

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



**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR AGUA DE LAS
UNIDADES MOTOCOMPRESORAS DE LA PLANTA SANTA ANA III,
DISTRITO GAS ANACO**

Realizado por:

ROSANGELES CRISTINA MÁRQUEZ CHACÓN

**Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito
parcial para optar al título de INGENIERO QUÍMICO**

Puerto La Cruz, junio de 2011

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



EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR AGUA DE LAS
UNIDADES MOTOCOMPRESORAS DE LA PLANTA SANTA ANA III,
DISTRITO GAS ANACO

ASESORES

Ing. Quím. Petra Martínez, (M.Sc.)
Asesor académico

Ing. Quím. Luis Brochero
Asesor industrial

Puerto La Cruz, junio de 2011

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



**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR AGUA DE LAS
UNIDADES MOTOCOMPRESORAS DE LA PLANTA SANTA ANA III,
DISTRITO GAS ANACO**

JURADO CALIFICADOR

Ing. Quím. Petra Martínez, (M.Sc.)

Asesor académico

Ing. Quím. Hernán Raven, (M.Sc.)

Jurado Principal

Ing. Quím. Freddy Santamaría

Jurado Principal

Puerto La Cruz, junio de 2011

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado:

“Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizados para otros fines, con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo quien lo participará al Consejo Universitario”



DEDICATORIA

Por compartir generosamente su amor y sabiduría rindo homenaje a mi madre y a mi padre, porque sencillamente lo han dado todo por mí.

AGRADECIMIENTO

Especialmente agradezco a mi madre Udelirde, por su amor incondicional, por estar siempre un paso adelante, por ser mi mejor amiga, y sobre todo por la confianza aun en los momentos más oscuros de estos últimos años.

A mi padre Tony por sus lecciones de vida, por enseñarme a dejar fluir la vida, sin perder de vista el objetivo.

A mí querida abuela Felicita, por sus bendiciones.

También quisiera expresar mi reconocimiento y gratitud a mi querido compañero de vida Hector, por su extraordinario apoyo, amor y contribuciones en la creación de este trabajo.

A la Universidad de Oriente por la oportunidad de formarme como profesional de esta importante casa de estudio.

A mi tutor académico, Ing. Petra Martínez, gracias por el apoyo y la colaboración que me brindó para desarrollar este trabajo. Éxitos y felicidad para ti y los tuyos.

A mi tutor industrial, Ing. Luis Brochero, gracias por el apoyo.

Al personal de la Planta Santa Ana III que me permitió iniciarme como profesional, gracias por la paciencia, por compartir sus conocimientos y brindarme todo el apoyo en mi transitar por la planta.

Gracias a la Organización PDVSA Gas por darme la oportunidad de formarme en el terreno laboral en sus instalaciones.

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el sistema de enfriamiento por agua de las unidades motocompresoras de la planta Santa Ana III, debido a las altas temperaturas que presentan en sus partes durante los períodos de operatividad. Inicialmente se identificaron las condiciones operacionales actuales de temperatura del sistema de enfriamiento por agua de la unidad motocompresora K-2, por ser la única que estaba en funcionamiento; se compararon estos datos operacionales con los de datos de diseño del motocompresor (alarma y paro), encontrándose que en la mayoría de los casos, éste opera fuera del rango especificado. Seguidamente, se realizaron análisis fisicoquímicos a muestras del agua que circula por el interior de esta unidad, a diferentes temperaturas, con el fin de determinar la tendencia del agua utilizada en el sistema de enfriamiento a ser corrosiva o incrustante, por medio de los índices de Langelier y Ryznar; estos últimos indicaron que el agua tiene tendencia incrustante, siendo esta tendencia proporcional al aumento de la temperatura. Posteriormente se aplicó un análisis de criticidad para precisar los equipos y/o accesorios del sistema de enfriamiento, que presentaron más fallas, durante el año 2010; al final del análisis se precisaron los siguientes componentes como los más críticos de sistema: enfriador por aire, filtro de arena y el controlador de nivel del tanque de compensación. Se analizó el efecto de la dosificación de química inhibidora aplicada al agua de enfriamiento, mediante técnicas de control estadístico y capacidad de procesos, tomando en consideración las características de agua que inciden en la formación de incrustaciones; se determinó que la dosis/tiempo empleada no es la más efectiva. Por último se propuso un sistema de

dosificación automatizado de químico inhibidor, basado en la escogencia de dos bombas dosificadoras, por medio de una matriz de valoración de criterios; se seleccionó la opción que cumplió con las especificaciones requeridas por la empresa, satisfaciendo los criterios de costo, garantía, plazo de entrega, confiabilidad operacional y disponibilidad de proveedores en el área.

CONTENIDO

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	vii
CONTENIDO	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. BREVE RESEÑA DE LA EMPRESA.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3. OBJETIVOS	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1. ANTECEDENTES	7
2.2. GENERALIDADES DEL PROCESO DE COMPRESIÓN DEL GAS NATURAL.....	9
2.3. EQUIPOS COMPRESORES DEL GAS NATURAL.....	11
2.4. COMPRESORES RECIPROCANTES	13
2.4.1. Sistema de lubricación.....	14
2.4.2. Sistema de enfriamiento	15
2.5. COMPONENTES QUE INTEGRAN EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LOS MOTOCOMPRESORES	15
2.5.1. Bombas.....	15
2.5.2. Enfriador por aire de tubos aleteados.....	16
2.5.3. Líquido enfriador.....	17

2.5.4. Tanque de compensación.....	18
2.5.5. Válvula termostática.....	20
2.6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DE LOS MOTOCOMPRESORES	20
2.7. PROBLEMAS ASOCIADOS A LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO	22
2.7.1. Corrosión	22
2.7.2. Incrustación	23
2.7.3. Ensuciamiento	30
2.7.4. Organismos microbiológicos.....	32
2.8. DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE ESTABILIDAD.....	33
3.8.1. Índice de Langelier.....	33
3.8.2. Índice de Ryznar	35
2.9. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS.....	35
2.9.1. Gráficos de media y rango.....	38
2.10. ANÁLISIS DE CAPACIDAD.....	42
2.11. ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	43
2.12. PROGRAMAS ESTADÍSTICOS.....	47
2.11.1 Statgraphics plus	47
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO.....	49
3.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERACIONALES ACTUALES DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR AGUA.....	49
3.1.1. Recolección de datos de diseño de las unidades motocompresoras	49
3.1.2. Recolección de datos operacionales actuales de temperaturas de la unidad motocompresora K-2.....	51
3.2. DETERMINACIÓN DE LA TENDENCIA DEL AGUA UTILIZADA COMO MEDIO DE ENFRIAMIENTO, A SER CORROSIVA O	

INCRUSTANTE, POR MEDIO DE LOS ÍNDICES DE LANGELIER Y RYZNAR.....	52
3.2.1. Caracterización del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2	52
3.2.2. Cálculo de los índices de Langelier y Ryznar	54
3.3. ANÁLISIS DE CRITICIDAD PARA PRECISAR LOS EQUIPOS Y/O ACCESORIOS DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO QUE PRESENTAN MAYORES FALLAS	56
3.4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA DOSIFICACIÓN DE QUÍMICO INHIBIDOR SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO	66
Producto	67
NALCOOL 2000.....	67
Formulación química.....	67
Nitrito de sodio, tetraborato de sodio y mercaptano benzotiazol de sodio. ...	67
Usos.....	67
Inhibidor de incrustación y corrosión en sistemas de enfriamiento cerrados.	67
3.4.1. Gráficos de control estadístico de procesos	68
3.4.2. Análisis de capacidad	70
3.5. PROPUESTA DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE DOSIS DE QUÍMICA INHIBIDORA, APLICADA AL AGUA UTILIZADA COMO MEDIO DE ENFRIAMIENTO	71
3.5.1. Selección de la mejor opción de bombas dosificadoras, por medio de evaluaciones de parámetros cualitativos y cuantitativos	74
3.5.2. Ponderación de criterios	77
CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	1
4.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	1
4.1.1. Identificación de las condiciones operacionales actuales del sistema de enfriamiento.....	1

4.1.2. Determinación de la tendencia del agua utilizada como medio de enfriamiento, a ser corrosiva o incrustante, por medio de los índices de Langelier y Ryznar	6
4.1.3. Análisis de criticidad para precisar los equipos y accesorios del sistema de enfriamiento que presentan mayores fallas.....	14
4.1.4. Análisis del efecto de la dosificación de química inhibidora aplicada al agua de enfriamiento, mediante el empleo de herramientas estadísticas.....	17
4.1.5. Propuesta de un sistema automatizado de dosis de química inhibidora aplicada al agua, utilizada como medio de enfriamiento	24
4.2 CONCLUSIONES.....	27
4.3 RECOMENDACIONES	28
BIBLIOGRAFÍA.....	30
ANEXOS.....	33
ANEXO A: DATOS OPERACIONALES DEL MOTOCOMPRESOR K-2	34
ANEXO B: INFORME DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LAS DIFERENTES MUESTRAS DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO.....	38
ANEXO C: RESULTADO DEL CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE ESTABILIDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS OPERACIONALES Y LAS CONSTANTES A Y B DE LOS ÍNDICES DE LANGELIER Y RYZNAR.....	40
ANEXO D: CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESO.....	43
ANEXO E: TABLA DE CONSTANTES ESTADÍSTICAS	46
ANEXO F: ENCUESTAS APLICADAS AL PERSONAL DE MANTENIMIENTO Y OPERACIONES DE LA PLANTA PARA EL ANÁLISIS DE CRITICIDAD	48
ANEXO G: ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE LOS EQUIPOS Y ACCESORIOS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación del agua de enfriamiento, de acuerdo al contenido de sólidos disueltos (PDVSA, 1991)	26
Tabla 2. 2. Clasificación del agua de enfriamiento, de acuerdo a la dureza como CaCO ₃ (PDVSA, 1991).....	27

Tabla 3. 1. Datos de temperaturas de diseño de los motocompresores	50
Tabla 3. 2. Datos de temperaturas de diseño del agua de enfriamiento de los motocompresores	51
Tabla 3.3. Valores permitidos para la calidad del agua de enfriamiento de motocompresores, de acuerdo a la norma PDVSA	53
Tabla 3.4. Ponderación de criterios de criticidad para el factor de mantenimiento	60
Tabla 3.5. Ponderación de criterios de criticidad para el factor de operaciones	61
Tabla 3.6. Porcentaje de criticidad de los equipos y accesorios del sistema de enfriamiento	66
Tabla 3. 7. Descripción del producto químico inhibidor.....	67
Tabla 3. 8. Especificaciones del sistema de inyección de químicos (PDVSA, 1989).....	73
Tabla 3. 9. Opciones de bombas dosificadoras por diferentes proveedores	74
Tabla 3. 10. Ponderación y criterio de Costo	75
Tabla 3. 11. Ponderación y criterio de Garantía.....	75
Tabla 3. 12. Indicadores y valores para el criterio de disponibilidad de proveedor.....	76
Tabla 3. 13. Indicadores y valores para el criterio de confiabilidad operacional	76
Tabla 3. 14. Indicadores y valores para el criterio de plazo de entrega	77
Tabla 3. 15. Resultados de las ponderaciones obtenidas por cada opción de bomba dosificadora.....	77
Tabla 3. 16. Matriz de valoración de criterios	78
Tabla 3. 17. Calificación cualitativa y cuantitativa para los criterios.....	78
Tabla 3. 18. Resultados de la matriz de valoración de criterios	79
Tabla 3. 19. Parámetros críticos ponderados para cada opción	81

Tabla 4. 1. Resultados de análisis fisicoquímicos del agua de enfriamiento de la unidad motocompresor K-2.....	8
Tabla 4. 2. Interpretación del índice de Langelier y Ryznar (C.S.D, 1968)	9
Tabla 4. 3. Categorías para clasificar la criticidad.....	15
Tabla 4. 4. Resultado del índice de capacidad Cp de los sólidos disueltos ..	23
Tabla 4. 5. Interpretación de resultados del índice de capacidad Cp.....	24
Tabla 4. 6. Importancia relativa de las opciones evaluadas.....	25
Tabla A.1. Datos operacionales de temperaturas en los cilindros de fuerza del motocompresor	35
Tabla A.2. Datos operacionales de temperaturas en las etapas de compresión del motocompresor.....	36
Tabla A.3. Datos operacionales de temperaturas del agua que enfría el motor y el aire de barrido de la unidad motocompresora	37
Tabla C. 1. Resultados de los Índices de Langelier y Ryznar del agua de enfriamiento a diferentes temperaturas	41
Tabla C. 2. Constante A como función de la temperatura del agua para calcular los índices de Langelier y Ryznar.....	41
Tabla C. 3. Constante B como función de los sólidos disueltos para el cálculo de los índices de Langelier y Ryznar	42
Tabla D. 1. Valores de pH, alcalinidad, dureza y sólidos totales obtenidos en diferentes mediciones del agua de enfriamiento, usados para el control estadístico de proceso y análisis de capacidad	44
Tabla D. 3. Resultados suministrados por el programa Statgraphics plus....	45
Tabla E. 1. Constantes estadísticas para el cálculo de los límites de control e índice de capacidad	47
Tabla G. 1. Resultados mayormente seleccionadas de las encuestas aplicadas al personal de mantenimiento.....	50

Tabla G. 2. Resultados mayormente seleccionadas de las encuestas aplicadas al personal de operaciones.....	50
Tabla G. 3. Resultados de las ponderaciones de los componentes del sistema de enfriamiento.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de un proceso de compresión por etapas (Green, 1992)	10
Figura 2.2. Proceso isentrópico de compresión o adiabático reversible (Green, 1992).....	12

Figura 2. 3. Motocompresor recíprocante	14
Figura 2. 4. Bomba centrífuga engranada al motocompresor	16
Figura 2. 5. Enfriador por aire de tiro forzado	17
Figura 2. 6. Sección transversal del tanque de compensación	19
Figura 2. 7. Esquema representativo del recorrido del agua por el sistema de enfriamiento de los motocompresores	21
Figura 2.8. Representación de los gráficos de media y rango respectivamente	39
Figura 2. 9. . Factores utilizados en el análisis de criticidad (Suarez, 2007).	44
Figura 3. 1. Puntos de tomas de agua de enfriamiento en la galería de aire de barrido, cilindros compresores y cilindros de fuerza respectivamente, utilizados para muestreo del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2.....	53
Figura 3. 2. Equipos y accesorios del sistema de enfriamiento, utilizados para el análisis de criticidad	56
Figura 3.3. Modelo de encuesta dirigida al personal de mantenimiento	58
Figura 3. 4. Modelo de encuesta dirigida al personal de operaciones	59
Figura 3. 5. Esquema representativo de la propuesta de inyección de químico inhibidor	72
Figura 4. 1. Tendencia de temperaturas de los cilindros de fuerza de la unidad motocompresora K-2.....	3
Figura 4. 2. Tendencia de temperaturas de los cilindros compresores de la unidad motocompresora K-2.....	3
Figura 4. 3. Tendencia de temperaturas del agua que circula por el motocompresor K-2	5
Figura 4. 4. Tendencia de temperaturas del agua de enfriamiento que circula por la galería del aire de barrido del motocompresor K-2	6
Figura 4. 5. Tendencia de los índices de Langelier Ryznar del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2	10

Figura 4. 6. Filtro de arena de la planta compresora	13
Figura 4. 7. Identificación de los equipos y accesorios críticos, semi-críticos y no críticos del sistema de enfriamiento	16
Figura 4. 8. Gráfico de control de media de los sólidos disueltos	18
Figura 4. 9. Gráfico de control de rangos de los sólidos disueltos	19
Figura 4. 10. Gráfico de control de media del pH.....	19
Figura 4. 11. Gráfico de control de rangos del Ph.....	20
Figura 4. 12. Gráfico de control de media de la dureza cálcica	20
Figura 4. 13. Gráfico de control de rangos de la dureza cálcica	20
Figura 4.14. Gráfico de control de media de la alcalinidad total	21
Figura 4.15. Gráfico de control de rangos de la alcalinidad total	21

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. BREVE RESEÑA DE LA EMPRESA

Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA), propiedad de la República Bolivariana de Venezuela, se encarga del desarrollo de la industria petrolera, petroquímica y carbonífera; también se encarga de planificar, coordinar, supervisar y controlar las actividades operativas de sus divisiones tanto en Venezuela como en el exterior, bajo la supervisión y control del Ministerio de Energía y Petróleo. Luego de 25 años de actividad, la empresa modifica su estructura y emerge con una nueva imagen corporativa a partir del 1 de enero de 1998, tras la fusión de sus filiales más importantes, Corpoven, Lagoven y Maraven. Dentro de estas transformaciones es creada a mediados del año 1998 PDVSA GAS.

PDVSA GAS es la empresa filial de Petróleos de Venezuela, cuyo accionista es el estado venezolano, que transporta, procesa, distribuye y comercializa gas natural y sus derivados, de manera rentable, segura y eficiente, con calidad en sus productos y servicios, en armonía con el ambiente y la sociedad, propiciando un clima organizacional favorable para sus trabajadores y promoviendo la incorporación del sector privado en el desarrollo de la industria del gas.

Para ejecutar sus operaciones, PDVSA GAS cuenta con varios distritos operacionales a lo largo del territorio nacional, siendo uno de ellos el Distrito Anaco, ubicado en la zona central del estado Anzoátegui, abarcando parte de los estados Guárico y Monagas. Este distrito posee yacimientos

petrolíferos productores de hidrocarburos liviano, mediano y condensado, así como también grandes cantidades de gas natural, las cuales representan el 40% de las reservas probadas del país. Cuenta con un área aproximada de 13.400 km², conformado por dos extensas áreas: Área Mayor de Oficina (AMO) y Área Mayor de Anaco (AMA).

En el Distrito Anaco se encuentra la Gerencia de Manejo de Gas, dentro de la cual funcionan las Superintendencias de Compresión, Recolección y Transmisión, Logística Operacional y Control y Gestión. Esta Gerencia se encarga del manejo de fluidos (gas natural), para ser inyectado en los yacimientos de petróleo que han perdido presión, a fin de proveer la energía suficiente para ayudar al levantamiento y a la recuperación de grandes volúmenes de petróleo; además se encarga de actividades como: inyección de vapor, conservación, combustible interno, ventas a terceros, así como el mantenimiento de los equipos motocompresores que opera.

Dentro de las funciones de la Superintendencia de Compresión está, en el plano de Operaciones, el monitoreo del funcionamiento íntegro de las instalaciones de producción y las plantas compresoras de gas natural, entre ellas la Planta Compresora Santa Ana III (PCSAIII).

La planta Santa Ana III se encuentra ubicada en el municipio Santa Ana del estado Anzoátegui, aproximadamente a 50 km de la ciudad de Anaco, en dirección Sur-Oeste. Está planta cuenta con tres unidades motocompresoras en línea, del tipo reciprocante (K1, K2 y K3), con una capacidad de descarga conjunta de 110 MMPCND, una producción asociada de 3500 BPD y LGN de 8250 BPD.

Fue diseñada para manejar gas de tres niveles de presión: nivel de 60 psi, 250 psi y 800 psi y descargar a los niveles de 1200 psi para transferencia y 3200 psi para recuperación secundaria del gas natural.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Planta Compresora Santa Ana III pertenece a la superintendencia de Compresión, adscrita a la gerencia de Manejo de Gas producción Gas Anaco; es una planta diseñada para recibir gas asociado de 60, 250 y 800 psi provenientes de las estaciones de producción y comprimirlo hasta 1200 psi, para ser luego enviado hacia la planta de Extracción San Joaquín. La planta tiene una capacidad nominal de 110 MMPCND; disponiendo para ello de tres unidades integrales motocompresores reciprocantes de dos tiempos en línea que comprimen el gas natural (K1, K2 Y K3), enfriadores inter-etapas y tres separadores para cada nivel de presión de entrada. Actualmente se encuentra operativo solo un motocompresores (K2) debido a las mermas que ha presentado el gas en el área.

Cada unidad motocompresora; dispone de un sistema de enfriamiento cerrado, para extraer el exceso de calor generado por el proceso de combustión, compresión y roce entre las partes en movimiento. El líquido de enfriamiento utilizado es agua, la cual proviene de un tanque de almacenamiento que es surtido por acuíferos del área; ésta pasa a través de filtros de arena, que disminuyen el contenido de partículas sólidas que pudieran estar presentes, luego es bombeada hacia un tanque de compensación que se utiliza para reponer las pérdidas que existieran por fuga o evaporación, en el recorrido del agua por el motor.

Durante el proceso operativo del motocompresor; se presentan diversos problemas funcionales debido a altas temperaturas producidas en la cámara de combustión, que traen como consecuencia fallas por calentamiento, detonaciones, daños de accesorios, entre otros; lo que implica grandes inversiones en mantenimiento correctivo del motocompresor. Aunado a esto el sistema de dosificación de químico inhibidor aplicado al agua, empleada en el proceso de enfriamiento, se efectúa de manera inadecuada y sin una metodología específica, por no contar con un personal dedicado exclusivamente al control y seguimiento de los tratamientos químicos y por no realizarse periódicamente análisis fisicoquímicos del agua, que permitan el cálculo de la dosis requerida para el tipo de agua que entra a la planta.

Debido a esto y a la importancia de la funcionalidad eficaz de las unidades motocompresoras, se plantea la necesidad de evaluar el sistema de enfriamiento por agua, teniendo como punto de partida la identificación de las condiciones operacionales del sistema de enfriamiento del motocompresor, a fin de verificar su comportamiento respecto a las condiciones de diseño. También es necesario conocer las características fisicoquímicas del agua usada como medio de enfriamiento y de esta manera determinar su índice de estabilidad, aplicando el principio de Langelier y Ryznar. Así mismo se jerarquizarán los equipos y accesorios que integran el sistema de enfriamiento y que presentan mayores fallas, por medio de un análisis de criticidad que permita tomar futuras acciones correctivas.

Adicionalmente, se estudiará el efecto de la dosificación de químico inhibidor sobre el agua de enfriamiento, para ello se seleccionarán los parámetros (alcalinidad, temperatura, pH, sólidos disueltos entre otros) que influyen en la tendencia del agua a formar incrustaciones. Posteriormente se llevarán a cabo pruebas in situ y de laboratorio de dichos parámetros, con el objeto de analizar su comportamiento a través del tiempo por medio de

diagramas de control de calidad haciendo uso del programa *Stargraphics plus* (programa estadístico). Con el cual se podrá establecer un tiempo promedio de dosificación, que permita tener los parámetros estudiados bajo control.

Considerando lo fundamental de una adecuada dosificación de química inhibidora, se realizará la propuesta de un sistema automatizado que garantice su inyección en la dosis y tiempo justo, en aras de minimizar la pérdida innecesaria de química y asegurar la correcta aplicación. Cabe destacar que la mejora en la operación de este sistema de enfriamiento por agua, representa un ahorro energético debido a la eficiencia de la transferencia de calor motocompresor - agua, mayor volumen de descarga de gas y conservación de los equipos y tuberías involucradas, con el consecuente beneficio económico para la planta.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el sistema de enfriamiento por agua de las unidades motocompresoras de la Planta Compresora Santa Ana III, Distrito Gas Anaco.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Identificar las condiciones operacionales actuales del sistema de enfriamiento por agua.
2. Determinar la tendencia del agua utilizada en el sistema de enfriamiento a ser corrosiva o incrustante, por medio de los índices de Langelier y Ryznar.

3. Precisar los equipos y accesorios del sistema de enfriamiento que presentan mayores fallas, a través de un análisis de criticidad.
4. Analizar el efecto de la dosificación de química inhibidora aplicada al agua de enfriamiento, mediante el empleo de herramientas estadísticas.
5. Proponer un sistema de automatización de dosis de química inhibidora aplicada al agua, utilizada como medio de enfriamiento.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

Olivier H. (2004), evaluó los sistemas de enfriamiento y sistema de lubricación de los motocompresores de la planta Santa Ana III, debido a altas temperaturas. Para esto tomó datos operacionales de temperatura y presión de los fluidos agua, gas de proceso y aceite en los sistemas de los motocompresores, comparándolos con las temperaturas de alarmas. Tomó muestras de agua y aceite para caracterizarlas por medio de análisis fisicoquímico y espectroscópico, evaluó la inestabilidad del agua, contaminación del aceite y desgaste en las piezas en movimiento de los motocompresores. Luego calculó las eficiencias de los intercambiadores de calor, concluyendo que éstos cumplían satisfactoriamente la función de extraer el calor generado en los motocompresores.

Aguilar V. (2005), evaluó los sistemas de enfriamiento mediante el uso de un tratamiento químico anti-incrustante de las unidades motocompresoras de las plantas compresoras Santa Ana III y El Toco. Para ello realizó análisis fisicoquímicos del agua de las unidades, tomó datos operacionales de temperaturas en las diferentes etapas de compresión y de los cilindros de fuerza, con los cuales hizo gráficos y comparó las temperaturas de operación con los rangos de temperatura de alarma y paro, de acuerdo a la aplicación del tratamiento químico anti-incrustante (antes, durante y después), evaluó las características y propiedades del anti-incrustante con lo cual determinó su calidad y analizó los costos de rentabilidad del anti-incrustante en el sistema de enfriamiento.

González G. (2005) evaluó el sistema de enfriamiento por aire de las unidades motocompresoras de la planta compresora de gas Zorro. Haciendo uso del programa de simulación de procesos *Hysys Plant*, estudio las condiciones de diseño y operación y evaluó su comportamiento a través del modelado y validación del sistema de enfriamiento por aire. Al igual que Olivier y Aguilar hizo análisis fisicoquímicos del agua y comprobó que su tendencia influía en la transferencia de calor motocompresor – agua.

El presente trabajo dio continuidad a los trabajos realizadas por Olivier y Aguilar en la evaluación del sistema de enfriamiento por agua de los motocompresores de la Planta Santa Ana III, al igual que ellos se diagnosticó el comportamiento de las temperaturas operacionales actuales con respecto a los datos de diseño, se realizaron análisis fisicoquímicos del agua de enfriamiento, a fin de calcular su tendencia y garantizar su uso como medio de enfriamiento. Se incluyó un análisis de criticidad del estado actual de funcionamiento de los equipos y accesorios que integran el sistema de enfriamiento para implementar acciones correctivas orientadas a garantizar su funcionamiento.

También se analizó el comportamiento de las características del agua que indican su tendencia a formar incrustaciones, con respecto a la dosificación de químico inhibidor suministrado al sistema, haciendo uso del programa *Statgraphics plus*, aunado a esto se propuso el uso de un sistema automatizado de dosis de químico inhibidor al sistema de enfriamiento por agua, alcances que no tuvieron los autores anteriores.

2.2. GENERALIDADES DEL PROCESO DE COMPRESIÓN DEL GAS NATURAL

El gas natural es un combustible que se obtiene de rocas porosas del interior de la corteza terrestre, y se encuentra mezclado con el petróleo cerca de yacimientos del mismo. Como se trata de un gas, puede encontrarse solo en yacimientos separados, sin embargo la manera más común en que se encuentra este combustible es atrapado entre el petróleo y una capa rocosa impermeable. En condiciones de alta presión se mezcla o disuelve en aceite crudo. El gas natural conocido como seco tiene menos de 0,013 L de gasolina/m³, cuando se excede de esta cantidad se le denomina húmedo. (Perry, 2001)

Una vez que la mezcla de gas - petróleo, es sacada a la superficie, se transporta a través de líneas de flujo bifásicas hasta llegar a las estaciones de flujo o estaciones de descarga, dónde se llevan a cabo los procesos de separación crudo-gas, fiscalización y bombeo de crudo, para luego ser enviado a través de gasoductos de recolección a las plantas compresoras.

Estas plantas tienen un aporte de gran importancia dentro de los operaciones de producción de petróleo, cuyo objetivo fundamental es aumentar la presión del gas separado del crudo en las estaciones de flujo, para ser utilizado como gas de levantamiento artificial en el proceso de recuperación secundaria (gas lift), para satisfacer ciertas necesidades de consumo tales como; suministro de gas a plantas eléctricas, plantas de fraccionamiento, refinerías, para usos domésticos, la entrega a otras filiales de PDVSA y para utilizar el remanente como gas de inyección a los yacimientos. (Sarabia, 2002)

Las plantas compresoras están constituidas por etapas de compresión (figura 2.1), cada etapa está constituida por un compresor, un enfriador y un separador. El gas de alimentación ingresa al separador de entrada, con la finalidad de separar el gas del agua e hidrocarburos más pesados que hubiesen sido arrastrados en línea. Seguidamente el gas proveniente del separador de entrada es comprimido por las etapas de compresión. En cada etapa el gas es comprimido (compresor) para elevar su presión, enfriado (enfriador) para que la temperatura de descarga no exceda los parámetros de diseño de los equipos, y depurado (separador) para eliminar del gas los líquidos producidos por la condensación en enfriamiento. (Sarabia, 2002)

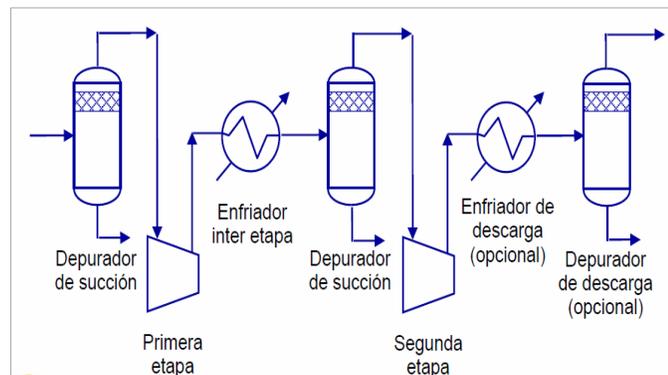


Figura 2. 1. Esquema de un proceso de compresión por etapas (Green, 1992)

El proceso de compresión requiere de una serie de equipos que conforman sistemas, que en conjunto realizan el trabajo de compresión. Entre los sistemas más importantes de una planta compresora se tienen (Sarabia, 2002):

- Depuradores.
- Botellas anti - pulsantes.
- Sistemas de enfriamiento.

Sistemas de aire de instrumentos/servicios.

Sistema de gas combustible.

Sistema de paro de emergencia.

Sistema de venteo y las válvulas de seguridad.

2.3. EQUIPOS COMPRESORES DEL GAS NATURAL

Los compresores son ampliamente usados para comprimir grandes volúmenes de gas, mediante la aplicación de fuerzas inerciales al gas manejado. Están diseñados para comprimir gas entre ciertos límites de presión, mediante la energía impartida al mismo. Esta compresión se efectúa en el impulsor, cuyas paletas imparten energía al fluido, aumentando su energía cinética y presión estática. La corriente de gas debe estar libre de líquidos, componentes corrosivos, materiales abrasivos, partículas que puedan depositarse en el impulsor y compuestos que se polimerizan a las condiciones existentes dentro de la unidad.

Generalmente estos equipos de compresión están basados en un modelo de compresión isentrópico o adiabático reversible (figura 2.2), en el cuál se establece, que a lo largo del proceso de compresión, se debe mantener una transferencia neta de calor nula. Es por eso que surge la necesidad de segmentar el proceso global en varias etapas, dónde el número de etapas vendrá determinado por la relación de compresión total y limitado por la temperatura máxima de descarga permisible, con la finalidad de sustraer la energía ganada por el gas una vez comprimido (Green, 1992).

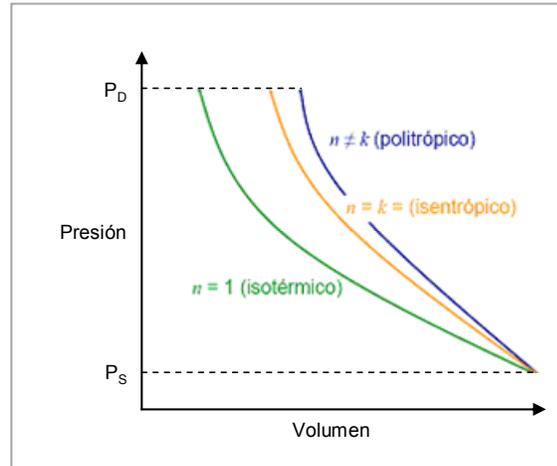


Figura 2. 2. Proceso isentrópico de compresión o adiabático reversible (Green, 1992)

Para realizar este proceso termodinámico de compresión, existen diferentes tipos de compresores entre los más comunes se encuentran:

- **Desplazamiento positivo**

Son máquinas que suministran al gas la fuerza necesaria para desplazarlo, reduciendo su volumen en cilindros y espacios muy pequeños, entre ellos se encuentran los de tipo recíprocos y rotatorios.

- **Dinámicos**

Son máquinas generadoras que en su movimiento giratorio, le suministra energía a un gas, para producir en él un cambio de energía, estos pueden ser de tipo centrífugos y axiales. (Espinoza, 2000)

2.4. COMPRESORES RECIPROCANTES

Son unidades formadas por varios cilindros compresores, cada uno de ellos unidos a un cigüeñal común por medio de dos piezas llamadas: cruceta y biela compresora. Los compresores reciprocantes pueden ser de dos tipos: integrales, donde la misma unidad incluye parte motriz y parte compresora, llamados motocompresores (figura 2.3), solo hay un cigüeñal; el otro tipo se llama separados, cuando son de dos unidades diferentes, por lo tanto dos cigüeñales. Dos o más compresores reciprocantes pueden instalarse en una planta para trabajar como unidades operando contra cabezales, es decir dos o más compresores succionan de una misma tubería y descargan para una misma tubería, llamados cabezales de succión y cabezales de descarga. (Marín, 2007)

Los motocompresores son unidades de combustión interna alternativos, donde la fuerza generada por la combustión es convertida en un movimiento rectilíneo por el pistón y luego a través del mecanismo biela – cigüeñal se transforma en un movimiento rotativo, que es transformado nuevamente en rectilíneo por otro conjunto biela – cigüeñal para ser utilizado por los cilindros compresores. Básicamente los compresores están formados por pistones de potencia, cilindros, válvulas o compuertas de admisión y escape, bielas, cigüeñal, pistones compresores y cilindros compresores. (Green, 1992)

Entre las ventajas más resaltantes de los compresores reciprocantes se encuentran las siguientes (Green, 1992):

- Poseen la capacidad de desarrollar altas presiones.

–Son de capacidad y velocidad constante, tienen presiones de descarga variables.

–Son menos sensibles a los cambios en las características de composición y gravedad específica del gas.

–Tienen mayor eficiencia a razones de compresión mayor a dos.



Figura 2. 3. Motocompresor reciprocante

Durante la compresión se produce elevación súbita de temperatura, debido al incremento de la presión del gas y a la combustión que mantiene operativo el equipo. Es necesario eliminar estas altas temperaturas, es por ello que estos equipos cuentan con dos sistemas de intercambio de calor, los cuales son: el sistema de lubricación y el sistema de enfriamiento. (González, 2005)

2.4.1. Sistema de lubricación

El sistema de lubricación se emplea para disminuir la fricción en los mecanismos internos del motocompresor. Éste funciona con un sistema de bomba de lubricación forzada la cual lubrica los componentes del motocompresor tales como envases (parkings), pistones, barras, etc. y un sistema de lubricación adicional que lubrica las bielas, cigüeñal, entre otros

componentes del motocompresor. El sistema de lubricación se compone de bombas de pre-lubricación, una caja o bomba de lubricación, líneas de distribución, intercambiador de calor para el aceite y filtros. (Marín, 2007)

2.4.2. Sistema de enfriamiento

Los numerosos procesos mecánicos (dilatación, fricción, resistencia al calor del aceite, y otros) y los intercambios térmicos que ocurren entre las cámaras de combustión y sus paredes, hacen necesarias la presencia de un sistema de refrigeración o enfriamiento de las partes internas del motocompresor. Este sistema puede ser de refrigeración directa (por aire) y de refrigeración indirecta (por agua). (Marín, 2007)

2.5. COMPONENTES QUE INTEGRAN EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LOS MOTOCOMPRESORES

El sistema de enfriamiento de las unidades motocompresoras disponen de una serie de equipos, accesorios e instrumentos que en conjunto garantizan el correcto enfriamiento de sus partes, entre los principales componentes se encuentran el agua o líquido refrigerante, bombas, líneas de distribución, intercambiadoras de calor, entre otros.

2.5.1. Bombas

Las bombas del sistema de enfriamiento son de tipo centrífugas cuyos ejes están engranados al cigüeñal del motor (figura 2.4); éstas son las encargadas de suministrar la energía necesaria al líquido enfriador, para mantener el flujo a través de todo el sistema de enfriamiento en valores apropiados y a su vez bajo control de la temperatura de la unidad motocompresora. (Wartsila, 1997)



Figura 2. 4. Bomba centrífuga engranada al motocompresor

2.5.2. Enfriador por aire de tubos aleteados

Estos enfriadores están constituidos por tubos con aletas para una mayor área de transferencia de calor. Poseen una estructura de sustentación de acero con una cámara y anillo para el ventilador, uno o más ventiladores de flujo axial con su impulsor, así como diversos accesorios tales como: persianas, protectores del ventilador, tirantes y protectores contra granizo. Estos equipos pueden suministrar el flujo de aire ya sea en tiro forzado o tiro inducido (figura 2.5). En las unidades de tiro forzado el ventilador empuja el aire a través de la superficie de los tubos aleteados, mientras que en las unidades de tiro inducido, el ventilador está colocado sobre los tubos, e induce el aire a través de ellos (PDVSA, 1995).



Figura 2. 5. Enfriador por aire de tiro forzado

2.5.3. Líquido enfriador

Es el encargado de absorber el exceso de calor generado en el motocompresor y debe cumplir con enfriar eficientemente el motocompresor, proteger contra la congelación, la ebullición, corrosión e incrustación. Éste debe poseer ciertas propiedades que le permitan mantener la temperatura de las diferentes partes mecánicas, en valores apropiados durante su funcionamiento, y no ocurra la fractura de alguna de estas partes, debido a incrementos de temperatura que debiliten su resistencia. (PDVSA, 1991)

Los medios de enfriamientos más utilizados en sistemas de refrigeración son:

- **Enfriamiento con agua**

El agua es uno de los fluidos más utilizados para intercambiar calor en los sistemas de enfriamiento, ésta debido a sus características requiere de acondicionamiento o tratamiento para controlar y minimizar los problemas de corrosión, incrustaciones, ensuciamiento y microorganismos que se

presentan en estos sistemas, a fin de mantenerlos en condiciones operativas confiables, preservar los equipos e incrementar su eficiencia. (Lipesa, 1998)

- **Refrigerantes**

Los refrigerantes son productos químicos en forma líquida o gaseosa, fácilmente licuable, que se utiliza para servir de medio transmisor de calor en un motocompresor. El principio de funcionamiento de algunos refrigerantes se basa en un ciclo de refrigeración por compresión, que tiene algunas similitudes con el ciclo de Carnot.

2.5.4. Tanque de compensación

Se compone de una cámara superior y una cámara inferior, que están separadas por una placa horizontal divisoria (figura 2.6). La cámara inferior se comunica con la atmosfera a través de una tubería vertical en el centro del tanque, pasando por la parte superior del tanque. El extremo superior lleva adosada una tapa que incluye un regulador de presión con una tubería de desbordamiento. (Wartsila, 1997)

El tanque está equipado con un indicador de nivel (visor de cristal) y una escala que marca lleno (full) y bajo (low). Durante el funcionamiento normal, el nivel del tanque debe encontrarse aproximadamente a la mitad de la escala. (Wartsila, 1997)

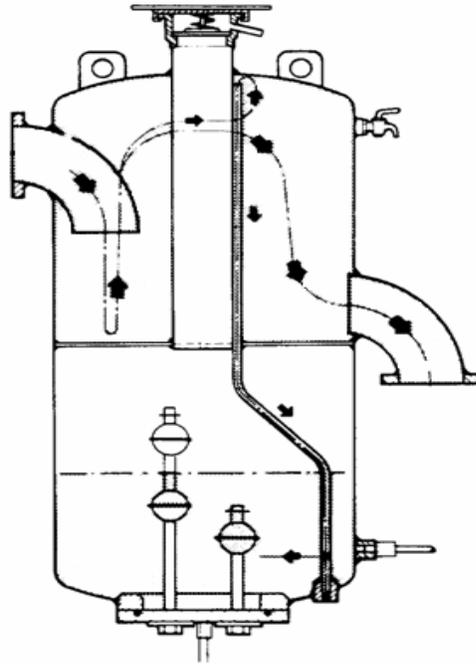


Figura 2. 6. Sección transversal del tanque de compensación

Las principales funciones del tanque de compensación son:

- **Reposición**

Repone las pérdidas de agua en el sistema de enfriamiento debido a escapes y/o evaporación que pudieran suscitarse por incrementos de temperaturas.

- **Regulación de presión**

La tubería del centro del tanque conecta la cámara inferior a la atmósfera. El extremo superior de la tubería va equipado con una tapa que lleva un regulador de presión con un resorte. Este controla la presión de expansión según varía la temperatura del sistema de enfriamiento. En principio, el regulador de presión actúa como una válvula de seguridad; se abre y suelta aire en exceso.

- **Desaireación**

La cámara superior del tanque actúa como desaireador del sistema, soltando el aire que se pueda haber introducido en el sistema cuando cambia la velocidad del flujo de agua.

2.5.5. Válvula termostática

Son reguladoras de temperatura, en principio son válvulas de tres vías controladas por elementos termostáticos, contiene una sustancia semilíquida muy sensible a los cambios de temperatura. Cuando este material se expande; como resultado de una elevación de la temperatura del agua que fluye a través de la válvula, ésta se cierra por medio de un movimiento deslizante, impidiendo el paso de agua hacia el motocompresor y enviando una señal de alarma o paro hacia el panel de control. (Wartsila, 1997)

2.6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DE LOS MOTOCOMPRESORES

El sistema de enfriamiento de las unidades motocompresoras, consiste en un circuito cerrado de recirculación de agua, en la figura 2.7 se muestra un esquema representativo del recorrido del agua por el sistema de enfriamiento de los motocompresores de la planta Santa Ana III.

La secuencia de enfriamiento comienza con el bombeo de agua por las diferentes partes del motocompresor, debido a la acción conjunta de dos bombas centrifugas, cuyos ejes están acoplados al cigüeñal del motor. Una bomba impulsa el agua por las camisas, tanto de los cilindros de fuerzas como compresores, seguidamente pasa a las tapas de los cilindros y de allí se desplaza hacia las secciones de escape de cada uno, pasando por un

conducto, que funciona como múltiple y es por donde salen los gases de escape de los cilindros de fuerza (manifold de agua). La segunda bomba impulsa agua por la galería de aire de barrido del motor.

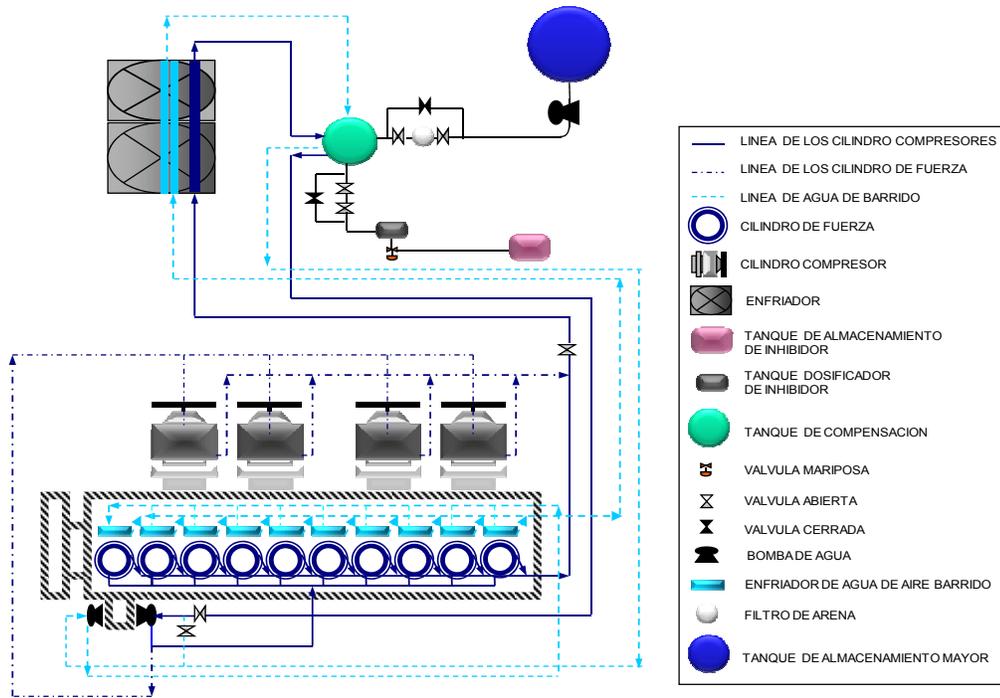


Figura 2. 7. Esquema representativo del recorrido del agua por el sistema de enfriamiento de los motocompresores

Una vez que el agua enfría las diferentes partes del motocompresor, pasa por un panel de tubos aleteados ubicado en un enfriador por aire (empleado para disminuir la temperatura de los diferentes fluidos que se manejan en el motocompresor: agua, gas natural y aceite lubricante), donde se enfría por efecto de dos ventiladores que son accionados por un motor eléctrico de velocidad constante, que mueven aire a través de ellos; el agua enfriada pasa al tanque de compensación y se recircula al motocompresor.

2.7. PROBLEMAS ASOCIADOS A LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

Los equipos y accesorios se dañan con mayor intensidad en procesos de calentamiento que en los procesos en los cuales el agua no sufre transformaciones físicas, por lo que es conveniente hacer tratamiento al agua de proceso y agregar compuestos químicos que neutralicen y compensen; por los efectos de calentamiento y concentración. Entre los problemas más comunes que se pueden presentar en sistemas de enfriamiento se encuentran la corrosión, incrustación, ensuciamiento y ataque de microorganismos.

2.7.1. Corrosión

Es el fenómeno mediante el cual los metales retornan a su estado natural, es decir, como compuesto químico o mineral. En un sistema de enfriamiento los metales más comunes son: hierro, cobre, zinc entre otros. Existen diversos tipos de corrosiones, entre los que se encuentran: corrosión uniforme, corrosión puntual, corrosión electroquímica y corrosión por erosión.

Cuando la corrosión no es controlada en un sistema de enfriamiento, causa dos problemas específicos:

1. Falla de equipos, lo que causa costos de reparación y reemplazo, además de costos por parada de planta y pérdidas de producción.
2. Disminución progresiva de la eficiencia del sistema debido a pérdidas en la transferencia de calor por el ensuciamiento que generan los productos de la corrosión. (Lipesa, 1998)

2.7.2. Incrustación

Es una capa densa compuesta principalmente por material inorgánico que ha precipitado porque su solubilidad ha sido excedida. Usualmente es muy densa y fuertemente adherida a sí misma y a la superficie metálica debido a que su formación es de distintos tipos de cristales. (Lipesa, 1998)

La formación de incrustaciones sobre una superficie no es un hecho espontáneo. Para ello tienen que manifestarse cuatro factores simultáneos, los cuales se detallan a continuación (Lipesa, 1998):

– *Supersaturación*

Ocurre cuando la concentración de una sal excede su solubilidad en el agua. En un sistema de enfriamiento ésta se produce por evaporación, cambios de pH o temperatura. La supersaturación es altamente localizada, por ejemplo, en una película laminar de agua próxima a una superficie de transferencia de calor; en la interface gas- líquido de una burbuja o en una grieta o debajo de un depósito. Esto significa que la incrustación puede producirse en un intercambiador de calor aunque la masa de agua se encuentre en condiciones no incrustantes.

– *Nucleación*

La formación inicial de un precipitado ocurre a través de una semilla que origina lo que se denomina nucleación. Existen dos tipos de nucleación: la homogénea, que se manifiesta espontáneamente debido a un grado de supersaturación de las especies incrustantes que originan su propia semilla, y la heterogénea, que ocurre cuando partículas extrañas actúan como semilla para la formación de la incrustación.

Para que la nucleación ocurra deben existir millares de moléculas orientadas hacia un punto fijo reticulado y deben tener un cierto tamaño para que permanezca estable.

– *Tiempo de contacto*

Lograda la supersaturación y la nucleación, debe haber un suficiente tiempo de contacto entre la solución y los sitios nucleares; el tiempo puede variar de segundos a varios años, dependiendo del grado de supersaturación, del tipo y número de sitios de nucleación, temperatura, pH, etc.

Cuando la incrustación está recientemente precipitada, su estructura es generalmente porosa y se puede remover con poco esfuerzo mecánico. Por otro lado, cuando la incrustación tiene tiempo precipitado, es dura, densa, muy adherente y difícil de remover.

Otro factor que es importante mencionar, porque contribuye a la formación, crecimiento y adherencia del depósito, es la rugosidad de la superficie metálica. Una superficie rugosa favorece las condiciones para la formación, crecimiento y adherencia de un depósito sobre esta. En conclusión, en una superficie lisa y pulida la precipitación es menor que en la rugosa.

• *Factores que incrementan la formación de incrustaciones*

Entre los factores que favorecen la formación de incrustaciones sobre los sistemas de enfriamiento se encuentran (Lipesa, 1998):

–pH

La mayoría de las sales presentes en el agua disminuyen su solubilidad cuando el pH aumenta, por lo tanto, incrementa su potencial incrustante. Entre las sales más comunes encontradas en un sistema de enfriamiento, están el carbonato de calcio, hidróxido de zinc, óxido de hierro, silicato de magnesio, fosfato de calcio y fosfato de zinc.

Cuando el pH baja, aumenta la corrosión del agua y se incrementa el potencial incrustante de algunos tipos de sílice.

–Temperatura

Al igual que con el pH, muchas sales comunes en el agua disminuyen su solubilidad cuando aumenta la temperatura.

–Concentración

Cuando la cantidad de algunas especies incrustantes disueltas en el agua exceden su punto de saturación se producen incrustaciones. También otros sólidos disueltos pueden influenciar la tendencia a formar incrustaciones. En general, mientras mayor sea el contenido de sólidos, mayor será la posibilidad de formación de incrustaciones.

–Sólidos disueltos

Son la suma de minerales disueltos incluyendo carbonatos, cloruros, sulfatos y todos los demás minerales presentes. Los sólidos disueltos constituyen un potencial importante para la formación de corrosiones y depósitos o costras en los sistemas de enfriamiento. En la tabla 2.1 se muestra la clasificación del agua de enfriamiento, de acuerdo a la concentración de sólidos disueltos.

Tabla 2.1. Clasificación del agua de enfriamiento, de acuerdo al contenido de sólidos disueltos (PDVSA, 1991)

Clasificación	Sólidos disueltos (ppm)
Muy buena	0-25
Buena	25-50
Aceptable	50-100
Regular	100-150

– *Factores dinámicos*

Las velocidades de flujo menores de 0,6 m/s ocasionan un flujo laminar en los tubos de los intercambiadores, creando condiciones favorables para la formación de incrustaciones, ya que las características y comportamiento de esta agua en el flujo laminar son muy diferentes de las del resto de la masa de agua.

Otro factor dinámico que afecta la formación de incrustaciones son los cambios en las velocidades de flujo, tal es el caso de un codo, ya que este factor cambia la energía del agua.

• *Compuestos comunes en el agua*

El agua como medio natural está constituido por una serie de compuestos, que varían según el lugar de procedencia, entre los más comunes se encuentran (Lipesa, 1998):

– *Carbonato de calcio*

Es la incrustación más común presente en los sistemas de enfriamiento, ya que se produce por efecto de la reversión del bicarbonato de calcio debido a un incremento de la temperatura, tal y como se observa en la reacción siguiente:



En la tabla 2.2 se muestra la clasificación del agua de enfriamiento, de acuerdo a la dureza.

Tabla 2. 2. Clasificación del agua de enfriamiento, de acuerdo a la dureza como CaCO₃ (PDVSA, 1991)

Clasificación	Dureza como CaCO ₃ (ppm)
Suave	< 50
Moderadamente dura	< 75
Dura	< 100
Muy dura	< 150

– *Sulfato de calcio*

Es una sal muy soluble comparada con otras sales presentes en los sistemas de enfriamiento. El sulfato de calcio es de color blanco, sin embargo, puede estar coloreada debido a la presencia de otros compuestos que precipiten con él.

– Silicato de magnesio

Es una incrustación sumamente resistente y vítrea, muy difícil de remover excepto por medios mecánicos o químicos. La precipitación de MgSiO_3 es influenciada por el pH y las concentraciones de Mg y SiO_2 .

La precipitación de silicato de magnesio puede ser prevenida manteniendo el pH por debajo de 7,8 y una relación de $\text{Ca/Mg} > 1$. En áreas de alta transferencia de calor, precipita porque su solubilidad disminuye cuando la temperatura aumenta.

– Sílice

La solubilidad de la sílice aumenta cuando la temperatura y el pH aumentan. Sin embargo, en este último caso, no se puede aumentar el pH del sistema solamente para solventar problemas de sílice a expensas de hacer más insoluble otras especies incrustantes.

Otra forma de minimizar el problema de la precipitación de sílice es manteniendo una relación $\text{Ca/Mg} > 1$. En los sistemas de enfriamiento el contenido de sílice no debe sobrepasar los 150 mg/L.

– Hierro

El hierro en forma ferrosa es totalmente soluble. El problema se presenta cuando en un medio saturado de oxígeno, como el agua de enfriamiento de un sistema de recirculación, el hierro se oxida o cuando al sistema se le agrega un agente oxidante fuerte como el cloro. En la forma oxidada como Fe_2O_3 y posteriormente como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, es insoluble, se precipita y forma incrustaciones.

Los depósitos de hierro se caracterizan por ser de color rojizo y, cuando se mezclan con otros compuestos, toma un color rojo oscuro.

- *Tipos de inhibidores de incrustación*

Los inhibidores más utilizados son los fosfatos inorgánicos, los fosfatos orgánicos o fosfonatos, polímero orgánico (derivado del ácido acrílico) y la última generación de fosfina carbónica o fosfina carboxílico.

Cada uno de esta familia tiene su forma de inhibir la formación de incrustaciones. Existen tres formas de actuar de los inhibidores (Lipesa, 1998):

- Efecto umbral (threshold)

Es la capacidad que tienen los inhibidores de incrustaciones de mantener grandes cantidades de sales incrustantes en solución.

La forma de actuar de los productos mediante el efecto umbral es que el adsorbe sobre los puntos de crecimiento del cristal incrustante, alterando de este modo su modelo de crecimiento, de manera tal que los cristales se formen lentamente y totalmente distorsionados.

- Secuestrantes

Actúa formando un complejo estable y soluble en agua con el ion metálico. En este caso, la relación de producto – ion metálico es un balance molecular 1:1. Se trata de una forma más costosa de prevenir incrustaciones pero bastante efectiva.

- **Dispersantes**

Actúa adsorbiéndose sobre la superficie de la partícula coloidal y reforzando de esta forma su carga negativa, produciendo un efecto de repulsión con otras partículas. De esta forma se evita su aglomeración para formar partículas más grandes que precipiten y forman incrustaciones.

En general, la mayoría de los productos mencionados al inicio como inhibidores de incrustaciones trabajan en las tres formas, con la diferencia de que unos pueden ser mejores dispersantes, otros mejores secuestrantes y otros muy buenos bajo el efecto umbral.

2.7.3. Ensuciamiento

En un sistema de enfriamiento, el ensuciamiento se define como la precipitación de materiales que no forman incrustaciones. Otra definición los señala como depósitos originados por material suspendidos en el agua que se difieren de las incrustaciones porque estos últimos se forman a partir de material disuelto o que está en solución.

Un depósito por ensuciamiento puede formarse de (Lipesa, 1998):

- Sólidos suspendidos (lodo, hierro, materia orgánica) presentes en el agua de compensación.
- Precipitación de aditivos químicos debido a un pésimo control.
- Sólidos suspendidos producto de la corrosión y de sales incrustantes.
- Contaminación orgánica por fuga del proceso.
- Crecimiento microbiano.
- Partículas provenientes del aire que son inducidas al sistema de enfriamiento durante el contacto aire- agua.

- *Factores que influyen en la precipitación de los sólidos suspendidos*

Hay varios factores que influyen en el proceso de precipitación de los sólidos suspendidos, los cuales aceleran el ensuciamiento en un sistema cuando están presentes dos o más de ellos. Estos factores son (Lipesa, 1998):

- *Carga de la partícula*

La precipitación de partículas es favorecida cuando las cargas de éstas son opuestas, porque se unen para producir partículas más grandes y luego se sedimentan produciendo el ensuciamiento. Es evidente que, a mayor cantidad de sólidos suspendidos con esta característica, mayor será el efecto del ensuciamiento.

- *Factor hidrodinámico*

El tipo de flujo existente en un sistema es una variable muy importante. Es conocido que, en un régimen laminar, el fluido se mueve en capas y cada partícula sigue un modelo llano o liso, lo que favorece su precipitación sobre la superficie. En un régimen turbulento, el fluido se mueve en forma desordenada y cada partícula sigue un modelo irregular, lo que disminuye la posibilidad de formación de depósitos por sólidos suspendidos y, por supuesto, disminuye el potencial de ensuciamiento.

- *Características de la superficie*

Una vez que las partículas han sedimentado, la característica del depósito va a depender de la concentración de las fuerzas atractivas entre partículas y la superficie que ellas contacten. Si la atracción entre las partículas es muy fuerte, el depósito será denso y bien estructurado, y si el depósito es débil, el depósito será suave.

2.7.4. Organismos microbiológicos

Los sistemas de enfriamiento son medios muy favorables para el crecimiento microbiológico, lo que contribuye a la formación de depósitos, ensuciamiento y corrosión dentro del sistema. Estos microorganismos son bacterias, algas y hongos (Lipesa, 1998).

- *Bacterias*

Son células simples, microscópicas, se reproducen por fisión binaria y, en general, carecen de clorofila. Algunas de ellas producen una baba que sirve como agente ligante para los sólidos suspendidos presentes en el sistema de enfriamiento, formando una masa pegajosa que obstruye la circulación del agua de enfriamiento.

- **Algas**

Viven en grandes cantidades en la tierra, abono, suciedad, etc. Son introducidas a un sistema de enfriamiento por el polvo y sucio que es arrastrado por el aire. Pueden vivir a temperaturas entre 50 y 60 °C y a temperaturas normales; además, no son muy sensitivas al pH.

- **Hongos**

Son organismos muy simples, sin clorofila y se reproducen por esporulación. Viven en la tierra y son inmóviles, pero sus esporas son transportadas por el viento y de ésta manera son introducidas a los sistemas de enfriamientos.

2.8. DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE ESTABILIDAD

Uno de los principales problemas de los sistemas de enfriamiento es la formación de incrustaciones de carbonato de calcio en las áreas de transferencia de calor y la tendencia corrosiva e incrustante del agua utilizada como medio enfriador. En este sentido, se han propuesto y establecido algunos métodos para predecir la formación de carbonato de calcio y de dicha tendencia. Estos métodos están basados en el equilibrio termodinámico del ácido carbónico, la alcalinidad, la temperatura y los sólidos disueltos. Entre los índices de estabilidad más comunes se encuentran el de Langelier (IL) y el de Ryznar (IR) (NALCO, 2001).

3.8.1. Índice de Langelier

El índice de la saturación de Langelier (a veces índice de la estabilidad de Langelier) es un número calculado usado para predecir la estabilidad del carbonato de calcio del agua. Indica si el agua se precipitará, disuelve, o esté en equilibrio con carbonato de calcio. Langelier desarrolló un método para predecir el pH en el cual el agua se satura con el carbonato de calcio (llamado pH_s). El IL se expresa como (Blake, 1980):

$$IL = pH - pH_s \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

pH : pH del agua

pH_s : pH de saturación

El pH de saturación se calcula a partir de:

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde:

$$A = \frac{\text{Log}[TDS]-1}{10} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$B = -13,12 \times \text{Log}(T + 273) + 34,55 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$C = \text{Log}[Ca^{+2}] \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$D = \text{Log}[M] \quad (\text{Ec. 2.7})$$

siendo:

TDS: sólidos disueltos (ppm)

T: temperatura (°C)

[Ca⁺²]: dureza cálcica en forma de CaCO₃ (ppm)

[M]: alcalinidad total en forma de CaCO₃ (ppm)

El **pH_s** también se puede calcular por medio de la ecuación:

$$pH_s = A + B - \text{Log}[Ca^{+2}] - \text{Log}[M] \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde **A** y **B**: constantes relacionadas con la temperatura y contenido de sólidos disueltos, las cuales se toman de las tablas C.2 y C.3 del anexo C.

La interpretación de los resultados del índice de Langelier está dada por:

IL = 0, agua en equilibrio químico.

IL < 0, agua con tendencia a ser corrosiva.

IL > 0, agua con tendencia incrustante. (Carrier, 1968)

3.8.2. Índice de Ryznar

Basándose en diversos estudios reales sobre distintos sistemas, Ryznar modifico el índice de Langelier para predecir la tendencia incrustante o corrosiva de un agua.

$$IR = 2pH_s - pH \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde pH_s se calcula por las ecuaciones 2.3 ó 2.8.

La interpretación de los resultados del IR está dada por:

IR de 4,0 – 5,0, fuertemente incrustante.

IR de 5,0 – 6,0, ligeramente incrustante.

IR de 6,0 – 7,0, ligeramente incrustante o corrosiva.

IR de 7,0 – 7,5, significativamente corrosiva.

IR de 7,5 – 9,0, fuertemente corrosiva.

IR de 9,0 y mayor, intolerablemente corrosiva. (Carrier, 1968)

2.9. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

El control estadístico de proceso persigue el mejoramiento continuo del proceso, buscando incrementar la calidad, la productividad y garantizar de esta manera la competitividad de la empresa, único cambio seguro hacia la calidad total.

Antes de aplicar cualquier método de control estadístico es necesario identificar qué tipo de variable se estudiará, para ello las variables se clasifican en (Juram, 1994):

- Variable cualitativa o atributo
Expresa una cualidad, por ejemplo: color, sabor, tono, apariencia, etc.
- *Variable cuantitativa*
Es una variable que es medible usando unidades, por ejemplo; diámetro, espesor, vida útil, capacidad, resistencia a la rotura. Estas variables pueden ser continuas o discretas.

Por otra parte se debe establecer si la variable en estudio sigue un comportamiento aleatorio, o si por el contrario es de tipo asignable; entendiéndose por variables aleatorias aquellas en las que se desconoce el resultado que se obtendrá pero posee un patrón regular de comportamiento, por lo que si se conoce un conjunto de posibles resultados. Mientras que las variables asignables son aquellas que no poseen un patrón de comportamiento regular, y corresponden a factores individuales que no siempre se pueden identificar a primera vista pero que causan un efecto notable de variación. Al respecto se ha establecido, que las causas de variación pueden ser (Pola, 1993):

– Causas comunes

Son causas cuyos efectos individuales son pequeños y difíciles de eliminar, producen una variabilidad estable y predecible.

Para identificar causas comunes no se emplean los métodos estadísticos de proceso, debido a su naturaleza de variables aleatorias. Así pues, para estas causas, se realizan ajustes de proceso y acciones correctivas muy sencillas.

- Causas especiales

Se producen debido a variables asignables, que están asociadas a uno o pocos factores que producen efectos notables de variación, y no responden a ningún modelo probabilístico. Entre las causas especiales se encuentran: mal ajuste de máquinas, errores del operador, defectos en materias primas entre otras.

Es importante identificar las causas especiales para tomar las acciones preventivas y correctivas pertinentes. Para detectar causas especiales; se utilizan los gráficos de control estadísticos de proceso (CEP).

Los gráficos de control o cartas de control son una importante herramienta utilizada en control de calidad de procesos. Básicamente, una carta de control es un gráfico en el cual se representan los valores de algún tipo de medición realizada, durante el funcionamiento de un proceso continuo, y que sirve para controlar dicho proceso.

Los gráficos de control pueden clasificarse según las características a estudiar:

Por variable:

- Gráficos de medias.
- Gráficos de rangos.
- Gráficos de medianas.
- Gráficos de desviaciones.
- Gráficos de individuos.

Por atributos:

- Proporción defectuosa.
- Número de defectuosos.
- Número de defectos.
- Proporción de defectos.

Los gráficos que se aplican en este estudio, son los de tipo medias y rangos, ya que todas las variables son continuas y se tiene facilidad de toma de datos. Para la construcción de estos gráficos de control, se requiere:

1. Tomar subgrupos, el tamaño dependerá del tipo de gráfico a realizar, en general se utilizan de tres a cinco mediciones.
2. Llevar un registro de cualquier cambio del proceso (material, operario, herramienta, etc.) durante el periodo de estudio.
3. Calcular los límites de control; si todos los puntos están fuera de los límites, el proceso se encuentra bajo control estadístico. Sin embargo, si algunos puntos caen fuera, se dice que el proceso no está bajo control estadístico; entonces debe hallarse la causa imputable de esta variación excesiva y eliminarla.

2.9.1. Gráficos de media y rango

Los gráficos de media analizan la ubicación promedio de la variable analizada del proceso (figura 2.8). La línea central de la grafica corresponde a la media aritmética de n datos o a la medida aritmética de las medianas (K) en caso de subgrupo de datos. (Pola, 1993).

Mientras que los gráficos de rango analizan la variabilidad o amplitud de la variable en estudio. La línea central corresponde al rango de los datos (R) o al rango promedio de los rangos (\bar{R}), en caso de subgrupos de datos. (Pola, 1993)

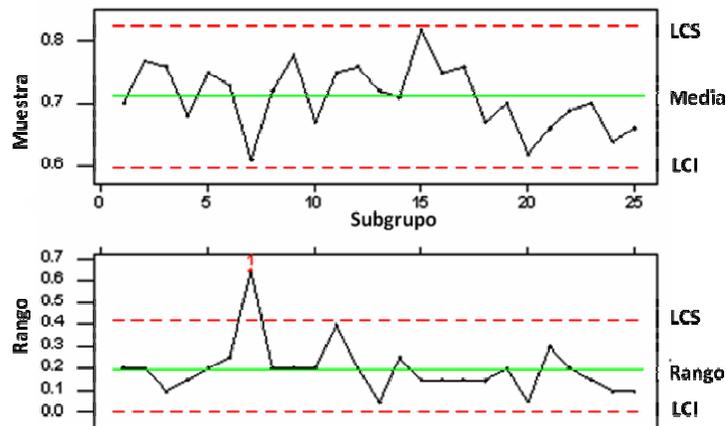


Figura 2. 8. Representación de los gráficos de media y rango respectivamente

Para n datos se tiene que la media aritmética (\bar{X}) está dada por:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

X = Medidas de datos individuales.

n = número de mediciones.

Mientras que para K subgrupo de n dato la media aritmética (\bar{X}) está dada por:

$$\bar{X} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_K}{K} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde:

\bar{X} = Es la media aritmética de cada subgrupo.

K = número de subgrupos.

Para n datos el cálculo del rango (R) está dado por:

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

X_{\max} = Valor máximo de n datos.

X_{\min} = Valor mínimo de n datos.

Para K subgrupo de n datos el rango promedio (\bar{R}) está dado por:

$$\bar{R} = \frac{\bar{R}_1 + \bar{R}_2 + \dots + \bar{R}_K}{K} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde

\bar{R} = rango de cada subgrupo.

K = número de subgrupos.

Los límites de control son calculados para determinar la variación de cada subgrupo, están basados en el tamaño de los subgrupos y se calculan de la siguiente forma:

Para gráficos de media:

$$LCS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \times \bar{R} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

$$LCI_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \times \bar{R} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde:

$LCS_{\bar{X}}$ = límite de control superior de media.

$LCI_{\bar{X}}$ = límite de control inferior de media.

A_2 : constantes tabuladas que dependen del tamaño de la muestra (anexo E.1).

\bar{R} : rango promedio de n datos.

Para gráficos de rango:

$$LCS_R = D_4 \times \bar{R} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

$$LCI_R = D_3 \times \bar{R} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde:

LCS_R = límite de control superior de rango.

LCI_R = límite de control inferior de rango.

D_4 y D_3 : son constantes tabuladas que dependen del tamaño de la muestra (anexo E.1).

2.10. ANÁLISIS DE CAPACIDAD

La capacidad del proceso (6σ) es una medida de la dispersión natural de la variable que mide la calidad del proceso o servicio, pero no dice nada si de dicha calidad se ajusta o no a las especificaciones. Se basa en el cálculo de distintos índices los cuales ocupan la información entregada por los valores de media y desviación estándar. (Ruíz, 2006)

2.10.1. Índice de capacidad C_p

Se define como la comparación de la variación del proceso con respecto a la variación permitida por las especificaciones. Su cálculo se realiza a través de:

$$C_p = \frac{LCS-LCI}{6 \times \sigma} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Donde σ = desviación estándar del proceso.

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde d_2 = constante que depende del número de subgrupo y se toman de la tabla E1 del anexo E.

Si $C_p < 1$, entonces se dice que el proceso no es potencialmente capaz.

Si $C_p > 1$, entonces se dice que el proceso es potencialmente capaz.

2.11. ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones, orientando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar, basado en la realidad actual. El objetivo de ésta metodología va dirigido a ofrecer una herramienta que ayude en la determinación de la jerarquía de equipos de una planta, que permita manejarla de manera controlada y en orden de prioridades. De acuerdo al nivel de criticidad los equipos se clasifican en (Suarez, 2008):

No critico

Semi critico

Critico

En la figura 2.9 se muestran los parámetros tomados en cuenta en el análisis de criticidad.

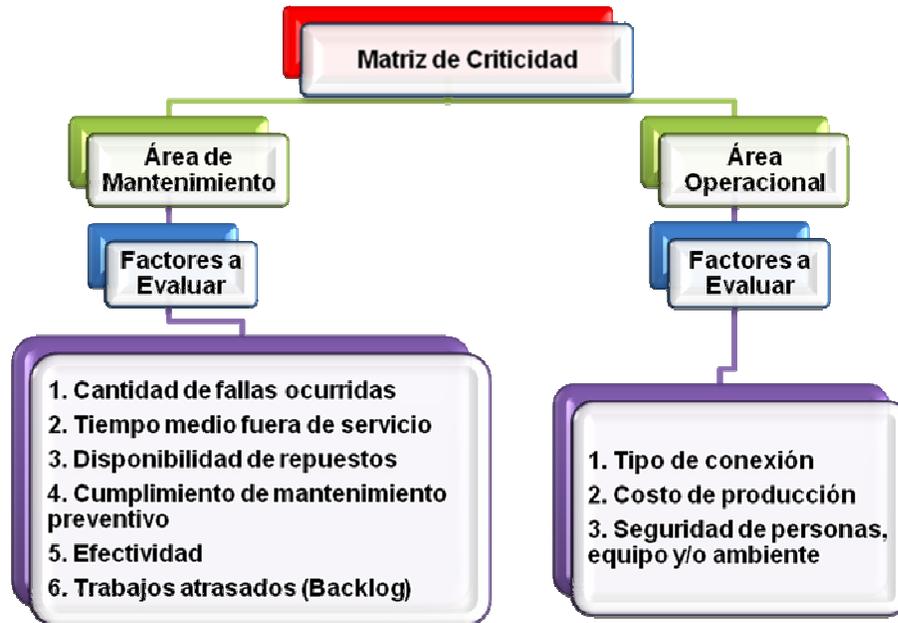


Figura 2. 9. . Factores utilizados en el análisis de criticidad (Suarez, 2007)

$$Criticidad = [K_1 \times (\sum A.M) + K_2 \times (\sum A.O)] \times 100\% \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde:

K_1 : Constante cuyo valor es 0,027.

K_2 : Constante cuyo valor es 0,0555.

$A.M$: Total de puntos obtenidos en el área de mantenimiento.

$A.O$: Total de puntos obtenidos en el área de operaciones

La constante K_1 varía si la cantidad de parámetros del área de mantenimiento aumenta o disminuye, de igual modo sucede con la constante K_2 pero relacionado con los parámetros del área de operaciones. Esto dado a que dichas constantes garantizan que el resultado obtenido mediante la ecuación 2.20 no exceda el 100%.

A continuación se describen los factores que se evalúan en el área de mantenimiento y operaciones (Suarez, 2008):

- *En el área de mantenimiento*

- Cantidad de fallas ocurridas

Representa la cantidad o número de veces que el equipo falla durante el tiempo de estudio.

- Tiempo medio fuera de servicio (MTFS)

Es el promedio de tiempo que el equipo está fuera de servicio, durante el tiempo de estudio. Se calcula por medio de la ecuación 2.21.

$$MTFS = \frac{\sum_{i=1}^n TFS}{N} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Donde TFS = Tiempo fuera de servicio

- Disponibilidad de Repuestos (DR)

Es el porcentaje de componentes nuevos adquiridos con respecto a la cantidad de repuestos requeridos o necesarios para mantenimiento, su cálculo se realiza por medio de la ecuación 2.22.

$$DR = \frac{\text{Cantidad adquirida}}{\text{Cantidad Requerida}} \times 100\% \quad (\text{Ec. 2.22})$$

- Cumplimiento del Mantenimiento Preventivo (CMP)

Es el porcentaje en que se ejecutan las órdenes de trabajo de mantenimiento preventivo. Se calcula mediante la ecuación 2.23.

$$CMP = \frac{ODT \text{ Ejecutadas}}{ODT \text{ Emitidas}} \times 100\% \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Donde *ODT*= ordenes de trabajo

– Efectividad

Es el porcentaje del tiempo que el activo está realmente en operatividad con respecto al tiempo programado, su cálculo esta dado por la ecuación 2.24.

$$Efectividad = \frac{Horas \text{ Efectivas}}{Horas \text{ Disponibles}} \times 100\% \quad (\text{Ec. 2.24})$$

– Trabajos atrasados (Backlog)

Indica la cantidad de trabajo pendiente por realizar en un periodo determinado en función de las horas disponibles. Se calcula mediante la ecuación 2.25.

$$Backlog = \frac{H \text{ de las ordenes de trabajo pendientes por ejecución}}{H \text{ disponible por semana}} \times 100\% \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Donde H= Horas

- *En el área de operaciones*

– *Tipo de conexión*

Este factor evalúa como está conectado el activo operacionalmente, ya sea en serie, paralelo o combinación.

– *Costo de producción en el periodo a evaluar*

Este indicador resulta de la comparación de los costos que trae como consecuencia la falla del activo, con los costos que se propone como meta la organización.

– *Seguridad del personal, equipos y/o ambiente*

Es la evaluación de las consecuencias por falla del activo sobre la seguridad de las personas, los equipos y el medio ambiente.

2.12. PROGRAMAS ESTADÍSTICOS

En el mercado existe una gran variedad de programas estadísticos, éstos analizan datos provenientes de mediciones y/o experimentos industriales, validación de métodos analíticos entre otros. También se encuentran programas que no son especialmente estadísticos pero que pueden hacer algunos cálculos en estadística aplicada. Estos programas han impulsado y siguen impulsando enormemente la labor de los investigadores que desean utilizar la estadística como apoyo en su trabajo.

2.11.1 Statgraphics plus

Dentro de los programas estadísticos se puede encontrar al *Statgraphics plus*, éste programa realiza todas las rutinas estadísticas que normalmente requieren las industrias desde estadística básica hasta análisis complejos como análisis de control de procesos.

Además cuenta con módulos de series de tiempo, estadística multivariada y regresión avanzada que coadyuvan a tener un mejor conocimiento del fenómeno de interés, establece relación entre las variables y reduce la dimensionalidad de los datos para tener una perspectiva global de la problemática.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO

El enfoque principal de esta investigación está en la evaluación del sistema de enfriamiento de las unidades motocompresoras, debido a las altas temperaturas que se manifiestan en éstas, durante los periodos de operatividad. Se hace énfasis en el motocompresor K-2, ya que las demás unidades se encuentran fuera de servicio.

A continuación se muestra el desarrollo de los objetivos planteados así como la información más relevante del proceso de enfriamiento.

3.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERACIONALES ACTUALES DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR AGUA

Con el objeto de identificar las condiciones actuales del sistema de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2, se realizó un cotejo de datos de temperaturas operacionales actuales con los de diseño, a fin de tener una base de datos amplia que refleje, por medio de gráficos de tendencias, las posibles desviaciones que pudieran existir entre ambos.

3.1.1. Recolección de datos de diseño de las unidades motocompresoras

Las condiciones de temperaturas de diseño de las unidades motocompresoras fueron obtenidas a partir de la hoja de datos del fabricante del equipo (*data sheets*), encontrada en los manuales de operación y planos de procesos de la planta, que son facilitados solo al personal de trabajo, por medio de una red de información interna. En estos documentos se encuentran los valores de temperatura de diseño (tanto de entrada como de

salida) de las etapas de compresión y cilindros de fuerza, como también del agua que circula por las diferentes partes del motocompresor, los cuales se muestran en las tablas 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3. 1. Datos de temperaturas de diseño de los motocompresores

Parámetros (°F)	Rango Nominal	Alarma	Paro
Cilindros de fuerza	700-800	850	1000
Succión de la 1era etapa de compresión	85-100	--	--
Descarga de la 1era etapa de compresión	120-250	250	280
Succión de la 2da etapa de compresión	120-150	--	--
Descarga de la 2da etapa de compresión	150-250	250	280
Succión de la 3era etapa de compresión	120-150	--	--
Descarga de la 3era etapa de compresión	150-250	250	280

Tabla 3. 2. Datos de temperaturas de diseño del agua de enfriamiento de los motocompresores

Parámetros (°F)	Rango Nominal	Alarma	Paro
Entrada del agua a camisas de cilindros compresoras	120-150	190	195
Salida del agua de camisas de cilindros compresoras	150-170	190	195
Entrada del agua a camisas de cilindros de fuerza	120-150	150	195
Salida del agua de camisas de cilindros fuerza	150-170	150	195
Entrada del agua a galería de aire de barrido	120-135	150	195
Salida del agua a galería de aire de barrido	130-140	150	195

3.1.2. Recolección de datos operacionales actuales de temperaturas de la unidad motocompresora K-2

A fin de conocer las condiciones operacionales actuales del sistema de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2, fue necesario hacer visitas frecuentes a la planta, para realizar la toma de los datos operacionales de temperaturas, durante veinte días continuos, sin variación apreciable del clima.

La toma de datos de temperaturas se hizo mediante visualización directa en el panel de control de la unidad motocompresora, la cual arrojó valores reales segundo a segundo, de los diferentes procesos de combustión de los cilindros de fuerza, las etapas de compresión a los distintos niveles manejados, tanto en la succión como en la descarga y del agua que recorre

las camisas internas del motor y la galería de aire de barrido. Los valores tomados se muestran en las tablas A.1 y A.2 del anexo A.

Estos datos también se pudieron comprobar a través del programa de monitoreo de la planta, llamado SCADA, el cual da un registro continuo del cambio de las variables; el programa toma los valores directamente de la consola, mediante un sistema computarizado y muestra los datos en tiempo real.

3.2. DETERMINACIÓN DE LA TENDENCIA DEL AGUA UTILIZADA COMO MEDIO DE ENFRIAMIENTO, A SER CORROSIVA O INCRUSTANTE, POR MEDIO DE LOS ÍNDICES DE LANGELIER Y RYZNAR

El sistema de enfriamiento debe seguir un programa integrado de tratamiento químico, para controlar la formación de incrustaciones, corrosión y presencia de lodos en las camisas de los cilindros compresores, cilindros de fuerza, galería de aire de barrido, tuberías del enfriador (fin fan cooler) y tuberías de agua de enfriamiento en general. En esta sección se determinó la calidad del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2, por medio del cálculo de los índices de Langelier y Ryznar.

3.2.1. Caracterización del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2

Se efectuaron caracterizaciones del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2, tomando muestras de ésta, en las válvulas de purgas de los cilindros de fuerza, cilindros compresores y galería de aire de barrido (figura 3.1), a fin de conocer la calidad del agua. Las muestras se tomaron

siguiendo los lineamientos de la norma *COVENIN 2709:2002 Aguas naturales, industriales y residuales. Guía para las técnicas de muestreo*; sin variaciones apreciables del clima.



Figura 3. 1. Puntos de tomas de agua de enfriamiento en la galería de aire de barrido, cilindros compresores y cilindros de fuerza respectivamente, utilizados para muestreo del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2

Las muestras recolectadas se llevaron al laboratorio de la empresa NALCO Anaco, para su posterior análisis fisicoquímico. Los análisis realizados al agua fueron: pH, dureza total, sólidos suspendidos y disueltos, alcalinidad total, cloruros, sílice, hierro total, calcio, bicarbonatos y magnesio, de acuerdo a los métodos estandarizados de las normas *ASTM*. En la tabla 3.3 se muestran los valores permitidos para la calidad del agua de enfriamiento de motocompresores, de acuerdo a la normativa interna de PDVSA.

Tabla 3.3. Valores permitidos para la calidad del agua de enfriamiento de motocompresores, de acuerdo a la norma PDVSA

Característica	Valores
pH	6,5-8,5
Dureza total (ppm)	<150
Sólidos suspendidos (ppm)	<50
Sólidos disueltos (ppm)	<25
Alcalinidad total (ppm)	150
Cloruros (ppm)	2,4-40
Sílice (ppm)	<150
Hierro total (ppm)	<2
Calcio (ppm)	<200
Bicarbonato (ppm)	<100
Magnesio (ppm)	<70

3.2.2. Cálculo de los índices de Langelier y Ryznar

Con el propósito de conocer la tendencia corrosiva o incrustante del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2, se calcularon los índices de estabilidad del carbonato de calcio, a través de la relación que existe entre el pH, la alcalinidad total, sólidos totales disueltos y la dureza cálcica (CaCO_3), en función de la temperatura, de acuerdo a los principios de Langelier (IL) y Ryznar (IR). Los datos empleados en estos cálculos corresponden a los promedios de los análisis fisicoquímicos del agua de enfriamiento, mostrados en el anexo B.

Para calcular los índices de estabilidad de las muestras de agua fue necesaria la estimación del pH de saturación (pH_s), mediante la ecuación 2.3. Esta ecuación depende de las constantes A , B , C y D , calculadas con las ecuaciones 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 respectivamente.

$$A = \frac{\log[220,00] - 1,00}{10,00} = 0,13$$

$$B = [-13,12 \times \log(25,00 + 273,15)] + 34,55 = 2,09$$

$$C = \log[75,30] = 1,88$$

$$D = \log[183,00] = 2,26$$

$$pHs = (9,30 + 0,13 + 2,09) - (1,88 + 2,26) = 7,38$$

El valor de pHs obtenido se sustituyó en las ecuaciones 2.2 y 2.9, para obtener los índices de Langelier y Ryznar. Este cálculo se repitió para diferentes temperaturas y así estudiar el efecto de la tendencia del agua de enfriamiento en el motocompresor, a medida que ocurren incrementos de éstas, mediante la construcción de gráficos.

$$IL = 7,90 - 7,38 = 0,52$$

$$IR = (2 \times 7,59) - 7,90 = 6,86$$

El pHs también se cálculo por medio de la ecuación 2.8; las constantes A y B se obtuvieron por medio de un proceso de interpolación, a partir de las tablas C.2 y C.3 mostradas en el anexo C. Una vez obtenido el valor de pHs , se calcularon nuevamente los índices de Langelier y Ryznar, mediante las ecuaciones 2.2 y 2.9 respectivamente. En los casos que correspondía se empleó el valor de 25°C como temperatura de referencia.

$$pHs = 2,00 + 9,83 - \log[75,30] - \log[183,00] = 7,69$$

$$IL = 7,90 - 7,69 = 0,21$$

$$IR = (2 \times 7,69) - 7,90 = 7,48$$

3.3. ANÁLISIS DE CRITICIDAD PARA PRECISAR LOS EQUIPOS Y/O ACCESORIOS DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO QUE PRESENTAN MAYORES FALLAS

Se aplicó un análisis de criticidad donde se involucraron factores operacionales y de mantenimiento, con el objeto de precisar cuáles son los equipos y/o accesorios, del sistema de enfriamiento, que originaron la mayor incidencia de fallas durante el año 2010. Se seleccionaron todos los componentes que conforman el sistema, ya que no se contó con un registro de control de fallas de éstos en la planta. En la figura 3.2 se muestran los equipos y accesorios del sistema de enfriamiento que se utilizaron en el análisis de criticidad.



Figura 3. 2. Equipos y accesorios del sistema de enfriamiento, utilizados para el análisis de criticidad

Por no contar con registros de datos reales para realizar el estudio, fue necesario aplicar encuestas al personal especializado de la planta, las cuales

consistieron en responder interrogantes relacionadas con los factores a evaluar. Se realizaron dos modelos de encuestas, una dirigida al personal de mecánica e instrumentación (área de mantenimiento) y la otra al personal de operaciones (área de operaciones). En las figuras 3.3 y 3.4, se muestran los modelos de encuestas aplicadas para recabar la información necesaria para la ejecución del análisis.

ENCUESTA DIRIGIDA AL PERSONAL DE MANTENIMIENTO ADSCRITO A LA PCSAIII CON EL FIN DE OBTENER INFORMACIÓN ACERCA DEL DESEMPEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LA UNIDAD MOTOCOMPRESORA "K-2"											
Marque en cada componente la opción más acertada de acuerdo a la pregunta, en caso de no ser una pregunta de selección responda de forma breve, preferiblemente en números. Si usted no maneja la información dejar las opciones sin responder.											
1. ¿QUÉ CANTIDAD DE FALLAS OCURRIERON DURANTE EL AÑO 2010 EN LOS SIGUIENTES COMPONENTES?											
A. Entre 0 a 1 falla			B. Entre 1 a 3 fallas			C. Más de 3 fallas					
- Enfriador						- Sistema de inyección de químico					
- Filtro de arena						- Bombas					
- Agua de enfriamiento						- Medidor de nivel					
- Tanque de compensación						- Tubertas y accesorios					
2. ¿CUÁL FUE EL TIEMPO PROMEDIO FUERA DE SERVICIO DURANTE EL AÑO 2010 DE LOS SIGUIENTES COMPONENTES?											
A. Entre 0 a 4 horas			B. Entre 4 a 8 horas			C. Más de 8 horas					
- Enfriador						- Sistema de inyección de químico					
- Filtro de arena						- Bombas					
- Agua de enfriamiento						- Medidor de nivel					
- Tanque de compensación						- Tubertas y accesorios					
3. ¿APROXIMADAMENTE CUÁNTAS SOLICITUDES DE REPUESTO SE EMITIERON DURANTE EL AÑO 2010 A LOS SIGUIENTES COMPONENTES? ¿A CUÁNTAS SE LES DIO RESPUESTA?											
		S		R				S		R	
- Enfriador						- Sistema de inyección de químico					
- Filtro de arena						- Bombas					
- Agua de enfriamiento						- Medidor de nivel					
- Tanque de compensación						- Tubertas y accesorios					
4. ¿APROXIMADAMENTE CUÁNTOS TRABAJOS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO FUERON SOLICITADOS DURANTE EL AÑO 2010 A LOS SIGUIENTES COMPONENTES? ¿CUÁNTOS FUERON EJECUTADOS?											
		S		E				S		E	
- Enfriador						- Sistema de inyección de químico					
- Filtro de arena						- Bombas					
- Agua de enfriamiento						- Medidor de nivel					
- Tanque de compensación						- Tubertas y accesorios					
5. ¿CUÁNTAS HORAS EFECTIVAS OPERARON DURANTE EL AÑO 2010 LOS SIGUIENTES COMPONENTES?											
- Enfriador						- Sistema de inyección de químico					
- Filtro de arena						- Bombas					
- Agua de enfriamiento						- Medidor de nivel					
- Tanque de compensación						- Tubertas y accesorios					
6. ¿EN PROMEDIO CUÁNTAS HORAS HOMBRES (H-H) CREE USTED QUE QUEDARON PENDIENTE POR REALIZAR MANTENIMIENTO DURANTE EL AÑO 2010 A LOS SIGUIENTES COMPONENTES?											
- Enfriador						- Sistema de inyección de químico					
- Filtro de arena						- Bombas					
- Agua de enfriamiento						- Medidor de nivel					
- Tanque de compensación						- Tubertas y accesorios					

Figura 3.3. Modelo de encuesta dirigida al personal de mantenimiento

ENCUESTA DIRIGIDA AL PERSONAL DE OPERACIONES ADSCRITO A LA PCSAIII CON EL FIN DE OBTENER INFORMACIÓN ACERCA DEL DESEMPEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LA UNIDAD MOTOCOMPRESORA "K2"			
Marque en cada componente la opción más acertada de acuerdo a la pregunta. Si usted no maneja la información dejar las opciones sin responder.			
7. ¿CREE USTED QUE EL COSTO EMPLEADO PARA EL MANTENIMIENTO DURANTE EL AÑO 2010 DE LOS SIGUIENTES COMPONENTES FUE?			
A. MENOR A LO QUE DEBERIA		B. IGUAL A LO QUE DEBERIA	C. MAYOR A LO QUE DEBERIA
- Enfriador			- Sistema de inyección de químico
- Filtro de arena			- Bombas
- Agua de enfriamiento			- Medidor de nivel
- Tanque de compensación			- Tuberías y accesorios
8. ¿EN PROMEDIO CUANDO OCURRIO, SE MANTUVO O SE REPARO UNA FALLA DURANTE EL AÑO 2010 ESTOS COMPONENTES OCASIONARON?			
A. LESIONES A LAS PERSONAS	B. DAÑO AL AMBIENTE		C. LESIONES A LAS PERSONAS Y DAÑO AL AMBIENTE
- Enfriador			- Sistema de inyección de químico
- Filtro de arena			- Bombas
- Agua de enfriamiento			- Medidor de nivel
- Tanque de compensación			- Tuberías y accesorios

Figura 3. 4. Modelo de encuesta dirigida al personal de operaciones

Se realizaron en total catorce encuestas, siete por cada área consultada, lo que significó que por cada encuesta se obtuvieron, en algunos casos, ocho respuestas o menos, ya que no todo el personal manejaba la información por completo, dejando preguntas sin responder.

El criterio usado para escoger la opción considerada como más confiable para el análisis, en las preguntas de selección, estuvo basado en

escoger aquella opción que fuese respondida mayor número de veces, mientras que en el caso de las respuestas en cantidad numérica, se eligió la cantidad que contribuyó, en mayor parte, con la criticidad del equipo, logrando obtener la ponderación más alta.

Luego de haber resumido toda la información de las encuestas, se procedió a seleccionar la ponderación correspondiente de los factores analizados en el área de mantenimiento y operaciones, de acuerdo a las tablas 3.4 y 3.5 respectivamente.

Tabla 3.4. Ponderación de criterios de criticidad para el factor de mantenimiento

Factor a Evaluar	Criterios		Ponderación
1. Cantidad de Fallas Ocurridas en el Período a evaluar.	A.	$0 \leq F \leq 1$	1
	B.	$1 \leq F \leq 3$	2
	C.	$F > 3$	3
2. Tiempo Promedio Fuera de Servicio (MTFS) en horas en el Período a evaluar	A.	$MTFS \leq 4$	1
	B.	$4 < MTFS \leq 8$	2
	C.	$MTFS > 8$	3
3. Disponibilidad de Repuestos (DR) en el Período a evaluar	A.	$DR \geq 80\%$	1
	B.	$50\% \leq DR < 80\%$	2
	C.	$DR < 50\%$	3
4. Cumplimiento de Mantenimiento Preventivo (CMP) en el Período a evaluar	A.	$75\% \leq CMP \leq 100\%$	1
	B.	$50\% \leq CMP < 75\%$	2
	C.	$0\% \leq CMP < 50\%$	3
5. Efectividad (E)	A.	$E \geq 80\%$	1

	B.	$50\% \leq E < 80\%$	2
	C.	$0\% \leq E < 50\%$	3
6. Trabajos atrasados (Backlog)	A.	$0 \leq \text{Backlog} \leq 2$	1
	B.	$2 < \text{Backlog} \leq 5$	2
	C.	$\text{Backlog} > 5$	3

Tabla 3.5. Ponderación de criterios de criticidad para el factor de operaciones

Factor a evaluar	Criterios		Ponderación
7. Tipo de conexión	A.	Sistema en paralelo	1
	B.	Combinación	2
	C.	Sistema en serie	3
8. Costo de Producción en el Período a evaluar	A.	Menor a la meta	1
	B.	Igual a la meta	2
	C.	Mayor a la meta	3
9. Seguridad del personal, equipos y/o ambiente	A.	Sin consecuencias	1
	B.	Efecto temporal sobre seguridad de personas, equipos y/o ambiente	2
	C.	Efecto Permanente sobre la Seguridad de personas, equipos y/o ambiente	3

A continuación se explica el significado de cada factor implicado en el análisis y se muestra cómo se seleccionaron las ponderaciones, de acuerdo a los resultados de las encuestas. Se ejemplificó el cálculo de los factores

evaluados en el análisis de criticidad para el caso del enfriador por aire (fin fan cooler).

1. Cantidad de fallas ocurridas

Se refirió a la cantidad de fallas ocurridas durante el período evaluado. Este factor estuvo relacionado con la primera pregunta de la encuesta dirigida al personal de mantenimiento e instrumentación, donde directamente fueron colocados los rangos de la tabla 3.4, de manera tal que la información generada por el personal de la planta, proporcionó una respuesta directa. En el caso del enfriador por aire, la opción seleccionada mayormente fue la C, lo que correspondió a una ponderación de tres puntos.

2. Media de los tiempos fuera de servicio

Estuvo dada por el tiempo promedio transcurrido desde la ocurrencia de una falla hasta la puesta en operatividad del equipo o accesorio evaluado, una vez que ésta se solventó. Este factor se relacionó con la segunda pregunta de la encuesta dirigida al personal de mantenimiento y las opciones de respuestas estuvieron relacionadas directamente con lo establecido en la tabla con la tabla 3.4, para obtener una respuesta directa. En el caso del enfriador por aire la respuesta mayormente seleccionada fue la opción C, lo que correspondió a una ponderación de tres puntos.

3. Disponibilidad de Repuestos (DR)

Representó la relación existente entre la cantidad de repuestos adquiridos con respecto a la cantidad solicitada. La tercera pregunta de la encuesta, dirigida al personal de mantenimiento, estuvo relacionada con estas dos variables, siendo la relación de cuatro y seis los valores obtenidos para el enfriador por aire. Posteriormente se determinó el factor mediante la Ec. 2.22, de la siguiente manera:

$$DR = \frac{4}{6} \times 100\% = 66,67\%$$

Una vez que se obtuvo el valor de DR, se seleccionó la ponderación respectiva en la tabla 3.4, siendo dos puntos por encontrarse en el rango $50\% \leq DR < 80\%$.

4. Cumplimiento del Mantenimiento Preventivo (CMP)

Aquí se relacionó la cantidad de órdenes de trabajo ejecutadas con respecto a las emitidas. Se planteó este factor en la encuesta a través de la pregunta cuatro, siendo la respuesta seleccionada para el cálculo del CPM, del enfriador por aire, la relación: cinco órdenes de trabajo ejecutadas y cinco emitidas. Se empleó la ecuación 2.23

$$CPM = \frac{5}{5} \times 100\% = 100\%$$

Una vez que se obtuvo el valor de CMP, se seleccionó la ponderación en la tabla 3.4, siendo un punto por encontrarse en el rango de $75\% \leq CMP \leq 100\%$.

5. Efectividad (E)

Se refirió al porcentaje real de utilización del componente evaluado durante el año 2010; se tomaron en cuenta tanto las horas efectivas como las disponibles. La pregunta cinco de la encuesta fue formulada para obtener la información necesaria para el cálculo de la efectividad. En el caso del enfriador por aire, a continuación se muestra el cálculo con los valores obtenidos, a partir de la ecuación 2.24.

$$E = \frac{6900}{8760} \times 100\% = 78,77\%$$

Seguidamente se seleccionó la ponderación respectiva en la tabla 3.4, obteniéndose para el valor calculado una ponderación de dos puntos.

6. *Trabajos atrasados (Backlog)*

Indicó la cantidad de horas de trabajo pendientes por realizar durante el año 2010, en función de las horas disponibles. Este factor estuvo relacionado con la pregunta seis de la encuesta, siendo 5 y 168 respectivamente las respuestas mayormente obtenidas para el enfriador por aire. El factor se calculó mediante la ecuación 2.25.

$$\text{Backlog} = \frac{5}{168} \times 100\% = 2,976\%$$

Posteriormente se seleccionó la ponderación en la tabla 3.5, siendo dos puntos por encontrarse en el rango $2 < \text{Backlog} \leq 5$.

7. *Tipo de Conexión (TC)*

Se refirió a los diferentes tipos de interconexión que existe entre los equipos y accesorios que participaron en el análisis, los cuales pudieron ser: serie, paralelo o combinado. Este factor se relacionó con la séptima pregunta de la encuesta dirigida al personal de operaciones, en la cual se colocaron directamente las opciones de la tabla 3.4, de manera que la selección generada por el personal para cada equipo y accesorio, proporcionó una respuesta directa. En el caso del enfriador por aire se selecciono la opción C, con una ponderación de tres puntos.

8. *Costo de Mantenimiento*

Esta variable relacionó directamente los desembolsos que se generaran debido a la aplicación de un mantenimiento preventivo o correctivo. Este factor fue relacionado directamente con la pregunta ocho de la encuesta dirigida al personal de operaciones, los cuales consideraron mayoritariamente, que los desembolsos son menores a la meta, es decir, la opción B; lo que sería a su vez la opción B de la tabla 3.5, con una ponderación de dos puntos, para el enfriador por aire.

9. *Seguridad del Personal, Equipo y/o Ambiente*

Se evaluó tomando en consideración la pregunta nueve de la encuesta aplicada al personal de operaciones. En el caso del enfriador, la opción elegida mayoritariamente fue la C, lo que correspondió a una ponderación de tres puntos de acuerdo a la tabla 3.5.

Una vez obtenidas las ponderaciones de los equipos y accesorios analizados, se calculó la criticidad para cada uno, mediante la ecuación 2.20. Las constantes K_1 y K_2 de esta ecuación estuvieron relacionadas con la cantidad de factores de cada área involucrados en el análisis y varían con el aumento o disminución de éstos, dado que dichas constantes garantizan que el resultado obtenido no exceda el 100%; los valores de las constantes son 0,0270 y 0,0555 respectivamente. A continuación se muestra el cálculo de la criticidad del enfriador por aire:

$$\text{Criticidad} = [0,0270 \times (3 + 3 + 2 + 1 + 2 + 2) + 0,0555 \times (3 + 1 + 3)] \times 100 = 73,95\%$$

Este procedimiento se repitió para el resto de los componentes del sistema de enfriamiento implicados en el análisis; los resultados se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Porcentaje de criticidad de los equipos y accesorios del sistema de enfriamiento

Componentes	Criticidad
Enfriador	73,95%
Filtro de Arena	84,90%
Agua de Enfriamiento	46,35%
Tanque de Compensación	60,30%
Sistema de Inyección de Químico	52,05%
Bombas	46,50%
Control de Nivel	71,11%
Tuberías y Accesorios	49,20%

Estos resultados de criticidad fueron representados en un diagrama de distribución y se muestran en la figura 4.7 del capítulo cuatro, a fin de compararlos con la tabla 4.3, y determinar la categoría de criticidad para cada equipo y accesorio analizado.

3.4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA DOSIFICACIÓN DE QUÍMICO INHIBIDOR SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO

La calidad del agua de enfriamiento es controlada con la adición de un químico inhibidor, el cual se inyecta manualmente al tanque de compensación y por acción del bombeo continuo del agua, es arrastrado hacia el motocompresor. Este químico inhibidor tiene efecto de película sobre las superficies metálicas, favoreciendo la transferencia de calor y evitando la formación de incrustación y corrosión. En la tabla 3.7 se muestra la descripción del producto inhibidor utilizado por la planta.

Tabla 3. 7. Descripción del producto químico inhibidor

PRODUCTO	NALCOOL 2000
FORMULACIÓN QUÍMICA	NITRITO DE SODIO, TETRABORATO DE SODIO Y MERCAPTANO BENZOTIAZOL DE SODIO.
USOS	INHIBIDOR DE INCRUSTACIÓN Y CORROSIÓN EN SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO CERRADOS.

Para analizar el efecto de la dosificación de químico inhibidor empleado en el agua de enfriamiento del motocompresor K-2, se seleccionaron las características fisicoquímicas del agua, determinantes de su tendencia incrustante o corrosiva, de acuerdo a los índices de Langelier y Ryznar. Estas características fueron: pH, dureza cálcica, alcalinidad total y sólidos disueltos.

Se realizó la dosificación del químico inhibidor cada cuatro días y se tomaron muestras del agua de enfriamiento antes y después de cada aplicación, por un lapso de ocho semanas consecutivas.

En el laboratorio de Gestión de Calidad de la planta de extracción San Joaquín, se realizaron los análisis de dureza, alcalinidad y sólidos disueltos para todas las muestras de agua recolectadas, mientras que el pH se determinó utilizando un medidor de pH (previamente calibrado) directamente en la planta. En la toma de datos se considero que no hubo cambio apreciable de la condición climatológica.

El efecto del producto químico aplicada, sobre las características del agua en función del tiempo, se estudió mediante la construcción de gráficos de control estadísticos y con la ayuda del programa *Statgraphics plus*.

3.4.1. Gráficos de control estadístico de procesos

La metodología empleada para la construcción de los gráficos de control, mediante el programa *Statgraphics plus*, fue la siguiente:

1. Se ingresaron los datos correspondientes a las caracterizaciones fisicoquímicas del agua (pH, dureza cálcica, alcalinidad total y sólidos disueltos) en una tabla de datos que proporciona el programa.
2. Se seleccionó el tipo de gráfico de control a utilizar, de acuerdo al tipo de variables (atributos o cuantitativas); en este caso, gráficos de control por variables cuantitativas.
3. De las opciones de gráficos de control de variables cuantitativas que ofrece el programa, se seleccionaron los gráficos de media y rango.
4. Una vez definido el tipo de gráficos a realizar, se especificó la variable a ser analizada (pH, dureza cálcica, alcalinidad total ó sólidos disueltos).
5. Se introdujo el número de datos que conformó un subgrupo; en este caso se utilizaron tres datos, producto de dividir los treinta datos en diez subgrupos de tres datos cada uno.
6. Se ejecutaron los gráficos de control para cada variable estudiada de manera individual.

Entre los resultados de interés que proporcionó el programa estadístico se destacaron: límites de control superior e inferior, medias estándar, rangos, entre otros, los cuales fueron calculados por medio de las ecuaciones 2.10 a 2.17, bajo la asunción de que los datos proceden de una distribución normal.

A continuación se muestran los cálculos realizados por el programa para la construcción de los gráficos de control, tomando como referencia los datos de sólidos disueltos, mostrados en la tabla D.1 del anexo D.

- **Media aritmética del proceso**

$$\bar{\bar{X}} = \frac{87 + 85 + 88 + 88 + 86 + 85 + 84 + 85 + 86 + 86}{10} = 86$$

- **Rango**

$$\bar{R} = \frac{4 + 5 + 5 + 2 + 1 + 1 + 3 + 1 + 2 + 2}{10} = 2,60$$

- **Limites de control del gráfico de media**

$$LCS_{\bar{X}} = 86 + 1,023 \times 2,60 = 88,66$$

$$LCI_{\bar{X}} = 86 - 1,023 \times 2,60 = 83,34$$

El valor de A_2 fue tomado de la tabla del anexo D, para $n=3$.

- **Límites de control del gráfico de rangos**

$$LCS_R = 2,574 \times 2,60 = 6,69$$

$$LCI_R = 0 \times 2,60 = 0$$

Los valores de D_3 y D_4 fueron tomas de la tabla E.1 del anexo E, para un $n=3$.

Este cálculo se repitió para las variables restantes y los resultados son mostrados en la tabla D.2 del anexo D.

3.4.2. Análisis de capacidad

Para la ejecución del análisis de capacidad, por medio del programa *Statgraphics plus*, se utilizaron los datos obtenidos de la caracterización fisicoquímica del agua previamente utilizados para la construcción de los gráficos de control; por lo que la metodología dentro del programa fue básicamente la misma:

1. Se seleccionó el tipo de análisis a realizar dentro del programa *Statgraphics plus* (análisis de capacidad).
2. Se introdujo la variable a analizar (pH, dureza cálcica, alcalinidad total ó sólidos disueltos).
3. Posteriormente se introdujeron las especificaciones de los límites de control superior e inferior utilizadas, las cuales fueron obtenidas del análisis inicial de control de proceso.
4. Se ejecutó el análisis de capacidad de proceso, obteniéndose los índices de capacidad respectivos.

Esta metodología se aplicó para las diferentes características fisicoquímicas; los de los índices de capacidad se calcularon por medio de las ecuaciones 2.18 y 2.19. A continuación se presenta la muestra de cálculo del índice de capacidad C_p , tomando como referencia los datos de sólidos disueltos.

- **Desviación estándar**

$$\sigma = \frac{2,60}{1,693} = 1,53$$

Ahora los límites de control serán:

$$LCM = 86 + 3 \times 1,53 = 90,59$$

$$LCM = 86 - 3 \times 1,53 = 81,41$$

- **Índice de capacidad C_p**

$$C_p = \frac{88,66 - 83,34}{90,59 - 81,41} = 0,57$$

3.5. PROPUESTA DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE DOSIS DE QUÍMICA INHIBIDORA, APLICADA AL AGUA UTILIZADA COMO MEDIO DE ENFRIAMIENTO

Con la propuesta de automatización de la dosis de químico inhibidor, aplicado al agua de enfriamiento de las unidades motocompresoras, se pretende garantizar la correcta dosificación en tiempo y cantidad necesaria. Esta propuesta de automatización de dosis, implica el uso de una serie de equipos y accesorios, tal como lo muestra la figura 3.5, que en conjunto conformaran el sistema de inyección de químico inhibidor.

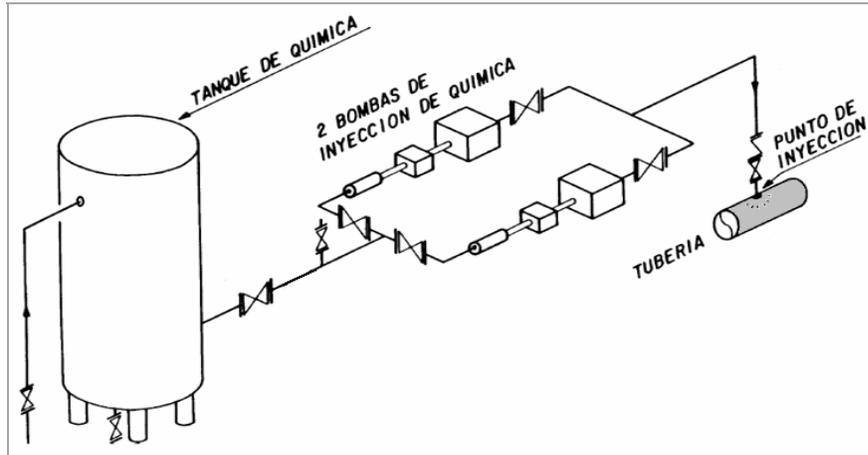


Figura 3. 5. Esquema representativo de la propuesta de inyección de químico inhibidor

Para garantizar que la propuesta cumpla con los lineamientos de la empresa, ésta se realizó basándose en la norma *PDVSA FH-202-R*, para sistemas de inyección de químicos; la norma establece las especificaciones que se deben seguir, en cuanto a la selección de los equipos y accesorios del sistema de dosificación automatizado. Tales especificaciones se muestran en la tabla 3.8, adicionalmente se expone el estado de éstos componentes dentro de la planta.

Tabla 3. 8. Especificaciones del sistema de inyección de químicos (PDVSA, 1989)

Equipo y accesorios	Especificaciones	Estatus dentro de la planta
Un tanque de solución	Debe estar provisto de: <ul style="list-style-type: none"> • Indicador de nivel. • Alarma de bajo nivel. 	Disponible
Dos bombas dosificadoras	<ul style="list-style-type: none"> • De tipo desplazamiento positivo. • Debe operar a cualquier rata entre 0 y 100% de la capacidad de diseño. • Debe estar provista de: manómetro, válvulas de bloque, línea de succión y descarga. 	Se requiere
Tuberías y válvulas	<ul style="list-style-type: none"> • Dependerán del producto químico inhibidor a utilizar. 	Disponible
Instrumentos y controladores	<ul style="list-style-type: none"> • Deben estar protegidos contra rotura y equipados con válvula de retención de bola para evitar el derrame del líquido en caso de rotura del indicador. 	Disponible
Panel de control local	<ul style="list-style-type: none"> • Debe incluir un interruptor de arranque y parada para cada bomba dosificadora. • Las bombas dosificadoras deben tener en el tablero, luces que indiquen si la bomba está funcionando o apagada. 	Disponible

De acuerdo a la tabla 3.8, la mayoría de los equipos y accesorios que forman parte de la propuesta de automatización de dosis de químico inhibidor, están disponibles en la planta. Pese a ello, para completar el sistema automatizado se requiere la adquisición de dos bombas dosificadoras, una que esté en operación y otra de respaldo, por lo que la propuesta de éste sistema consistió básicamente en seleccionar, entre varias opciones de proveedores, las bombas que cumplan con las especificaciones requeridas. En la tabla 3.9 se muestran las opciones de bombas evaluadas,

éstas ya se encuentran dimensionados de acuerdo a los estándares comerciales.

Tabla 3. 9. Opciones de bombas dosificadoras por diferentes proveedores

	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Marca	Arrow	Arrow	Flomore
Costo por unidad	39.698,15 Bs F.	14.538,66 Bs F.	24.890,72 Bs F.
Garantía	1 año	1 año	1 año
Rango de capacidad	3-72 litros/hora	0,23-60 litros/hora	10-180 litros/hora
Rango de presión	25-100 bar	1,5-25 bar	25-100 bar

3.5.1. Selección de la mejor opción de bombas dosificadoras, por medio de evaluaciones de parámetros cualitativos y cuantitativos

Para la selección de las bombas dosificadoras de químico inhibidor, se evaluaron tres opciones, proporcionadas por distintos proveedores, tomando en cuenta una serie de criterios con sus respectivas ponderaciones, que sirvieron para su calificación. Estos criterios fueron seleccionados tomando como referencia, los criterios utilizados por el departamento de costos de la empresa PDVSA GAS, para la adquisición de bombas dosificadoras. A continuación se muestran los criterios seleccionados y el análisis para ponderar la opción uno, mostrada en la tabla 3.9.

A. **Costo:** se considera, con cierto porcentaje de contingencia, el precio total a desembolsar por la compra de cada una de las opciones propuestas. En la tabla 3.10 se muestran las ponderaciones de este criterio, siendo tres

puntos para la opción uno, debido a que representó el mayor costo entre las opciones.

Tabla 3. 10. Ponderación y criterio de Costo

Ponderación	Costo
1	Bajo
2	Mediano
3	Alto

B. *Garantía*: hace referencia a la certeza de que, en caso de fallas o defectos que afecten el correcto funcionamiento de las bombas dosificadoras, el proveedor se hará cargo de su reparación o reemplazo, para que el equipo vuelva a reunir las condiciones mínimas de uso, por un determinado periodo de tiempo. En la tabla 3.11 se muestran las ponderaciones para este criterio, siendo dos puntos la ponderación obtenida para la opción uno, ya que el tiempo de garantía mínimo para este tipo de equipos es de dos años, de acuerdo a la normativa de PDVSA.

Tabla 3. 11. Ponderación y criterio de Garantía

Ponderación	Garantía
1	Bajo
2	Media
3	Alta

C. *Disponibilidad de proveedor*: define la disponibilidad de empresas proveedoras de bombas dosificadoras en áreas circunvecinas a la PDVSA Gas Anaco. La ponderación de este criterio, para la opción uno, de acuerdo a

la tabla 3.12, fue de dos puntos debido a que el proveedor se encuentra en la región oriental, pero fuera de la ciudad de Anaco.

Tabla 3. 12. Indicadores y valores para el criterio de disponibilidad de proveedor

Ponderación	Disponibilidad de proveedor
1	Baja – Disponibilidad de proveedor en el país y exterior
2	Media – Disponibilidad de proveedor en el resto de la región oriental
3	Alta – Disponibilidad de proveedor en el área de Anaco

D. *Confiabilidad operacional*: hace referencia a la probabilidad de que las bombas dosificadoras operen sin fallas, por un determinado periodo de tiempo, bajo unas condiciones operacionales previamente establecidas; la ponderación se hizo con base a los criterios establecidos por el departamento de costos de la empresa PDVSA, los cuales se muestran en la tabla 3.13. La ponderación de este criterio fue de dos puntos para la opción uno.

Tabla 3. 13. Indicadores y valores para el criterio de confiabilidad operacional

Ponderación	Confiabilidad operacional
1	Baja
2	Media
3	Alta

E. Plazo de entrega: se refiere al tiempo de entrega de las bombas dosificadoras, una vez realizado el proceso de compra. En la tabla 3.14 se

muestra la ponderación para este criterio, la cual fue de un punto, de acuerdo a la información suministrada por el proveedor.

Tabla 3. 14. Indicadores y valores para el criterio de plazo de entrega

Ponderación	Plazo de entrega
1	Inmediata
2	Una semana
3	Mayor a una Semana

Este procedimiento se repitió para las opciones restantes; los resultados se muestran en la tabla 3.15.

Tabla 3. 15. Resultados de las ponderaciones obtenidas por cada opción de bomba dosificadora

	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Costo	3	1	2
Garantía	2	2	2
Disponibilidad de proveedor	2	3	3
Confiabilidad operacional	2	1	3
Plazo de entrega	2	1	1

3.5.2. Ponderación de criterios

Se construyó una tabla matriz de doble entrada, llamada matriz de valoración de criterios (MVC), tal como se muestra en la tabla 3.16, colocando los criterios a evaluar tanto en filas como en columnas; la matriz constó de cinco columnas y cinco filas. Esta matriz se lee por filas y tiene

como objetivo establecer la importancia relativa de cada criterio en comparación con los restantes.

Tabla 3. 16. Matriz de valoración de criterios

Fila Columna	Costo	Garantía	Disponibilidad de proveedor	Confiabilidad operacional	Plazo de entrega
Costo					
Garantía					
Disponibilidad de proveedor					
Confiabilidad operacional					
Plazo de entrega					

En la matriz de valoración de criterios, se comparó cada criterio fila con todos los criterios columna, consignándose en las casillas de la fila, el resultado de la comparación, de acuerdo con una escala numérica preestablecida. Se utilizó la tabla 3.17 para asignar la valoración a la matriz.

Tabla 3. 17. Calificación cualitativa y cuantitativa para los criterios

Calificación Cuantitativa	Calificación Cualitativa
1	Si el elemento columna es mucho más importante que el elemento fila.
2	Si el elemento columna es algo más importante que el elemento fila.
3	Si el elemento fila es igual de importante que el elemento columna.
4	Si el elemento fila es algo más importante que el elemento columna.
5	Si el elemento fila es mucho más importante que el elemento columna.

Para jerarquizar los parámetros en la MVC se calcularon los porcentajes de los pesos ponderados de cada criterio, los cuales se obtuvieron de la suma de cada fila, dividido entre la suma de los totales y multiplicándolos por 100; éstos se muestran en la tabla 3.18.

Tabla 3. 18. Resultados de la matriz de valoración de criterios

Fila Columna	C osto	Garan tía	Disponi bilidad de proveedor	Confiabili dad operacio nal	Plaz o de entre ga	T otal	% peso ponderado
Costo		4	4	3	4	1 5	24, 59
Garantía	2		3	4	4	1 3	21, 31
Disponibil idad de proveedor	2	3		4	3	1 2	19, 67
Confiabili dad operacion al	2	2	2		4	1 0	16, 39
Plazo de entrega	4	2	3	2		1 1	18, 03
						6	10
						1	0,00

Posteriormente se multiplicaron las ponderaciones de los criterios evaluados de cada opción de bomba (tabla 3.15), por el porcentaje de peso ponderado de cada criterio, mostrado en la tabla 3.18. A continuación se muestra el cálculo para el caso de la opción uno respecto al criterio costo.

$$Costo_{Opción 1} = 24,59 \times 3 = 73,77$$

Este cálculo se repite para las demás opciones respecto a los criterios ponderados. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.19.

Tabla 3. 19. Parámetros críticos ponderados para cada opción

Criterios	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Costo	73,77	24,59	49,18
Garantía	42,62	42,62	42,62
Disponibilidad de proveedores	39,34	59,01	59,01
Confiabilidad del proveedor	32,78	16,39	49,17
Plazo de entrega	34,06	18,03	59,09

Finalmente se seleccionó la opción cuya importancia relativa sea mayor; estos valores se muestran en la tabla 4.6 del capítulo cuatro.

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La evaluación del sistema de enfriamiento de las unidades motocompresoras estuvo enfocada principalmente en el funcionamiento de la unidad K-2, ya que solo ésta se encontraba en operatividad. Para ello se identificaron las condiciones operacionales de las diferentes etapas relacionadas al proceso, desde la toma de datos de temperaturas en el motocompresor y calidad del agua de enfriamiento, hasta la verificación del estado de criticidad de los equipos que integran el sistema. Seguidamente se analizó el efecto del producto químico inhibidor con base a la dosificación empleada en diferentes tiempos, utilizando técnicas de control estadístico de procesos.

Se planteó la propuesta de un sistema de inyección automatizado de química, que cumpla con las normas estandarizadas de PDVSA GAS aplicando una matriz de valoración de criterios (MVC); se evaluaron los criterios de costos, garantías, disponibilidad de oferente, confiabilidad operacional y plazo de entrega.

4.1.1. Identificación de las condiciones operacionales actuales del sistema de enfriamiento

La eficiencia del sistema de enfriamiento de las unidades motocompresoras radica en el control de las diferentes condiciones de temperaturas, producto de los procesos de compresión y combustión que se llevan a cabo. El incremento de temperatura es responsable de la mayoría de

los problemas que presentan estos equipos, hasta el punto de fundir el material con el que están hechas muchas de sus partes y que a su vez significa, desde un punto de vista monetario, grandes pérdidas debido a daños irreversibles de las unidades y a la producción que se deja de manejar.

Es por ello que como punto de partida se procedió a identificar las condiciones de operación de los procesos de combustión y compresión que se llevan a cabo en la unidad motocompresora K-2 y mediante gráficos de tendencias, definir el comportamiento de los valores de temperaturas durante el periodo de estudio, contrastándolos con las condiciones de diseño.

De acuerdo a la figura 4.1, las temperaturas de los cilindros de fuerza del motocompresor se encuentran fuera de rango con respecto a las condiciones de diseño (700-800 °F), presentando situaciones de alarma frecuentes durante el periodo de estudio. Tales variaciones están asociadas a desperfectos mecánicos debido al desgaste efectivo de los cilindros, producidos a su vez por las cargas desbalanceadas que presentan, por problemas en las válvulas reguladoras de gas combustible y que provocan insuficiencia de carga de gas para el proceso de combustión.

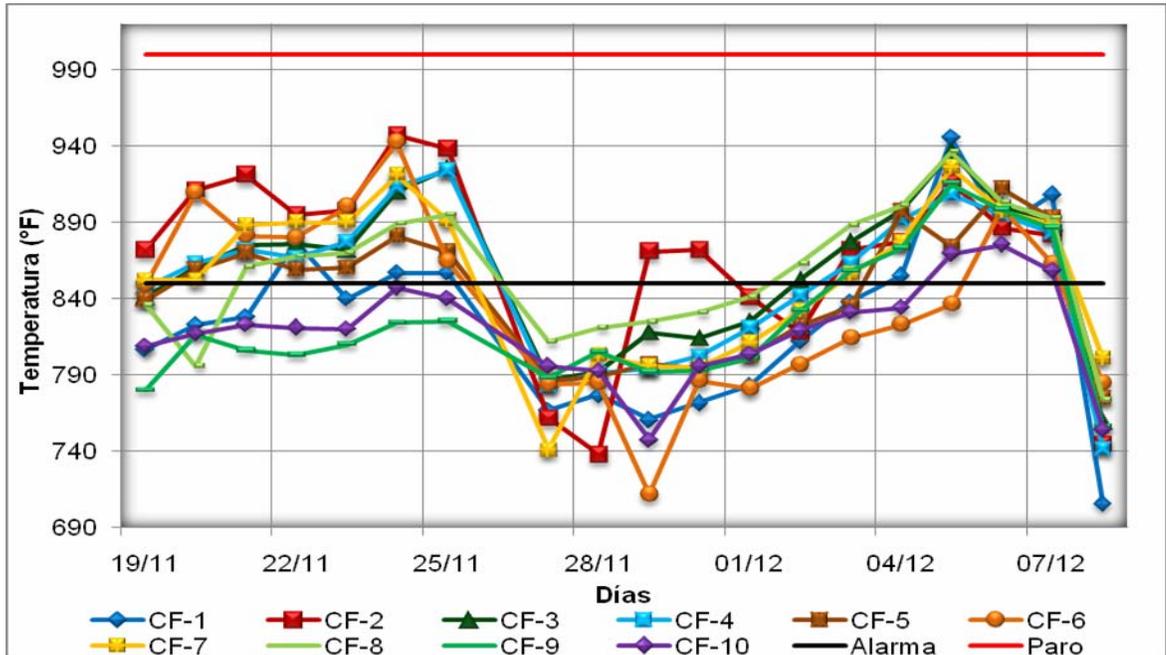


Figura 4. 1. Tendencia de temperaturas de los cilindros de fuerza de la unidad motocompresora K-2

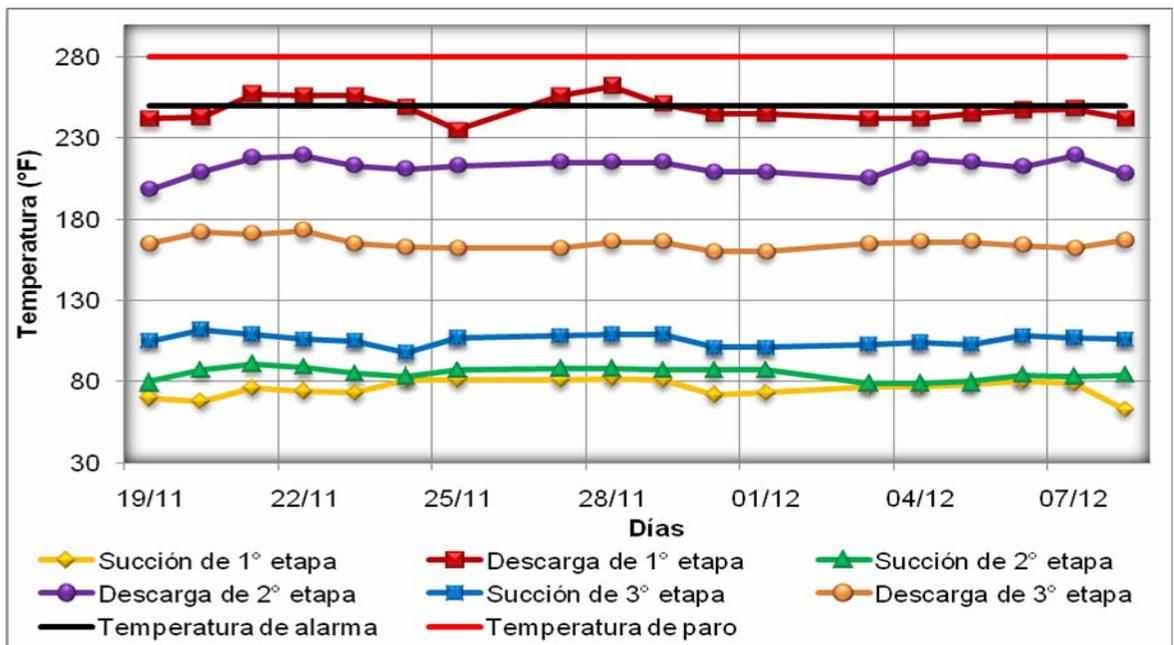


Figura 4. 2. Tendencia de temperaturas de los cilindros compresores de la unidad motocompresora K-2

En la figura 4.2 se observan las temperaturas alcanzadas en los cilindros compresores, las cuales se mantuvieron dentro de las condiciones de diseño, exceptuando la temperatura de descarga de la primera etapa de compresión, donde los valores sobrepasaron las condiciones de alarma en algunas tomas, debido a la acumulación de aire en la cámara de recorrido del agua de enfriamiento de este cilindro, durante el proceso operativo del motocompresor, por lo que el personal operacional se ve obligado a purgarlo continuamente.

La entrada de aire involuntaria se produce por desperfectos en la válvula de paso de agua hacia la cámara del cilindro, provocando insuficiencia en el flujo de agua circulante y la deficiente transferencia de calor. Cabe destacar que este incremento de temperaturas ocasiona el desgaste de los diferentes componentes del cilindro compresor, entre ellos válvulas compresoras, empaaduras, resortes y otros, causando a su vez el paro ocasional de la unidad motocompresora por arreglo o reemplazo de dichos componentes.

La figura 4.3 muestra el comportamiento de los valores de temperaturas del agua a la entrada y salida del motocompresor. En la mayoría de los casos, los valores de temperatura de entrada de agua se mantuvieron fuera de los rangos de diseño (120 – 150 °F), mientras que los valores correspondientes a la temperatura de salida, mantuvieron un comportamiento variable de acuerdo a las especificaciones de diseño (150 – 170 °F), presentando elevaciones súbitas de temperatura, debido al incremento de la misma en los cilindros de fuerza, durante el periodo de estudio.

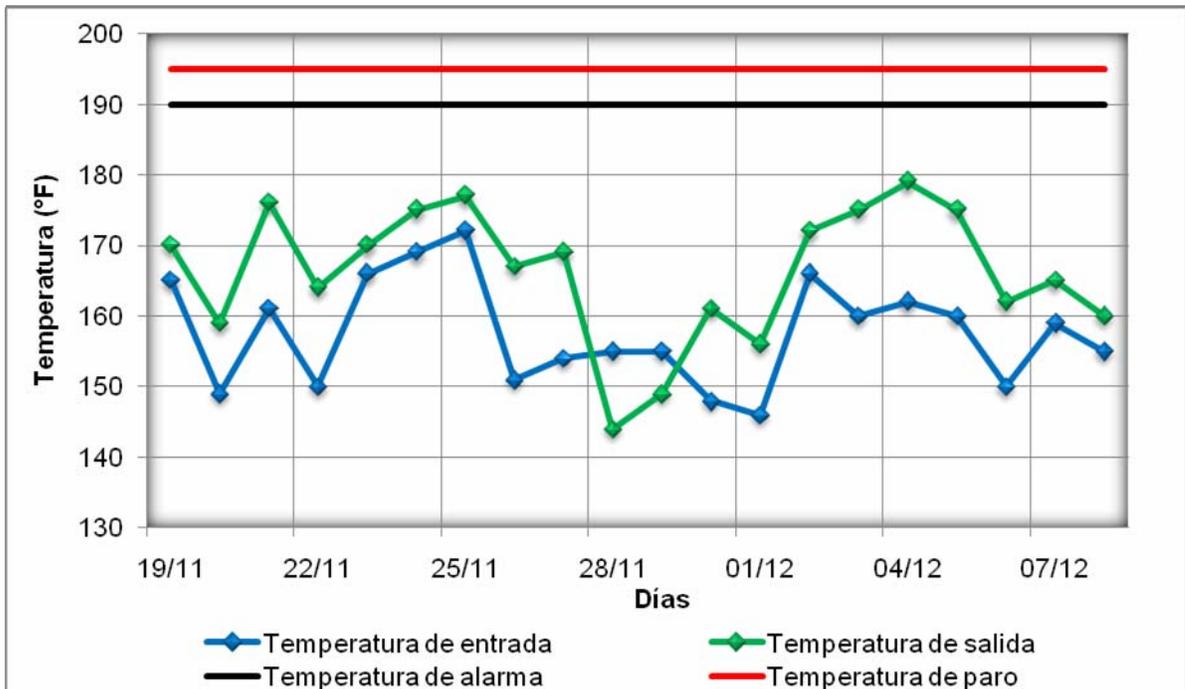


Figura 4. 3. Tendencia de temperaturas del agua que circula por el motocompresor K-2

La figura 4.4 muestra la tendencia de los valores de temperatura a la entrada y salida de la galería de aire de barrido del motocompresor. En el primer caso, los valores permanecieron dentro del rango permitido, de acuerdo a las condiciones de diseño (120 – 135 °F), mientras que los valores de temperatura a la salida, de esta parte del motocompresor, estuvieron considerablemente menores al rango especificado (130- 140 °F), por lo que no se hace efectiva la transferencia de calor en esta sección, mientras está operativa la unidad motocompresora. Lo anterior se produce debido a la acumulación de lodos en los serpentines de la galería de barrido, lo cual se detectó en el último mantenimiento preventivo de esta unidad.

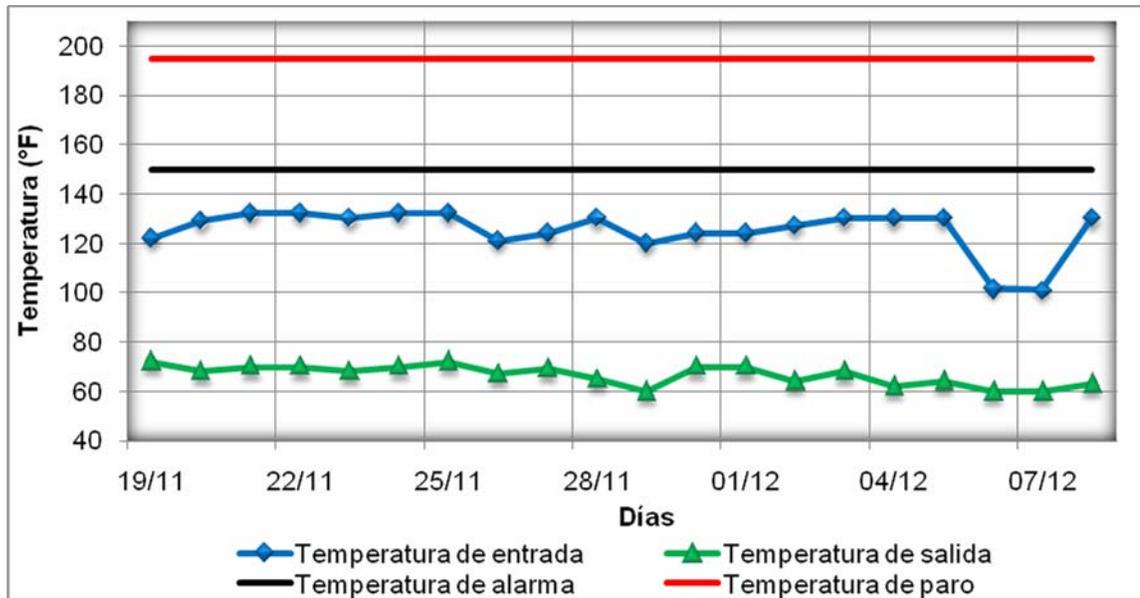


Figura 4. 4. Tendencia de temperaturas del agua de enfriamiento que circula por la galería del aire de barrido del motocompresor K-2

Cabe destacar que durante el periodo de estudio se presentaron gran cantidad de fallas asociadas al sistema de enfriamiento de esta unidad, siendo las más comunes: fugas del agua de enfriamiento, altas temperaturas de aceite del motor y baja presión de agua; sumado a esto se observó que muchos de los equipos y accesorios del sistema de enfriamiento, se encontraron fuera de servicio y otros funcionando en malas condiciones, tal es el caso del filtro de arena, termostato y el controlador de nivel del tanque de compensación.

4.1.2. Determinación de la tendencia del agua utilizada como medio de enfriamiento, a ser corrosiva o incrustante, por medio de los índices de Langelier y Ryznar

La transferencia de calor es uno de los procesos más importantes en los motores de combustión interna (motocompresores), siendo el agua, el

fluido de enfriamiento más utilizado y que debido a sus características, requiere de acondicionamiento o tratamiento para controlar y minimizar los problemas que se presentan en este sistema, a fin de mantenerlos en condiciones operativas confiables, preservar el equipo e incrementar su eficiencia.

Las características del agua de enfriamiento deben cumplir con ciertos rangos establecidos; cuando uno o varios de estos valores son alterados, se generan problemas de corrosión, incrustación y ensuciamiento que intervienen en el rendimiento de la transferencia de calor de las unidades motocompresoras.

Por esta razón se realizaron análisis fisicoquímicos del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2, a fin de identificar qué tipo de agua es la que circula por este sistema, calculando los índices de Langelier y Ryznar. En la tabla 4.1 se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos, para tres muestras tomadas en diferentes partes del motocompresor (agua de enfriamiento de la galería de aire de barrido, cilindros de fuerza y cilindros compresores).

Tabla 4. 1. Resultados de análisis fisicoquímicos del agua de enfriamiento de la unidad motocompresor K-2

Característica	Cilindros Compresores	Cilindros de Fuerza	Galería de Barrido	Promedio
pH	7,8	7,9	8,2	7,9
Dureza total (CaCO ₃) (ppm)	74	76	84	78
Sólidos suspendidos (ppm)	14	15	22	17
Sólidos disueltos (ppm)	212	218	232	220
Sólidos totales (ppm)	226	233	254	237
Alcalinidad total (ppm)	181	184	186	183
Cloruros (ppm)	39	40	44	41
Sílice (ppm)	20	22	24	22
Hierro total (ppm)	1,9	2,1	2,3	2,1
Calcio (ppm)	12	15	17	14
Bicarbonato (ppm)	95	101	112	102
Magnesio (ppm)	15	15	19	16

Las tres muestras de agua presentan propiedades fisicoquímicas semejantes, por lo que se calculó un valor promedio entre los resultados de las características de ésta, tomadas en las diferentes partes del motocompresor.

Los índices de estabilidad Langelier y Ryznar se calcularon a diferentes temperaturas con los valores promedios de las muestras tomadas de la tabla 4.1. Los resultados de éstos se representaron mediante gráficas en función de la temperatura y se compararon con los criterios de la tabla 4.2, a fin de precisar la tendencia del agua de enfriamiento.

Tabla 4. 2. Interpretación del índice de Langelier y Ryznar (C.S.D, 1968)

Caso	Tendencia
IL = 0	Agua en equilibrio químico
IL < 0	Agua con tendencia a ser corrosiva
IL > 0	Agua con tendencia incrustante
IR de 4.0 – 5.0	Fuertemente incrustante
IR de 5.0 – 6.0	Significativamente incrustante
IR de 6.0 – 7.0	Ligeramente incrustante
IR de 7.0 – 7.5	Significantemente corrosiva
IR de 7.5 - 9.0	Fuertemente corrosiva
IR de 9.0 y mayor	Intolerablemente corrosiva

En la figura 4.5 se muestra la tendencia de los índices de Langelier y Ryznar del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2. Aquí se observa que el IL presenta un comportamiento ascendente a medida que aumenta la temperatura, en una relación directamente proporcional. El IL calculado a la temperatura de 77 °F fue de 0,52, lo cual indica, de acuerdo a los criterios de la tabla 4.2, que se está en presencia de un agua con tendencia incrustante; los valores de IL obtenidos a temperaturas superiores refuerzan esta afirmación, ya que en todos los casos resultaron ser mayores a cero.

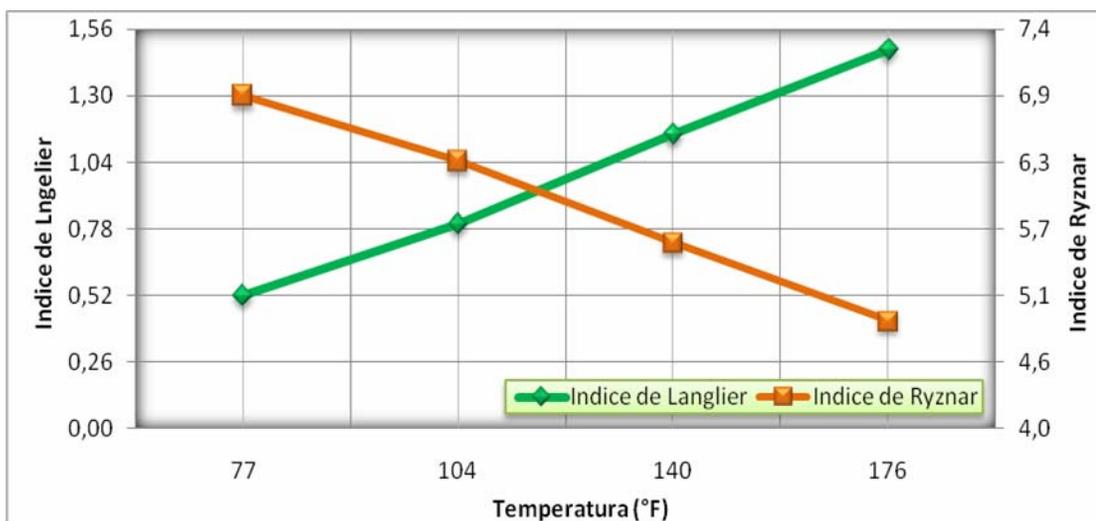


Figura 4. 5. Tendencia de los índices de Langlier Ryznar del agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2

La curva que muestra la tendencia del índice de Ryznar a diferentes temperaturas, presenta una pendiente negativa con un comportamiento inversamente proporcional, lo que significa, con base a lo establecido en la tabla 3.2, que el agua de enfriamiento tiende a ser más incrustante con el incremento de la temperatura.

La tendencia incrustante del agua de enfriamiento es debido a que muchas sales comunes en el agua, disminuyen su solubilidad a medida que aumenta la temperatura. De estas sales, el bicarbonato de calcio se descompone para formar carbonato de calcio, adhiriéndose a las paredes de las tuberías y disminuyendo la eficiencia de la transferencia de calor. El valor promedio de carbonato de calcio (CaCO_3), de acuerdo a la tabla 2.2, se encuentra por encima del valor permitido para aguas de enfriamiento (<50 ppm), lo que la hace un agua dura por sus características (PDVSA, 1991).

Otra característica que influye en los índices y en la tendencia incrustante del agua es el pH, el cual se encontró en un intervalo de 7,8 a 8,2, por lo que dichas aguas pueden considerarse alcalinas de acuerdo con las clasificaciones para aguas de enfriamiento (tabla 3.3). Sin embargo, el valor del pH del agua de enfriamiento en la galería de barrido se encuentra moderadamente elevado, por lo que se favorece la descomposición de bicarbonatos a carbonatos, y ésto a su vez la precipitación de sales que se acumulan en los serpentines de la galería de barrido.

El contenido de sólidos disueltos en el agua permanece soluble bajo determinadas condiciones de temperatura, pH, concentración, etc. Mientras estos sólidos permanecen disueltos no existen posibilidades de que se formen incrustaciones. El problema está, que en el sistema de enfriamiento del motocompresor K-2, los cambios de temperaturas son tan dinámicos que la probabilidad para formarse incrustaciones por sólidos disueltos es bastante alta.

Es importante recalcar que el alto contenido de sólidos disueltos presente en las tres muestras tomadas, se encuentran fuera de las especificaciones de calidad para aguas de enfriamiento de acuerdo a la tabla 2.1, siendo el agua que circula por la galería de aire de barrido la de mayor afectación. Los sólidos disueltos representan materiales insolubles como sílice, tierra, microorganismos, hierro oxidado (insoluble), entre otros; el contenido de estos sólidos en los sistemas de enfriamiento deben ser cercanos a cero y nunca deben de sobrepasar los 25 ppm (PDVSA, 1991), ya que estos contribuyen a la formación de incrustaciones o costras que interfieren en la transferencia de calor de la unidad.

Si bien el contenido de hierro no influye en los índices de estabilidad, éste es portador de incrustaciones en los sistemas de enfriamiento. En la tabla 4.1 se leen diferencias entre los valores de hierro medidos para las muestras, siendo las más críticas la galería de aire de barrido y los cilindros de fuerza; ésta discrepancia se debe a remanentes de hierro presentes en las tuberías del sistema de enfriamiento y camisas de los cilindros, que se acumulan por efecto de la variación de la velocidad del fluido que transita por ellas y aumentan su concentración en estas zonas. La concentración de hierro no deben ser mayores a 2 ppm, ya que el hierro en contacto con el aire se oxida formando hidróxido ferrico (rojizo e insoluble), lo que favorece la formación de incrustaciones y en algunos casos es causante de corrosión (PDVSA, 1991).

La presencia de hierro en el sistema de enfriamiento también se identificó de manera visual, ya que el hierro tiende a manchar las superficies de contacto con una coloración anaranjada. Esta presencia se notó en los diferentes equipos que conforman el sistema de enfriamiento siendo el filtro de arena el que presentó mayores indicios del mismo (figura 4.6).



Figura 4. 6. Filtro de arena de la planta compresora

La determinación del contenido de sílice en el agua de enfriamiento se hizo con la finalidad de conocer si existía riesgo de incrustación por precipitación de SiO_2 , ampliamente conocida como incrustación de sílice o por silicatos alcalinos. Las incrustaciones producidas por sílice forman costras sólidas que requieren de ácidos concentrados y en caliente para limpiarlas, por lo que no son fácilmente dispersadas por los tratamientos inhibidores como el que se aplica en la planta. El contenido de sílice promedio de las muestras de agua tomadas no supera los 22 ppm, las incrustaciones de sílice se producen cuando la concentración es superior a 150 ppm (PDVSA, 1991), por lo tanto no existe riesgo de incrustaciones de sílice en el motocompresor.

Caso contrario ocurrió con las concentraciones de cloruros en el agua de enfriamiento, las cuales fueron superiores y en algunos casos cercanos al límite máximo permitido de 40 ppm (tabla 3.3). El contenido de cloruro es una de las causantes de corrosión por picadura. Los cloruros no contribuyen

a la formación de depósitos porque son muy solubles, sin embargo, son corrosivos y causan una excesiva corrosión cuando se presentan en grandes proporciones.

Es importante destacar que a pesar de que se hallaron altos niveles de cloruros, en el sistema de enfriamiento no se encontraron indicios de corrosión, ésto se debe a presencias de costras o sales disueltas, lo cual se demostró mediante los índices de saturación. Las incrustaciones forman películas sobre las superficies metálicas que disminuyen e interfieren en el ataque corrosivo de muchas sustancias.

Por último las concentraciones de calcio y magnesio se mantuvieron relativamente bajas y similares, encontrándose por debajo de los valores máximos permitidos (<200 ppm y <70 ppm), para aguas de enfriamiento de motocompresores (PDVSA, 1991).

4.1.3. Análisis de criticidad para precisar los equipos y accesorios del sistema de enfriamiento que presentan mayores fallas

Se realizó un análisis criticidad que permitió precisar los equipos y accesorios, del sistema de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2, que presentaron mayor cantidad de fallas durante el año 2010. Esta categorización se efectuó comparando los porcentajes de criticidad obtenidos para los equipos y accesorios (tabla 3.6), con lo expuesto en la tabla 4.3, donde se definen tres categorías: no crítico, semi-crítico y crítico

Tabla 4. 3. Categorías para clasificar la criticidad

Categorías
No crítico ($33\% \leq \% \text{ Criticidad} < 50\%$)
Semi-crítico ($50 \leq \% \text{ Criticidad} < 70\%$)
Crítico ($\% \text{ Criticidad} \geq 70\%$)

La figura 4.7 muestra la distribución, con base a las categorías de la tabla 4,3, del nivel de criticidad de los equipos y accesorios que conforman el sistema de enfriamiento. Se puede observar en esta figura que los equipos que se ubicaron en el área crítica corresponden al filtro de arena, control de nivel y enfriador por aire.

El filtro de arena se encuentra fuera de servicio desde hace más de 5 años y su función es retirar el contenido de sólidos suspendido presente en el agua de enfriamiento, antes de entrar a la unidad motocompresora. Sin embargo, a pesar de ser parte del diseño del sistema de enfriamiento, a este equipo no se le ha dado la debida atención para su puesta en operación, trayendo como consecuencias la formación de incrustaciones definidos por los excesivos valores de sólidos, obtenidos a partir del análisis fisicoquímico del agua de enfriamiento.

El controlador de nivel permite medir y mantener el nivel de agua requerida para la reposición del tanque de compensación, que se pierde en el proceso de enfriamiento del motocompresor. Sin embargo, dicho instrumento se encuentra fuera de servicio por fallas en su funcionalidad, por lo que las reposiciones son parte del trabajo del personal de operaciones de la planta. No obstante, esta acción no es la más idónea ya que no hay un control que precise el tiempo y cantidad necesaria de llenado de agua,

trayendo como consecuencia la parada de la unidad motocompresora en diferentes ocasiones.

El enfriador por aire constituye uno de los equipos más importantes de la planta compresora, dado que entre sus funciones está la de disminuir la temperatura del agua de enfriamiento una vez que sale del motocompresor, del aceite lubricante y las diferentes corrientes de gas que salen de esta unidad. Este equipo presentó la mayor frecuencia de paradas operacionales durante el año 2010 y por consiguiente el mayor número de inversiones por concepto de mantenimiento correctivo y preventivo.

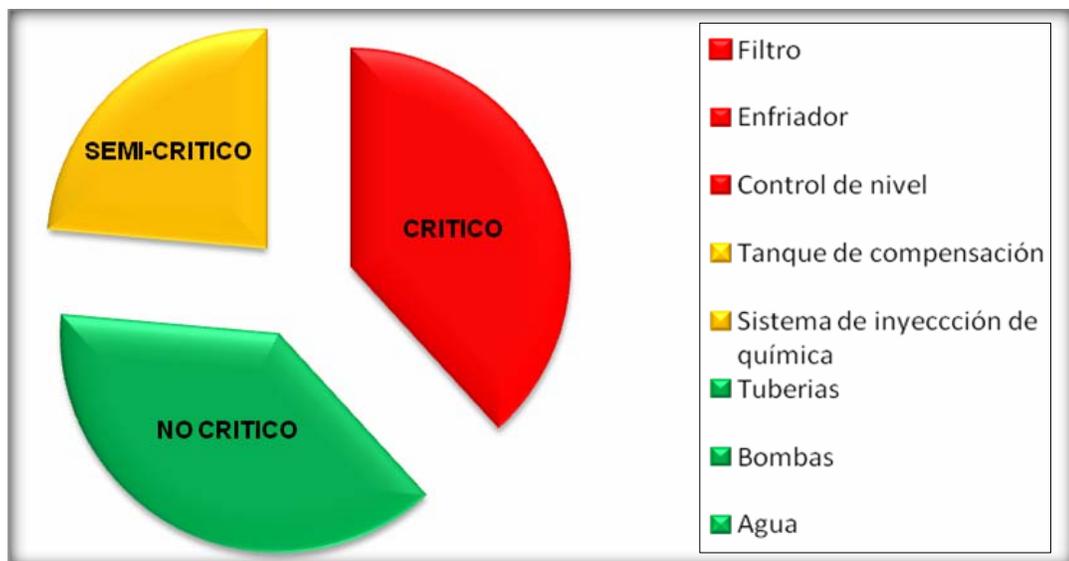


Figura 4. 7. Identificación de los equipos y accesorios críticos, semi-críticos y no críticos del sistema de enfriamiento

Entre los componentes del sistema de enfriamiento que se ubicaron en la categoría de semi-crítico se encontraron el tanque de compensación y el sistema de inyección de química. El tanque de compensación constituye uno de los componentes más importantes del sistema de enfriamiento ya que

repone el agua que se pierde en el motocompresor, sin embargo, a pesar de no presentar fallas ni horas de no operatividad, cae en esta categoría debido al tiempo que tiene sin servicio de limpieza ni mantenimiento preventivo. Este tanque debe ser sometido cada semana a purgas con el fin de expulsar sólidos precipitados en el fondo del mismo, de lo contrario los sólidos presentes son arrastrados hacia el motocompresor, afectando una vez más la eficiencia en la transferencia de calor.

Por otra parte el sistema de inyección de química, que durante el año 2010 no presentó mayores paradas operacionales, sin embargo a este sistema de inyección desde su puesta en operación no se le ha hecho mantenimiento preventivo de sus partes. El sistema de inyección de química constituye uno de los tratamientos del agua más importante ya que, el químico inhibidor además de ayudar a evitar formación de incrustaciones y corrosiones, actúa como refrigerante y mantiene limpias las tuberías involucradas en el sistema de enfriamiento. La inyección de químico inhibidor se realiza de manera manual, por parte del personal operacional de la planta, su ejecución es esporádica y sin una metodología específica que permita mantener el agua de enfriamiento debidamente dosificada.

4.1.4. Análisis del efecto de la dosificación de química inhibidora aplicada al agua de enfriamiento, mediante el empleo de herramientas estadísticas

Con el fin de analizar el efecto del químico inhibidor sobre el agua de enfriamiento de la unidad motocompresora K-2, se obtuvo una data amplia de valores para las características determinantes de la tendencia incrustante del agua, de acuerdo al principio de Langelier, mediante análisis

fisicoquímicos in situ (pH) y de laboratorio (alcalinidad, dureza y sólidos disueltos); el análisis estadístico permitió definir el comportamiento de las variables evaluadas, mediante gráficos de control de procesos de medias y rangos y gráficos de capacidad del proceso en función del tiempo.

Los gráficos de control fueron elaborados por medio del programa *Statgraphics plus* como se mencionó en el capítulo 3, estos gráficos están basados en técnicas estadísticas para la medición y análisis de las variaciones en los procesos, permitiendo detallar si éste es capaz de mantenerse dentro de las especificaciones de control.

En las figuras 4.8 y 4.9 se muestran los gráficos de media y rango para el contenido de sólidos disueltos, cuyos valores se encontraron dentro de los límites de control, durante el tiempo de estudio.

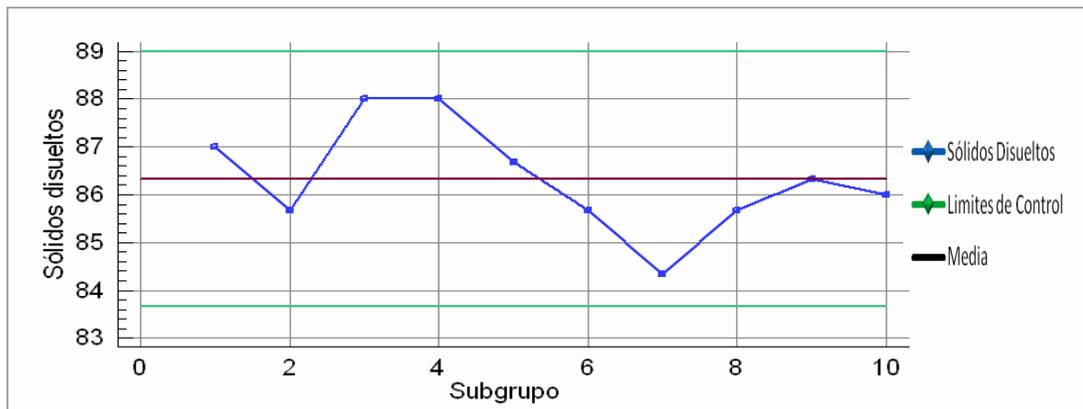


Figura 4. 8. Gráfico de control de media de los sólidos disueltos

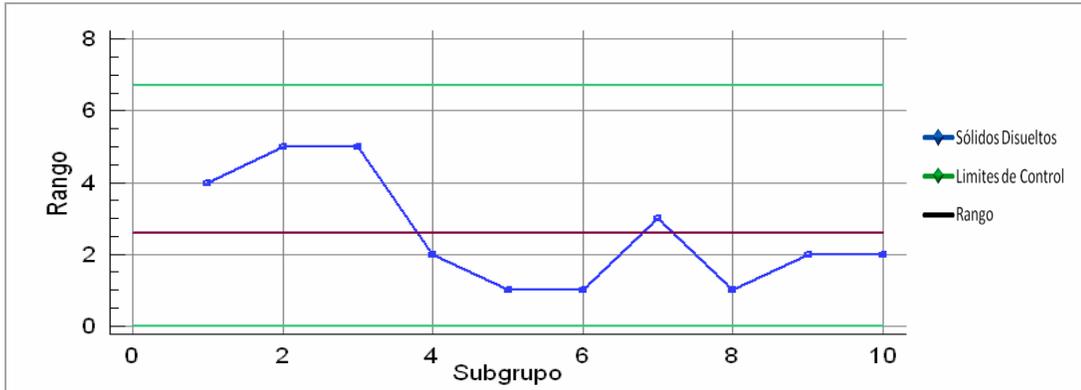


Figura 4. 9. Gráfico de control de rangos de los sólidos disueltos

Caso contrario ocurrió con los gráficos de control de medias y rangos para los valores de pH, alcalinidad y dureza del agua de enfriamiento, mostrados en las figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 y 4,15 respectivamente, los cuales se encontraron fuera de control, puesto que en todos los casos, al menos un punto estuvo fuera de los limites, durante el tiempo evaluado.

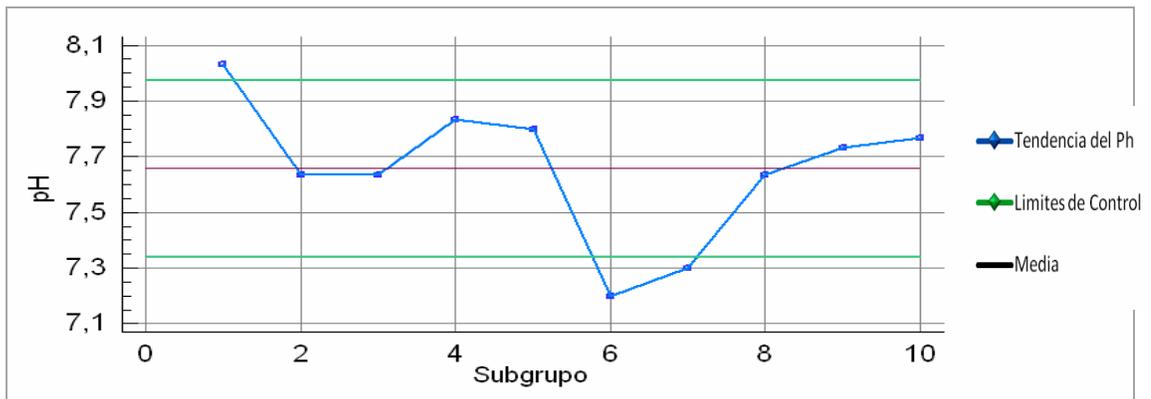


Figura 4. 10. Gráfico de control de media del pH

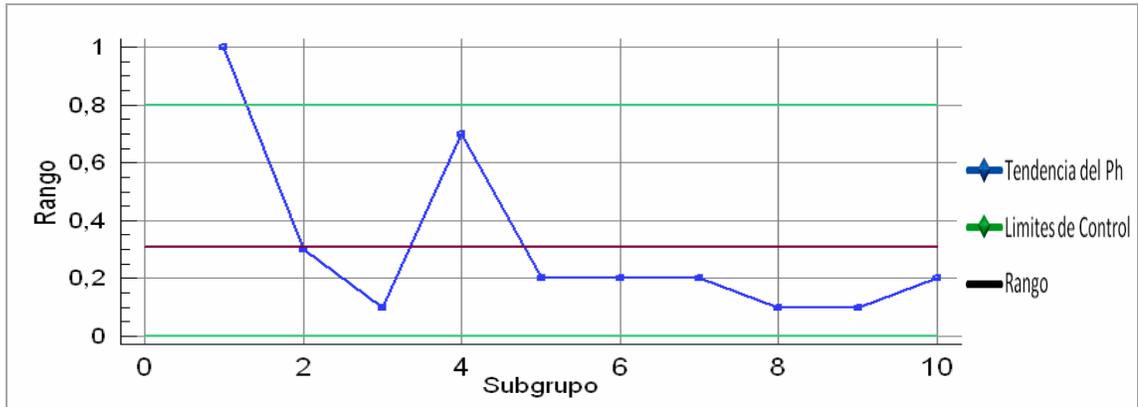


Figura 4. 11. Gráfico de control de rangos del Ph

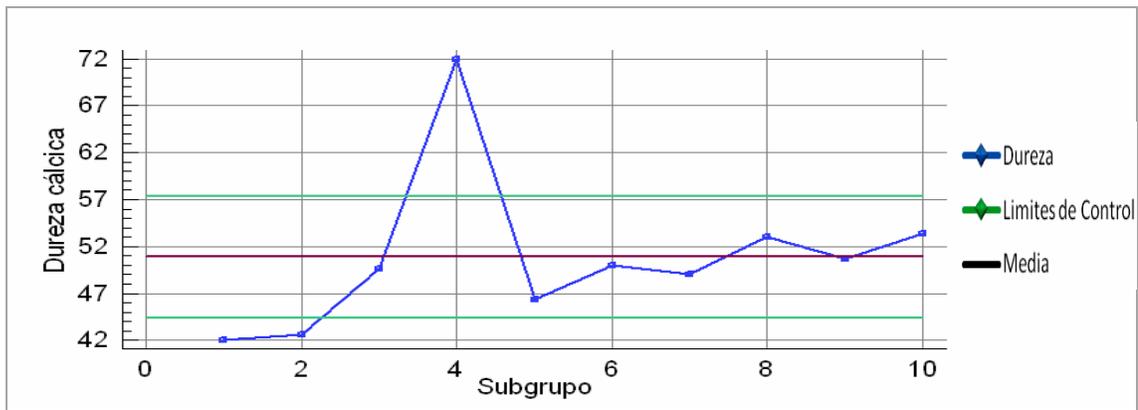


Figura 4. 12. Gráfico de control de media de la dureza cálcica

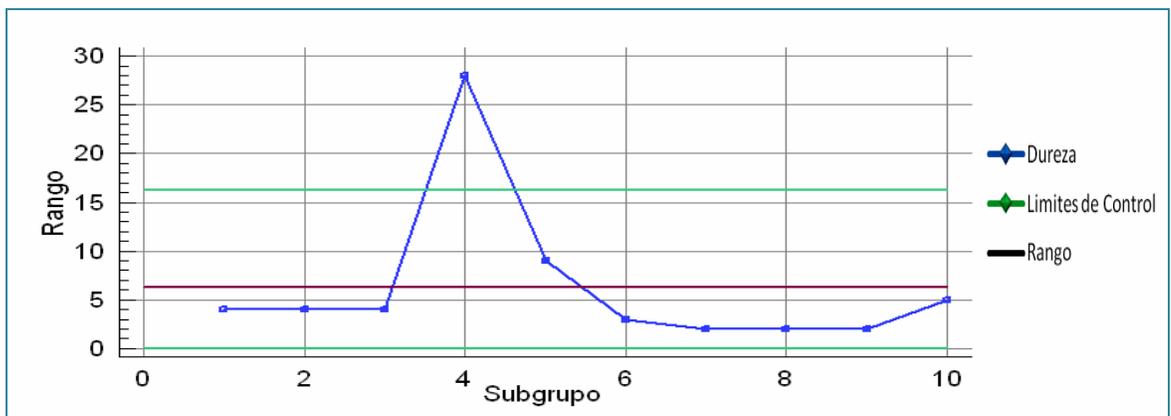


Figura 4. 13. Gráfico de control de rangos de la dureza cálcica

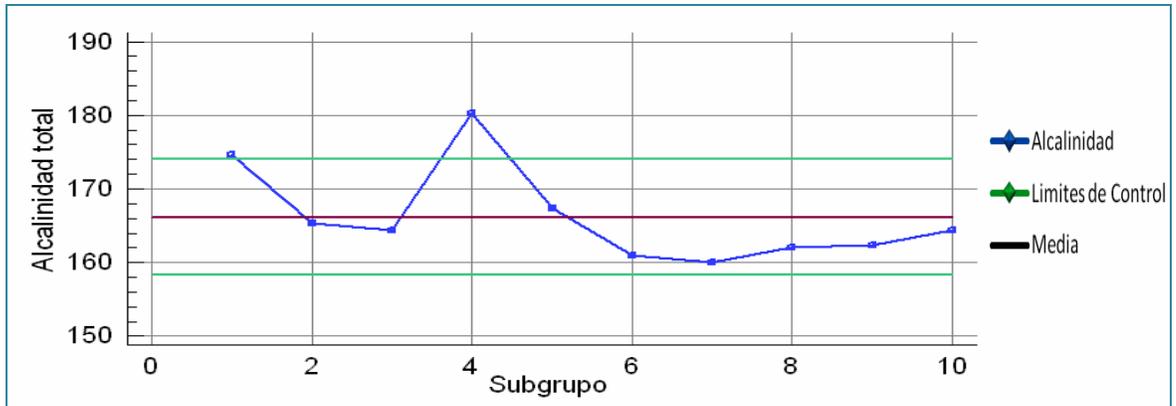


Figura 4.14. Gráfico de control de media de la alcalinidad total

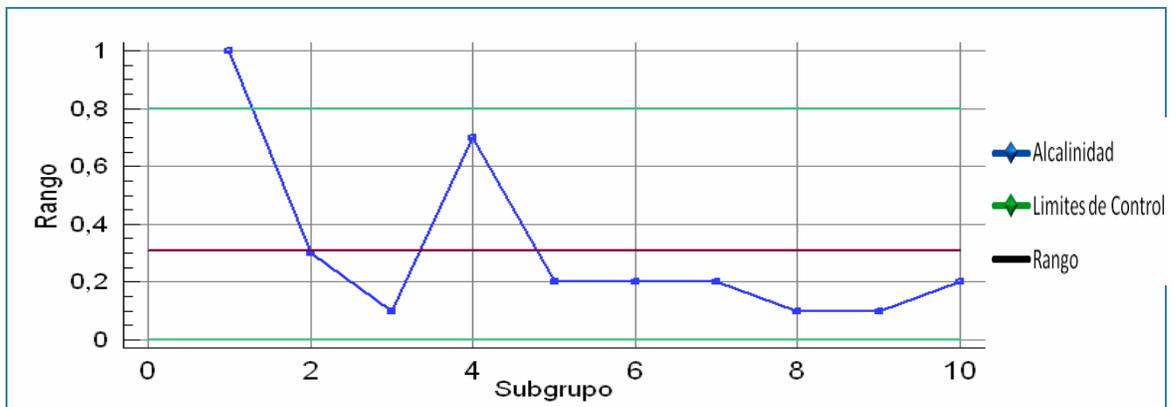


Figura 4.15. Gráfico de control de rangos de la alcalinidad total

En La mayoría de los casos, la variabilidad del efecto del químico inhibidor empleado, obedecieron a causas especiales (asignables), la cuales no responden a ningún modelo probabilístico y actúan en determinados momentos produciendo gran inestabilidad; éstas fueron:

- Oscilaciones de las características del producto químico inhibidor utilizado

El producto químico inhibidor utilizado en la planta compresora se encuentra en estado de vencimiento desde hace dos años.

- Variaciones de temperatura

Los cambios de temperaturas que se presentaron en la unidad motocompresora K-2, durante el periodo de estudio, originó grandes pérdidas de agua por evaporación, por lo que fue requerida la continua compensación. Esta agua que entra al sistema no está sometida al producto inhibidor, lo que ocasiona que la concentración del producto existente en el sistema disminuya y por consiguiente su eficiencia.

- Operario no calificado

Este factor representó una de las causas más importantes de las fluctuaciones que presentaron los valores de las características del agua de enfriamiento, debido a que la dosificación del químico inhibidor se realiza de manera manual; el personal encargado no posee la capacitación necesaria para la correcta aplicación del químico inhibidor, aunado a esto no se cuenta con un control y registro adecuado, en cuanto a cantidad de dosis y tiempo de agregación.

- Falta de un sistema automatizado de inyección de químico inhibidor

La ausencia de un método automatizado que mantenga el sistema de enfriamiento con una adecuada dosis en tiempo y cantidad, repercute de manera significativa en la inestabilidad de los valores.

Estas causas incidieron en el efecto del químico inhibidor sobre el agua de enfriamiento, originando gran variabilidad de las características del agua, favoreciendo la tendencia a desarrollar incrustaciones en el sistema de enfriamiento y a las subsecuentes altas temperaturas que presentó la unidad motocompresora. No obstante, las causas que produjeron la inestabilidad de los valores de pH, alcalinidad total y dureza cálcica del agua de enfriamiento son predecibles y definidas, por lo que pueden ser reducidos si se eliminan las causas.

Por otra parte, el análisis de capacidad permitió definir si el proceso realmente cumplió con las especificaciones de control durante el periodo de estudio, mediante el empleo del índice de capacidad C_p , no obstante, la aplicación de este método es atribuible solo a procesos que se encuentran bajo control estadístico.

De las características seleccionadas para el análisis, solo el contenido de sólidos disueltos presentó causas comunes de variación, es decir, variaciones propias del proceso que no pueden ser controladas, pero sigue estando dentro de los límites de control. Sin embargo, esto no significó que el contenido de sólidos disueltos en el agua de enfriamiento no esté repercutiendo sobre el sistema, solamente significó que el proceso es consistente en cuanto a los valores que se tienen de esta característica, por lo que se calculó el índice de capacidad para esta característica, el cual se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4. 4. Resultado del índice de capacidad C_p de los sólidos disueltos

Índice de capacidad	Valor
C_p	0,57

El índice de capacidad C_p para esta característica, resultó ser menor a 1, lo cual implicó que el proceso fue potencialmente no capaz de cumplir con las especificaciones, de acuerdo a la tabla 4.

Tabla 4. 5. Interpretación de resultados del índice de capacidad C_p

Consideración	Interpretación
$C_p > 1$	El proceso es potencialmente capaz
$C_p < 1$	El proceso no es potencialmente capaz

4.1.5. Propuesta de un sistema automatizado de dosis de química inhibidora aplicada al agua, utilizada como medio de enfriamiento

La propuesta de un sistema automatizado de dosificación de químico inhibidor, implicó el uso de numerosos equipos y accesorios para su puesta en operación, sin embargo, muchos de éstos ya se encuentran disponibles en la planta, por tal razón, esta propuesta se limitó únicamente a la escogencia de dos bombas de dosificación automatizada, para completar el sistema.

En su escogencia se evaluaron diferentes opciones de proveedores de bombas dosificadoras, por medio de una matriz de valoración de criterios (MVC), para finalmente sugerir cual fue la opción más viable, de acuerdo a las especificaciones indicadas por la empresa.

Se compararon cada una de las opciones, a través de criterios cualitativos fundamentados en variables cuantificables, para la selección de las bombas dosificadoras de químico inhibidor, que cumpla con los

estándares del departamento de costos de la empresa PDVSA. Una vez evaluadas las opciones se obtuvo la valoración de cada una, las cuales se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4. 6. Importancia relativa de las opciones evaluadas

	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Importancia Relativa	224,57	160,64	259,07

De esta tabla la opción 3 resultó la más conveniente, ya que se ajustó mejor a las exigencias mínimas de la empresa en cuanto a costo, garantía, disponibilidad de proveedores en el área, confiabilidad operacional y plazo de entrega, en contraposición con las otras dos opciones, obteniendo así un mayor valor de importancia relativa.

La adquisición de la bomba dosificadora completaría el sistema de inyección de la planta Santa Ana III, lo que significaría la regulación de la dosis de inyección del químico inhibidor en el sistema de enfriamiento y a su vez la salvaguarda de la unidad motocompresora K-2, manteniendo así su operatividad y producción, ante la amenaza de formación de incrustaciones que interferirían con la eficiencia de la transferencia de calor,

La puesta en marcha de un sistema automatizado de dosificación de químico, a un costo relativamente bajo, que representa su materialización, tiene como ventajas la posibilidad de implementarse, en el marco de un plan piloto, en otras plantas del Distrito, que presenten problemas operacionales semejantes por las características de las aguas, haciéndose sumamente

conveniente la implementación de este sistema, cómo estrategia para solucionar los problemas que pudieran producirse.

4.2 CONCLUSIONES

1. La unidad motocompresora K-2 se encuentra operando a temperaturas superiores de las condiciones de diseño del equipo.
2. El sistema de enfriamiento no está retirando el suficiente calor del motocompresor, a pesar de mantenerse operando dentro de los rangos de diseño.
3. El sistema de enfriamiento de la unidad motocompresora presenta acumulaciones de sales precipitadas en las camisas de los cilindros de fuerza, cilindros compresores y tuberías involucradas en el sistema.
4. El agua de enfriamiento utilizada en la planta compresora presenta una tendencia altamente incrustante a las temperaturas de operación del motocompresor (80 °C), debido al alto contenido de dureza cálcica y sólidos disueltos que presenta.
5. Los componentes del sistema de enfriamiento que resultaron ser más críticos fueron el filtro de arena, el controlador de nivel y el enfriador por aire; los dos primeros por encontrarse fuera de servicio y el último por poseer el mayor índice de fallas durante el periodo de estudio.
6. La dosis de químico inhibidor empleada, no es capaz de reducir la tendencia incrustante del agua de enfriamiento, evidenciándose en los altos valores obtenidos, de los parámetros determinantes, durante la investigación.

7. La implantación de un sistema automatizado de inyección de químico inhibidor, garantizara que el agua de enfriamiento de la unidad motocompresora se mantenga debidamente dosificada, y con ello reducir y evitar la formación de incrustaciones y depósitos de sales.

4.3 RECOMENDACIONES

1. Realizar periódicamente análisis fisicoquímico del agua de enfriamiento, a fin de determinar la tendencia de ésta, empleando los índices de estabilidad.

2. Se debe reactivar el filtro de arena a la salida del tanque de almacenamiento mayor, ya que éste retiene gran parte del contenido de sólidos totales y hierro insoluble, presentes en el agua que entra al motocompresor, minimizando la formación de depósitos y costras en las paredes de la tuberías de la unidad.

3. Hacer seguimiento de la efectividad del químico inhibidor sobre los parámetros que determinan la tendencia del agua, por medio de técnicas de control estadístico, que permitan identificar causas no asignables o especiales que afecten el proceso.

4. Capacitar al personal encargado sobre el proceso de inyección de químico inhibidor y la importancia de éste para el tratamiento del agua.

5. Aplicar el químico inhibidor en forma automatizada, de manera de que el agua de enfriamiento siempre se mantenga dosificada.

6. Se debe incorporar al sistema de enfriamiento de la planta un tanque de almacenamiento auxiliar, con el objeto de almacenar el agua que circula por la unidad motocompresora, cuando a ésta se le practican mantenimientos preventivos y correctivos.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, V. (2005). *Evaluación del sistema de enfriamiento por agua mediante uso de tratamiento químico anti-incrustante en las unidades motocompresoras de la planta Santa Ana III y el Toco, Distrito Gas Anaco*. Tesis de Grado. Departamento de Ingeniería de Petróleo. Universidad de Oriente, Anzoátegui.

American Society for Testing and Materials. *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, USA.

American Petroleum Institute. (1991). *Annual Book of API System Metric*. Washington: API Publishing Services.

Blake, T. (1980). *Water Treatment for HVAC and Potable Water Systems*. Editorial McGraw-Hill, EE.UU

Carmona, G. (2007). *Evaluación de Refrigerantes para el sistema de enfriamiento de los motocompresores ubicados en la superintendencia de plantas del Distrito San Tome*. Tesis de Grado. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente, Anzoátegui.

Carrier System Design. (1968). *Manual Water Conditioning*, Editorial McGraw-Hill, N.Y.

Espinoza, H. (2000). *Compresores Reciprocantes. Características, Funcionamiento y Selección*, guía de trabajo, Universidad de Oriente, Anzoátegui.

Franco, J. (2007). *Evaluación del efecto de los niveles de impurezas sobre la productividad en el área de precipitación de la planta CVG- Bauxilium*. Tesis de Grado. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente, Anzoátegui.

González, Y. (2005). *Evaluación del sistema de enfriamiento por aire de las unidades motocompresoras de una planta de compresión de gas natural*. Tesis de Grado. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente, Anzoátegui.

Green, R. (1992). *Compresores, selección, uso y mantenimiento* (Primera ed.), Editorial McGraw-Hill, México

Guaura, C. (2006). *Evaluación estadística de los resultados de los análisis fisicoquímicos en la planta potabilizadora José Antonio Anzoátegui*. Tesis de Grado. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente, Anzoátegui.

Juram, J. (1994). *Manual de control de calidad*, Editorial McGraw-Hill, Mexico

Lipesa. (1998). *“Tratamiento Químico del Agua”*, Editorial Impregraf, Caracas.

Marin, J. (2007). *Taller de Motocompresores Reciprocantes*. Guía de trabajo, Anaco.

NALCO. (2001). *Manual de Aguas. Tomo III*, Editorial McGraw-Hill, México.

Olivier, H. (2004). *Evaluación del comportamiento de los sistemas de enfriamiento de los motocompresores Marca Clark, Modelo TLA-10 en la Planta Compresora de Gas Santa Ana III, PDVSA-Gas Anaco*. Tesis de

Grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Oriente, Anzoátegui.

PDVSA GAS, (1991). *Manual de Mejoramiento de la Calidad del Agua de Enfriamiento de Compresores*, Anaco.

PDVSA. (1995). *Norma de Plantas Compresoras Centrifugas de Gas N° MED-400-01-01*. Venezuela.

PDVSA. (1987). *Norma de Diseño de Sistemas de Inyección de Químicos N° PI-05-01-02*. Venezuela.

Perry, R. y Green, D. (2001). *Manual del Ingeniero Químico. (7° Edición). Tomo I*, Editorial McGraw-Hill, Madrid – España.

POLA, A. (1993). *Aplicación de la Estadística al Control de Calidad*.

Ruíz, A. (2006). *Control Estadístico de Procesos*. Manual Técnico. Universidad de Comillas, Madrid.

Sarabia, L. (2002). *Manual de Diagnóstico y Optimización de Compresores Reciprocantes*, PDVSA Gas, Anaco.

Suarez, D. (2008). *Manual de Herramienta Técnica para Mejorar la Confiabilidad*, Editado por Confirma & Consultores, Puerta la Cruz.

Wartsila. (1997). *Manual de Instrucciones de Motocompresores*, Editado por Wartsila NSD, EE.UU.

ANEXOS

**ANEXO A: DATOS OPERACIONALES DEL
MOTOCOMPRESOR K-2**

Tabla A. 1. Datos operacionales de temperaturas en los cilindros de fuerza del motocompresor

Fecha	CF-1 (°F)	CF-2 (°F)	CF-3 (°F)	CF-4 (°F)	CF-5 (°F)	CF-6 (°F)	CF-7 (°F)	CF-8 (°F)	CF-9 (°F)	CF-10 (°F)
19/11/2010	807	872	841	847	839	849	852	836	780	809
20/11/2010	823	911	860	863	859	909	852	796	816	817
21/11/2010	828	921	875	872	870	881	888	861	806	823
22/11/2010	877	895	876	867	859	880	890	868	803	821
23/11/2010	840	898	872	877	860	900	890	870	810	820
24/11/2010	857	947	910	913	881	942	921	889	824	847
25/11/2010	857	938	925	924	871	864	891	895	825	840
27/11/2010	767	762	787	783	786	784	741	812	788	796
28/11/2010	777	738	792	791	789	785	803	821	805	793
29/11/2010	761	871	818	794	797	712	796	825	792	748
30/11/2010	772	872	814	802	794	786	795	831	793	796
01/12/2010	783	841	825	821	803	781	811	841	801	804
02/12/2010	812	818	852	842	822	797	832	863	832	819
03/12/2010	838	872	877	863	835	814	856	888	858	831
04/12/2010	855	877	898	892	897	823	877	901	873	834
05/12/2010	945	916	936	908	874	836	926	936	915	869
06/12/2010	887	886	900	895	912	899	897	903	898	875
07/12/2010	908	882	889	883	893	863	889	893	886	858
08/12/2010	706	745	759	742	775	785	801	774	756	755

Tabla A. 2. Datos operacionales de temperaturas en las etapas de compresión del motocompresor

Fecha	1era Etapa (°F)		2 Etapa (°F)		3 Etapa (°F)	
	Succión	Descarga	Succión	Descarga	Succión	Descarga
19/11/2010	70	242	80	198	105	165
20/11/2010	68	243	87	209	112	172
21/11/2010	76	257	91	218	109	171
22/11/2010	74	256	89	219	106	173
23/11/2010	73	256	85	213	105	165
24/11/2010	81	249	83	211	98	163
25/11/2010	81	235	87	213	107	162
27/11/2010	81	256	88	215	108	162
28/11/2010	82	262	88	215	109	166
29/11/2010	81	251	87	215	109	166
30/11/2010	72	245	87	209	101	160
01/12/2010	73	245	87	209	101	160
03/12/2010	77	242	79	205	103	165
04/12/2010	77	242	79	217	104	166
05/12/2010	78	245	80	215	103	166
06/12/2010	80	247	84	212	108	164
07/12/2010	79	248	83	219	107	162
08/12/2010	63	242	84	208	106	167

Tabla A. 3. Datos operacionales de temperaturas del agua que enfría el motor y el aire de barrido de la unidad motocompresora

Fecha	Agua que enfría el motocompresor		Agua que enfría el aire de barrido	
	Temp. Entrada (°F)	Temp. Salida (°F)	Temp. Entrada (°F)	Temp. Salida (°F)
19/11/2010	165	170	122	72
20/11/2010	149	159	129	68
21/11/2010	161	176	132	70
22/11/2010	150	164	132	70
23/11/2010	166	170	130	68
24/11/2010	169	175	132	70
25/11/2010	172	177	132	72
26/11/2010	151	167	121	67
27/11/2010	154	169	124	69
28/11/2010	155	144	130	65
29/11/2010	155	149	120	60
30/11/2010	148	161	124	70
01/12/2010	146	156	124	70
02/12/2010	166	172	127	64
03/12/2010	160	175	130	68
04/12/2010	162	179	130	62
05/12/2010	160	175	130	64
06/12/2010	150	162	102	60
07/12/2010	159	165	101	60
08/12/2010	155	160	130	63

**ANEXO B: INFORME DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS
FISICOQUÍMICO DE LAS DIFERENTES MUESTRAS DEL
AGUA DE ENFRIAMIENTO**



ACTIVIDADES DE LABORATORIO
ANÁLISIS DE AGUA

PLANTA SANTA ANA IIII

Fecha de análisis: 14/12/2010

Análisis de agua

Característica	Cilindros Compresores	Cilindros de Fuerza	Galería de Barrido	Promedio
pH	7,8	7,9	8,2	7,9
Dureza total (CaCO ₃) (ppm)	74	76	84	78
Sólidos suspendidos (ppm)	14	15	22	17
Sólidos disueltos (ppm)	212	218	232	220
Sólidos totales (ppm)	226	233	254	237
Alcalinidad total (ppm)	181	184	186	183
Cloruros (ppm)	39	40	44	41
Sílice (ppm)	20	22	24	22
Hierro total (ppm)	1,9	2,1	2,3	2,1
Calcio (ppm)	12	15	17	14
Bicarbonato (ppm)	95	101	112	102
Magnesio (ppm)	15	15	19	16

**ANEXO C: RESULTADO DEL CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE
ESTABILIDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS
OPERACIONALES Y LAS CONSTANTES A Y B DE LOS
ÍNDICES DE LANGELIER Y RYZNAR**

Tabla C. 1. Resultados de los Índices de Langelier y Ryznar del agua de enfriamiento a diferentes temperaturas

Temperatura (°F)	Índice de Langelier	Índice de Ryznar
77	0,3	7,3
104	0,6	6,7
140	1,0	6,0
176	1,3	5,3

Tabla C. 2. Constante A como función de la temperatura del agua para calcular los índices de Langelier y Ryznar

Temperatura en °C	Temperatura en °F	Constante A
0	32,0	2,6
4	39,2	2,5
8	46,4	2,4
12	53,6	2,3
16	60,8	2,2
20	68,0	2,1
25	77,0	2,0
30	86,0	1,9
40	104,0	1,7
50	122,0	1,5
60	140,0	1,4
70	158,0	1,2
80	176,0	1,1

Tabla C. 3. Constante B como función de los sólidos disueltos para el cálculo de los índices de Langelier y Ryznar

Total de sólidos disueltos (ppm)	Constante B
0	9,70
100	9,77
200	9,83
400	9,86
800	9,89
1000	9,90

ANEXO D: CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESO

Tabla D. 1. Valores de pH, alcalinidad, dureza y sólidos totales obtenidos en diferentes mediciones del agua de enfriamiento, usados para el control estadístico de proceso y análisis de capacidad

Fecha	pH	Alcalinidad total (ppm)	Dureza cálcica (ppm)	Sólidos Disueltos (ppm)
03/02/11	8,6	194	44	89
	7,6	166	42	85
	7,9	164	40	87
07/02/11	7,6	166	42	86
	7,8	163	41	88
	7,5	167	45	83
10/02/11	7,7	167	52	91
	7,6	162	49	86
	7,6	164	48	87
14/02/11	7,4	171	56	88
	8,0	184	84	87
	8,1	186	76	89
17/02/11	7,9	170	46	87
	7,7	164	42	86
	7,8	168	51	87
21/02/11	7,1	161	52	86
	7,3	163	49	85
	7,2	159	49	86
24/02/11	7,4	163	50	84
	7,3	158	48	83
	7,2	159	49	86
28/02/11	7,6	161	52	85
	7,6	163	54	86
	7,7	162	53	86

Tabla D. 1. Valores de pH, alcalinidad, dureza y sólidos totales obtenidos en diferentes mediciones del agua de enfriamiento, usados para el control estadístico de proceso y análisis de capacidad.

Continuación

03/03/11	7,8	164	52	87
	7,7	162	50	87
	7,7	161	50	85
07/03/11	7,7	163	53	86
	7,9	166	56	87
	7,7	164	51	85

Tabla D. 2. Resultados suministrados por el programa Statgraphics plus

Característica	\bar{X}	\bar{R}	LCS (X)	LCI (X)	LCS (R)	LCI (R)
pH	7,66	0,31	7,97	7,33	0,80	0,00
Dureza cálcica	50,87	6,30	57,31	44,42	16,21	0,00
Alcalinidad total	166,17	7,70	174,04	158,29	19,82	0,00
Sólidos disueltos	86,33	2,60	88,99	83,67	6,60	0,00

ANEXO E: TABLA DE CONSTANTES ESTADÍSTICAS

Tabla E. 1. Constantes estadísticas para el cálculo de los límites de control e índice de capacidad

n	d_2	D_3	D_4	A_2
1	1,128	0	3,267	2,660
2	1,128	0	3,267	1,880
3	1,693	0	2,574	1,023
4	2,059	0	2,282	0,729
5	2,326	0	2,114	0,577

**ANEXO F: ENCUESTAS APLICADAS AL PERSONAL DE
MANTENIMIENTO Y OPERACIONES DE LA PLANTA PARA EL
ANÁLISIS DE CRITICIDAD**

**ANEXO G: ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE LOS EQUIPOS Y
ACCESORIOS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO**

Tabla G. 1. Resultados mayormente seleccionadas de las encuestas aplicadas al personal de mantenimiento

Componente	Fallas	MTFS	DR		CMP		Eficiencia	Backlog
			S	R	S	E		
Enfriador	C	C	4	6	5	5	6900	5
Filtro de Arena	C	C			0	0	0	
Agua de Enfriamiento	B	A	0	0	0	0	7997	0
Tanque de Compensación	A	A	0	0	0	0	8760	0
Sistema de Inyección de Químico	A	A	1	1	0	0	4990	0
Bombas	B	A	1	1	0	0	7900	3
Control de Nivel	C	C	1	1	0	0	7900	0
Tuberías y Accesorios	A	A	1	2	0	0	8760	3

Tabla G. 2. Resultados mayormente seleccionadas de las encuestas aplicadas al personal de operaciones

Componente	TC	Costos	SPEA
Enfriador	C	A	C
Filtro de Arena	C	B	C
Agua de Enfriamiento	A	A	C
Tanque de Compensación	C	B	B
Sistema de Inyección de Químico	C	B	B
Bombas	A	B	B
Control de Nivel	C	B	A
Tuberías y Accesorios	A	C	B

Tabla G. 3. Resultados de las ponderaciones de los componentes del sistema de enfriamiento

Componentes	Factores de Mantenimiento						Factores de Operación			% de Criticidad
	Fallas	MTFS	DR	CMP	Eficiencia	Backlog	TC	Costos	SPEA	
Enfriador	3	3	2	1	2	2	3	1	3	73,950
Filtro de Arena	3	3	1	3	3	2	3	2	2	84,90%
Agua de Enfriamiento	2	1	3	3	1	1	1	1	1	46,35%
Tanque de Compensación	1	1	3	3	1	1	3	2	1	60,30%
Sistema de Inyección de Químico	1	1	1	3	2	1	3	2	2	52,05%
Bombas	2	1	1	3	1	1	1	2	1	46,50%
Control de Nivel	3	3	1	3	3	1	3	2	1	71,11%
Tuberías y Accesorios	1	1	2	3	1	2	1	2	1	49,20

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

TÍTULO	EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR AGUA DE LAS UNIDADES MOTOCOMPRESORAS DE LA PLANTA SANTA ANA III, DISTRITO GAS ANACO
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
MARQUEZ CH. ROSANGELES C.	CVLAC: 17.785.908 E MAIL: marquezrosangeles@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

INDICE DE LANGELIER Y RYZNAR _____

INCRUSTACION _____

ANALISIS DE CONTROL _____

ANALISIS DE CRITICIDAD _____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS	INGENIERÍA QUÍMICA

RESUMEN (ABSTRACT):

Se evaluó el sistema de enfriamiento por agua de las unidades motocompresoras de la planta Santa Ana III. Inicialmente se identificaron las condiciones operacionales de temperatura del sistema de enfriamiento por agua de la unidad motocompresora K-2, por ser la única operativa, y se compararon con los datos de diseño, encontrándose que éste opera fuera del rango especificado. Se realizaron análisis fisicoquímicos a muestras del agua a diferentes temperaturas, para determinar su tendencia a ser corrosiva o incrustante, basado en los índices de Langelier y Ryznar, indicando que el agua tiene tendencia incrustante, siendo esta tendencia proporcional al aumento de la temperatura. Se aplicó un análisis de criticidad para precisar los equipos y/o accesorios del sistema de enfriamiento que presentaron más fallas durante el año 2010; al final del análisis los componentes más críticos fueron: enfriador por aire, filtro de arena y controlador de nivel del tanque de compensación. Se analizó el efecto de la dosificación de química inhibidora aplicada al agua de enfriamiento, mediante técnicas de control estadístico y capacidad de procesos, encontrándose que la dosis/tiempo empleada no es la más efectiva. Por último se propuso un

sistema de dosificación automatizado de químico inhibidor que cumpliera con las especificaciones requeridas por la empresa.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
PETRA MARTÍNEZ	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	4.902.046			
	E_MAIL	pmartinez@hotmail.com			
	E_MAIL				
FREDDY SANTAMARIA	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	11.420.552			
	E_MAIL	sfreddy_j@hotmail.com			
	E_MAIL				
HERNÁN RAVEN	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	4.136.007			
	E_MAIL	raven1@hotmail.com			
	E_MAIL				
YRAIMA SALAS	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	8.478.649			
	E_MAIL	Yrasal57@hotmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	06	21
------	----	----

AÑO	MES	DÍA
-----	-----	-----

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS: "EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR AGUA DE LAS UNIDADES MOTOCOMPRESORAS DE LA PLANTA SANTA ANA III, DISTRITO GAS ANACO"	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: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

INGENIERO QUÍMICO

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

PREGRADO

ÁREA DE ESTUDIO:

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA _____

INSTITUCIÓN:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE NÚCLEO ANZOÁTEGUI _____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado

“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario para su autorización”.

Rosangeles Márquez

AUTOR

AUTOR

AUTOR

Petra Martínez

TUTOR

Freddy Santamaría

JURADO

Hernán Raven

JURADO

Yraima Salas

POR LA SUBCOMISION DE TESIS