pueden ser observados estos detalles.



**Figura 2.** Procedencia del agua industrial.



**Figura 3.** Fuente de agua industrial para METOR S.A.

### **2.2.2. Calidad del Agua Industrial Empleada por METOR S.A.**

El agua proveniente de PEQUIVEN se denomina agua filtrada (FTW, por sus siglas en inglés *filtered water*), las características fisicoquímicas de esta agua se muestran en la tabla 2.1.

**Tabla 1.** Características fisicoquímicas del agua proveniente de PEQUIVEN<sup>5</sup>

Características	Valor
Conductividad	32.9 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Sólidos disueltos	200 ppm
Dureza total	144 ppm
pH	7.2
Cloro residual	ND ( no detectable)
Sólidos suspendidos	ND
Sílice	10 ppm
Magnesio	4 ppm
Cloro	4 ppm
Calcio	50 ppm
Sulfatos	20 ppm
Hierro	Trazas
Materia orgánica (DBO <sub>5</sub> )	2.5 ppm

Las características de BFW se pueden observar en la tabla 2.2.

**Tabla 2.** Características del agua para calderas<sup>6</sup>y <sup>7</sup>

Características	Valor
pH	8,5 – 9,5
Sodio	< 0,025 ppm
Dureza total, CaCO <sub>3</sub>	0,01 ppm
Conductividad	< 0,3 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Sílice	< 0,02 ppm
Hierro	< 0,03 ppm

**Tabla 2.** Características del agua para calderas (BFW) (continuación)<sup>6y 7</sup>

Características	Valor
Cobre	< 0,01 ppm
Aluminio	< 0,02 ppm
Sólidos suspendidos	Trazas
Oxígeno disuelto	0,007 ppm

Las características del agua de enfriamiento (CW) para un óptimo funcionamiento del sistema deben mantenerse dentro de los rangos que se observan en la tabla 2.3.

**Tabla 3.** Calidad del agua de recirculación del sistema de enfriamiento (CW)<sup>5</sup>

Características	Valor
Conductividad	1200 – 1400 $\mu\text{s}/\text{cm}$
pH	8,0 – 9,0
Cloro residual	0,5 – 1,0 ppm
Dureza cálcica ( $\text{CaCO}_3$ )	200 – 700 ppm
Alcalinidad m ( $\text{CaCO}_3$ )	200 – 500 ppm
Cloruros	Máx. 90 ppm
Fosfatos totales	4 – 6 ppm

### 2.3. Calderas

La caldera es un recipiente en el cual tiene lugar una vaporización continua del agua mediante aporte de energía calorífica obtenida de un combustible fósil o nuclear. Debido al cambio de estado de agua a vapor también se denomina generador de vapor.<sup>7</sup>

Existen varios tipos de calderas de acuerdo a sus usos. Las calderas se clasifican de acuerdo a sus estructuras, los métodos de circulación del agua, los tipos de combustibles, y el tipo de los materiales utilizados. En general, se clasifican aproximadamente en calderas cilíndricas y calderas de tubos de agua o acuotubulares. En la siguiente figura se muestra un modelo de caldera acuotubular.<sup>8</sup>

El vapor es una fuente de energía de transporte relativamente fácil a distancias cortas, razón por la cual se encuentran numerosas aplicaciones industriales como medio de calefacción y fuerza motriz.<sup>8</sup>



**Figura 4.** Modelo de caldera acuotubular.

### **2.3.1. Necesidad de Tratamiento de Aguas para Calderas**

Las aguas utilizadas como alimentación a calderas, agua industrial, agua subterránea o agua de ríos, por lo general contienen impurezas, sólidos suspendidos, sólidos disueltos y gases. Las cantidades de estas sustancias varían en gran medida dependiendo de la fuente. El uso de agua cruda sin el tratamiento previo puede resultar en problemas, como la incrustación, la corrosión y el arrastre, en las calderas y los equipos auxiliares.



La mayoría de las calderas de baja presión usan agua cruda o agua suavizada como agua de alimentación y por lo general no se emplea desaireador. Por lo tanto, estas calderas están sujetas a problemas tales como durezas e incrustaciones de sílice, corrosión a causa de oxígeno disuelto y corrosión por dióxido de carbono en la línea de condensado.

Las calderas de alta o media presión generalmente emplean agua desmineralizada y agua desaireada como agua de alimentación. Sin embargo, debido a que son operadas a alta temperatura y alta presión, la presencia de una pequeña cantidad de impurezas causa problemas, tales como los depósitos de óxido de metales en la superficie de calefacción de la caldera, la corrosión de equipos auxiliares, la incrustación en los sobrecalentadores y turbinas aleteadas. Con el fin de evitar estos problemas y para operar las calderas de forma segura y eficiente, es necesaria la aplicación de un adecuado tratamiento del agua.

El tratamiento de agua para calderas se divide en tratamiento externo (mecánico) e interno (químico). El tratamiento mecánico es para eliminar las impurezas en el agua por aplicación de coagulación, sedimentación, filtración, intercambio iónico, tratamiento de desaireación, entre otros. El tratamiento químico puede aplicarse al agua de alimentación, líneas de condensado, y a la caldera propiamente.

El tratamiento químico del agua de alimentación y líneas de condensado tiene por objeto controlar la corrosión mediante la adición de un secuestrante de oxígeno e inhibidores de corrosión, para suministrar agua con tan pocas impurezas como sea posible a la caldera. Dispersantes de lodos, secuestrante de oxígeno y otros compuestos se utilizan para el tratamiento químico de calderas. Estos químicos previenen la corrosión, hacen insoluble en el agua los elementos que forman la

incrustación y dispersan las partículas para ser descargadas por la purga de la caldera.<sup>9</sup>

### **2.3.2. Problemas Relacionados con el Agua Para Calderas**

#### **2.3.2.1. Corrosión**

La corrosión es el ataque químico sobre la superficie del metal, el cual resulta en pérdida de material. Este fenómeno ocurre naturalmente y es una amenaza constante a los equipos de la planta, implicando costosos reemplazos, reparaciones y servicios por paradas de planta. Si la corrosión no es monitoreada, eventualmente conllevará a la ruptura de tubos y todos los riesgos que esto representa.

Muchos metales tienen la tendencia a corroerse y el acero es un buen ejemplo. El acero es procesado a partir del hierro mineral, el cual existe en estado natural como un componente marrón rojizo, óxido de hierro hasta convertirlo en un metal utilizable del cual ha sido removido el oxígeno.

De cualquier modo, el hierro es inestable y naturalmente regresará a su estado natural de óxido que se le llama herrumbre. Combinando hierro con otros metales, para formar aleaciones, permite que este proceso ocurra más despacio, pero siempre las aleaciones tienden a oxidarse cuando son expuestas a aire, agua y otros metales.

Los metales también se oxidan en las calderas, y la pérdida de metal conllevará a la ruptura de tubos y goteo. Además las partículas de metal que son liberadas, viajan a través del sistema y pueden causar daños posteriores.

Un buen mantenimiento y tratamiento del agua para generar vapor, promoverá la formación de una capa negra magnética de óxido ferroso-diférrico ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) dentro de la caldera, la cual se encarga de proteger la caldera de la corrosión. Un incorrecto

control del pH y gases disueltos en el agua destruirá esta capa, dejando desprotegido el sistema de la corrosión.

La segunda causa de corrosión es la presencia de gases disueltos en el agua de calderas, específicamente de oxígeno disuelto. El oxígeno disuelto interfiere con la formación de la capa magnética y se combina con hierro en el agua resultando en la formación de óxido de hierro.

La corrosión por oxígeno se da en áreas pequeñas penetrando la superficie del metal, causando *pitting* o picadura severa. La picadura puede ocurrir dentro de líneas de alimentación, economizadores, a lo largo de la línea del tambor de vapor de la caldera (domo superior) y por todas partes del sistema de condensado. Las fallas debido al ataque de oxígeno suelen ocurrir muy rápidamente.

El oxígeno disuelto también contribuye con otras reacciones de corrosión, incluyendo corrosión por amoníaco en las tuberías de condensado de aleaciones de cobre y corrosión inducidas por cloruros en ciertos tipos de acero inoxidable.

El oxígeno no es el único gas disuelto que puede causar daños en calderas. Hidrógeno, produce ataque ácido que causa el debilitamiento del metal, lo cual resulta en ruptura de tubos. La remoción de gases disueltos en el agua y el monitoreo del pH dentro del sistema son necesarios para mantener la corrosión en niveles aceptables.<sup>10</sup>

En la figura 5., puede afectar la corrosión la metalurgia de los sistemas asociados a aguas con tratamiento químico deficiente.



**Figura 5.** Corrosión en sistemas de tuberías.

### 2.3.2.2. Formación de Incrustaciones

El segundo mayor problema que se presentan en sistemas de generación de vapor es la formación de incrustaciones en la superficie del metal. La formación de incrustaciones resulta de los productos de corrosión en el agua, sólo con impurezas entrando en el agua de alimentación.

En la sección pre-caldera, los depósitos se pueden formar en varios lugares, en cada uno de los cuales se presentan problemas específicos. En el interior del desaireador, interfieren con la distribución adecuada del agua y la desaireación. Pueden reducir la capacidad de las líneas de alimentación, reduce la recuperación de calor y capacidad de los economizadores u otros calentadores del agua de alimentación, incrementando el peligro de corrosión. Y en reguladores de agua de alimentación, los depósitos pueden causar que el control del nivel del agua sea errado produciendo irregularidades en la circulación de esta.

El efecto más severo de depósitos en sistemas de generación de vapor ocurre dentro de la caldera. La presencia de depósitos en las superficies de transferencia de calor interrumpe las funciones básicas de las calderas.

Los depósitos en las superficies de los tubos de agua previene el enfriamiento de metales. El sobrecalentamiento resulta en debilitamiento del metal, pérdida de espesor y finalmente en ruptura. Siempre que la ruptura no ocurra, el efecto de aislamiento de los depósitos resulta en pérdida de eficiencia. Y finalmente, los depósitos se pueden formar en la sección después de caldera afectando turbinas, equipos que trabajan con vapor y líneas de condensado. Los depósitos en calderas son clasificados como incrustaciones o lodos.

Las incrustaciones generalmente son duras y muy difíciles de remover. Las incrustaciones en calderas resultan del crecimiento de cristales en las superficies de los tubos y más severamente en áreas donde se alcanzan las máximas temperaturas. Los tubos elevadores son los más susceptibles. La incrustación usualmente está asociada con componentes que se hacen menos solubles cuando las temperaturas se incrementan, tales como carbonato de calcio y fosfato de calcio.

Al contrario de las incrustaciones, los lodos son más suaves y se adhieren menos a la superficie de las calderas. Cuando la solubilidad de los componentes que forman el lodo es excedida, estos tienden a precipitar en el agua fuera de la caldera y se depositan en el tambor de lodos (domo inferior).

Además de restringir el flujo y reducir la transferencia de calor, los depósitos de las calderas contribuyen con la corrosión. Debajo de los depósitos se forman sitios de corrosión que resultan en corrosión localizada. Esto se conoce como “corrosión bajo depósitos”. Los productos de corrosión generados, se mueven a través del agua, adhiriéndose a otras áreas del sistema y permitiendo que el proceso continúe.

Los depósitos formados en líneas de condensados causan alta corrosión localizada, fallas en líneas de retorno resultando en la pérdida valiosa de calor y la

alta calidad del condensado. Los depósitos no controlados pueden ocasionar paradas de planta.

Finalmente, los depósitos en la superficie del tambor de vapor pueden inhibir la efectiva separación de la mezcla agua/vapor. Debido a esto se pueden presentar problemas de arrastre en la sección después de caldera.<sup>9</sup>

### **2.3.2.3. Arrastre**

El tercer problema relacionado al agua para calderas es el arrastre. El arrastre es el paso de impurezas al flujo de vapor. Puede ser causado por gotitas de aguas atrapadas en el vapor o por impurezas que se vaporizan y viajan con el vapor.

El transporte de gotitas de agua en el vapor es llamado “captura mecánica” la cual se divide en dos tipos, “*priming*” y “*foaming*”.

El *priming* ocurre cuando el agua es arrastrada junto con el vapor. Esto ocurre cuando aumenta la turbulencia del agua y se inunda el tambor de vapor. Las gotitas de aguas son capaces de pasar a los sobrecalentadores y formar depósitos en los tubos de estos.

Por otro lado, el *foaming*, resulta del aumento excesivo de la cantidad de alcalinidad, sólidos disueltos o contaminación del agua por aceite.

En aguas turbulentas, estas impurezas forman una capa de burbujas de agua en la superficie del tambor de vapor. Una capa de espuma en la superficie del agua reduce el espacio disponible donde el vapor puede ser despojado, permitiendo al agua de calderas entrar a los sobrecalentadores junto con el vapor.

La captura mecánica es generalmente controlada a través de un diseño adecuado de la caldera y del tambor de vapor, complementado con el uso de productos para el control de espumas. El tambor de vapor debe ser diseñado para proveer suficiente volumen y una velocidad suficientemente baja para permitir la separación del agua del vapor antes de que este salga de la caldera. Dependiendo del tamaño del tambor de vapor, el nivel de operación debe ser ajustado. Cuando el nivel del agua es alto, el área de separación y volumen se reducen y puede ocurrir el acarreo. Esto es corregido por la simple disminución del nivel de operación del tambor de vapor.

El arrastre puede resultar también de la vaporización de impurezas. Una impureza presente en el agua puede alcanzar el punto de ebullición y convertirse en vapor. Este es el caso de la sílice, la cual se convierte en vapor y se arrastra a la sección después de caldera. La sílice regresa a estado sólido cuando se encuentra en áreas frías donde forma depósitos extremadamente duros. Los depósitos de sílice causan problemas, especialmente cuando el vapor se emplea para operar turbinas. Las turbinas están cuidadosamente equilibradas, y siempre una pequeña cantidad de depósito puede afectar este equilibrio, causando vibraciones y fallas de las mismas. Los problemas que resultan del arrastre pueden ser minimizados por el monitoreo y control del nivel de agua en la caldera junto con la aplicación de un efectivo programa de tratamiento.<sup>10</sup>

### **2.3.3. Tratamiento Interno de Agua para Calderas**

Aun cuando se aplique el tratamiento externo de agua para calderas, es absolutamente difícil prevenir la contaminación de agua para calderas con impurezas, las cuales causan problemas de corrosión e incrustaciones. Los tratamientos químicos de agua para calderas son empleados para protegerlas de estos problemas, además de

todo el sistema de generación de vapor incluyendo la alimentación y la línea condensado de vapor.<sup>8</sup>

### **2.3.3.1. Tipos de Tratamientos Químicos y sus Funciones**

Los tipos, funciones y nombres químicos típicos de tratamientos químicos de calderas son reseñados en la tabla 2.4.

El principal propósito de la aplicación de estos químicos son los siguientes:

- Dispersar los componentes de las incrustaciones para facilitar su desalojo a través de la purga.
- Mantener el pH del agua de calderas en un rango alcalino adecuado, para prevenir la corrosión y formación de incrustaciones de sílice manteniéndola en su forma soluble.
- Remover el oxígeno disuelto en el agua de alimentación para prevenir la corrosión.
- Mantener el pH del condensado en un rango apropiado para prevenir la corrosión de la línea de condensado por oxígeno y dióxido de carbono.
- Prevenir la formación de espuma en el interior de la caldera.

El criterio de control de calidad de agua para calderas tiene que ser efectivo para lograr estos propósitos, por lo que se debe prestar mucha atención al control de inyección de químicos y el control de calidad de agua de alimentación y agua de calderas.<sup>8</sup>



**Tabla 4.** Tipo, función y nombres químicos típicos del tratamiento químico de calderas<sup>8</sup>

Tipo	Función	Nombre químico
Agentes de control de pH y alcalinidad	Controlar pH y alcalinidad del agua de alimentación y de calderas para prevenir corrosión e incrustaciones	Hidróxido de sodio Carbonato de sodio Fosfato de sodio Poli-fosfato de sodio Ácido fosfórico
Inhibidores de incrustaciones	Control de incrustaciones convirtiendo componentes de dureza en precipitados insolubles en el agua de calderas para ser descargado por la purga	Hidróxido de sodio Fosfato de sodio Poli-fosfato de sodio Fosfato de potasio
Dispersantes	Dispersión de sólidos suspendidos en el agua de las calderas, a fin de ser descargados fácilmente por la purga para prevenir incrustaciones	Polímeros sintéticos Taninos Almidones
Agentes antiespumantes	Prevención de espumas en el agua de alimentación a calderas para evitar el arrastre	Surfactantes
Secuestrante de oxígeno	Remoción de oxígeno disuelto del agua de alimentación y agua de calderas para prevenir la corrosión	Sulfito de sodio Hidrazina Almidones Taninos Aminas Poli-fenoles

#### **2.3.4. Descripción del Proceso de Generación de Vapor en METOR, S.A.**

El sistema de generación y distribución de vapor tiene como función generar y distribuir vapor a tres niveles de presión para su uso en las diferentes unidades de proceso. El vapor es usado principalmente en:

Reacción de reformación, impulsar las turbinas, calentamiento del proceso/fluidos de servicio, impulsar los eyectores y desaireación del agua de alimentación a calderas.

La planta cuenta con dos sistemas de generación de vapor:

- Generación de vapor con las calderas de recuperación de calor en la unidad de proceso, E-205 y E-421, y
- Generación de vapor con las calderas auxiliares B-620 A/B en la unidad de servicios.

Los tres niveles de distribución de vapor se denominan:

1. Alta presión (SH).
2. Media presión (SM).
3. Baja presión (SL).

El vapor SH es generado en la caldera de recuperación de calor (E-205/V-201) de la planta, el vapor SM es suministrado por las calderas auxiliares (B-620 A/B) y la extracción de la turbina del compresor de gas de síntesis (K-301T), el vapor SL es generado en la caldera de recuperación de calor (E-421); y se complementa con la extracción de las turbinas de contrapresión.

El agua empleada para la generación de vapor inicialmente pasa por un proceso de desmineralización. El agua desmineralizada (DMW) se mezcla con condensado proveniente de las turbinas (P-621-AT, P-624-AT, K-301T y K-302T) y se precalienta a 83 °C en el precalentador de agua de alimentación al desaireador (E-207). Posteriormente se mezcla con condensado de vapor proveniente de los rehervidores de las columnas de destilación, convirtiéndose en lo que se conoce como agua de alimentación al desaireador (DFW, por sus siglas en inglés *deaired feed water*).

El oxígeno disuelto en el agua después de la desaireación es de 0,007 ppm y ya puede ser empleada como agua de alimentación a calderas (BFW), lo cual se consigue inyectando un secuestrante de oxígeno a base de hidrazina (con lo que se consigue un residual de oxígeno disuelto de casi 0 ppm) y una amina estabilizante, la dosificación de estos productos químicos permite prevenir la corrosión por oxígeno disuelto y pH respectivamente. En la figura 6., se muestra el diagrama de generación de vapor de la planta estudiada.

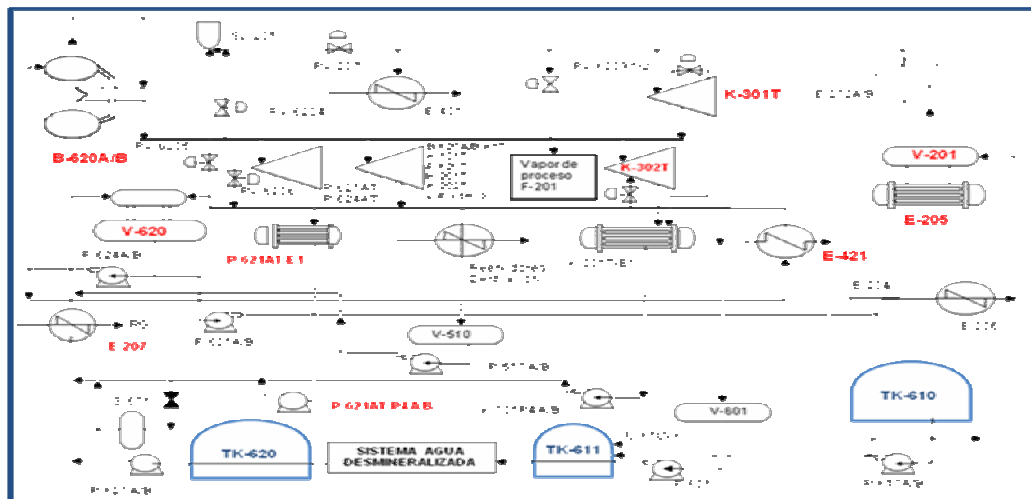


Figura 6. Diagrama del sistema de generación de vapor de METOR S.A. <sup>6</sup>

Una vez que el agua ha sido acondicionada para su uso en los equipos de generación de vapor, la descarga del V-620, se divide en dos corrientes una de ellas corresponde a la succión de las bombas de alimentación a la caldera de alta presión (P621 A/B) y la otra corriente a las bombas de alimentación a la calderas de media presión (P-624 A/B).

#### **2.4. Sistemas de Enfriamiento por Agua**

Los sistemas de enfriamiento tienen como objetivo principal remover el calor que se produce en las unidades de transferencia de calor, para mantener las condiciones operacionales de temperaturas requeridas, de manera que, el sistema funcione según lo establecido. El agua de enfriamiento se utiliza para enfriar los distintos equipos que conforman el sistema, de los cuales se pueden mencionar condensadores, intercambiadores de calor, motores, compresores, reactores, refrigerantes de aceite, aire, gases, etc.

El agua generalmente es utilizada como medio enfriante a nivel industrial, por poseer una baja viscosidad, alta densidad, alto calor específico, alta conductividad térmica, pero sobre todo es abundante y de bajo costo. El agua fría penetra en estos aparatos y su temperatura se eleva por contacto con las paredes calientes. Los sistemas de enfriamiento por agua son abiertos o cerrados y el flujo del agua puede ser de un solo paso o recirculante. Los tres tipos básicos de sistemas de enfriamientos por agua son de un solo paso, cerrados recirculante (no evaporativos), y abierto recirculante (evaporativos).<sup>10</sup>

##### **2.4.1. Torres de Enfriamiento**

Las torres de enfriamiento son usadas para enfriar agua caliente por recirculación. En las torres de enfriamiento el agua caliente entra en contacto con el

aire frío, en este proceso una porción del agua se evapora.

Las torres de enfriamiento se clasifican en dos grandes grupos. Un tipo son las torres de tiro natural donde el aire es suplido por convección natural y el otro tipo son las de tiro mecánico donde el aire es suplido por un ventilador.

El tipo de tiro mecánico incluye tiro forzado y tiro inducido. También, ellas se clasifican en las de tipo flujo contracorriente y las de tipo flujo cruzado, dependiendo de la dirección del flujo del agua y aire. En una torre de flujo contracorriente, el aire se mueve hacia arriba a través del relleno de la torre, a contracorriente el flujo de agua baja. En una torre de flujo cruzado, el flujo de aire cruza horizontalmente y el flujo de agua baja. Cada una de estas torres tiene sus ventajas y desventajas, el tipo más apropiado es seleccionado dependiendo de condiciones como capacidad de la torre, área de instalación, entre otras.<sup>8</sup>

#### **2.4.2. Problemas Relacionados con el Agua de Enfriamiento**

Son generalmente clasificados en las siguientes tres categorías:

- Corrosión,
- Depósitos,
- Ensuciamiento microbiológico.

Como se observa en la tabla 2.5, la corrosión acorta la vida de los equipos en sistemas de enfriamiento y causa la filtración de productos o agua de enfriamiento de los intercambiadores de calor. La adhesión de productos de corrosión también causa problemas tales como la reducción de la eficiencia térmica de los intercambiadores de calor y la rata de circulación de agua.

La adhesión de depósitos y limo en intercambiadores de calor no sólo disminuye la eficiencia térmica, también causa frecuentemente corrosión local bajo depósitos. Estos problemas apenas ocurren independientemente y usualmente son causados por una relación mutua.<sup>8</sup>

**Tabla 5.** Problemas que ocurren en sistemas de agua de enfriamiento y sus causas<sup>8</sup>

Problema	Causa
Disminución del tiempo de vida de intercambiadores de calor, tuberías, etc.	Corrosión Corrosión que ocurre bajo depósitos como limo y fango Corrosión bajo incrustaciones
Reducción de la eficiencia térmica de intercambiadores de calor	Adhesión de productos de corrosión, incrustaciones y limo Acumulación de fango
Incremento de la caída de presión y reducción de la tasa de circulación del agua de enfriamiento en el sistema (incremento del consumo eléctrico de las bombas)	Adhesión de productos de corrosión, incrustaciones y limo Acumulación de fango
Adsorción y pérdida de agua de tratamiento químico	Por productos de corrosión, incrustaciones, limo y fango Por sólidos suspendidos en agua de enfriamiento

### 2.4.2.1. Corrosión

En un sistema de enfriamiento, la corrosión aparece como un adelgazamiento general (**corrosión generalizada**) o corrosión intensa en puntos específicos (**pitting o picadura**). El *pitting* es más peligroso que la corrosión generalizada porque es muy concentrado. Cuando el “pit” perfora el metal, puede ocurrir una falla en poco tiempo.

Un tipo especial de corrosión ocurre cuando dos metales distintos están en contacto en el agua. El metal más fuerte, más “noble” actúa como cátodo. El metal más débil como un ánodo y empieza a corroerse. Esto se denomina **corrosión galvánica** y es común en sistemas de enfriamiento de aguas.

Otro tipo de corrosión, que puede ocurrir en sistemas de enfriamiento, es **lixiviación selectiva**. En este caso, la corrosión ataca a un elemento de una aleación. La forma más común de lixiviación selectiva en sistemas de enfriamiento es la descincificación del latón *admiralty*, mediante la cual el zinc es removido del bronce, dejando metal de cobre puro. Desgraciadamente, el cobre remanente no es tan fuerte como el metal original. Eso hace que el tubo del intercambiador de calor descincificado sea más susceptible a falla y fugas. En sistemas de enfriamiento, la causa más importante de descincificación es sobrealimentación de biocidas oxidantes, como cloro o hipoclorito de sodio y/o una operación de los sistemas de agua de enfriamiento con pH debajo de 7 (condiciones ácidas).

Otro tipo de corrosión que a veces ocurre en sistemas de enfriamiento es la llamada **quebra debida a corrosión por tensión** (*Stress Corrosion Cracking, SCC*). Es un tipo de falla muy rápida. El acero inoxidable y los bronce *admiralty* son más susceptibles a este tipo de falla. Para que ocurra, deben estar presentes en el agua materiales corrosivos específicos, las temperaturas de los metales deben ser altas y la

base metálica debe estar bajo alguna forma de tensión. La presencia de cloruros es una causa común de SCC del acero inoxidable. La presencia de amoníaco está conectada a SCC en bronce *admiralty*.

Puede ocurrir **corrosión bajo depósitos** cuando los productos de corrosión o incrustación mineral se acumulan sobre la superficie metálica. Esto es la corrosión localizada causada por las celdas de concentración de oxígeno. A medida que se forman depósitos sobre las superficies metálicas, los niveles de oxígeno debajo de los depósitos se reducen y se establece una celda de corrosión electroquímica. Esto puede hacer que el metal debajo del depósito sea rápidamente corroído ocasionando corrosión localizada severa y perforación de la superficie metálica.

Otra forma de corrosión que puede observarse en sistemas de enfriamiento es **corrosión por influencia microbológica o microbológicamente inducida (MIC)**. MIC ocurre debajo del *biofilm* (lodo) sobre superficies metálicas. El *biofilm* actúa como una barrera para los microbios, protegiéndolos contra los biocidas oxidantes y no oxidantes y permitiendo que se desarrollen vigorosamente. La mayoría de los organismos segrega ácidos como parte de sus procesos metabólicos. Eso crea condiciones de bajo pH localizado debajo del *biofilm*, generando corrosión.

Existen distintas formas de corrosión en sistemas de enfriamiento. No se puede, por lo tanto, minimizar la corrosión con un solo método mágico. Eso exige la combinación de soluciones mecánicas y químicas.<sup>11</sup>

#### **A. Factores que Influencian la Corrosión**

Distintos factores afectan la tasa y la severidad de la corrosión. La comprensión de estos factores permite elegir los programas de tratamiento más apropiados y ayuda a operar las torres de enfriamiento e intercambiadores de calor más eficientemente.



Muchos de los factores que afectan la corrosión del sistema de enfriamiento son parte del diseño del sistema o dependen del agua de reposición.

El **oxígeno** es un componente clave que influye en la tasa de corrosión del sistema de enfriamiento, él afecta la tasa de corrosión porque está involucrado en las reacciones anódicas y catódicas sobre la superficie del metal. Cuanto más oxígeno, tanto más rápidamente ocurre la corrosión. En una torre de enfriamiento, el aire se mezcla con el agua a medida que pasa a través del relleno de la torre. El agua se satura continuamente con oxígeno. Una forma de controlar el efecto corrosivo del oxígeno en sistemas de enfriamiento es agregar inhibidores especiales que no permiten que el oxígeno llegue a la superficie metálica. Sin oxígeno no pueden ocurrir las reacciones químicas y cesa la corrosión.

La **temperatura** es otro factor que afecta directamente la tasa de corrosión en un sistema de enfriamiento. Generalmente, la tasa de corrosión se duplica por cada elevación de 18°F (10°C) de la temperatura del agua. En la mayor parte de los casos, las temperaturas operacionales están diseñadas para el sistema de enfriamiento y no se puede hacer mucho para cambiarlas.

La **velocidad del agua** influye también en la tasa de corrosión en sistemas de enfriamiento. En un rango de velocidad relativamente bajo, la tasa de corrosión tiende a crecer a medida que aumenta la velocidad del agua. Sin embargo, a una velocidad crítica, la tasa de corrosión disminuye un poco según el oxígeno es llevado para la superficie metálica, incrementando la rápida formación de una capa protectora de óxido metálico. A medida que la velocidad aumenta más allá de aquel punto, la acción de fricción (*scouring*) del agua comienza a remover el *film* protector y la corrosión tiende a aumentar (erosión). Las velocidades son normalmente inherentes al sistema de enfriamiento y es muy difícil alterarlas. Una velocidad más baja puede reducir el potencial de corrosión pero aumenta el riesgo de ensuciamiento.

El **pH**, es una medida de la acidez del agua. Él puede influenciar dramáticamente sobre la corrosión. Por lo general, cuanto más bajo es el pH, mayor será la tendencia a la corrosión. Los inhibidores de corrosión se agregan al sistema para reducir la tasa de corrosión y son diseñados para operar dentro de un rango específico de pH. Es crítico por lo tanto controlar el pH del sistema de enfriamiento dentro del rango especificado para su programa de tratamiento. En los sistemas de enfriamiento el pH es controlado, sea a través de dosificación de ácido o ajustando los ciclos de concentración en la torre de enfriamiento.

El contenido **total de sólidos disueltos** (TSD) tiene un efecto directo sobre la tasa de corrosión del hierro y del acero. Es lógico que, como la corrosión involucra la transferencia de electrones dentro del metal y las correspondientes reacciones en el agua, el agua con un alto contenido iónico tenga una alta tendencia a corroer el metal.

El uso de **cloro** también está fuertemente relacionado con la tasa de corrosión. Por lo general, cuanta más alta es la dosificación de cloro o hipoclorito de sodio, mayor será la tendencia a la corrosión. Si ese material fuera dosificado en exceso en un sistema de enfriamiento, atacará las aleaciones de cobre del sistema, tales como latón *admiralty*, liberando iones de cobre en el agua de enfriamiento. Los iones de cobre pueden depositarse sobre las superficies de acero dentro del sistema y llevar a corrosión galvánica. Por lo tanto, un buen control del cloro y/o del hipoclorito de sodio es crítico para el control del sistema.<sup>11</sup>

#### **2.4.2.2. Control de la Corrosión**

Es necesario usar métodos de control de corrosión en sistemas de enfriamiento para mantener una planta operando sin problemas. Además son necesarios para mantener la planta en existencia. Estos métodos generalmente son clasificados como mecánicos y químicos.

Las técnicas mecánicas para minimizar la corrosión en sistemas de enfriamiento generalmente hacen parte integrante del diseño del equipo. Por ejemplo, las metalurgias del intercambiador de calor se seleccionan en base al servicio que el intercambiador deberá ejecutar. Se especifican equipos o esquemas de control de temperaturas para permitir que los intercambiadores de calor operen en velocidades de agua apropiadas. La corrosión galvánica es minimizada mediante la selección apropiada de los componentes del sistemas o usando ánodos de sacrificios. El equipo también es instalado considerando el control de pH y de los ciclos/conductividad. Algunos sistemas usan equipos de dosificación automáticos para mantener dosificaciones químicas apropiadas.

Las técnicas químicas para inhibición de la corrosión en sistemas de enfriamiento incluyen control de pH, control de los ciclos y la utilización de aditivos químicos especiales, llamados inhibidores de corrosión. Es importante mantenerse dentro del rango recomendado de eficiencia de los productos químicos inhibidores de corrosión para controlar la corrosión todo el tiempo en los sistemas de enfriamiento. La sobrealimentación de inhibidores de corrosión aumenta los costos y en algunos casos puede causar deposición. Por estos motivos, algunas plantas han instalado sistemas de control y dosificación automáticos.<sup>11</sup>

Los **inhibidores de corrosión** son sustancias que aplicadas sobre un material bien sea metal o acero de refuerzo en concreto, reducen el ataque del ambiente. Su acción consiste en la formación de una película que actúa como barrera al medio corrosivo, esta película se encuentra en estado de equilibrio, donde ocurren procesos simultáneos de adsorción y desorción del inhibidor sobre el sustrato metálico. Los inhibidores de corrosión extienden la vida de la tubería, equipo y sistema, previniendo fallas y evitando escapes involuntarios.

Entre los tipos de inhibidores se encuentran las bases o *primers*, fosfatizantes-pasivantes, inhibidor anódico, inhibidor en fase-vapor, secuestrantes o eliminadores de oxígeno.<sup>12</sup>

### 2.4.2.3. Depósitos

La acumulación gradual de depósitos en sistemas de agua de enfriamiento afecta directamente la producción. Los problemas de deposición pueden: reducir la eficiencia de la torre, disminuir la transferencia de calor y reducir la capacidad de transporte de las tuberías.

Finalmente, si no es tratada, la deposición puede resultar en pérdidas de producción, reducción de la vida del equipo y aumento de los costos, debido a limpiezas frecuentes y exigencia adicional de bombeo.

La formación de depósitos está fuertemente influenciada por diversos factores. Los factores claves son: composición del agua, pH, temperaturas del agua y del intercambiador, velocidad del agua, tiempo de residencia, metalurgia del sistema. En la figura 7., se muestra un intercambiador de calor que presenta problemas de depósitos.

Estos factores están interrelacionados. La deposición más severa, normalmente ocurre en el equipo de proceso que opera en temperaturas elevadas y/o con agua a baja velocidad. Para torres de enfriamiento con un relleno de *film* sumamente eficiente, la acumulación de depósitos es un área de preocupación.<sup>12</sup>



**Figura 7.** Intercambiador de calor que presenta problemas de depósitos.

#### **A. Incrustación y Ensuciantes**

Generalmente, los depósitos son clasificados como incrustación o ensuciantes (*foulants*). La incrustación es una capa de materiales predominantemente inorgánicos (semejantes a sales o a minerales), formados mediante la precipitación y subsecuente crecimiento del cristal en una superficie que está en contacto con el agua. La precipitación ocurre cuando la solubilidad de los minerales formadores de depósito es sobrepasada, sea en el agua bruta o sobre las superficies. Las sales más comunes formadoras de depósito en las superficies de transferencia de calor presentan solubilidad retrógrada o inversa con la temperatura.

La mayoría de las sales se vuelven más solubles a medida que aumenta la temperatura. La sal común (cloruro de sodio) presenta este tipo de comportamiento cuanto más caliente la solución, mayor será la concentración de sal que se disuelve en ella. Algunas sales presentan solubilidad inversa a medida que la temperatura aumenta, su solubilidad decrece. Respecto a las sales con solubilidad inversa, el potencial de los problemas de incrustación es mayor en las partes más calientes del sistema de enfriamiento. Las superficies del intercambiador de calor, que también son las más críticas para una transferencia de calor eficiente.

El carbonato de calcio, sulfato de calcio, fosfato de calcio y silicato de magnesio son ejemplos de sales que presentan solubilidad inversa. Pueden ser totalmente solubles en el agua bruta con baja temperatura del sistema de enfriamiento, pero no son solubles en agua con temperatura más elevada como en las superficies de transferencia de calor de los intercambiadores y se precipitan sobre esta superficie. Observe que las sales de calcio y magnesio constituyen un tipo particular de problema al respecto. Por el contrario la mayoría de las sales de sodio presenta solubilidad normal. La mayoría de las sales basadas en dureza presentan solubilidad inversa.

Existen otros factores además de los efectos de la temperatura. Las incrustaciones se forman por un proceso con distintas etapas, llamado nucleación. Los cristales iniciales crecen y pueden en realidad proveer más sitios de nucleación, acelerando el proceso de formación de incrustación. Sin embargo, las condiciones de las superficies metálicas son ideales para la nucleación cristalina. La superficie del metal es “áspera” desde el punto de vista atómico, creando sitios para la nucleación. Además, las velocidades del agua son más bajas cerca de una superficie, lo que evita que la turbulencia rompa los sitios de nucleación. Para complicar aún más el problema, las celdas de corrosión de una superficie metálica producen áreas localizadas con pH relativamente elevado, incrementando la precipitación de muchas sales de dureza del agua de enfriamiento. Después de formados, los depósitos incrustantes proveen sitios adicionales de nucleación y aceleran el crecimiento cristalino.

El **carbonato de calcio** es la incrustación más común formada en sistemas de agua de enfriamiento, porque se forma a partir de dos materiales presentes en casi todas las aguas de reposición dureza de calcio y alcalinidad de bicarbonato. Sin embargo, la química de formación de carbonato de calcio depende de varios factores:

dureza de calcio, alcalinidad de bicarbonato, total de sólidos disueltos (TSD), pH y temperatura.

Otro depósito común es el **fosfato de calcio**. Como el carbonato de calcio, él se vuelve menos soluble con el aumento de pH y de la temperatura. Fuentes típicas de fosfato incluyen agua de ciudades y ríos, aguas de alcantarillado parcialmente tratadas o programas de tratamiento de aguas basados en fosfatos. Con frecuencia se agrega fosfato para evitar la corrosión. Los altos niveles de fosfato proveen protección a las áreas anódicas de la superficie metálica y la precipitación controlada de calcio protege las áreas catódicas. Si el fosfato precipita como incrustación descontrolada sobre la superficie de un intercambiador de calor, se reduce la transferencia de calor, y puede incrementar la corrosión por la pérdida de fosfato.

Existe **sílice** disuelta naturalmente en el agua. A medida que el agua es concentrada en un sistema de enfriamiento, los niveles de sílice aumentan. Niveles de sílice mayores que 200 ppm (mg/L) con frecuencia llevan a incrustación por sílice. Contrariamente a la mayoría de los otros incrustantes, la sílice presenta solubilidad normal, su solubilidad aumenta con la temperatura. Por lo tanto, si ocurriera incrustación por sílice, generalmente ella se deposita en las partes más frías del sistema de enfriamiento. A veces se observa incrustación por sílice en el relleno de la torre y líneas de transferencia. La sílice también puede reaccionar consigo misma y formar grandes agregados.

**Calcio** y **magnesio** pueden reaccionar con sílice formando incrustación muy dura de silicato de magnesio o silicato de calcio/magnesio. Estos compuestos presentan solubilidades inversas y se depositan en las superficies de los intercambiadores. Los depósitos formados con estos incrustantes son sumamente fuertes, pequeñas cantidades pueden reducir drásticamente la transferencia de calor.

El **hierro** en un pozo de agua con frecuencia presenta baja solubilidad en sistemas de enfriamiento, llevando a la formación de depósitos de hierro en todo el sistema de enfriamiento. Pueden ser incrustaciones duras, densas, muy adherentes, o depósitos flojos, sumamente porosos. Ambas formas reducen sensiblemente la eficiencia de la transferencia de calor.

Con frecuencia se encuentra **manganeso** en conjunto con hierro. La deposición de manganeso depende de la metalurgia del sistema. Los depósitos de manganeso se forman preferentemente sobre superficies de latón *admiralty* y acero inoxidable. Cuando se forman, es muy difícil remover esos depósitos, que pueden producir severa corrosión bajo depósitos.

Además de los iones que están naturalmente en el agua, los **productos químicos de tratamiento**, agregados para controlar la corrosión, pueden causar problemas de depósito si no son dosificados de manera apropiada. Por eso es crítico hacer pruebas y monitorear el sistema de enfriamiento para mantener operaciones confiables con una deposición mínima.<sup>11</sup>

## **B. Ensuciamiento**

Es la acumulación de materiales suspendidos en el agua, en oposición a materiales disueltos en el agua, que generalmente forman incrustaciones. Los materiales suspendidos incluyen lodo, sedimentos, compuestos orgánicos, aceites, polvo y suciedad, productos de corrosión, lodos biológicos y desechos en general.

Los sólidos suspendidos entran en un sistema de enfriamiento de distintas formas. Si el agua de reposición contiene sólidos suspendidos, estos se concentran durante la operación de la torre, a medida que el agua es ciclada. Según el aire pasa por la torre, es limpiado (*scrubbed*) por el agua de la torre. Además, debido a su calor



y carga de nutrientes, el agua de enfriamiento es un medio formidable para el crecimiento de los microorganismos que transporta. El ensuciamiento biológico (*biofouling*) puede reducir severamente la eficiencia de la transferencia de calor, si no es controlado.<sup>11</sup>

#### **2.4.2.4. Control de los Depósitos**

Tal como existen métodos mecánicos y químicos para controlar la corrosión, también existen métodos mecánicos y químicos para controlar la deposición.

En términos de métodos de control mecánico, la mejora de la calidad del agua de reposición de la torre tiene importancia primaria. Ablandamiento con cal/soda, ablandamiento con zeolita, intercambio iónico y ósmosis inversa son opciones; sin embargo es necesario un buen análisis costo/beneficio para elegir el mejor tratamiento.

Otra alternativa es permitir que las impurezas precipiten como lodo removible en lugar de depósito duro. Los clarificadores o separadores de sólidos se diseñan para remover estos lodos. Muchos sistemas usan filtros laterales del agua de la torre para remover, o por lo menos disminuir los sólidos suspendidos o productos de corrosión, reduciendo substancialmente el potencial de deposición.

Los ajustes del proceso proveen otro medio de controlar los depósitos. Estos ajustes incluyen el aumento de la purga, reducción del pH, aumento de la velocidad del agua o reducción de las temperaturas. Existe una limitación de costo respecto a aumento de purga: puede no ser económico operar la torre con muy pocos ciclos. Con frecuencia se agrega ácido a los sistemas de enfriamiento para reducir el pH. Las velocidades son importantes en el lado carcasa de los intercambiadores, en donde los

sólidos suspendidos en el agua de enfriamiento pueden decantarse en las áreas de baja velocidad.

Aún con buenos procesos de ajuste, es necesario un programa químico de control de depósitos para la operación óptima del sistema. Existen tres tipos de control químico:

- Inhibidores.
- Dispersantes.
- Surfactantes.

Los **inhibidores** retardan el crecimiento del cristal de las sales formadoras de incrustación, adhiriéndose a las superficies de los cristales. Ellos alteran la estructura del cristal a medida que se forman, durante la etapa de nucleación. Esto hace que el cristal inicial sea frágil, quebrándose en unidades menores o volviendo a disolverse. El uso de un inhibidor permite concentraciones más altas de sales en el sistema, sin el peligro de deposición en las superficies calientes de un intercambiador.

Los **dispersantes** controlan el tamaño de la partícula interfiriendo con la atracción partícula-a-partícula. Normalmente, las partículas son atraídas una a la otra y se combinan para producir partículas mayores, eventualmente llevando a la deposición. El uso de dispersantes interfiere con este proceso. Los dispersantes se anexan a las partículas, cuando todavía son pequeñas, y les dan una carga negativa más grande. El mismo efecto ocurre las cargas negativas de las partículas se repelen y las partículas no pueden crecer hasta un tamaño peligroso. Si se logra mantener la dispersión de las partículas pequeñas, ellas pueden ser removidas del sistema de enfriamiento por la descarga.

Los **surfactantes** también son útiles en un programa de control de depósito. Estos productos químicos actúan como el jabón, reaccionando con las grasas y aceites, dispersándolos. Los surfactantes tienen una estructura interesante parte de la molécula tiene una extremidad moderadamente cargada y prefiere disolverse en el agua, tal como otras especies cargadas. La otra parte de la molécula tiene una extremidad no cargada a la cual no le gusta mucho el agua. Esa extremidad de la molécula prefiere aceites y grasas, que no son tampoco sustancias químicas muy cargadas. Cuando las moléculas de los surfactantes reaccionan con grasa o aceite, la extremidad no cargada se alinea y circunda el glóbulo de aceite, dejando la extremidad cargada y el aceite libre para dispersarse en el agua. Es el mismo mecanismo que hace que el jabón sea eficiente para remover grasa y suciedad de sus manos. La palabra “surfactante” es una abreviación de “agente activo superficial”. Los surfactantes son eficientes porque pueden actuar sobre las superficies de una mezcla de aceite y agua.<sup>11</sup>

#### **2.4.2.5. Crecimiento Microbiológico**

Los sistemas de enfriamiento proveen condiciones que ayudan el crecimiento de vida microscópica predominantemente algas, hongos y bacterias. Las algas crecen en piscinas con agua o lagunas estancadas, haciendo que el agua se vuelva verde o amarilla. Los hongos aparecen en forma de moho del pan. Los hongos son especies mayores. Bajo forma de levadura hacen que la masa de pan crezca. Las bacterias, pues, están por todas partes. Son responsables por muchas infecciones humanas graves, como por ejemplo pulmonía y tuberculosis. También ayudan a hacer queso y son responsables por la fertilización natural del suelo, bajo forma de bacterias fijadoras de nitrógeno. Aunque tengan implicaciones buenas y malas sobre la vida humana, en sistemas de enfriamiento siempre son mala noticia.

Existen dos clases principales de microorganismos:

- **Planctónicos:** organismos que nadan libremente, viven en el agua.
- **Sésiles:** que prefieren vivir adheridos a una superficie.

Los microorganismos se adhieren a superficies mojadas, crecen en ellas y, después de algún tiempo, forman comunidades mayores. Esas comunidades, llamadas **biofilmes o lodos**, consisten de celdas microbianas y material oculto por las células como una capa de protección. Esta capa consiste de polímeros biológicos complejos. Estos materiales son gelatinosos y pegajosos (lodosos).

Si su crecimiento no es controlado, los *biofilmes* interfieren con el desempeño del equipo la contaminación biológica puede reducir, bloquear el flujo de agua, reducir la transferencia de calor y aumentar las tasas de corrosión. Algunos organismos biofílmicos atacan la madera, lo que debilita los miembros estructurales de torres de enfriamiento de madera. Además, sistemas de enfriamiento sucios aumentan el riesgo de enfermedades llevadas por el aire debido a la entrada de aire a la torre de enfriamiento cargado con microorganismos.

Sin un control microbiológico adecuado, la eficiencia de los programas de inhibición de corrosión y control de depósitos está seriamente comprometida. Por ejemplo, una capa espesa de lodo protector puede impedir que los inhibidores de corrosión alcancen la superficie del metal por debajo de los organismos. Peor todavía, los organismos con frecuencia producen materiales de desecho ácidos que en realidad aceleran la corrosión del metal. Las capas de lodo protectoras son pegajosas y atrapan sólidos suspendidos del agua bruta, aumentando el nivel de ensuciamiento (“*fouling*”) del sistema de enfriamiento.

En sistemas de recirculación abiertos, son introducidos en la torre primariamente como consecuencia del lavado de la tremenda cantidad de aire que

pasa a través de la torre. También entran en los sistemas abiertos y cerrados a través del agua de reposición contaminada o por fugas de corrientes del proceso.

Los sistemas de enfriamiento proveen condiciones óptimas para el crecimiento de microorganismos agua, nutrientes para el crecimiento, temperatura ideal, rango preferido de pH.

Las necesidades de nutrientes de los microorganismos son sencillas. Básicamente, necesitan de las fuentes como el carbono, nitrógeno y un poco de fósforo. Estos elementos pueden estar en el agua de reposición, fuga de las corrientes del proceso, pueden ser lavadas del aire, lixiviados de la madera de la torre, o agregadas como productos químicos de tratamiento de corrosión o deposición. Muchas especies necesitan oxígeno para crecer, pero el oxígeno existe en abundancia en los sistemas de recirculación abiertos. En realidad, algunos organismos prefieren la ausencia de oxígeno.

A continuación se mencionan las características generales de los microorganismos. Primero, como dice el nombre, son sumamente pequeños, es necesario un microscopio para poder verlos. Lamentablemente, una segunda característica es su potencial de crecimiento rápido. Los microorganismos se reproducen a un ritmo fenomenal porque típicamente crecen por división celular una determinada célula crece y se divide en dos células hijas. Estas dos células entonces crecen y se dividen en cuatro células, después ocho, etc. Eso lleva a un crecimiento explosivo y a grandes poblaciones, lo que es su tercera característica. Cuando las poblaciones crecen demasiado, forman colonias que pueden ser vistas a ojo.

Los microorganismos también son flexibles respecto al medio ambiente. Además de que existen innumerables especies, ellos sufren mutación rápidamente, cambiando su bioquímica básica a medida que el ambiente cambia. Esos organismos

son nutricionalmente versátiles pues se adaptan a cambios en el alimento disponible y pueden usar miles de compuestos distintos para sobrevivir.<sup>12</sup>

#### 2.4.2.6. Control del Crecimiento Microbiológico

Existen tres tipos generales de productos usados para controlar el ensuciamiento microbiológico:

- Biocidas:       (1) biocidas oxidantes.  
                          (2) biocidas no oxidantes.
- Surfactantes:   (3) biodispersantes.

Los **biocidas** matan los microorganismos. Lo hacen por oxidación, como ocurren con el cloro y el bromo, o mediante un mecanismo no oxidante. Los biodispersantes son surfactantes especiales que rompen la capa protectora de lodo de *biofilmes* y ayudan al biocida a llegar a los organismos y matarlos. Los biodispersantes, por sí mismos, no son tóxicos para los microorganismos; sin embargo, es una manera astuta de mejorar el desempeño del biocida a costo relativamente bajo, con mínimo impacto ambiental.

Los **biocidas oxidantes** son productos químicos muy reactivos que, en realidad, “quemar” todos los compuestos que el oxidante ataca. Los oxidantes buscan típicamente estructuras que contienen carbono complejo. Ellos abren las paredes celulares. Destruyen los materiales de soporte de vida, como proteínas, enzimas y ADN. Como no son selectivos, los oxidantes son eficaces contra un amplio rango de organismos.

Los biocidas oxidantes incluyen cloro gas, hipoclorito de sodio, compuestos bromo-cloro y ozono. El cloro gas se usa para tratar el agua bruta entrante, sistemas de enfriamiento y algunas corrientes de efluentes. Preocupaciones recientes con el riesgo de almacenaje de los cilindros de cloro gas en la planta, han llevado a muchos usuarios a considerar biocidas alternativos.

El hipoclorito de sodio, es cloro en forma líquida. Provee más o menos la misma química desinfectante que el cloro gas, pero elimina la necesidad de cilindros de gas presurizado. Sin embargo es un producto químico muy peligroso y extremadamente corrosivo. Está disponible comercialmente como solución diluida. Una cantidad de hipoclorito considerablemente mayor que cloro gas se necesita para obtener el mismo nivel de desinfección. Esto quiere decir que el hipoclorito exige instalaciones de almacenaje y alimentación amplias y onerosas.

Existe una química nueva que trae muchos beneficios de matanza por oxidación, que es mucho más segura para almacenar y dosificar. Está basada en un compuesto orgánico de bromo-cloro. El material es suministrado como un sólido que se disuelve lentamente en una dosificadora, liberando bromo y cloro en el agua. Aunque el producto propiamente dicho sea más caro que un detergente, los sistemas de dosificación son considerablemente más baratos y el material es mucho más seguro que el hipoclorito o cloro gas.

La nueva combinación química bromo-cloro actúa bien en aguas con alto contenido de amoníaco y alto pH. Y también en donde el tiempo de contacto es limitado. Además está demostrado que es menos corrosivo que el cloro para la metalurgia del sistema, especialmente metales amarillos.

El ozono es otro biocida oxidante usado en sistemas de enfriamiento. Es tan inestable que necesita ser generado "*in-situ*", cercano al sistema de enfriamiento. Los

generadores de ozono son onerosos respecto a capital, mantenimiento y energía; sin embargo, el ozono es un biocida efectivo contra la mayoría de las poblaciones biológicas. Desgraciadamente, es incompatible con muchos de los productos de tratamiento de enfriamiento y, como cualquier oxidante, si fuera sobredosificado puede causar corrosión.

Los **biocidas no oxidantes** son mucho más específicos por la manera como atacan los microorganismos. En lugar de la química de “quemar” del cloro, los no oxidantes interactúan con la membrana que circunda un organismo o interfieren con su actividad metabólica.

La membrana celular es crítica para la supervivencia del organismo. La membrana regula los materiales que entran y salen de la célula. Algunos biocidas dañan selectivamente la membrana celular. Con una membrana dañada, la célula pierde control sobre su ambiente interno y muere.

Otros biocidas entran en la célula y envenenan una actividad bioquímica específica dentro de ella. Existen muchas reacciones bioquímicas que ocurren en cada célula: producción de energía, movimentación de nutrientes interno de la célula, uso de nutrientes para fabricar nuevo material celular y división celular. Interfiere con muchas de estas reacciones o daña una reacción crítica y la célula muere.

Como los biocidas no oxidantes son más específicos que los oxidantes, un biocida no oxidante puede no ser efectivo contra todos los organismos en un sistema de enfriamiento. Nos toca hacer pruebas para elegir el biocida correcto y la dosificación más eficiente respecto a costo. Con frecuencia es necesario cambiar biocidas a medida que las poblaciones microbianas cambian. Existen combinaciones especiales de biocidas. Múltiplos activos expanden el rango de mortalidad y a veces



son más activos que sus componentes individuales usados solos. Los activos múltiples también pueden proveer mejor control microbiano en dosis más bajas.<sup>11</sup>

#### **2.4.3. Descripción del Sistema de Enfriamiento de METOR S.A.**

El sistema de agua de enfriamiento (CW) de METOR S.A., tiene como objetivo suplir agua a los distintos intercambiadores de la planta con la finalidad de enfriar tanto las corrientes de proceso como las corrientes de servicio.

La alimentación al sistema CW o agua de reposición (*Make-up*), la cual representa el agua que se requiere para recuperar las pérdidas totales por evaporación, arrastre, purgas y pequeñas fugas, proviene del cabezal de suministro de agua filtrada (FTW), el cual es suplido por el tanque TK-610 mediante las bombas P-610 A/B.

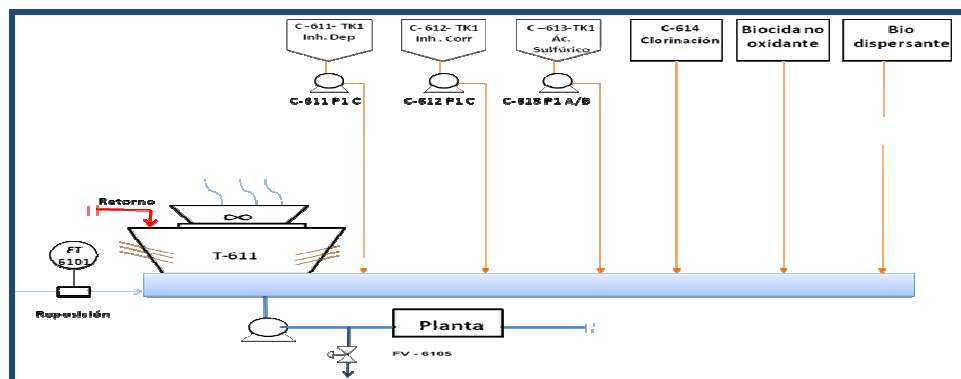
El agua proveniente del cabezal de retorno CW entra a la torre de enfriamiento (T-611) a una temperatura de 45°C, donde es enfriada hasta 34°C. Este proceso de enfriamiento es llevado a cabo mediante transferencia de calor del agua en contracorriente con el aire. El aire es aspirado verticalmente mediante ventiladores (T-611-K1 A~G) ubicados en siete celdas en la parte superior de la torre, la corriente de aire pasa a través del relleno del empaque de película en contracorriente con el agua y es descargado a la atmósfera. El agua caliente entra por la parte superior de la torre y se distribuye en siete ramales que alimentan cada celda. En la figura 8., se muestra el diagrama del sistema de enfriamiento.

El sistema de agua de enfriamiento consiste en dos circuitos: el primero CW provee la mayor parte del agua de enfriamiento a la planta y el otro CW(E), suministra agua a los equipos pequeños y más críticos de la planta. La razón de esta distribución obedece a la necesidad de contar con un sistema de envío de agua permanente a los equipos críticos para su parada y del resto de la planta en forma

segura. En operación normal, el agua de enfriamiento es suministrada a ambos circuitos mediante las bombas de circulación de agua de enfriamiento (P-611A/B/C/D) (tres en operación y una de reserva), a un caudal de diseño de 13380 m<sup>3</sup>/h al circuito principal y 920m<sup>3</sup>/h al circuito de emergencia. El circuito principal y el de emergencia están conectados a un mismo cabezal de retorno. Estos detalles de equipos y distribución de los mismos en el sistema de enfriamiento pueden ser observados en el capítulo 3 en las figuras 3.2 y 3.3.

La metalurgia asociada al sistema de enfriamiento de la planta se basa principalmente en acero al carbono, también aunque en menor proporción en el sistema de enfriamiento están presente los siguientes materiales: aluminio, acero inoxidable, latón *admiralty*, cobre y otras aleaciones de cobre (metales amarillos).

El sistema CW de la planta cuenta c un sistema de filtración, conformado por tres filtros con una capacidad de diseño de 240t/h cada uno, dando un total de 720 t/h, lo que representa un 5% de la capacidad de la torre (T-611). Este sistema permite remover los sólidos suspendidos en el agua de enfriamiento mediante un material poroso contenido en cada filtro.



**Figura 8.** Diagrama del sistema de enfriamiento de METOR S.A.

Para prevenir los problemas asociados al agua de enfriamiento se emplea un tratamiento químico basado en la inyección de ciertos productos químicos en un único punto de dosificación en la piscina de la torre. El programa de tratamiento incluye un polímero dispersante que se encarga de prevenir los depósitos, un inhibidor de corrosión basado en ortofosfato ( $O-PO_4$ ), ácido sulfúrico para mantener el pH en un rango de 8,2-8,8 por diseño, además de emplear cloro gas para el control de los microorganismos, todos ellos aplicados de manera continua. Adicionalmente se aplican choques periódicos de un biocida no oxidante y un biodispersante.

## **2.5 Fundamentos de Control Automático de Diferentes Tecnologías Disponibles en el Mercado para la Automatización de los Sistemas BFW y CW**

### **2.5.1. Equipo Controlador que Opera en Calderas de Diferentes Niveles de Presión y en Torres de Enfriamiento**

#### **2.5.1.1. Sistema BFW**

La propuesta plantea la incorporación de un equipo de control automatizado, el cual ha sido diseñado para funcionar en diferentes niveles de presión. A dicho equipo de control deben ser incorporadas las mediciones del residual de hidrazina y de pH, de los sensores que se encuentran en planta, con lo cual se logrará la dosificación automática del secuestrante de oxígeno y estabilizante, cuando el equipo detecte alguna fluctuación en el proceso.

Adicionalmente el equipo controlador tiene la capacidad de recibir señales analógicas y digitales que permiten la incorporación de cualquier variable requerida del proceso de tratamiento en sí, del sistema condensado y/o del sistema desmineralizador. También puede efectuar el control de las purgas de las calderas a

través de ciclos de concentración. Los detalles pueden ser observados en el anexo A.<sup>113</sup>

### **2.5.1.2. Sistema CW**

La opción de tratamiento químico automatizado patentado por una determinada casa tratante, se basa en el empleo de un equipo de control computarizado, el cual funciona acompañado de un equipo que mide el residual del polímero contenido en el dispersante de forma directa, para el monitoreo completo del sistema de enfriamiento se incluyen medidor de pH, medidor de potencial de óxido-reducción (ORP) y un medidor de conductividad.

Esta opción permite el control de los componentes que integran el tratamiento químico en un sistema de enfriamiento. Permite monitorear y controlar residual del polímero dispersante que se encuentra contenido en el inhibidor de depósitos, dosificación del inhibidor de corrosión, valor del pH, residual de cloro libre y los ciclos de concentración basados en conductividad.

Como los sistemas de enfriamiento son dinámicos, ocurren fluctuaciones en los parámetros de control. En la medida que se modifique alguno de ellos, el sistema automatizado tomará las acciones correctivas del caso.

El sistema automatizado tiene el control de la aplicación de los productos del tratamiento, los cuales se hacen de manera tal que los inhibidores de corrosión e incrustación, ácido sulfúrico, biocida oxidante se hagan de manera continua, en función del residual de polímero contenido en el producto inhibidor de incrustaciones, flujo de agua de reposición, pH, residual de cloro y ciclos de concentración medidos por conductividad. El biocida no oxidante y el biodispersante

se aplicarán por choques controlados a través del sistema automático, dependiendo de la necesidad del sistema de enfriamiento.

En la medida que ocurren cambios en el proceso, tal como, en el flujo de agua de reposición o recirculación, residual de polímero, cambio del pH, residual de cloro, conductividad del agua de reposición para en el sistema de enfriamiento, el sistema de control automatizado compensará estos cambios de manera automática con la reducción o el aumento en la dosificación de los productos químicos inhibidores de corrosión e incrustaciones, ácido sulfúrico y/o cloro, con el objeto de garantizar los residuales establecidos en función del nuevo cambio en el sistema. En el anexo A, se reflejan los detalles de este sistema automatizado.<sup>13</sup>

### **2.5.2. Equipo Controlador que Basa su Operación en la Medición de las Condiciones Reductoras y Oxidantes del Agua de Alimentación a Temperatura y Presión Real del Sistema (AT-ORP) Calderas de Alta y Media Presión**

Para el sistema BFW, se debe incorporar un equipo computarizado de control desarrollado y patentado para trabajar con calderas que funcionan en diferentes niveles de presión, este equipo mide la presencia de agentes reductores y oxidantes en el agua de alimentación de calderas a las condiciones de temperatura y presión real del sistema. Esto permite tener un acercamiento real a las condiciones de estrés del sistema de agua de alimentación a calderas, lo cual permite optimizar el control de corrosión en dicho sistema, controlando automáticamente la adición del secuestrante de oxígeno y estabilizador, empleado como parte del tratamiento químico.

Con este control cualquier entrada adicional de oxígeno por succión en las bombas o mal desempeño en el desaireador, fluctuaciones de vapor, problemas asociados a bandejas, entre otros, será inmediatamente detectada. La señal de medición va a un controlador el cual está conectado a la red y este informa en tiempo

real las lecturas detectadas enviando señal a la bomba de secuestrante de oxígeno y estabilizador para mantener en rango los parámetros de control del tratamiento.

En otras palabras actuará a cambios de flujo, cambios de temperaturas, mayor o menor presencia de especies químicas y cambio de condiciones mecánicas de los sistemas del proceso.<sup>14</sup>

### **2.5.3. Equipo Controlador que Basa su Operación en la Medición por Fluorescencia en Sistemas de Enfriamiento**

La tecnología se basa en la incorporación de moléculas que pueden ser medidas a través de fluorescencia en los productos claves del tratamiento. Esta opción plantea incorporar dentro del sistema un equipo computarizado de control, cuyo equipo está compuesto por un fluorómetro, una probeta de medición de pH, una probeta de medición de ORP, un medidor de conductividad inductiva (para el control de la purga por ciclos de concentración), una probeta de corrosión de acero al carbono y una probeta de corrosión de aleaciones de cobre.

La propuesta de automatización se basa en el monitoreo de las variables más críticas para el sistema de enfriamiento, considerando como prioridades el control del estrés del sistema. Donde estrés se refiere a las variaciones que pueda sufrir el flujo de reposición, conductividad, pH, cloro residual, concentración de agentes reductores, variaciones en la carga del proceso, residuales de los productos químicos empleados en el tratamiento, entre otras condiciones. De tal manera que el equipo al percibir cualquiera de estas variaciones automáticamente tome las acciones correctivas pertinentes. En el capítulo 3 se observan los detalles de esta opción.<sup>14</sup>

## 2.6. Fundamentos de Control Predictivo

El control predictivo tiene como objetivo resolver de forma efectiva, problemas de control y automatización de procesos industriales que se caractericen por presentar un comportamiento dinámico complicado, multivariable y/o inestable. La estrategia de control en que se basa este tipo de control, utiliza el modelo matemático del proceso a controlar para predecir el comportamiento futuro de dicho sistema, y en base a este comportamiento futuro puede predecir la señal de control futura. El control predictivo integra disciplinas como el control óptimo, control estocástico, control de procesos con retardo de tiempo, control multivariable, control con restricciones.

El tipo de control predictivo más aplicado es control predictivo basado en modelo (CPBM), conocido también como *model based predictive control* (MBPC) o simplemente *model predictive control* (MPC). Esta estrategia también se conoce como control por horizonte deslizante, por ser ésta la forma en que se aplican las señales de actuación.

El control predictivo basado en modelo se puede definir como una estrategia de control que se basa en la utilización de forma explícita de un modelo matemático interno del proceso a controlar (modelo de predicción), el cual se utiliza para predecir la evolución de las variables a controlar a lo largo de un horizonte temporal de predicción especificado por el operador, de este modo se puede calcular las variables manipuladas futuras (señal de control futura) para lograr que en dicho horizonte, las variables controladas converjan en sus respectivos valores de referencia.

El MPC se enmarca dentro de los controladores óptimos, es decir aquellos en los que las actuaciones responden a la optimización de un criterio. El criterio a optimizar o función de costo, está relacionado con el comportamiento futuro del

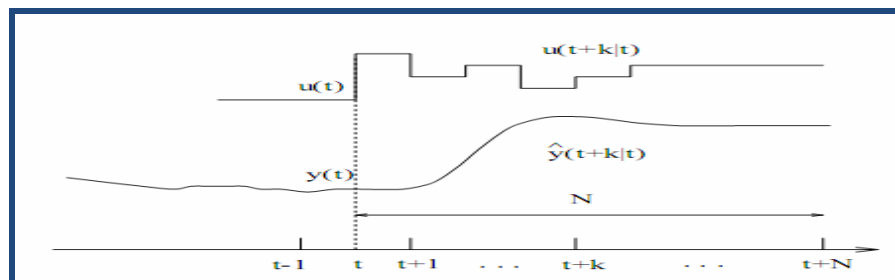
sistema, que se predice gracias a un modelo dinámico del mismo, denominado modelo de predicción.

El intervalo de tiempo futuro que se considera en la optimización se denomina horizonte de predicción. Dado que el comportamiento futuro del sistema dependen de las actuaciones que se aplican a lo largo del horizonte de predicción, son éstas las variables de decisión respecto a las que se optimiza el sistema. La aplicación de estas actuaciones sobre el sistema conduce a un control en bucle abierto.

La posible discrepancia entre el comportamiento predictivo y el comportamiento real del sistema crean la necesidad de imponer cierta robustez al sistema incorporando realimentación del mismo. Esta realimentación se consigue gracias a la técnica del horizonte deslizante que consiste en aplicar las actuaciones obtenidas durante un periodo de tiempo, tras el cual se muestrea el estado del sistema y se resuelve un nuevo problema de optimización. De esta manera el horizonte de predicción se va deslizando a lo largo del tiempo.<sup>15</sup>

### 2.6.1. Estrategia de los Controladores

La metodología de todos los controladores pertenecientes a la familia del MPC se caracteriza por la estrategia siguiente, representada en la figura 2.8.



**Figura 9.** Estrategia del control predictivo.



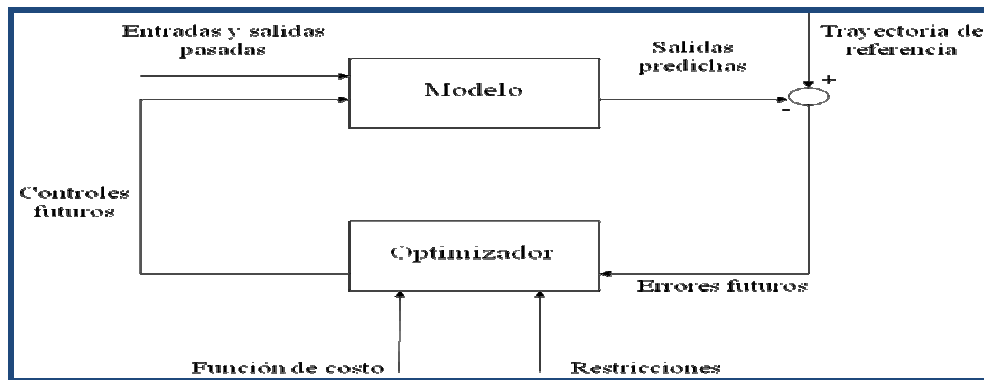
1. En cada instante  $t$  y haciendo uso del modelo del proceso se predicen las futuras salidas para un determinado horizonte  $N$ , llamado horizonte de predicción. Estas salidas predichas  $\hat{y}(t + k|t)$  para  $k=1\dots N$  depende de los valores conocidos hasta el instante  $t$  (entradas y salidas pasadas) y de las señales de control futuras  $u(t + k|t)$ ,  $k=0\dots N-1$  que se pretende mandar al sistema y que son las que se quieren calcular.

2. El conjunto de señales de control futuras se calcula optimizando un determinado criterio en el que se pretende mantener el proceso lo más próximo posible a la trayectoria de referencia  $w(t + k)$  (que puede ser directamente el *setpoint* o una suave aproximación a éste). Este criterio suele tomar la forma de una función cuadrática de los errores entre la salida predicha y la trayectoria de referencia también predicha, incluyendo en muchos casos el esfuerzo de control. Si el criterio es cuadrático, el modelo lineal y no existen restricciones se puede obtener una solución explícita, en otro caso se debe usar un método iterativo de optimización. Adicionalmente se hace alguna suposición sobre la estructura de la ley de control futura, como por ejemplo que va a ser constante a partir de cierto instante.

3. La señal de control  $u(t|t)$  es enviada al proceso mientras que las siguientes señales de control calculadas son desechadas, puesto que en el siguiente instante de muestreo ya se conoce  $y(t + 1)$  y se repite el paso 1 con este nuevo valor y todas las secuencias son actualizadas. Se calcula por tanto  $u(t + 1|t + 1)$  (que en principio será diferente al  $u(t+1|t)$  al disponer de nueva información), haciendo uso del concepto de horizonte deslizante.

Para llevar a cabo esta estrategia, se usa una estructura como la mostrada en la figura 2.9. Se hace uso de un modelo para predecir las salidas futuras del proceso, basándose en las futuras señales de control propuestas. Estas señales son calculadas por el optimizador teniendo en cuenta la función de costo (donde aparece el futuro error de seguimiento) así como las restricciones. Por tanto el modelo juega un papel

decisivo en el controlador. El modelo elegido debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso para poder predecir las salidas futuras al mismo tiempo que debe ser sencillo de usar y de comprender.



**Figura 10.** Estructura básica del MPC.

El optimizador es otra parte fundamental de la estrategia pues proporciona las acciones de control. Si la función de costo es cuadrática, el mínimo se puede obtener como una función explícita de las entradas y salidas pasadas y de la trayectoria de referencia. Sin embargo, cuando existen restricciones de desigualdad la solución debe ser calculada por métodos numéricos con más carga de cálculo.<sup>17</sup>

### 2.6.2. Ventajas y Desventajas del Control Predictivo

Entre las ventajas se pueden citar:

- Formulación en el dominio del tiempo, lo cual le permite ser una técnica flexible, abierta e intuitiva.
- Permite tratar con sistemas lineales y no lineales, monovariantes y multivariantes utilizando la misma formulación para los algoritmos del controlador.

- La ley de control responde a criterios de optimización.
- Permite la incorporación de restricciones en la síntesis o implementación del controlador.
- Brinda la posibilidad de incorporar restricciones en el cálculo de las actuaciones.

Entre las desventajas se pueden citar:

- Requiere el conocimiento de un modelo dinámico del sistema suficientemente preciso.
- Requiere un algoritmo de optimización, por lo que sólo se podría implementar por medio de una computadora.
- Requiere de un alto costo computacional, lo que hace difícil su aplicación a sistemas rápidos.
- Hasta hace relativamente poco, no se podía garantizar la estabilidad de los controladores, especialmente en el caso con restricciones. Esto hacía que el ajuste de estos controladores fuese heurístico y si un conocimiento de cómo podían influir los parámetros en la estabilidad del sistema.<sup>16</sup>

### **2.6.3. Elementos del Control Predictivo**

Hay una serie de elementos comunes a todos los controladores predictivos:

- El uso de un modelo matemático del proceso que se utiliza para predecir la evolución futura de las variables controladas sobre un horizonte de predicción.
- La imposición de una estructura en las variables manipuladas futuras.

- El establecimiento de una trayectoria deseada futura, o referencia, para las variables controladas.
- El cálculo de las variables manipuladas optimizando una cierta función de costo.
- La aplicación del control siguiendo una política de horizonte móvil.
- Los modelos internos que se usan para predecir el comportamiento del sistema pueden ser de diversos tipos función de transferencia, respuesta al impulso, respuesta al escalón, espacio-estado.<sup>15</sup>

En el anexo B, se muestra la propuesta de automatización basada en control predictivo.

## CAPÍTULO III

### DESARROLLO DEL PROYECTO

#### **3.1. Identificación de las Variables Claves para el Control y Regulación de los Procesos de Estudio**

Para llevar a cabo el desarrollo de este objetivo, inicialmente se realizó un estudio exhaustivo del tratamiento químico del agua de alimentación para calderas (BFW) y del agua de enfriamiento (CW). Este estudio comprendió la recopilación de la información, descripción detallada de los procesos mencionados (incluyendo los equipos involucrados) a través de libros de información de planta, lecturas y análisis de diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID's) y diagramas de flujo de procesos (PFD), así como también recorridos en planta que permitieron verificar la información recopilada y visitas a plantas vecinas para conocer como realizan el tratamiento en las áreas de estudio de interés de este proyecto. Además de información teórica que permitió verificar cual de las variables estudiadas son claves o críticas en el proceso de automatización de sistemas de tratamiento de aguas para BFW y CW.

Para la identificación de las variables claves para el control de los procesos estudiados se tomó en cuenta las variables con mayor criticidad y que influyen directamente los problemas que se presentan en los sistemas estudiados (corrosión, depósitos o incrustaciones, crecimiento microbiológico, etc.). De igual forma, se tomó en cuenta las variables que típicamente controlan las casas tratantes de aguas de procesos.

Se realizaron visitas a planta con lo que se verificó la información recopilada en la investigación previa. Las visitas se hicieron en todas las unidades de procesos para la producción de metanol y específicamente el sistema de agua para generación de vapor y sistema de agua de enfriamiento (Sección 600, unidad

de servicios industriales). Este estudio permitió conocer la calidad de agua que es requerida por cada proceso, los equipos principales que lo conforman, parámetros medidos para el control del tratamiento químico, entre otros aspectos. En dicho estudio se tomó en cuenta la información suministrada por el personal de planta especializado (ingenieros y operadores de planta).

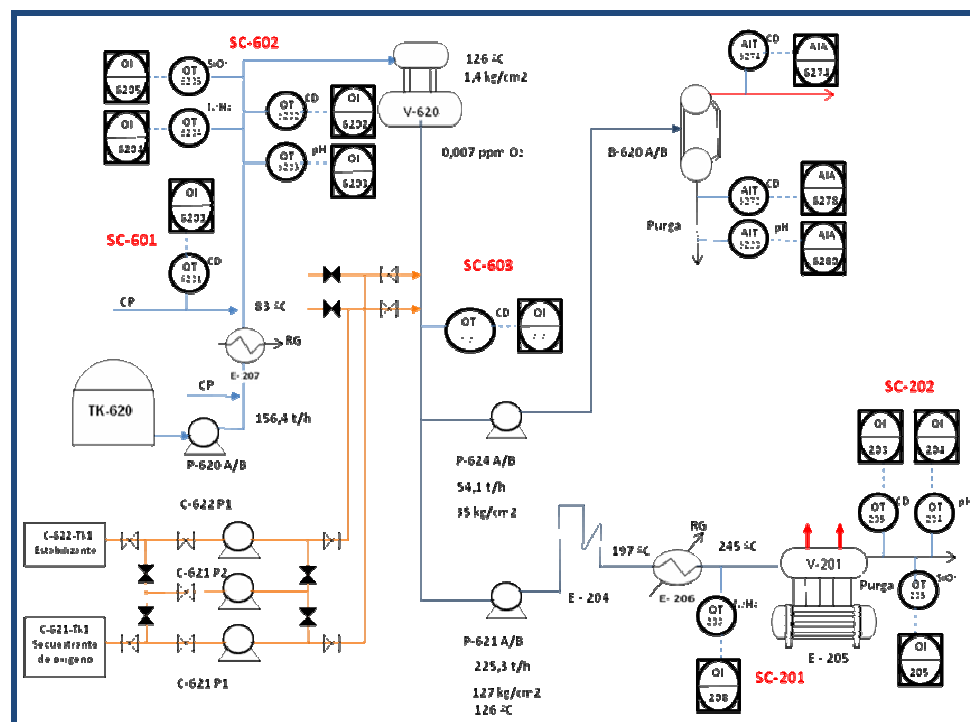
La recolección de la información se realizó tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Calidad de agua de entrada al proceso.
- Equipos principales involucrados en el sistema y particularmente en el tratamiento químico (tanques de almacenamiento, bombas dosificadoras, entre otros).
- Tipos de productos químicos empleados actualmente para realizar el tratamiento de las aguas de los procesos mencionados, especificando los complejos activos de los inhibidores de depósitos y corrosión, biodispersantes, biocidas, estabilizantes, cómo funcionan dichos productos y cuáles son los parámetros establecidos para la dosificación de productos, así como el rango de control fijado para cada producto de los tratamientos y los, puntos de inyección en la planta, para ambos procesos en estudio.

Toda la información recopilada y posteriormente verificada por expertos en el tema (ingenieros y operadores de planta, de la sección 600 de la planta), permitió identificar cuáles parámetros son empleados típicamente para la dosificación de los productos químicos a través de bombas de ajuste manual, además de una investigación de las tecnologías disponibles en el mercado y cómo funcionan las mismas. Toda esta investigación permitió identificar las variables claves para el control y regulación automática de los procesos estudiados en este proyecto.

Posterior a la investigación realizada para recabar toda la información de los procesos en estudio, se elaboraron diagramas generales de los sistemas de tratamiento químico de BFW y CW, indicando en ellos los equipos principales que los conforman, lazos abiertos y cerrados de control, puntos de tomas de muestras, puntos de dosificación, así como también especificaciones de las unidades de dosificación de productos químicos utilizados en el tratamiento de las aguas de los procesos estudiados (tanques de almacenamiento y bombas dosificadoras). Dichos diagramas fueron realizados bajo ambiente PowerPoint.

La figura 3.1., representa el diagrama realizado para el sistema de BFW. Posteriormente en las figuras 3.2. y 3.3. se muestran los diagramas elaborados para el sistema de CW.



**Figura 11.** Esquema general del proceso de tratamiento de BFW

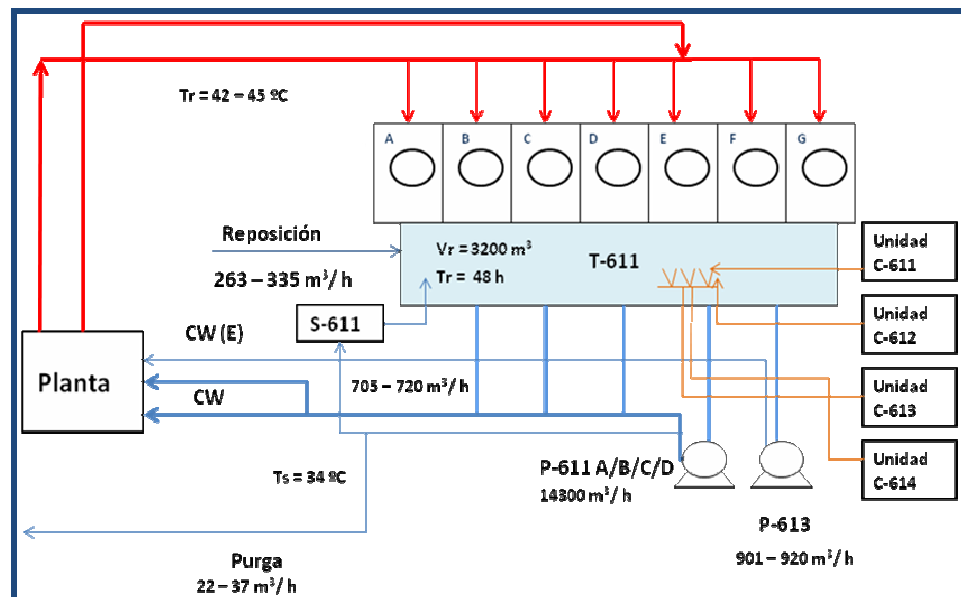


Figura 12. Esquema general del proceso de tratamiento de CW.

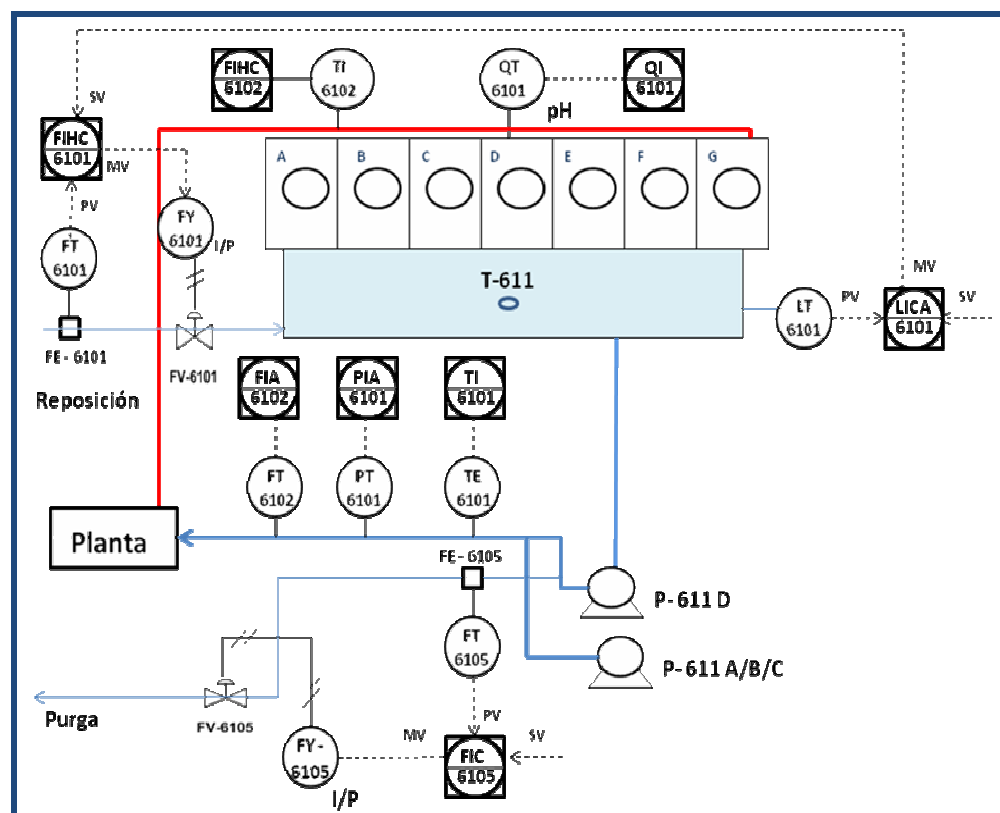


Figura 13. Lazos de control abiertos y cerrados presentes en el sistema CW



### **3.2 Evaluación Técnica de las Tecnologías Usadas en el Tratamiento Químico del Agua que Soporte la Selección de la Mejor Opción**

Para darle curso al desarrollo de este proyecto, se continuó con la evaluación de las tecnologías disponibles en el mercado y que pueden ser implementadas por METOR S.A. Inicialmente se realizó una investigación de las posibles tecnologías que aplican para el tratamiento químico automatizado para BFW y CW.

#### **3.2.1. Identificación de Tecnologías Disponibles en el Mercado para la Automatización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas.**

Se realizó una investigación de las tecnologías disponibles para los procesos de estudio. La investigación fue tomada de las siguientes fuentes de información: artículos y documentos relacionados con el tema, páginas Web e información proveída por diferentes casas tratantes de aguas de procesos.

#### **3.2.2. Selección Preliminar de Tecnologías**

A través de la revisión realizada se pudo conocer que en el mercado se presentan una serie de opciones para la automatización tanto de BFW como CW. Sin embargo, algunas de estas tecnologías pueden ser aplicadas sólo a CW y no a BFW y viceversa, en algunos casos no contemplan la automatización de todas las variables requeridas para el funcionamiento óptimo que se espera de un tratamiento químico automatizado, así como tampoco se cuenta con evidencia de su aplicación en Venezuela y específicamente en la zona donde se encuentra ubicada la planta en estudio.

Todo esto conllevó a reducir las opciones que se presentan en el mercado. Fue así como se preseleccionaron las tecnologías ofrecidas por dos casas tratantes en específico, esto debido a la experiencia de trabajo que ha tenido la empresa con

dichas casas tratantes y la aplicación de estas tecnologías en empresas vecinas. Adicionalmente se presenta una tercera opción, propuesta por la propia empresa.

### **3.2.3. Ventajas y Desventajas de las Opciones Preseleccionadas**

#### **3.2.3.1. Opción 1**

Las ventajas y desventajas de la opción 1, basada en algoritmos de control preconfigurados para sistemas de generación de vapor y sistemas de enfriamiento, se citan a continuación:

##### **Ventajas**

- Control automático del secuestrante de oxígeno por medio de la medición de  $N_2H_4$ .
- Control automático del pH por medio de la medición del mismo en el sistema.
- Control automático de la purga de calderas de alta y media presión así como de torres de enfriamiento, por medio de la medición de conductividad y cálculo de los ciclos de concentración.
- Control automático directo del inhibidor de depósitos por medio de la medición del componente activo presente en el producto.
- Control automático indirecto (a través de ciclos de concentración) del inhibidor de corrosión.
- Control directo del ácido sulfúrico empleado en CW, a través de la medición del pH.
- Control automático del cloro gas empleado en CW, a través de la medición de las condiciones reductoras y oxidantes del agua (ORP).
- Control automático del biocida no oxidante y biodispersante mediante la configuración de temporizadores en el equipo controlador.

- La posibilidad del cambio de tecnología durante operación normal, no es tan riesgoso porque actualmente se opera con los productos de esta casa tratante.
- Permite la incorporación de señales analógicas y digitales que permiten incrementar el monitoreo.
- El equipo controlador posee algoritmos de control preconfigurados para monitoreo y control de un amplio rango de procesos, entre ellos calderas de alta y media presión, sistemas de enfriamiento, sistemas de efluentes entre otros.
- El equipo tiene la capacidad de comunicarse con el DCS de la planta, el estado del sistema puede ser supervisado desde la Web, emitir alarmas y reportes sobre las condiciones detectadas durante su operación y monitoreo.

### **Desventajas**

- No mide el potencial de óxido-reducción a P y T real del sistema (AT-ORP) del agua de alimentación a calderas.
- La medición de conductividad se realiza a través de probetas convencionales susceptibles al ensuciamiento.
- La tecnología planteada por esta opción no ha sido aplicada en Venezuela para el sistema BFW y para el sistema CW se ha implementado pero no en la zona donde se encuentra la planta estudiada.
- La medición del componente activo presente en el inhibidor de corrosión se realiza cada hora.
- No mide el componente activo presente en el inhibidor de depósitos, el control de este producto se realizaría de forma indirecta.
- No mide la corrosión de sistemas de enfriamiento en tiempo real (en línea).
- No mide la concentración de especies incrustantes en sistemas de enfriamiento en tiempo real (en línea).

- Al cambiar de casa tratante de agua de procesos, se deberá efectuar un nuevo proceso de automatización a los sistemas debido a que estas casas son dueñas de los equipos controladores que patentan para la automatización de los procesos estudiados.
- El reemplazo de partes y el mantenimiento y calibración de equipos se debe realizar cada tres meses, específicamente para el equipo encargado de la medición del componente activo presente en el inhibidor de depósitos.

### **3.2.3.2. Opción 2**

#### **A. Sistema BFW**

Las ventajas y desventajas de la opción 2, basada en algoritmos de control preconfigurados y medición del potencial de óxido-reducción a presión y temperatura real del sistema (AT-ORP) para sistemas de generación de vapor, son citadas a continuación:

#### **Ventajas**

- Para el control automático de los productos del tratamiento de calderas el equipo controlador toma en cuenta las variaciones de las condiciones de óxido-reducción del agua a P y T real del agua de alimentación a calderas.
- Control automático del secuestrante de oxígeno por medio de la medición de  $N_2H_4$ .
- Control automático del pH, por medio de la medición del mismo en el sistema.
- Control automático de la purga de calderas de alta y media presión por medio de la medición de conductividad.
- Esta tecnología ha sido aplicada en Venezuela y específicamente en el Complejo Petroquímico donde esta ubicada la planta estudiada.

- Permite la incorporación de señales analógicas y digitales que permiten incrementar el monitoreo.
- El equipo controlador posee algoritmos de control preconfigurados para monitoreo y control de calderas de alta y media presión.
- El equipo tiene la capacidad de comunicarse con el DCS de la planta, el estado del sistema puede ser supervisado desde la Web, emitir alarmas y reportes sobre las condiciones detectadas durante su operación y monitoreo.

### **Desventajas**

- El cambio de tecnología durante operación normal a esta tecnología puede repercutir negativamente en el proceso operativo de la planta, debido a que actualmente se opera este sistema con productos de otra casa tratante.
- Al cambiar de casa tratante de agua de procesos, se deberá efectuar un nuevo proceso de automatización a los sistemas debido a que estas casas son dueñas de los equipos controladores que patentan para la automatización de los procesos estudiados.

### **B. Sistema CW**

Las ventajas y desventajas de la opción 2, basada en algoritmos de control preconfigurados y medición de los parámetros claves del tratamiento por fluorescencia en sistemas de enfriamiento, son citadas a continuación:

#### **Ventajas**

- Control automático directo del inhibidor de depósitos por medio de la medición por fluorescencia del componente activo presente en el producto.

- Control automático directo del inhibidor de corrosión por medio de la medición por fluorescencia del componente activo presente en el producto.
- Control directo del ácido sulfúrico a través de la medición del pH.
- Control automático del cloro gas a través de la medición de las condiciones reductoras y oxidantes del agua (ORP).
- Control automático del biocida no oxidante y biodispersante mediante la configuración de temporizadores en el equipo controlador.
- El ciclo de detección de los parámetros claves del tratamiento se realiza en un rango de 6 y 15 segundos.
- El mantenimiento del fluorómetro y calibración de equipos se realiza mensual. El reemplazo de partes se realiza cada de 1 a 2 veces por año.
- Está tecnología ha sido ampliamente aplicada en Venezuela y en empresas vecinas a la planta estudiada.
- Mide la corrosión en línea en metalurgias de acero al carbono y metales amarillos.
- Mide la concentración de especies incrustantes en tiempo real (en línea).
- Permite la incorporación de señales analógicas y digitales que permiten incrementar el monitoreo.
- El equipo controlador posee algoritmos de control preconfigurados para monitoreo y control de torres de enfriamiento.
- El equipo tiene la capacidad de comunicarse con el DCS de la planta, el estado del sistema puede ser supervisado desde la Web, emitir alarmas y reportes sobre las condiciones detectadas durante su operación y monitoreo.

### **Desventajas**

- El cambio de tecnología durante operación normal a esta tecnología puede repercutir negativamente en el proceso operativo de la planta, debido a que actualmente se opera este sistema con productos de otra casa tratante.
- Al cambiar de casa tratante de agua de procesos, se deberá efectuar un nuevo proceso de automatización a los sistemas debido a que estas casas son dueñas de los equipos controladores que patentan para la automatización de los procesos estudiados.

#### **3.2.3.3. Opción 3 (Control Predictivo)**

Las ventajas y desventajas de la opción 3, basada en algoritmos de control predictivos configurados en el DCS de la planta tanto para el sistema de generación de vapor como el sistema de enfriamiento, son citadas a continuación:

### **Ventajas**

- Control automático del secuestrante de oxígeno por medio de la medición de  $N_2H_4$ .
- Control automático del pH por medio de la medición del mismo en el sistema.
- Control automático de la purga de calderas de alta y media presión así como de torres de enfriamiento, por medio de la medición de conductividad y cálculo de los ciclos de concentración.
- Control directo del ácido sulfúrico empleado en CW, a través de la medición del pH.
- Control automático del cloro gas empleado en CW, a través de la medición de las condiciones reductoras y oxidantes del agua (ORP).

- Control automático del biocida no oxidante y biodispersante mediante la configuración de temporizadores en el DCS de la planta.
- Los cambios efectuados en los sistemas para la automatización de los mismos, permanecerán aun si se cambiará de casa tratante debido a que estos serían realizados en el DCS de la planta.
- Los algoritmos de control empleados estarían fundamentados en los datos históricos de la planta para los procesos estudiados.

### **Desventajas**

- No mide el potencial de óxido-reducción a P y T real del sistema (AT-ORP) del agua de alimentación a calderas.
- No mide los componentes activos presentes en los inhibidores de depósitos y corrosión, el control de estos productos se realizaría de forma indirecta.
- No mide la corrosión de sistemas de enfriamiento en tiempo real (en línea).
- No mide la concentración de especies incrustantes en sistemas de enfriamiento en tiempo real (en línea).
- No permite comunicación vía Web, emisión de reportes, envío de correos a custodios de los sistemas estudiados.

### **3.2.4. Evaluación Técnica**

A través de esta evaluación se eligió cuál tecnología de las preseleccionadas anteriormente ofrece mayores ventajas y beneficios para METOR S.A. En el capítulo 4 serán discutidas las ventajas y desventajas de mayor importancia relacionadas con las tecnologías de tratamiento químico automatizado, que de esta manera soporte la selección de la mejor opción para la empresa. Para el desarrollo de esta evaluación técnica, se clasificaron diferentes aspectos para BFW y CW.



### **3.2.4.1. BFW**

Las opciones preseleccionadas proponen para la automatización del tratamiento químico de BFW, una serie de aspectos operacionales, mecánicos y químicos que permiten conocer las virtudes y debilidades que ofrecen cada una de las opciones estudiadas. A continuación se mencionan todo estos aspectos:

#### **A. Control del Inhibidor de Corrosión por Oxígeno Disuelto**

Se estudio principalmente cómo las diferentes alternativas evaluadas controlan la dosificación del secuestrante de oxígeno, qué tipo de control emplean y si tienen la capacidad de monitorear el residual de oxígeno disuelto.

#### **B. Control del Inhibidor de Corrosión por pH**

Este aspecto se estudió de manera similar al control del inhibidor de corrosión por oxígeno disuelto.

#### **C. Control de Purga de la Caldera**

Con la medición de la conductividad en la purga de la caldera se controla el flujo de la misma así como los ciclos de concentración en la caldera, para mantener de esta forma en el rango de control establecido las especies que se encuentran disueltas en el agua de calderas.

#### **D. Mantenimiento y Calibración de Equipos**

Este aspecto se refiere al mantenimiento mínimo que se debe realizar a los equipos, por ejemplo, cambio de algún instrumento establecido de forma periódica, reemplazo de partes (probetas de medición, mangueras, filtros, entre otros) así como también determinar el período de calibración mínimo de instrumentos para confiar en la operación de los equipos utilizados.

### **E. Posibilidad de Realizar el Cambio de Tecnología Durante Operación Normal**

Se deben especificar en este aspecto si se pueden cambiar de la tecnología empleada actualmente a otra durante operación normal y cuáles son los riesgos que implica dicho cambio o si necesariamente el cambio debe ser llevado a cabo durante una parada de planta. Además se debe especificar cómo sería el periodo de transición de una tecnología a otra, cómo se trabajaría durante este tiempo y cuál es el tiempo aproximado de dicho periodo de transición.

### **F. Experiencia Operacional en Venezuela**

En este aspecto se considera sí la tecnología evaluada ha sido aplicada en el país y específicamente en las empresas que forman parte del Complejo Petroquímico, para de esta manera tener un aval que demuestre el desempeño garantizado y confiable de dicha tecnología y cuáles son los resultados que se han obtenidos después del cambio de la operación manual a automática.

### **G. Otros Aspectos**

#### **G.1. Medición del Potencial de Óxido-Reducción a las Condiciones Reales del Proceso (AT-ORP)**

Esta medición se relaciona directamente con la dosificación del secuestrante de oxígeno y del producto estabilizador. Mide las condiciones reductoras y oxidantes del agua de alimentación de calderas a la temperatura y presión real del proceso.

#### **G.2. Capacidad de Incorporar Otras Variables para Incrementar el Control y Monitoreo del Sistema**

Este aspecto se refiere a la capacidad que tienen los controladores empleados por las alternativas estudiadas para admitir señales bien sea analógicas

o digitales que permitan incorporar mediciones adicionales de conductividad, pH y especies químicas que se requieran (sílice, sodio), flujos, entre otras, bien sea en el agua de alimentación, del sistema desmineralizador o condensados de proceso, esto con el fin de mejorar el monitoreo del tratamiento químico.

### **G.3. Algoritmos de Control Preconfigurados para Monitoreo y Control de Calderas de Alta y Media Presión**

Las tecnologías disponibles en el mercado, son el resultado de varios años de estudio en diferentes plantas, que permitieron a las empresas proveedoras desarrollar algoritmos de control que se puedan adaptar prácticamente a cualquier proceso.

### **G.4. Funcionalidad del Equipo Controlador**

Se debe detallar si el equipo de control tiene la capacidad de trabajar sólo con agua para calderas, o si por el contrario tiene la capacidad de trabajar en un amplio rango de procesos como agua de enfriamiento, efluentes, y otros. Además describir si el equipo de control tiene la posibilidad de comunicarse con el sistema de control distribuido (DCS), Web, capacidad de emitir alarmas y reportes sobre las condiciones detectadas durante su operación y monitoreo.

#### **3.2.4.2. CW**

Así como en BFW para el estudio de la aplicación de una alternativa en CW, fue necesario evaluar una serie de aspectos ofrecidos por las diferentes alternativas en la automatización del tratamiento químico en este sistema.

#### **A. Control del Inhibidor de Depósitos**

En este aspecto se considera si la forma de controlar el inhibidor es directa, a través de la medición en línea del componente activo del producto controlado o

si esta medición se realiza en forma indirecta (tomando en cuenta análisis de laboratorio, índice de Langelier, ciclos de concentración o cualquier otro parámetro que se pueda emplear para dosificar el inhibidor de depósitos).

Sí se realiza la medición directa del componente activo del producto, entonces se debe especificar la frecuencia con la cual se realiza la detección de dicho componente activo y qué método emplea, instrumentos y/o equipos que se emplean para realizar esta medición.

#### **B. Control del Inhibidor de Corrosión**

Al igual que el aspecto anterior, en este se toma en cuenta si el control de la dosificación del producto se realiza de forma directa o indirecta. Especificándose cuáles son los parámetros y/o equipos que son tomados en cuentas para ejecutar el control del producto.

#### **C. Control del Ácido (Sulfúrico)**

Este control se efectúa por la medición directa del pH, en este aspecto se debe tomar en cuenta si el control es realizado de forma on/off, PID o si se emplea cualquier otro tipo de modalidad de control.

#### **D. Control del Biocida Oxidante**

Se utiliza cloro gaseoso como biocida oxidante, por ser el de uso más común, más fácil consecución y más económico. El control de la inyección de este producto se relaciona con la medición del potencial de óxido-reducción (ORP). En este aspecto se deben tomar en cuenta si los analizadores de ORP que emplea cada tecnología son compatibles con el clorinador con que se cuenta en planta, si existen facilidades para adaptar el medidor a dicho equipo o si hipotéticamente se requiriese de uno diferente.

### **E. Control del Biocida No-Oxidante y Biodispersantes**

Estos productos son de aplicación periódica es por ello que se debe evaluar que ofrecen las tecnologías para la aplicación de estos productos. Detallando si el control se realiza por temporizadores, intervalos de tiempo programados o cualquier otro tipo de control periódico de tiempo.

### **F. Control de Purga de la Torre de Enfriamiento**

Debe realizarse en base a los ciclos de concentración.

### **G. Mantenimiento y Calibración de Equipos**

Igual que para BFW.

### **H. Posibilidad de Realizar el Cambio de Tecnología Durante Operación Normal**

Igual que para BFW.

### **I. Experiencia Operacional en Venezuela**

Igual que para BFW.

### **J. Otros Aspectos**

#### **J.1. Medición de Corrosión en Línea**

Se refiere a la capacidad que tiene el equipo de control de medir o incorporar un instrumento que realice mediciones constantes (en línea) de los

niveles de la tasa de corrosión presente en el sistemas. Y conocer para qué tipo de metalurgia funciona.

### **J.2. Medición de Especies Incrustantes en Línea**

De cierta forma este aspecto es semejante al anterior, sólo que en este se controlará la concentración de especies incrustantes en el sistema.

### **J.3. Capacidad de Incorporar Otras variables para Incrementar el Control y Monitoreo del Sistema**

Igual que para BFW.

### **J.4. Algoritmos de Control Preconfigurados para Monitoreo y Control de Sistemas de Enfriamiento**

Igual que para BFW.

### **J.5. Funcionalidad del Equipo Controlador**

Igual que para BFW.

Estos aspectos mencionados y no definidos cumplen con una definición semejante a la explicada para BFW.

### **3.2.5. Ponderación y Calificación de la Matriz de Evaluación**

La ponderación fue establecida en una mesa de trabajo, que tomó en cuenta las necesidades principales en el control de tratamiento químico para las aguas de procesos estudiadas, contando con la participación de los profesionales expertos

en el tema. Se tomó en cuenta un puntaje en base a 100 %, donde se elegirá la mejor propuesta desde el punto de vista técnico.

Todos los parámetros técnicos seleccionados fueron considerados elementos de la ponderación, a los cuales se le asignó una letra o nomenclatura para la identificación en la matriz de evaluación.

A continuación se muestra la tabla 3.1 que refleja la ponderación y calificación para realizar la matriz de evaluación, como modelo general, en la cual fue considerada la siguiente escala de puntuación, definida en un rango del 1 al 4:

4: Óptimo.

3: Bueno.

2: Regular.

1: Deficiente.

Donde se define a una tecnología óptima aquella que cumpla con todos los requisitos exigidos o necesitados, en el mismo orden de ideas una tecnología es considerada como buena cuando cumple con los requisitos exigidos pero comparada con otra presente fallas mínimas, se define como regular a la tecnología que no cumple satisfactoriamente con los requisitos exigidos y deficiente a la tecnología que no cumple con ninguno de los requisitos.

El valor de la ponderación de cada aspecto, depende de la importancia de cada parámetro evaluado, así como el valor asignado definido en un rango de 1-4 el cual define la calidad de la tecnología, bien sea óptimo, bueno, regular o deficiente como se estableció; estos valores son multiplicados entre sí y divididos por el mayor valor asignado establecido (cuatro, 4)

Con la ponderación y el valor asignado a los parámetros establecidos, se obtuvo la calificación, la cual permitió la selección de la nueva tecnología para el tratamiento automatizado de BFW y CW.

**Tabla 6.** Matriz de evaluación general.

Identificación	Ponderación	Valor asignado	Calificación
A	$Y_1$	$X_1$	$A=(Y_1.X_1)/4$
B	$Y_2$	$X_2$	$B=(Y_2.X_2)/4$
C	$Y_3$	$X_3$	$C=(Y_3.X_3)/4$
:	:	:	:
N	$Y_N$	$X_N$	$N=(Y_N.X_N)/4$
Total	100	$\leq 40$	$\leq 100$

Donde:

A, B, C, N es la identificación dada a cada parámetro que se desea evaluar.

$Y_1, Y_2, Y_3, Y_N$  es un número establecido, el cual define la importancia del parámetro evaluado.

$X_1, X_2, X_3, X_N$  es un número establecido según el estudio realizado de la tecnología.

### **3.3. Propuestas de las Modificaciones Adecuadas para Mejoras del Sistema de Tratamiento Actual, Empleando un Sistema Automatizado**

Luego de haber seleccionado la tecnología más adecuada, a través de una matriz de evaluación, tanto para el sistema BFW como para CW. Se procedió a realizar la propuesta de modificación de los sistemas de tratamiento de aguas, donde se detallarán las modificaciones que deben realizarse al sistema actual para



que se pueda ejecutar el tratamiento químico de forma automática. Los diagramas realizados para la propuesta de modificación de los sistemas fueron hechos bajo ambiente PowerPoint.

En esta propuesta se deben especificar la lista de materiales y equipos que se deben emplear para llevar a cabo las modificaciones necesarias. Esto implica, especificar que instrumentos o equipos se deben incorporar al sistema actual como por ejemplo equipos de control, medidores de pH u otros tipos de medidores que deben ser empleados, bombas dosificadoras, además de definir si se requiere el cambio o adecuación de equipos que no sean compatibles con la propuesta de la tecnología automatizada. Estos detalles se pueden observar en el capítulo 4.

## **CAPÍTULO IV**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1. Discusión de Resultados**

Los sistemas de aguas que forman parte del proceso y servicios industriales de una planta, requieren de tratamiento mecánico y químico de dichas aguas. El estudio de este proyecto se basó fundamentalmente en el tratamiento químico que se aplican a este tipo de sistemas, específicamente para el sistema de agua de alimentación para calderas (BFW) y agua de enfriamiento (CW).

Para poder aplicar exitosamente este tipo de tratamiento es necesario el control y monitoreo del programa de tratamiento, de la identificación de variables así como también la aplicación de tecnología de punta que permita optimizar el tratamiento de tal manera que se minimicen los consumos de agua industrial, consumo de productos químicos, costos asociados a los sistemas y en la medida de lo posible evitar problemas operacionales que puedan repercutir en el proceso normal de la planta.

#### **4.1.1. Identificación de las Variables Claves para el Control y Regulación del Sistema BFW**

En BFW, se presentan problemas de corrosión, incrustación y arrastre, los cuales afectan tanto a las calderas como a los equipos auxiliares de un sistema de generación de vapor, por ejemplo, tuberías del sistema, economizadores, calentadores, turbinas, etc. Para ello es fundamental identificar cuales variables favorecen estos problemas y de esta manera controlarlas para minimizar los efectos adversos que puedan tener sobre el sistema.

La investigación realizada en planta permitió verificar que para minimizar estos problemas hay que partir del control de variables como residual de sílice presente en el agua, oxígeno disuelto y el pH del agua con la cual se está trabajando. Es importante mencionar, que la sílice es controlada a través de un tratamiento mecánico de desmineralización. Sin embargo, el oxígeno disuelto es controlado inicialmente con un tratamiento mecánico de desaireación y seguidamente se emplea un tratamiento químico para eliminar las nocivas trazas de este gas. El pH del agua es controlado por medio de un tratamiento químico.

Para el sistema BFW, el tratamiento químico está basado principalmente en la prevención de corrosión por pH y oxígeno disuelto en el agua. Es de destacar, que el agua de alimentación para calderas inicialmente es sometida a un tratamiento externo del agua, comenzando con un proceso de desmineralización, y posteriormente dicha agua es sometida a un proceso de desaireación. El tratamiento externo del agua en combinación con el tratamiento químico que se emplea permite prevenir problemas de incrustación y corrosión. Los problemas de arrastre son minimizados por el diseño adecuado del sistema para generación de vapor.

De todo esto, surge la necesidad de mantener un estricto control automatizado para prevenir problemas por corrosión, debido a que los problemas por incrustación se controlan de manera óptima a través de un tratamiento mecánico al igual que el problema de arrastre. Si se aplicará el control automatizado del tratamiento químico de BFW se lograría la optimización del tratamiento químico aplicado al sistema de generación de vapor de la planta METOR S.A., ganando confiabilidad y seguridad de la operación de este sistema. Esto debido al control estricto de las variables que ofrece un proceso automatizado.

#### **4.1.1.1. pH**

El pH es un factor clave para el tratamiento químico, manteniéndolo en un rango determinado en el agua de alimentación para calderas se logra prevenir la corrosión por este factor.

El control del pH en planta se logra a través de la dosificación de un producto estabilizante, verificándose la eficiencia de dicho producto por los análisis de pH que se efectúan para monitorear el tratamiento en el sistema.

Cambios por encima o por debajo del rango de control de pH establecidos para BFW, implicará problemas de corrosión asociados a la metalurgia del sistema.

#### **4.1.1.2. Residual de oxígeno disuelto**

El control de los gases disueltos en el agua es de vital importancia en BFW, principalmente el oxígeno disuelto. Mantener un residual de casi 0 ppm de oxígeno disuelto en el agua permite prevenir los daños por corrosión asociados a la presencia de este gas cuando se encuentra en el agua.

En planta se emplea para el control químico de este parámetro la dosificación de un secuestrante de oxígeno a base de hidrazina ( $N_2H_4$ ), y el monitoreo se realiza a través de análisis del residual de  $N_2H_4$  en el agua para verificar si se está cumpliendo con las condiciones establecidas por el tratamiento que requiere el sistema.

#### **4.1.2. Identificación de las Variables Claves en el Control y Regulación del Tratamiento Químico de CW**

En sistemas de agua de enfriamiento, el tratamiento químico se realiza con el objetivo de prevenir problemas de corrosión, depósitos y ensuciamiento microbiológico. Destacando que estos problemas escasas veces se presentan uno independiente del otro, generalmente la aparición de uno ellos está estrechamente relacionada con otro.

Para minimizar estos problemas es necesario la dosificación de ciertos productos químicos de tratamiento, ácido, inhibidores de corrosión y depósitos, biodispersantes y biocidas (oxidantes y no oxidantes).

La aplicación de dicho tratamiento implica un monitoreo y control del mismo, del cual se establecen las variables claves y críticas para la regulación del tratamiento químico automatizado en el sistema de enfriamiento. Dichas variables se listan a continuación:

##### **4.1.2.1. Residual de Cloro Libre**

Mantener en el rango de control establecido el residual de cloro libre, permite evitar problemas por ensuciamiento microbiológico del sistema de enfriamiento. Además un exceso de cloro en el sistema puede ocasionar daños de corrosión en el sistema.

El residual de cloro libre en la planta se logra por la dosificación del cloro gas al sistema. El control y monitoreo de este parámetro es fundamental en el tratamiento químico empleado en sistemas de enfriamiento.

#### 4.1.2.2. Residual del Componente Activo del Inhibidor de Corrosión

El monitoreo y control de este parámetro permite evitar y/o minimizar los problemas de corrosión que pueda afectar a la metalurgia del sistema CW. Para que pueda cumplir su efecto adecuadamente es necesario que se mantengan ciertas condiciones de pH en el sistema.

#### 4.1.2.3. Residual del Componente Activo del Inhibidor de Depósitos

Este parámetro al ser mantenido en el rango de control del sistema, evita los problemas asociados a los depósitos que se puedan formar en el sistema. Al igual que el parámetro anterior es preciso que se mantengan ciertas condiciones de pH, para que surta el efecto deseado en el sistema.

#### 4.1.2.4. Conductividad

El análisis de este parámetro de calidad del agua tanto en la reposición como en la recirculación de la torre permite conocer el valor de los ciclos de concentración, a través del siguiente cálculo:

$$\text{Ciclos de concentración} = \frac{[\text{Conductividad}]_{\text{Recirculación}}}{[\text{Conductividad}]_{\text{Reposición}}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Los ciclos de concentración son un parámetro que se emplea como referencia para la dosificación tanto manual como automática de productos químicos en el sistema de enfriamiento.

#### 4.1.2.5. pH

Este parámetro es de vital importancia en el tratamiento químico; permite evitar la tendencia corrosiva e incrustante del sistema, además del crecimiento de

microorganismos. El control del pH en planta se realiza a través de la dosificación de ácido sulfúrico.

Se debe destacar que el pH, entre todas las variables es considerado uno de las más críticos, debido a que esta variable está vinculada con la dosificación efectiva de los productos químicos del tratamiento de CW (inhibidor de corrosión e inhibidor de depósitos) ya que estos están diseñados para operar en un rango específico de pH. Mientras se incrementa esta variable se incrementará la tendencia incrustante en el sistema, cuando esta decrece se incrementará la tendencia corrosiva del sistema, asimismo cambios bruscos de esta variable influyen el crecimiento de microorganismos. Por todo esto, es necesario un control riguroso del pH de CW. Con respecto al crecimiento de microorganismos influenciado en gran medida por el pH, es requerida también la dosificación de biocidas para controlar y prevenir los problemas relacionados con los microorganismos en el sistema.

En el caso de la planta estudiada, ya se ha mencionado que se emplea cloro gas como biocida oxidante en combinación con choques periódicos de biocidas no oxidantes y biodispersantes. Es sumamente importante el control del residual de cloro en el sistema, porque el problema de ensuciamiento microbiológico pudiera ocurrir muy rápidamente, así como también se requiere el control del residual de cloro debido a que una dosis mayor a la requerida por el sistema ocasionará corrosión en la metalurgia asociada al sistema CW, especialmente aleaciones de cobre (metales amarillos).

Al controlar el pH y el residual de cloro rigurosamente, se garantizará la aplicación efectiva del programa de tratamiento químico del sistema CW. Para ello también es necesario monitorear los residuales de los componentes activos del inhibidor de corrosión, inhibidor de depósitos y ciclos de concentración. Todo esto con el fin de optimizar el tratamiento químico aplicado al sistema.

La optimización de los sistemas estudiados conllevará a mejorar la aplicación del tratamiento químico tanto en BFW como en CW. Esto implicaría la disminución de problemas de corrosión, incrustaciones, depósitos y ensuciamiento microbiológico principalmente.

Además de mejorar la dosificación de los productos químicos en cuanto a los problemas que ocasionan la sobredosificación y sub-dosificación. Ya que el primero permite el incremento de los costos operacionales de la planta, y en el caso de el inhibidor de corrosión aumenta la posibilidad de que se presenten problemas de depósitos cuando se trabaja con inhibidores a base de  $O-PO_4$  el cual es el caso de la planta estudiada y el segundo resulta en la desprotección de los sistemas.

Es importante el control automatizado para evitar también el error humano asociado con la manipulación de bombas de ajuste manual, así como en los análisis de laboratorio realizados para determinar el valor de los residuales de los productos químicos dosificados.

#### **4.1.3. Evaluación Técnica de las Tecnologías Usadas en el Tratamiento Químico del Agua que Soporte la Selección de la Mejor Opción**

Actualmente en el mercado existen una serie de tecnologías disponibles para automatizar el tratamiento de aguas para alimentación para calderas y sistemas de enfriamiento. Pero ello no significa que se adapten al proceso y necesidades de la planta que se está estudiando, que cuente con la experiencia necesaria en el país para ser puesta en marcha la tecnología, que el reemplazo de partes sea fácil, entre otros factores. Existe una serie de factores que conllevaron a que se hiciera una preselección de tecnología basada en los mismos.

De la preselección resultó conveniente estudiar las tecnologías propuestas por dos casas tratantes específicamente, las cuales aplican sus tratamientos



químicos y en la zona donde se encuentra la planta de estudio de este proyecto. En base a la experiencia y conocimiento que tienen los expertos en el tema del proceso de METOR S.A., se decidió plantear una alternativa basada en el empleo de algoritmos control predictivo, debido a que no son procesos lineales, con considerable tiempo muerto, entre otros aspectos que hacen difícil que estos sistemas sean controlados a través de un control convencional.

En la tabla 4.1, se muestran los resultados obtenidos para el sistema de generación de vapor (BFW).

**Tabla 7.** Matriz de evaluación para el sistema BFW

Identificación	Ponderación	Opción 1		Opción 2		Opción 3	
		Val. Asg.	Cal.	Val. Asg.	Cal.	Val. Asg.	Cal.
A	25	4	25	4	25	4	25
B	25	4	25	4	25	4	25
C	5	4	5	4	5	4	5
D	10	4	10	4	10	3	7,5
E	15	3	11,25	2	7,5	4	15
F	10	1	2,5	3	7,5	3	7,5
G	10	3	7,5	4	10	1	2,5
Total	100	23	86,25	25	90	23	87,5

Donde:

A: Control del inhibidor de corrosión por oxígeno disuelto.

B: Control del inhibidor de corrosión por pH.

C: Control de purga de la caldera.

D: Mantenimiento y calibración de equipos

E: Posibilidad de realizar el cambio de tecnología durante operación normal.

F: Experiencia operacional en Venezuela.

G: Otros aspectos.

Destacándose que la importancia del tratamiento está basada en la dosificación de los inhibidores de corrosión por oxígeno disuelto y pH. Seguido por la posibilidad de realizar el cambio durante operación normal, en orden de importancia se encuentra el mantenimiento y calibración que debe ser efectuado a los equipos, experiencia operacional en el país y otros aspectos de la tecnología (como funcionalidad del equipo controlador, capacidad de incorporar variables, etc.), por último se estudió si las tecnologías realizaban el control de la purga de las calderas.

A continuación se muestra la tabla 4.2, referida a los resultados obtenidos de la evaluación técnica realizada al sistema de enfriamiento (CW).

**Tabla 8.** Matriz de evaluación para el sistema CW.

Identificación	Ponderación	Opción 1		Opción 2		Opción 3	
		Val. Asg.	Cal.	Val. Asg.	Cal.	Val. Asg.	Cal.
A	10	4	10	4	10	3	7,5
B	10	3	7,5	4	10	3	7,5
C	20	4	20	4	20	4	20
D	20	4	20	4	20	4	20
E	5	4	5	3	3,75	3	3,75
F	5	4	5	4	5	4	5
G	5	4	5	4	5	4	5
H	10	3	7,5	2	5	4	10
I	5	2	2,5	4	5	3	3,75
J	10	3	7,5	4	10	1	2,5
Total	100	35	90	37	93,75	33	85

Donde:

A: Control del inhibidor de depósitos.

B: Control del inhibidor de corrosión.

C: Control del ácido (sulfúrico).

D: Control del biocida oxidante.

E: Control del biocida no-oxidante y biodispersantes.

F: Control de purga de la torre de enfriamiento.

G: Mantenimiento y calibración de equipos.

H: Posibilidad de realizar el cambio de tecnología durante operación normal.

I: Experiencia operacional en Venezuela.

J: Otros aspectos.

La importancia del tratamiento se basó principalmente en el control del ácido, el cual permite el control del pH y el control del biocida oxidante, con el control estricto de estos dos parámetros se logra controlar y/o minimizar corrosión, depósitos y ensuciamiento microbiológico. Seguidamente se dio igual importancia a los siguientes aspectos de control del inhibidor de corrosión y depósitos, posibilidad de realizar el cambio durante operación normal y otros aspectos, y los aspectos de menor importancia en la evaluación son control del biocida no oxidante y biodispersante, control de la purga de la torre de enfriamiento, mantenimiento y calibración de equipos y experiencia operacional en el país.

En base a los resultados de la evaluación técnica se determinó que tanto para BFW como CW, la mejor tecnología es la que plantea la opción 2. A pesar, de ser semejante a la opción 1 por tratarse de sistemas de automatización preconfigurados y ser competitiva frente a la opción 3. Todo esto debido a que además de ofrecer las ventajas que plantea la alternativa 1 y el control predictivo

(opción 3) adicionalmente incorpora una serie de aspectos de monitoreo que le da a esta opción ventaja sobre las demás.

Las ventajas que ofrece el control automatizado de la opción 2, incluye para BFW control del inhibidor de corrosión debido a oxígeno disuelto en el agua, control del inhibidor de corrosión por variaciones en el pH. La diferencia del control de estos productos que plantea esta alternativa estriba en el hecho de que la dosificación de dichos productos se basa en la medición de las condiciones reductoras y oxidantes del agua de alimentación para calderas a las condiciones reales del proceso de presión y temperatura, lo que la tecnología denomina AT-ORP.

Conjuntamente con el control de los productos químicos del tratamiento, se ejecutaría el control de la purga de la caldera, a través de la conductividad medida en la misma así como el flujo de esta.

Adicionalmente el equipo de control empleado para el sistema BFW admite la incorporación de otras variables que permitan optimizar el monitoreo del sistema. Entre estas variables se puede mencionar conductividad, pH, especies químicas (sílice, sodio), flujos de los siguientes puntos del sistema agua de alimentación a la caldera, sistema desmineralización, del condensado de proceso. A fin de mantener un mayor monitoreo del sistema BFW.

El tipo de controlador empleado en esta opción tiene la capacidad de emitir alarmas a los custodios del sistema cuando se presenta alguna anomalía, emitir reportes, comunicación con el DCS de la planta, verificar las condiciones del sistema a través de la Web.

Es importante mencionar que se conoce a través de información bibliográfica, que la opción 1 tiene la capacidad de ejecutar el control de las variables claves del tratamiento químico en BFW, permite la incorporación de

variables que incremente el monitoreo del sistema, emite alarmas y reportes y permite comunicación con el DCS y revisión a través de la Web.

La desventaja que presenta esta tecnología es que no ha sido implementada en el país por lo cual la información que se dispone para poner en marcha la automatización del tratamiento químico para sistemas de generación de vapor es insuficiente. Adicionalmente el control que se logra con esta alternativa no incluye la medición de las condiciones reductoras y oxidantes del sistema a las condiciones reales del proceso.

Para el sistema CW, todas las opciones proponen la automatización del pH a través de la medición directa de esta variable. Así como también todas proponen el control del cloro gas a través de la medición del potencial de óxido-reducción del agua. Es importante destacar que el control de las variables más críticas (pH y cloro gas) para la automatización de un sistema de enfriamiento cualquiera, puede ser ejecutado indiferentemente por cada una de las tres opciones estudiadas.

Lo que marca la diferencia de la opción 2 con respecto a las demás es que dicha alternativa propone el control directo de la dosificación del inhibidor de depósitos a través de la tecnología de fluorescencia, la cual se encarga de medir el componente activo del producto cada 15 segundos para ejecutar el control del mismo. La opción 1 a pesar de tener la capacidad de realizar también este tipo de control lo realizaría cada hora perdiendo eficiencia frente a la opción 2.

Para la dosificación del inhibidor de corrosión la alternativa 2 lo realiza de forma directa por la tecnología de fluorescencia en la que está basada su propuesta, sin embargo la alternativa 1 ejecuta este tipo de control de forma indirecta (a través de los ciclos de concentración). La alternativa 3 realizaría la dosificación de ambos productos de tratamiento de forma indirecta a través de los ciclos de concentración.

La automatización de la purga de la torre de enfriamiento puede ser realizada por todas las tecnologías estudiadas a través de la conductividad medida en la misma. La innovación que incluye la opción 2 es la incorporación de probetas de medición de conductividad inductiva, las cuales minimizan el error de las mediciones realizadas con probetas convencionales.

La dosificación de biocidas no oxidantes y biodispersantes al sistema es también posible realizarla de forma directa a través de las tres opciones estudiadas. Este tipo de control puede ser ejecutado a través de temporizadores por cada una de las opciones evaluadas.

En las ventajas que hacen mejor opción a la alternativa 2 se encuentra el incremento del monitoreo con respecto a las otras opciones debido a que esta alternativa incluye la medición de corrosión y de especies incrustantes en línea para el sistema CW.

La experiencia operacional de la opción 2 para CW pudo ser corroborada en empresas vecinas que emplean satisfactoriamente esta tecnología. A diferencia del sistema BFW se conoce que esta tecnología ha sido implementada en el país, aunque no ha sido implantada en tantas plantas como en el caso del sistema CW. Sin embargo, la opción 1 se ha implantado para sistemas de enfriamiento en el país mas no en el Complejo Petroquímico, y la tecnología no ha sido aplicada para sistemas BFW.

A pesar de presentar las mayores ventajas y beneficios la opción 2, se debe destacar que el cambio de tecnología y de productos químicos de tratamiento durante operación normal puede repercutir de forma negativa en todo el proceso operativo de la planta. A diferencia de la tecnología 1, a pesar de no tener las suficientes evidencias de su aplicación en el país es menos riesgosa la aplicación de esta tecnología, debido a que actualmente se operan con los productos de tratamiento de esta casa tratante.

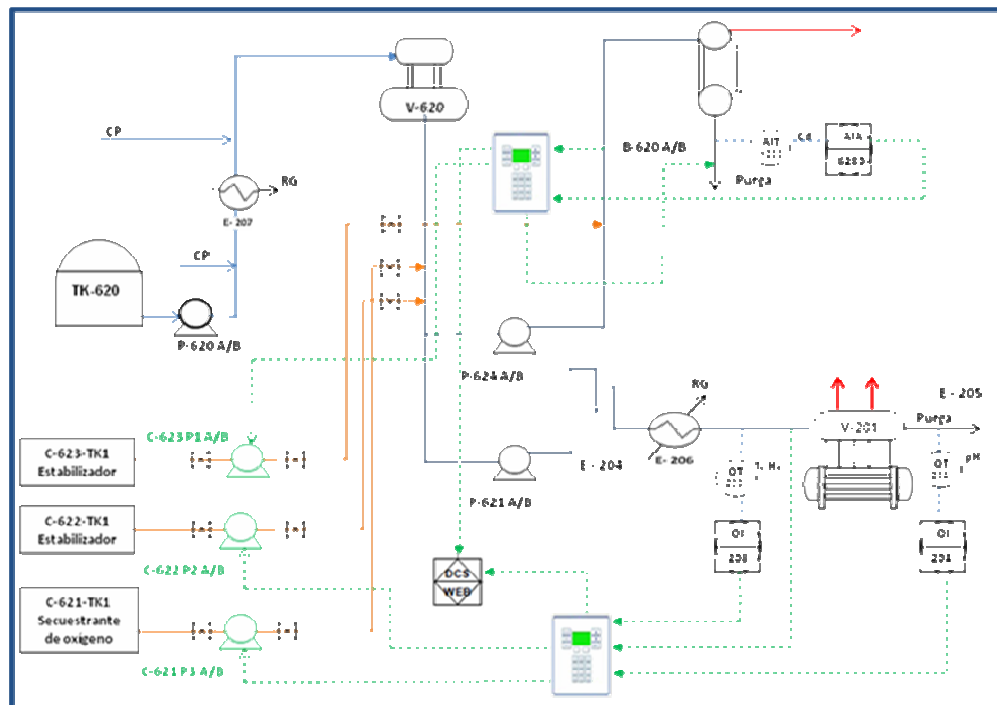
Se debe destacar también la independencia que ofrece implementar la opción 3, puesto que los cambios que se ejecutarían en planta permanecerían iguales aun si se cambia de casa tratante, lo que no es posible con las opciones 1 y 2, debido a que las casas tratantes son dueñas de los equipos controladores que patentan las tecnologías. Además el beneficio que ofrece esta propuesta es que los algoritmos de control predictivo con el cual funcionarían los controladores para BFW y CW están fundamentados en los datos históricos de los sistemas de la planta, con lo cual se pudieran controlar los problemas antes de que ocurran.

#### **4.1.4 Propuesta de las Modificaciones Adecuadas para Mejoras del Sistema de Tratamiento Actual, Empleando un Sistema Automatizado**

Luego de haber seleccionado la opción que ofrece mayores ventajas y beneficios a la planta se procedió a elaborar un diagrama donde se observan los cambios que deberían ser efectuados a los sistemas de tratamiento actual. Donde pueden ser observados los equipos que deben ser modificados y/o adecuados para que el sistema funcione en forma automatizada.

##### **4.1.4.1. Sistema BFW**

En el siguiente diagrama se muestran todos los cambios que deben ser efectuados en el sistema de generación de vapor (BFW) para que pueda ser aplicado de forma automatizada el tratamiento químico. En el capítulo 3, en la figura 3.1 se observa la situación actual del sistema BFW. Posteriormente se procederá a explicar cómo funcionaría el sistema después de ser implementados los cambios en el mismo.



**Figura 14.** Diagrama del sistema de tratamiento automatizado para BFW.

El sistema automatizado propuesto por la opción 2, que se muestra en la figura 4.1., plantea la incorporación de tres equipos computarizados de control, los cuales serán distribuidos según las necesidades del sistema de tratamiento.

El equipo computarizado de control que propone esta alternativa, basa su funcionamiento principalmente en la medición del AT-ORP lo que significa que mide las condiciones reductoras y oxidantes a la presión y temperatura real del sistema, y en base a estas condiciones dosifica los productos químicos de tratamiento (para el caso del proyecto en estudio secuestrante de oxígeno y productos estabilizante). Adicionalmente el equipo tiene cuatro entradas analógicas (4-20 mA) que permite incorporar señales como residual de hidrazina, pH, especies químicas (sílice, sodio), flujos, etc., lo cual incrementaría el monitoreo y control del sistema.



Se plantea incorporar un equipo computarizado de control en el agua de alimentación a la caldera de alta presión, la muestra tomada ingresará al equipo y a través del medidor de AT-ORP ejecutaría la dosificación de manera automática de los productos de tratamiento según las condiciones oxidantes y reductoras del agua. Para incrementar el monitoreo se emplearan los medidores con que se cuenta actualmente en planta de hidrazina (QI-208) y pH (QI-204), con los cuales cualquier fluctuación en el sistema será corregida tan pronto como sea detectada.

Es importante resaltar que las bombas dosificadoras (C-621 P1, C-621 P2 y C-622 P1) de ajuste manual, deben ser sustituidas por bombas dosificadoras que reciban señal de automatización y que el arreglo de bombas y válvulas empleado para la distribución actual que presenta el sistema (observar figura 3.1) debe ser sustituido para lograr mayor flexibilidad y confiabilidad del sistema, es por ello que se plantea la incorporación de dos bombas dosificadoras para cada producto dosificado, de tal manera que una bomba este operando y la otra se encuentre como reserva, constantemente.

En las calderas de media presión (B-620 A/B) son incorporados dos equipos computarizados de control de modo que cada uno mida las condiciones de AT-ORP a la entrada de las calderas y sea dosificado el producto estabilizante para cumplir con el tratamiento interno de las mismas. Empleando los medidores de conductividad que se encuentran en planta ubicados en las purgas de las calderas mencionadas se puede controlar automáticamente la purga de las mismas.

Para poder aplicar el tratamiento interno a las calderas de media presión es necesario incorporar un tanque de almacenamiento para el producto estabilizante empleado por el tratamiento (C-623-TK1), bombas dosificadoras automáticas (C-623 P1 A/B) y una nueva línea de distribución para el producto estabilizante de modo que se independice el tratamiento hacia dichas calderas, estas modificaciones pueden ser observadas en la figura 4.1.

En el estudio realizado al sistema de dosificación de químicos para acondicionar el agua a ser empleada en las calderas, se observó que los tanques de almacenamiento y bombas dosificadoras de los productos químicos se encuentran a una distancia considerable del punto de dosificación de los productos, lo cual implica un mayor tiempo de respuesta del sistema. Es recomendable realizar un análisis para la reubicación de dichos tanques y bombas a un lugar más cercano al punto de dosificación y se logre así una mayor efectividad de las estrategias de control implantadas.

Los equipos controladores ubicados en planta tendrán comunicación con el DCS de la misma, además de poder ser visualizado el estatus del sistema a través de la Web, todo ello con el fin de emitir alarmas, correos, reportes diagnósticos del sistema, entre otros beneficios.

#### **A. Lista de Materiales y Equipos que Deben ser Incorporados al Sistema BFW para que Funcione de Manera Automática.**

En la siguiente tabla se muestran los equipos que deben ser incorporados al sistema BFW.

**Tabla 9.** Lista de materiales y equipos que se requieren para la automatización de BFW.

Cantidad	Materiales y equipos
3	Equipos controladores de medición de AT-ORP
6	Bombas dosificadoras de ajuste automático
-	Válvulas
-	Tuberías
-	Cables de 4-20 mA

La cantidad de válvulas, tuberías y cables de 4-20 mA, depende de la ubicación de los equipos controladores en planta, dependerá de el punto donde se tomaran las muestras para medir las condiciones reductoras y oxidantes tanto a la caldera de alta presión así como a las calderas de media presión.

#### **4.1.4.2. Sistema CW**

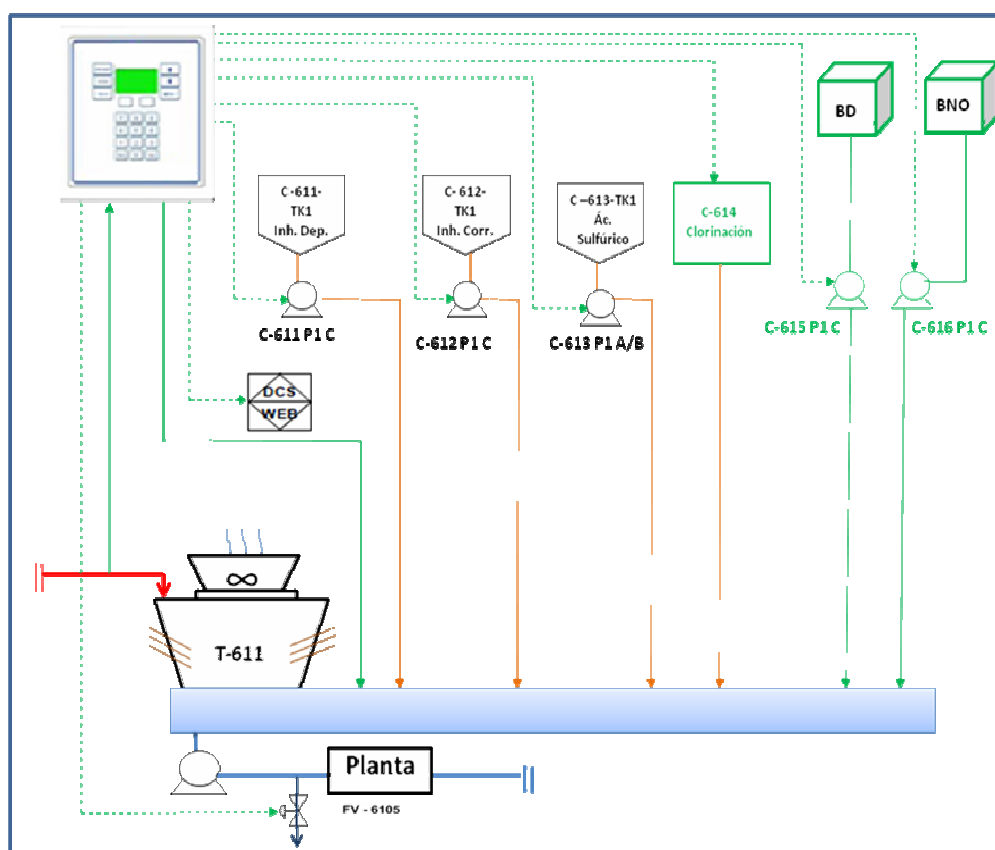
La figura 4.2 muestra el diagrama donde se plantean los cambios para que el tratamiento del sistema CW funcione de manera automática.

Para que el sistema de tratamiento de CW funcione de manera automática es necesario incorporar un equipo de control computarizado. Cuyo equipo está compuesto internamente por una probeta de medición de pH, una probeta de medición de ORP, una probeta de medición de conductividad inductiva, un fluorómetro (que permite medir componentes de los productos del tratamiento a través de tecnología fluorescente), una probeta de medición de corrosión en acero al carbono y otra para metales amarillos y una probeta para la medición de especies incrustantes.

Al equipo de control automático ingresa una muestra proveniente de la reposición a la T-611, la cual pasa a través de los sensores internos del equipo de control efectuando mediciones las cuales posteriormente permitirán dosificar cualquiera de los productos del tratamiento si el equipo percibe algún cambio (o condiciones de estrés en el sistema). El equipo percibe cuando existe un cambio en la carga del proceso, los residuales de los productos químicos, pH y poblaciones microbiológicas (tanto planctónicas como sésiles). La muestra que es tomada de la reposición de la T-611 se retorna nuevamente a la piscina de la torre.

Para poner en marcha la automatización del sistema CW es necesario además de incorporar un equipo de control, se debe incorporar un nuevo clorinador que reciba señal de automatización de modo que la medición es

efectuado por el equipo controlador, pueda ser recibida por el clorinador y este dosifique la cantidad del biocida oxidante necesitado. En el anexo C se muestra un tipo de clorinador compatible con el equipo controlador.



**Figura 15.** Diagrama del sistema automatizado para CW.

Para la dosificación automática del biocida no oxidante y biodispersante se debe incorporar tanques para el almacenamiento de dichos productos y que a su vez permita la preparación de determinada cantidad de estos, para disminuir los riesgos que conlleva la preparación y dosificación manual, además de incorporar las bombas que se muestran en la figura 4.2., este tipo de control será efectuado a través de temporizadores que son configurados en el equipo de control según los requerimientos del tratamiento aplicado en planta.

Es necesario incorporar una señal de control a la purga de la torre para que esta pueda ser controlada a través de los ciclos de concentración medidos por el equipo.

Vale resaltar que los equipos donde son almacenados los productos de inhibición de corrosión e inhibidor de depósitos actualmente, al igual que las bombas que los dosifican no requieren ser cambiados ya que estas últimas reciben señal de automatización. Con respecto al almacenamiento y dosificación del ácido sulfúrico no es necesario efectuar cambios al igual que para los productos anteriormente mencionados.

Después de realizar todas las modificaciones requeridas el equipo debe ser operado de forma manual durante 90 días, este es el período de transición requerido para que el equipo tenga una base de datos de los sistemas de tratamiento de BFW y CW de METOR S.A., pasado este período de tiempo los equipos controladores de ambos sistemas están en capacidad de operar automáticamente.

El mantenimiento de partes reemplazables como probetas de medición de conductividad, filtros, mangueras, entre otros se deben ser realizar cada seis meses para evitar futuros problemas.

#### **A. Lista de Materiales y Equipos que Deben ser Incorporados al Sistema CW para que Funcione de Manera Automática**

En la tabla 4.4., se muestra la tabla de los materiales y equipos que deben incluirse en el sistema CW para que funciones de manera automática.

**Tabla 10.** Lista de materiales y equipos que se requieren para la automatización de CW.

Cantidad	Materiales y equipos
1	Equipos controlador para sistemas de enfriamiento
2	Bombas dosificadoras de ajuste automático
1	Clorinador automatizable
2	Tanques de almacenamiento
-	Válvulas
-	Tuberías
-	Cables de 4-20 mA

Al igual que para el sistema BFW la cantidad de válvulas, tuberías y cables de 4-20 mA depende de la ubicación del equipo controlador. Estos detalles se deberán finiquitar cuando se realice la ingeniería conceptual, básica y de detalle del proyecto para la automatización tanto del sistema BFW y CW.

#### 4.2. Conclusiones

1. Las variables claves en el control del tratamiento químico para el sistema BFW son pH y residual de oxígeno disuelto.
2. Las variables claves en el control del tratamiento químico para CW son residual de cloro libre, residual del componente activo del inhibidor de corrosión, residual del componente activo del inhibidor de depósitos, conductividad y pH.
3. Para los sistemas estudiados la opción 2, resultó ser la mejor tanto para BFW como CW.

4. En el sistema de tratamiento actual de BFW deben ser sustituidas las bombas dosificadoras actuales (de ajuste manual) por unas que reciban señal de automatización.
5. Para el sistema de CW debe ser sustituido el clorinador actual por uno que permita incorporar señales de automatización.
6. Para efectuar la dosificación automática del biodispersante y biocida no oxidante es necesario incorporar equipos de almacenamiento y bombas dosificadoras que eliminen el control manual efectuado por los operadores.

#### **4.3. Recomendaciones**

1. Llevar a cabo un proceso de concurso (licitación) para evaluar, también desde el punto de vista económico, la factibilidad de cada alternativa, toda vez que todas muestran un nivel de cumplimiento con los requisitos suficientemente alto como para considerarlas técnicamente aceptables.
2. Verificar periódicamente que los equipos de control estén calibrados y se les efectúe el mantenimiento correspondiente para evitar falsas lecturas.
3. Realizar las pruebas dinámicas pertinentes para elaborar los algoritmos de control predictivos para cada sistema.
4. Hacer un estudio de ingeniería para la reubicación de los tanques de almacenamiento de químicos y bombas dosificadoras de los productos químicos de tratamiento del sistema BFW.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Cova A. **“Mejoras en la unidad de clarificación de aguas crudas en una planta cervecera”**. Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Química, UDO, Anzoátegui (1999).
2. Noriega, P. **“Mejoramiento de la calidad del agua en los sistemas de generación de vapor y enfriamiento en una industria cervecera”**. Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Química, UDO, Anzoátegui (2000).
3. Toews, S. **“Automatización del tratamiento de agua para calderas”**. Tesis de Grado, Grupo de Investigación de Electrónica y Mecatrónica (GIEM), Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción. (2009). Disponible en: [www.pol.una.py/giem/resumenTApC.pdf](http://www.pol.una.py/giem/resumenTApC.pdf)
4. *MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.* **“Data sheet for cooling tower system”**. Documento número: 3480 B264-10030. Revisión 2. *Basic*. Vol. B 2/4. Revisión 0. (1998).
5. *MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.* **“Unidad de tratamiento de agua desmineralizada manual de operación y mantenimiento”**. Documento número: 3480 B403-10100. *Operation Manual*. Vol. SOM 2/2. Revisión 0. (1998).
6. *MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.* **“Basic engineering design data”**. Documento número: 3480 B212-0100. Revisión 1. *Basic*. Vol. B 1/4. Revisión 0. (1998).
7. Rigola, M. **“Tratamiento de aguas industriales, aguas de procesos y residuales”**. Alfaomega Marcombo S.A, Barcelona, España (2005).



8. Kurita. **“Kurita handbook of water treatment”** *Second English edition*. Tokio, Japón (1999).
9. *Power-Chemicals “Boiler water related problems”*. Disponible en: <http://www.arvanitakis.com>.
10. NALCO, **“Manual Técnico de Agua de Enfriamiento”**. Sección 1 y 3, Naperville, Illinois (1980).
11. G.E Betz. **“Agua de enfriamiento. Programa de entrenamiento para operadores”**. *Cooling Water*. (2002).
12. Powell, S., **“Manual de agua para usos industriales”**. Tomo I. Editorial LIMUSA, México (1987).
13. Proveedor 1. **“Propuesta de automatización y servicio de medición en línea del componente activo del inhibidor de depósitos en METOR S.A.”**. Barcelona, estado Anzoátegui (2009).
14. Proveedor 2. **“Evaluación preliminar de los sistemas de prevención de fallas, monitoreo y control para el tratamiento químico aplicado en los sistemas de enfriamiento y vapor de METOR S.A.”** Barcelona, estado Anzoátegui (2009).
15. Díaz, H. **“Introducción al control predictivo”**. Disponible en: <http://www.revistaciencias.com/publicaciones/EEVFFkEEEupegfSOxr.php>
16. Bordóns, C. **“Control predictivo: metodología, tecnología y nuevas perspectivas”** Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,

Universidad de Sevilla. I curso de especialización en automática. Aguadulce, Almería, (2000).

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y**  
**ASCENSO**

<b>TÍTULO</b>	“Selección de una tecnología para la automatización de los sistemas de tratamiento de aguas en una planta de producción de metanol”
<b>SUBTÍTULO</b>	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Villafaña M, Ana K.	CVLAC: 17.540.430 E MAIL: villaanak@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

**PALABRAS O FRASES CLAVES:**

Tratamiento químico

Sistemas de generación de vapor

Sistemas de enfriamiento

Automatización

Equipos controladores

Corrosión, depósitos, crecimiento microbiológico

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Química

**RESUMEN (ABSTRACT):**

El objetivo de estudio del presente proyecto abarcó una selección de tecnología para la automatización de los sistemas de tratamiento químico de agua para generación de vapor (BFW) y agua de enfriamiento (CW) de una planta productora de metanol. Para ello, se realizó un estudio de las tecnologías disponibles en el mercado para la automatización de este tipo de sistemas, estudiándose tres alternativas. Cuyo estudio comprendió la identificación de las variables claves en los sistemas estudiados. Posteriormente se realizó la selección de la tecnología basándose en las ventajas y desventajas que presentan las mismas. Arrojando que tanto para el sistema de generación de vapor como para el sistema de enfriamiento la mejor opción es la propuesta que plantea la alternativa dos. Finalmente se plantearon los cambios que se requiere realizar tanto a BFW como a CW para que el tratamiento químico sea dosificado de forma automatizada, resaltándose que para el sistema BFW son requeridos tres equipos controladores para la automatización completa del sistema incluyendo el tratamiento interno de las calderas de media presión, sin embargo para el sistema CW es necesario el uso de un solo equipo controlador.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y****ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b>				
<b>Salas, Yraima</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS X</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>	V-8.478.649			
	<b>E_MAIL</b>	yrasal57@hotmail.com			
	<b>E_MAIL</b>				
<b>Robles, Eliezer</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU X</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>	V-6.213.711			
	<b>E_MAIL</b>	ej_rm@hotmail.com			
	<b>E_MAIL</b>				
<b>Cova, Alexis</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU X</b>
	<b>CVLAC:</b>	V-11.905.328			
	<b>E_MAIL</b>	alexiscovab@gmail.com			
	<b>E_MAIL</b>				
<b>Silva, Héctor</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU X</b>
	<b>CVLAC:</b>	V- 3.955.146			
	<b>E_MAIL</b>	hectorlsu@yahoo.es			
	<b>E_MAIL</b>				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

<b>2010</b>	<b>06</b>	<b>03</b>
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.Selección_automatización del tratamiento químico_calderas y torres de enfriamiento.doc	Application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J  
K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u  
v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** Ingeniería de procesos. Gerencia Técnica. METOR (OPCIONAL)

**TEMPORAL:** seis meses (OPCIONAL)

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero químico

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pregrado

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Ingeniería de procesos

**INSTITUCIÓN:**

Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

**DERECHOS**

De acuerdo con el artículo 41 del reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente: "los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados por otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participará al consejo universitario".

Villafaña M, Ana K

**AUTOR**

Yraima Salas

**TUTOR**

Alexis Cova

**JURADO**

Héctor Silva

**JURADO**

Yraima Salas

**POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**