

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



**Evaluación de Refrigerantes para el Sistema de Enfriamiento de los
Motocompresores ubicados en la Superintendencia de Plantas del Distrito
San Tomé**

Realizado por:

GABRIEL ALEJANDRO CARMONA CARABALLO

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

INGENIERO QUÍMICO

Puerto La Cruz, Noviembre de 2007

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



**Evaluación de Refrigerantes para el Sistema de Enfriamiento de los
Motocompresores ubicados en la Superintendencia de Plantas
del Distrito San Tomé**

ASESORES

Ing. Quím. Lucas Alvarez (Ph.D)
Asesor Académico

Ing. Ind. Esquíá Jiménez
Asesor Industrial

Puerto La Cruz, Noviembre

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



**Evaluación de Refrigerantes para el Sistema de Enfriamiento de los
Motocompresores ubicados en la Superintendencia de Plantas
del Distrito San Tomé**

JURADO CALIFICADOR

Ing. Quím. Lucas Alvarez (Ph.D)

Asesor Académico

Ing. Quím. Petra Martínez (MSc) Ing. Quím. Fidelina Moncada (MSc)

Jurado Principal

Jurado Principal

Puerto La Cruz, Noviembre de 2007

RESOLUCION

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de Trabajo de Grado:

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

DEDICATORIA

A Dios: Padre celestial, por haber guiado cada uno de mis pasos durante el largo camino recorrido y por demostrarme que siempre hay una luz al final del camino y enseñarme que en cada obstáculo que se presentó siempre estuvo conmigo.

A mis abuelos: Carmen Cirila y Nicasio de Jesús (Q.E.P.D.), por haber estado conmigo durante toda mi niñez y, Carmen Dolores y Juan Bautista (Q.E.P.D.), por estar siempre pendiente de mí a pesar de no verlos con frecuencia.

A mis padres: Yesenia y Francisco, por todos los momentos felices que he pasado al lado de ustedes, por todo el amor que me han dado y por la confianza que han depositado en mí.

A mi esposa: Chiquinquirá porque tu has sido pilar fundamental en todos los logros alcanzados, eres y siempre serás muy especial en mi vida, TE AMO MUCHO PRINCESITA!!!

A mis hijos: Diego Alejandro y Ángel David, porque son la alegría y la dicha más grande que he tenido, para ustedes mil bendiciones, LOS AMO!!!

A mis hermanos: Francisco Javier y Francis Gabriela, por todos los momentos que hemos vivido juntos; luchan siempre por lo que quieren y verán que es fácil lograrlo.

A mis sobrinas: Anhibel (ahijada) y Rosibel, porque son la luz que mantiene encendida la casa de la abuela. Dios las Bendiga!!!

A mí tía: Rosa Angélica (Q.E.P.D.), tu recuerdo siempre permanecerá vivo en nuestros corazones. Donde estés, muchas gracias!!!

Gabriel Alejandro Carmona Caraballo

AGRADECIMIENTO

A mis padres: Yesenia y Francisco, sin ustedes no existiría. Madre, hoy estás cosechando el fruto de todos los sacrificios realizados, gracias a todo tu esfuerzo hoy soy lo que soy. Padre, gracias por el tiempo que hemos pasado juntos, sin tu guía y todos consejos y conocimientos recibidos de ti, esto no fuera posible. Félix gracias por haber estado allí y por habernos apoyado durante todo este tiempo, para mí siempre serás como un Padre.

A mi esposa: Chiquinquirá, por el cariño que me brindaste desde el principio y por todo el apoyo que has significado para mí desde el día en que nos conocimos.

A mis hijos: Diego Alejandro y Ángel David, ustedes me impulsan a seguir luchando, sobre todo en los momentos en los que creí no lograrlo. Esto es para ustedes!!!

A mi suegro: José, gracias por haberme brindado su mano incondicional, sobre todo en los momentos en que más lo necesité.

A mis tíos: Luisa y Fernando, por el apoyo y la confianza que me han brindado toda la vida; César, por haber creído en mí y por el apoyo brindado durante parte de la carrera.

A mi primo: Fernando, por haber sido un compañero, un amigo y por haberme guiado en mis primeros pasos en la Universidad.

A mis compañeros de residencia, Fredery, Gabriel y Daniel, ustedes contribuyeron en mi formación personal durante los primeros años de mi carrera.

A mis amigos y compañeros de estudio: Chiquinquirá Sarmiento, Silenia Florez, Mariceli Ojeda, Yoanni Avilez (La China), Yorvic Vital, Erick Berbín, Evelyn Rojas, Héctor Luna, Lisette Rodríguez, Alis Fernández, Amarfi Fernández, Daniela Balbás, Alexi Rosas, Jonatan Coa, Nelson Torrealba; gracias por compartir juntos el sueño de ser Ing. Químicos, sueño que ya se hizo realidad.

A mis asesores: Esquía Jiménez (Industrial), gracias los consejos y por enseñarme que las cosas hay que hacerlas siempre con cariño y a hacerlas siempre bien. A Yusmila Torres(Industrial) por el tiempo dedicado y por compartir conmigo la realización de las pruebas; un gran y sincero agradecimiento a mi Asesor Académico Prof. Lucas Álvarez, por su invaluable aporte durante la carrera, gracias Ud. aprendí a tenerle amor a mi carrera, muchas gracias por la paciencia y dedicación que ha tenido durante el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores: Héctor Silva, Hernán Ravén, Petra Martínez, Amalia Moya, Raiza Sánchez, Henry Rodríguez, de ustedes aprendí gran parte de lo que sé. Quiero brindar un agradecimiento muy especial a mis queridos profesores: Maritza Millán, Shirley Marfisi, Fidelina Moncada y Lucas Álvarez; porque ustedes han dejado en mí un legado de conocimientos y sobre todo me enseñaron a ver que los profesores pueden ser también un buen amigo.

A mis compañeros de trabajo: Luis Bastardo, Daniel Gallardo, Raiza Aristimuño, Odalis Gutiérrez, José Fuentes, Rafael Godoy, Javier Romero, Santos Maguana, Miguel Rodríguez, por darme siempre ánimo para terminar y muy especialmente a Julio Salazar, por no dejarme desmayar en el intento.

A todas y cada una de las personas que desinteresadamente me apoyaron y creyeron en mí.

A todos ustedes Mil Gracias...

RESUMEN

En este trabajo se evaluaron cuatro refrigerantes comerciales con la finalidad seleccionar aquel que ofreciera mayor protección al sistema de enfriamiento de los motocompresores ubicados en el Distrito San Tomé, debido a los constantes problemas de recalentamiento y demás problemas asociados al sistema de enfriamiento que estaban presentando estas unidades. Para el desarrollo de este trabajo se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de los refrigerantes, donde se determinó la gravedad específica, punto de ebullición, porcentaje de m-etilenglicol, reserva alcalina, capacidad calorífica, protección anticorrosiva, tendencia a la formación de espuma; encontrándose ligeras variaciones en cuanto al punto de ebullición, gravedad específica, ya que estas propiedades son directamente proporcionales al porcentaje de m-etilenglicol que contenga cada refrigerante (A: 38,40%; B: 50,54%; C: 50,24%; D: 17,07%). Para la capacidad calorífica se encontró que la relación es inversamente proporcional al porcentaje de m-etilenglicol, obteniéndose los siguientes valores para las capacidades caloríficas: A: 0,84; B: 0,79; C: 0,79 y D: 0,93 cal/g°C. De estos resultados se concluyó que el refrigerante D presenta mayor capacidad para retirar el calor del sistema, lo cual es favorable para evitar recalentamiento en el equipo. Al evaluar la reserva alcalina se obtuvo que el refrigerante D posee mayor capacidad amortiguadora de pH, con un valor de reserva alcalina de 2,69 mL de HCl, seguido por el refrigerante A con 2,40 mL de HCl. En cuanto a la tendencia a la formación de espuma se pudo notar que solamente los refrigerantes B y D cumplen con la norma, al obtenerse valores de 20 mL y ruptura en 4,7 s para B y, 28 mL y ruptura en 3,5 s para el refrigerante D. Una de las pruebas más determinantes en la elección del refrigerante es la de corrosividad, en la cual se obtuvo que únicamente el refrigerante D cumple con la norma, al ofrecer protección a todos los metales presentes en la prueba. Por todos los resultados obtenidos se seleccionó el refrigerante D, ya que es el único que cumple con todos los requerimientos y exigencias del sistema de enfriamiento de los motocompresores.

INDICE

RESOLUCION	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	viii
INDICE	ix
INDICE TABLAS	xii
INDICE FIGURA	xiii
CAPITULO I	15
EL PROBLEMA	15
1.1 Reseña histórica de pdvsa	15
1.2 Gerencia de plantas sur	16
1.3 Distrito social san tomé.....	17
1.4 Planteamiento del problema.....	18
1.5 Objetivos	20
1.5.1 Objetivo general.....	20
1.5.2 Objetivos específicos	20
CAPITULO II	21
MARCO TEÓRICO	21
2.1 Antecedentes	21
2.2 Aspectos generales del proceso de compresión de gas natural.....	21
2.3 Primera ley de la termodinámica	22
2.4 Equipos compresores de gas	23
2.4.1 Sistema de lubricación	24
2.4.2 Sistema de Enfriamiento	24
2.4.2.1 Componentes del sistema de enfriamiento.....	25
2.4.2.2 Funcionamiento del sistema de enfriamiento.....	27
2.5 Principales problemas del sistema de enfriamiento	29
2.5.1 Corrosión.....	29

2.5.2 Ensuciamiento y formación de escamas dentro de los intercambiadores de calor	40
2.5.3 Incrustaciones.....	41
2.6.1 Tipos de inhibidores.....	43
2.6.2 Mecanismo de acción de los inhibidores	44
2.7 Compuestos comunes en el agua	45
2.7.1 Caracterización del agua	45
2.8 Índices de estabilidad	46
2.9 Intercambiadores de calor	48
2.9.1. Tipos de intercambiadores.	48
2.10 Coeficientes convectivos de película	50
2.11 Coeficiente global de transferencia de calor	52
2.11.1 Factor de ensuciamiento.....	56
2.11.2 Diferencia de temperatura media logarítmica.....	57
2.11.3 Diferencia efectiva de temperatura	57
2.12 Eficiencia de un intercambiador de calor.....	58
CAPITULO III.....	62
DESARROLLO DEL TRABAJO	62
3.1 Revisión bibliográfica	62
3.2 Determinación de las condiciones de operación del sistema de enfriamiento de los motocompresores.....	62
3.2.1 Características del Motocompresor White Superior K-6.....	63
3.2.2 Caracterización del agua utilizada en el sistema de enfriamiento.....	67
3.2.3 Determinación de las fallas más frecuentes en el sistema de enfriamiento atribuibles al refrigerante.....	68
3.3 Pruebas de laboratorio para determinación de las propiedades fisicoquímicas de los refrigerantes.	68
3.3.1 Obtención de las muestras de refrigerantes para realizar análisis.....	68
3.3.2 Determinación de la temperatura de ebullición	69
3.3.3 Determinación del pH	70
3.3.4 Determinación de la reserva alcalina	70

3.3.5 Determinación de la gravedad específica.....	71
3.3.6 Determinación del contenido de agua y m-etilenglicol.....	71
3.3.7 Determinación de la tendencia a formar espuma	72
3.3.8 Determinación de la corrosividad	72
3.4 Acondicionamiento del sistema de enfriamiento	74
3.5 Muestra de cálculo	75
3.5.1 Determinación de los índices de estabilidad	75
3.5.2 Cálculo de la capacidad calorífica para distintas concentraciones de m-etilenglicol	76
3.5.3 Determinación del % de m-etilenglicol de los refrigerantes estudiados	76
CAPITULO IV	79
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES...79	
4.1 Discusión de resultados.....	79
4.1.1 Análisis de la caracterización del agua utilizada en el sistema de enfriamiento	79
4.1.2 Análisis de la caracterización de los refrigerantes, mediante pruebas fisicoquímicas.....	80
4.1.2.1 Determinación de la temperatura de ebullición	81
4.1.2.2 Determinación del pH	81
4.1.2.3 Determinación de la reserva alcalina	82
4.1.2.4 Determinación de la gravedad específica, % de m-etilenglicol y % de agua.....	83
4.1.2.5 Determinación de la tendencia a formar espuma	89
4.1.2.6 Determinación de la Corrosividad	90
4.1.3 Selección del producto	97
4.1.4 Condiciones de operación del sistema de enfriamiento utilizando el refrigerante seleccionado.	98
4.2 Conclusiones	101
4.3 Recomendaciones.....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	102
ANEXOS	105

INDICE TABLAS

Tabla 2.1 Requerimientos físicos y químicos[11]:.....	29
Tabla 2.2 Requerimientos de actuación[11]:	29
Tabla 2.3 Clasificación del agua de acuerdo a su dureza y al contenido de sólidos disueltos	46
Tabla 3.1 Características del Motocompresor White Superior K-6	63
Tabla 3.2 Datos del Motocompresor utilizando Agua en el Sistema de Enfriamiento	65
Tabla 3.3 Componentes y propiedades del agua utilizada en el sistema de enfriamiento del motocompresor White Superior K-6	67
Tabla 3.4 Refrigerantes a evaluar	69
Tabla 4.1 Índices de estabilidad de la muestra de agua tomada del sistema de enfriamiento	79
Tabla 4.2 Temperatura de ebullición de los refrigerantes estudiados	81
Tabla 4.3 Valores obtenidos de pH para los refrigerantes estudiados	82
Tabla 4.4 Volúmenes de HCl 0,1N gastado en cada refrigerante estudiado.....	82
Tabla 4.5 Gravedad específica de los refrigerantes estudiados	83
Tabla 4.6 Gravedad específica para cada dilución de m-etilenglicol	83
Tabla 4.7 % v/v de m-etilenglicol de los refrigerantes estudiados.....	85
Tabla 4.8 Capacidad calorífica para distintos porcentajes de m-etilenglicol.....	87
Tabla 4.9 Capacidad calorífica para los refrigerantes estudiados	88
Tabla 4.10 Nivel de espuma alcanzado y tiempo de ruptura para cada muestra	90
Tabla 4.11 Valores de masa obtenidos para diferentes láminas en la prueba de corrosión	91
Tabla 4.12 Variación de la masa (mg) para diferentes láminas en la prueba de corrosión	92
Tabla 4.13 Matriz de evaluación para la selección del producto	97
Tabla 4.14 Datos operación del motocompresor utilizando refrigerante D en el sistema de enfriamiento	100

INDICE FIGURA

Figura 1.1 Ubicación geográfica del Distrito Social San Tomé.....	17
Figura 2.1 Clasificación de los compresores.....	24
Figura 2.2 Tipos de enfriadores para motocompresores.....	26
Figura 2.3 Enfriador de aceite	27
Figura 2.4 Forma esquemática del nivel de costo y esfuerzo involucrado en la producción de los diferentes metales, equipos e instalaciones utilizadas[12].....	30
Figura 2.5 Esquema general de los tipos de corrosión.....	35
Figura 2.6 Corrosión por picadura en el metal debido a la presencia de iones cloruros	37
Figura 2.7 Corrosión por picadura de bomba expuesta a cavitación	37
Figura 2.8 Corrosión en las camisas del motor	37
Figura 2.9 Obstrucción de camisa por lodo [10]	42
Figura 2.10 Flujo en un intercambiador de calor de doble tubo [18]	48
Figura 2.11 Intercambiador de calor de tubos y coraza: un paso por la coraza y...	49
Figura 2.12 Patrón de flujo en intercambiadores de calor de flujo transversal [18]	50
Figura 2.13 Flujo de calor a través de una pared	51
Figura 3.1 Análisis de fallas más frecuentes atribuibles al líquido refrigerante.....	68
Figura 3.2 Muestras de refrigerantes a analizar	69
Figura 3.3 Medidor de pH digital	70
Figura 3.4 Titulador automático.....	71
Figura 3.5 Preparación de agua corrosiva.....	73
Figura 3.6 Arreglo de los cupones de corrosión	73
Figura 3.7 Muestras con los cupones de corrosión	74
Figura 3.8 Inicio de la prueba de corrosividad	74
Figura 4.1 Curva de calibración de % v/v de m-etilenglicol vs gravedad específica	84

Figura 4.2 Punto de congelación para soluciones acuosas de m-etilenglicol	86
Figura 4.3 Capacidad calorífica vs % v/v de m-etilenglicol	88
Figura 4.4 Aspecto de los refrigerantes al final de la prueba de corrosividad	94
Figura 4.5 Aspecto de las láminas de cobre al final de la prueba de corrosividad ..	94
Figura 4.6 Aspecto de las láminas de bronce al final de la prueba de corrosividad	95
Figura 4.7 Aspecto de las láminas de soldadura al final de la prueba de corrosividad.....	95
Figura 4.8 Aspecto de las láminas de aluminio al final de la prueba de corrosividad	96
Figura 4.9 Aspecto de las láminas de hierro al final de la prueba de corrosividad .	96
Figura 4.10 Aspecto de las láminas de acero al final de la prueba de corrosividad	97

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Reseña histórica de pdvsa

El 1º de enero de 1976 nació Petróleos de Venezuela S.A., como la empresa encargada de asumir las funciones de planificación, coordinación y supervisión de la industria petrolera nacional, al concluir el proceso de reversión de las concesiones de hidrocarburos a las compañías extranjeras que operaban en el territorio venezolano. El nacimiento de la principal industria del país quedó plasmado en el decreto presidencial número 1.123, del 30 de agosto de 1975. Su primer presidente fue el General Rafael Alfonso Ravard.

En 1976 inició acciones el Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo (Intevep), destinado a efectuar los estudios e investigaciones necesarias para garantizar el alto nivel de los productos y procesos dentro de la industria petrolera. Igualmente, dos años después se creó Petroquímica de Venezuela S.A. (Pequiven), dirigida a organizar el negocio de la producción petroquímica.

A mediados de los años 80, la principal empresa del país inició una expansión tanto en el ámbito nacional como mundial, con la compra y participación en diversas refinerías ubicadas en Europa, Estados Unidos y el Caribe. En este sentido, estableció operaciones en la refinería de la Ruhr Oel, en Alemania; Nynas en Suecia y Bélgica; e Isla en Curazao. El 15 de septiembre de 1986, Petróleos de Venezuela adquirió a la empresa Citgo ubicada en la ciudad de Tulsa, Estados Unidos, punta de lanza de la estrategia de comercialización de hidrocarburos en Norteamérica, con más de mil estaciones de servicio y casi 20% de las ventas de gasolina en suelo estadounidense.

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. Adicionalmente, lleva adelante actividades en materia de exploración y producción para el desarrollo de petróleo y gas, Bitumen y crudo pesado de la Faja del Orinoco, producción y manufacturación de Orimulsión. Ocupa una destacada posición entre los refinadores mundiales, y su red de manufactura y mercadeo abarca Venezuela, el Caribe, Estados Unidos y Europa. Además, realiza actividades en las áreas de investigación y desarrollo tecnológico, educación y adiestramiento en sectores vinculados con la industria energética.

1.2 Gerencia de plantas sur

La Superintendencia de Plantas Sur de PDVSA se encarga del manejo de gas, agua y vapor del Distrito Social San Tomé. Entre sus responsabilidades se tiene el programar, ejecutar y coordinar el mantenimiento operacional y el mantenimiento mayor de las plantas compresoras, gasoductos, plantas de inyección de agua y generadores de vapor del Distrito. También planifica el crecimiento de las instalaciones en el área de recolección y compresión de gas, la disposición de agua para recuperación secundaria e inyección de vapor. Además, se optimizan los procesos y la operación de la infraestructura de gas. Se establece la logística de manejo de gas, agua y vapor en los sistemas de inyección, la transmisión y recolección del Distrito para la operación en forma eficiente y segura en todas las instalaciones. Otra de sus responsabilidades es supervisar y coordinar la operación y mantenimiento de instalaciones y equipos contratados, que participan en el suministro de gas a los sistemas de levantamiento artificial de crudo o inyección para recuperación secundaria.

1.3 Distrito social san tomé

El Distrito Social San Tomé está ubicado geográficamente en el municipio Freites, en la región Centro Sur del estado Anzoátegui, comprendiendo parte de la región Centro Oeste del estado Monagas y parte de la región Sur del estado Guárico. Posee un área total de 17.085 km², 135 km en dirección Norte-Sur y 180 km en dirección Este-Oeste (ver figura 1.1).

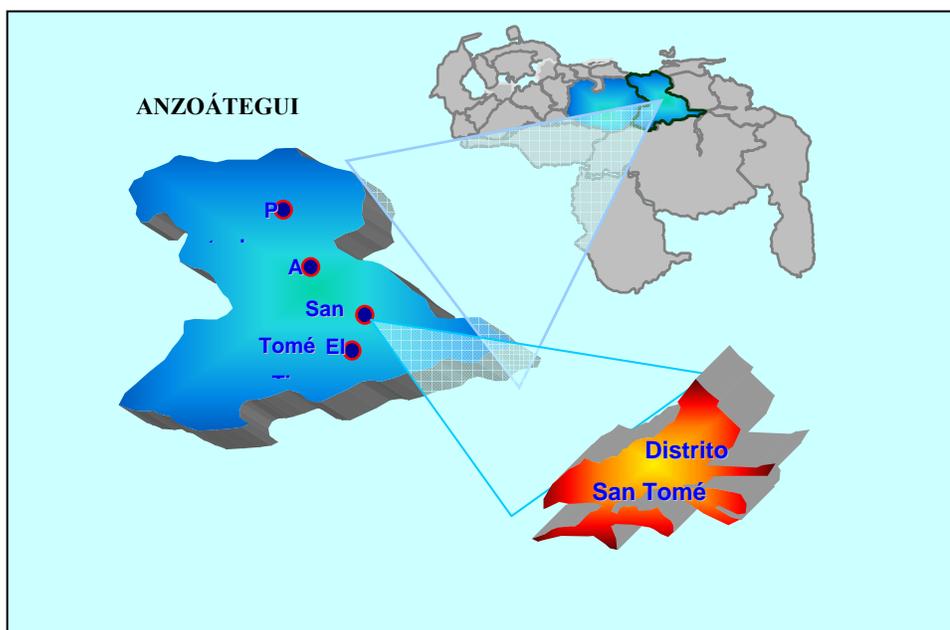


Figura 1.1 Ubicación geográfica del Distrito Social San Tomé

Los 17.085 km² que ocupa están divididos en: 8.585 km² que comprenden las áreas tradicionales (crudo liviano-mediano), y 8.500 km² en las áreas no tradicionales, ubicados en la Faja del Orinoco específicamente en la región de Hamaca del estado Anzoátegui y Machete del estado Guárico (crudo pesado-extrapesado).

1.4 Planteamiento del problema

En el Distrito Social San Tomé se encuentra la Gerencia de Plantas Sur, la cual cuenta entre sus Departamentos de Operación: Área I y Área II, Centro de Operaciones Morichal, Inyección de Vapor, Mantenimiento Operacional y para el seguimiento administrativo 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 (crudo); 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.

El gas manejado por esta Gerencia proveniente de los separadores de gas-crudo es comprimido, elevando la presión del mismo desde una presión baja hasta una presión superior, para luego ser reinyectado a los yacimientos de petróleo. El proceso de compresión se realiza con unidades integradas de motor y compresor, las cuales para su funcionamiento utilizan como combustible el gas natural (GNC), que es el mismo gas a comprimir.

Durante la combustión se produce calor, el cual es combinado con el generado por la fricción de las piezas en movimiento dentro del motor. De todo este calor generado sólo, aproximadamente un 30% es aprovechado para la potencia del motor, mientras que 7% normalmente es disipado al ambiente, 33% pasa directo al escape, y el 30% restante tiene que ser eliminado por el aceite y el sistema de enfriamiento.

El aceite circula por el motor, absorbiendo parte del calor generado por la combustión y la fricción; mientras que el líquido refrigerante absorbe calor de las camisas del motor, de la cámara y del aceite. El aceite tiene que ser capaz de absorber y disipar calor fácilmente. Para que el aceite pueda mantener sus propiedades por un tiempo prolongado, la temperatura de éste no debe exceder los 88°C.

Actualmente se está utilizando agua como líquido refrigerante, pero el agua presenta varios problemas a saber: hierve a 100°C a nivel del mar, causa corrosión y herrumbre, lo cual ocasiona, en muchos casos, taponamiento de tuberías.

Por otra parte, el agua utilizada proviene de pozos ubicados en las plantas; dicha agua no posee ningún tipo de tratamiento químico o inhibidores para evitar los problemas de corrosión u oxidación; tampoco es filtrada para disminuir el contenido de partículas sólidas que ocasionan la formación de incrustaciones en el interior de los tubos de los intercambiadores de calor agua-aceite, obstruyéndolos y disminuyendo la transferencia de calor como consecuencia de una menor superficie de contacto. Con frecuencia, estos sedimentos se depositan también en las camisas del motor que, cuando se acumulan, forman lodos que impiden la circulación del agua por las mismas, ocasionando elevadas temperaturas en las camisas debido a que el líquido no logra retirar parte del calor generado por la fricción del pistón.

A fin de mejorar las operaciones y reducir costos de operación en sus equipos, la Superintendencia de Plantas ha decidido sustituir el agua por otro líquido refrigerante, pero debido a la diversidad de refrigerantes presentes en el mercado se evaluarán cuatro (4) productos, suministrados cada uno de ellos, por empresas con las cuales el Departamento de Compra de Materiales (BARIVEN) sostiene convenios operativos.

Para la evaluación de los refrigerantes se aplicarán los procedimientos establecidos por las normas ASTM (American Society for Testing Materials) para refrigerantes utilizados en motores de combustión interna. Entre las pruebas más relevantes se encuentran: análisis de propiedades fisicoquímicas y corrosión a los metales (hierro, acero, aluminio, cobre, bronce y estaño) presentes en el líquido de enfriamiento de los motores.

Es imprescindible realizar esta evaluación a los refrigerantes, para que de esta manera se pueda seleccionar aquel que ofrezca una mayor protección a las altas temperaturas, y que a su vez proteja las partes metálicas contra la corrosión.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar los Refrigerantes para el Sistema de Enfriamiento de los Motocompresores ubicados en la Superintendencia de Plantas del Distrito San Tomé.

1.5.2 Objetivos específicos

1.- Conocer las condiciones de operación del sistema de enfriamiento de los motocompresores.

2.- Establecer matriz de evaluación para los refrigerantes utilizando las normas ASTM.

3.- Determinar las propiedades fisicoquímicas y la protección que ofrecen estos productos contra la corrosión aplicando las normas internacionales ASTM.

4.- Seleccionar el producto que cumpla con los requerimientos del sistema de enfriamiento de los motocompresores.

5.- Comprobar que el producto seleccionado cumple con las exigencias de estos equipos.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En el año 2002, O. López[1], realizó un estudio basado en el diseño de un sistema de enfriamiento para los motocompresores White Superior. Este diseño se propuso con el fin de minimizar el tiempo de parada de los motocompresores, y se planteó el dimensionamiento y selección de equipos para el funcionamiento del sistema de enfriamiento; mientras que Á. Luna[2], en el año 2003, trabajó rediseñando el sistema de enfriamiento de aceite de un motocompresor White Superior. El estudio arrojó como resultado la instalación de un nuevo intercambiador de calor de tubo y coraza y el rediseño del sistema refrigerante del motocompresor, para mejorar su rendimiento y eficacia.

En el año 2004, T. España[3], realizó un estudio del sistema de enfriamiento del motocompresor recíprocante de gas K-6, de la planta compresora de gas Guara Este, San Tomé. En dicho trabajo se realizaron modificaciones a la configuración del sistema de enfriamiento y se seleccionó un refrigerante que, de acuerdo a la hoja de seguridad de varios productos, era el que cubría las necesidades del motocompresor.

La diferencia del trabajo realizado con respecto al que se está realizando, es que en aquel trabajo no se realizaron pruebas en laboratorio a los distintos refrigerantes para verificar que ciertamente el refrigerante seleccionado era el correcto.

2.2 Aspectos generales del proceso de compresión de gas natural

La *compresión* es el aumento de energía que se logra en un fluido gaseoso por medio de un trabajo que se efectúa sobre él. Los fluidos que más comúnmente se comprimen son: el aire, gas natural, componentes separados del gas natural y gases comerciales de propósitos industriales[4].

El *gas natural* se encuentra en la naturaleza de dos maneras: asociado al crudo o en yacimientos de gas. El gas natural asociado emerge a la superficie durante la producción de crudo. El gas debe ser separado y dirigido a las plantas compresoras de gas, en las cuales se debe incrementar la presión del mismo para ser reinyectado a los pozos que han perdido presión[5].

La *planta compresora de gas* es una instalación diseñada para aumentar la presión del gas natural recolectado, de un nivel de menor presión a un nivel de mayor presión con el objeto de producir petróleo a través de los sistemas de Levantamiento Artificial. Las plantas compresoras pertenecen al sistema básico de producción de la Industria Petrolera, el cual está constituido principalmente por yacimientos petroleros, pozos de producción e instalaciones de superficie (plantas compresoras, estaciones de producción y bombeo)[5].

Las plantas compresoras no están compuestas únicamente por las máquinas. El proceso de compresión requiere 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[6]:

- 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
- Válvulas de seguridad

2.3 Primera ley de la termodinámica

La Primera Ley de la Termodinámica establece que: “la energía no puede ser creada ni destruida, ésta sólo puede ser transformada de una forma a otra”. Esta Ley se refiere al concepto de energía interna, trabajo y calor. Dice que si sobre un sistema con una determinada energía interna, se realiza un trabajo mediante un proceso, la energía interna del sistema variará. A la diferencia de energía interna del sistema y a la cantidad de trabajo se le denomina **CALOR**. El calor es la energía transferida al sistema por medios no mecánicos. El calor es una interacción entre un sistema y sus alrededores, a través de aquellas porciones de los límites del sistema en que no hay transferencia de masa, y que ocurre como consecuencia de una diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores[7,8].

2.4 Equipos compresores de gas

Para el proceso de compresión del gas natural se utilizan compresores de gas, los cuales, son equipos que elevan la presión del gas desde una presión menor llamada presión de succión, hasta una presión mayor llamada presión de descarga.

Para realizar este proceso termodinámico de compresión, existen diferentes tipos de compresores, los cuales son clasificados según la figura 2.1[4]:

Los compresores más utilizados son los *compresores reciprocantes*; éstos son los más antiguos y conocidos entre los compresores de desplazamiento positivo. En este tipo de equipos, el elemento principal de compresión es un pistón que se mueve alternativamente dentro de un cilindro, lográndose así la disminución del volumen del gas a comprimir[4].

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*[4].

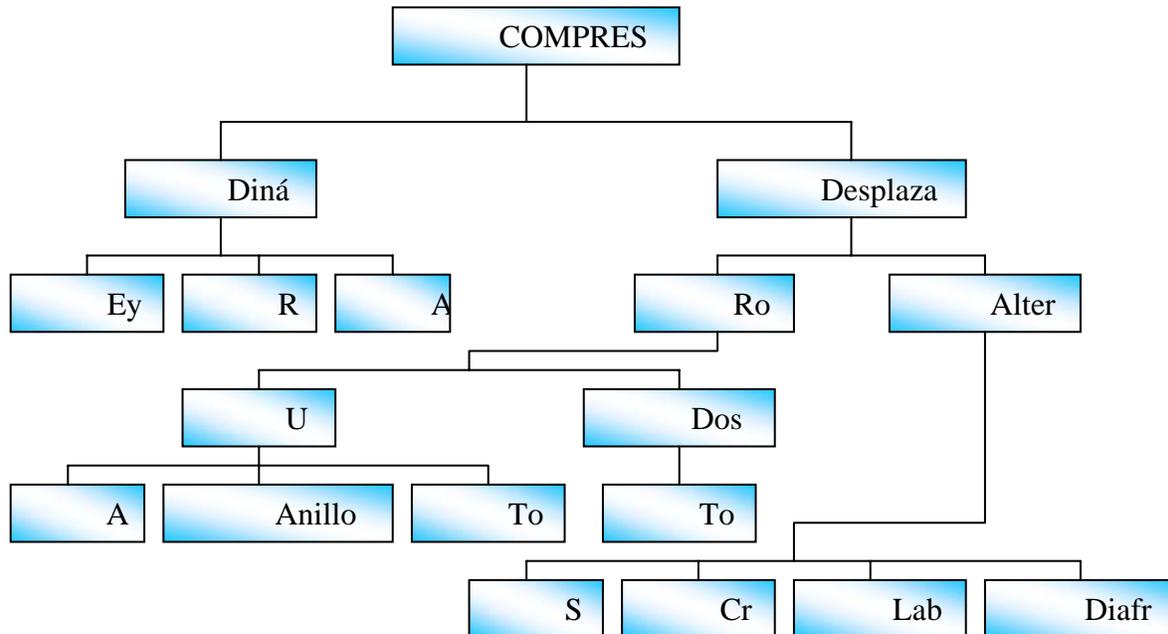


Figura 2.1 Clasificación de los compresores

2.4.1 Sistema de lubricación

Las funciones principales del sistema de lubricación son: reducir la fricción entre las partes en movimiento y enfriar las partes sometidas a intenso calor. El motor posee dos tipos de lubricación, una a presión y la otra por chapoteo; todos los cojinetes y bocinas son lubricados a presión; es el caso de los cojinetes principales, de los cojinetes de las bielas, de las bocinas del árbol de levas entre otros[4].

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 para el motor. Este sistema puede ser de refrigeración directa (por aire) y de refrigeración indirecta (por agua)[4].

- **Refrigeración directa**

En este sistema se expelle el calor, aumentando las superficies externas por medio de aletas de ventilación apropiadas.

- **Refrigeración indirecta**

Este método utiliza como refrigerante agua dulce que circula internamente por el motor y refrigera las paredes de las cámaras que rodean los cilindros y las culatas, luego el agua es enfriada en intercambiadores de calor.

2.4.2.1 Componentes del sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento de los motores estacionarios varía considerablemente a causa de las características de cada instalación, de los requerimientos de las plantas. Pero básicamente el sistema está integrado por los siguientes componentes[6]:

A) Bomba

Usa una bomba centrífuga cuyo eje está acoplado al cigüeñal del motor. Es la encargada de suministrar la energía necesaria al agua, para mantener el flujo de refrigerante a través de todo el sistema de refrigeración en valores apropiados, que permitirán mantener bajo control la temperatura del motocompresor.

B) Radiador

Para mantener la temperatura del fluido refrigerante en valores apropiados se utiliza un enfriador de aire horizontal, de tiro forzado y de flujos cruzados, tal y como se muestra en la figura 2.2-b), en donde el agua del sistema de refrigeración fluye por el interior de un haz de tubos aletados, mientras que el aire fluye por la superficie exterior de los tubos, con un patrón de flujo transversal. El flujo de aire es proporcionado por un ventilador, el cual es accionado por un motor eléctrico de velocidad constante. En la figura 2.1-a) se muestra otro radiador, el cual tiene el mismo funcionamiento, pero está ubicado verticalmente.



Figura 2.2 Tipos de enfriadores para motocompresores

- a) Enfriador de tipo horizontal
- b) Enfriador de tipo vertical

C) Enfriador de aceite

Para enfriar el aceite lubricante del motor se usa un enfriador de tubo y carcasa de flujos encontrados (cruzados). El aceite que se ha de enfriar pasa por el casco del enfriador de aceite y alrededor de la superficie exterior de los tubos. Por dentro de los tubos fluye el agua enfriadora. En la figura 3 se muestra el intercambiador utilizado en estos equipos.

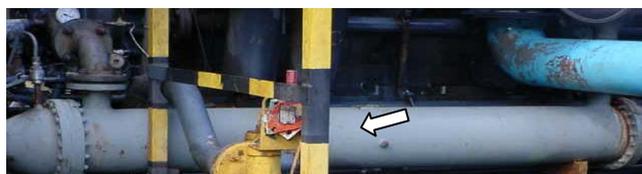


Figura 2.3 Enfriador de aceite

D) Termostato

Es un regulador de temperatura, que ayuda a mantener la temperatura del refrigerante y del motor durante la operación. Cuando el motor se encuentra por debajo de la temperatura normal de operación el termostato permite circular el refrigerante solo por el motor, y cuando está a la temperatura óptima se abre para permitir que el refrigerante circule hacia el radiador.

2.4.2.2 Funcionamiento del sistema de enfriamiento

Para un correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento es necesario que las partes internas del motor y de todo el sistema de circulación estén llenas de aceite limpio y no corrosivo[4].

El sistema de lubricación de cada motor puede variar ligeramente aunque muchos principios son idénticos. El sistema de lubricación del motor White Superior 8G825, 12G825 y 16G825 es similar a los sistemas de lubricación de otros motores a gas. La bomba recibe aceite del sumidero del motor a través de un colador de succión y su conexión de admisión diseñados para prevenir la formación de un remolino que podría provocar una pérdida de energía y que suministra aceite al enfriador de aceite, de donde éste pasa a un filtro de tipo flujo total y que finalmente llega al distribuidor de aceite lubricante del motor[9].

El aceite después que circula por todas las partes a lubricar es extraído por una bomba la cual impulsa el aceite al enfriador de aceite, pasando luego por sistema de filtros que limpian el aceite entrando nuevamente al motor[4].

La temperatura del aceite a la salida del motor debe ser de 85°C-88°C y el incremento de temperatura del motor debe guardar relación con la carga. El motor posee un dispositivo de paro por alta temperatura, el cual se activa cuando la temperatura supera los 93°C[9].

▪ **Líquido enfriador**

Es el encargado de absorber el exceso de calor generado en el motocompresor y debe cumplir con lo siguiente:

- Enfriar eficientemente el motor y compresor.
- Proteger contra la congelación.
- Proteger contra la ebullición.
- Proteger contra la corrosión.

Si se utiliza agua en el sistema de enfriamiento 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.

El agua del sistema de enfriamiento, además de ser agua dulce y limpia, debe poseer las siguientes características[10]:

- No debe estar contaminada con materia orgánica (aceite, hojas, bacterias, hongos, entre otros).
- Tampoco debe estar contaminada con gases como oxígeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, los cuales aceleran la corrosión si no son venteados adecuadamente.
- Carbonato de calcio (CaCO_3), sulfato de calcio (CaSO_4) y silica (SiO_2), son depósitos no deseables en el agua del sistema de enfriamiento, pero que generalmente se encuentran presentes en el sistema. Como regla general 0,025 pulgadas (0,6 mm) de incrustaciones puede reducir en un 30% la transferencia de calor.
- Para evitar la formación de costras en el enfriador de agua, en el bloque del motor o en las tuberías, el agua debe contener una onza de polifosfato por cada 100 galones de agua.
- Debe contener por lo menos 200 g de cromato de sodio por cada galón de agua.
- No se debe permitir una cantidad de impurezas superior a 200 ppm.

Si se utiliza un refrigerante éste debe poseer las siguientes propiedades:

Tabla 2.1 Requerimientos físicos y químicos[11]:

<i>Propiedad</i>	<i>Valores Específicos</i>		<i>Método ASTM</i>
	<i>Concentrado</i>	<i>Diluido</i>	
PH, Concentrado		7,5 a 11	D 1287
Solución 50% v/v	7,5 a 11		
Alcalinidad de Reserva,	**	**	D 1121
mL	1,110 a	1,065 min	D 1122, D 5931
Densidad relativa a	1,145		
15,5°C			
(60/60°F)		108 (226)	D 1120
Punto de ebullición °C	163 (325)	min	
(°F)	min		
Concentrado	108 (226)		
Solución 50% v/v	min		

** Valor a convenir entre el fabricante y el consumidor.

Tabla 2.2 Requerimientos de actuación[11]:

<i>Prueba</i>	<i>Pérdida de Peso, max, mg/espécimen</i>	<i>Método ASTM</i>
Corrosión en envase de vidrio	5	D 1384
Cobre	10	
Estaño	30	
Latón	10	
Acero	10	
Hierro	30	
Aluminio	150 mL, max	D 1881
Espuma	tiempo 5 s, max	

2.5 Principales problemas del sistema de enfriamiento

2.5.1 Corrosión

Los metales se encuentran en la naturaleza bajo la forma de compuestos estables, como óxidos, sales, etc. Así, por ejemplo, el hierro permanece bajo la forma de óxido de hierro durante millones de años, porque ésta es su forma más estable de energía, la menos reactiva.

un metal elaborado posee un nivel de energía mucho mayor que el compuesto natural del cual proviene.

La corrosión de los metales también puede ser considerada como el proceso inverso de la metalurgia extractiva. Muchos metales existen en la naturaleza en estado combinado; por ejemplo, como óxidos, sulfatos, carbonatos o silicatos. En estos estados, las energías de los metales son más bajas. En el estado metálico las energías de los metales son más altas, y por eso, hay una tendencia espontánea de los metales a reaccionar químicamente para formar compuestos[13]. Esta tendencia de un metal de regresar a su estado natural es lo que se conoce como el fenómeno de **Corrosión**.

La corrosión es un ataque destructivo de los metales, que puede ser de naturaleza química o electroquímica. La *corrosión química* ocurre en ambientes no-electrolíticos, los cuales son en la mayoría de los casos, gases secos. Este tipo de corrosión obedece a las leyes de la cinética de las reacciones químicas heterogéneas y sólo se verifica en condiciones extraordinarias que comprenden medios ambientales altamente corrosivos, o una elevada temperatura, o ambas cosas. Sin embargo, la *corrosión electroquímica* ocurre en medios electrolíticos; es decir, donde haya la presencia de especies químicas cargadas, iones, y hay transferencias de electrones; por ejemplo: la corrosión del acero en presencia del agua. Ella contempla la mayoría de los fenómenos que comprenden la corrosión de metales que contienen agua o están sumergidos en ella, o su corrosión en la atmósfera por películas de humedad[14].

En un sistema de enfriamiento, los metales procesados más comunes son: hierro, cobre y zinc. El hierro en su estado natural forma diferentes compuestos oxidados, tales como: Fe_2O_3 , FeO , Fe_3O_4 y otros, pero cuando son procesados pierden el oxígeno y quedan como hierro puro, Fe^0 . Cuando este metal, en un sistema, está expuesto al contacto con el oxígeno presente en el agua, se convierte a su forma natural u oxidada. Cuando no es controlado en un sistema de enfriamiento, este proceso de corrosión causa dos problemas muy específicos: el primero, falla de equipos, lo que causa costos de reparación y reemplazo, además de costos por paradas de planta y pérdidas de producción; el segundo es la disminución progresiva de la eficiencia del sistema, debido a pérdidas en la transferencia de calor por ensuciamiento con los productos de corrosión[15].

La corrosión es un proceso electroquímico en donde la oxidación del metal ocurre en el ánodo y la reducción del oxígeno ocurre en el cátodo. Estas dos reacciones se realizan en una celda de corrosión en medio acuoso, a los valores de pH normalmente encontrados en sistemas de enfriamiento. Como todo proceso electroquímico, se produce una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, con un flujo de corriente del ánodo al cátodo a través de la solución, y un flujo de electrones a través del metal.

A) Mecanismo del fenómeno de corrosión

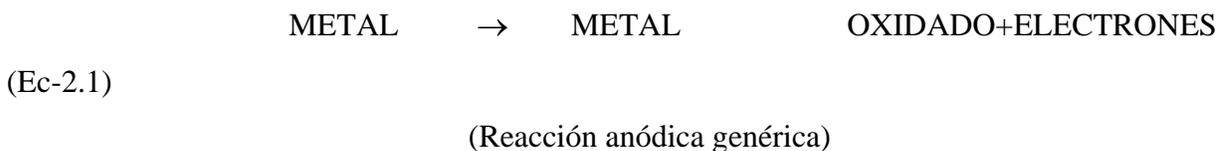
El mecanismo de corrosión electroquímica se evidencia en dos partes: 1) la *reacción anódica*, durante la cual se disuelve el metal en el electrolito en forma de iones cargados positivamente, y 2) la *reacción catódica*, en la que los iones cargados positivamente cubren con una capa de hidrógeno atómico la superficie catódica. Los electrones liberados por la reacción anódica circulan por el circuito metálico hasta el cátodo, donde neutralizan un número exactamente equivalente de iones de hidrógeno.

Siempre que se produce la corrosión de un metal o aleación metálica, sumergido en un medio húmedo (suelo, agua, medio industrial, etc.), es posible identificar los fenómenos electrolíticos que dan lugar a la corrosión. Estos fenómenos son:

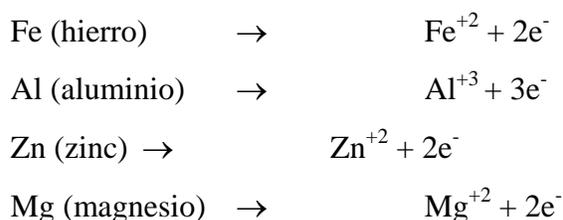
- *Ánodo o zona anódica*: es el sitio donde se produce la salida de una corriente eléctrica desde el metal hacia el medio; ésta es la zona donde el metal sufre la corrosión.
- *Cátodo o zona catódica*: es el sitio al cual llega la corriente proveniente del medio.
- *Medio corrosivo*: es el ambiente que ataca al metal; en un sistema de enfriamiento el medio corrosivo es el agua.
- *Conductor eléctrico*: la corriente que sale de la zona anódica y circula por el medio corrosivo para penetrar en la estructura por la zona catódica, debe cerrar el circuito, en los sistemas de enfriamiento la tubería sirve de conductor eléctrico.

Las reacciones involucradas en el fenómeno de corrosión, son:

- *Reacciones anódicas*: en la zona anódica, el metal se oxida mediante la reacción siguiente:



Ejemplos más comunes:



Estos electrones que quedan libres o disponibles de la reacción, se trasladan hasta la zona catódica, en la cual son consumidas en otras reacciones, denominadas *reacciones catódicas* que ocurren de manera simultánea a las reacciones anódicas.

- *Reacciones catódicas*: las reacciones catódicas más comunes son:

Reacción del oxígeno:



Reacción del hidrógeno:



La reacción del oxígeno tiene lugar cuando en el medio húmedo hay oxígeno disuelto; esa combinación de agua y oxígeno reacciona con los electrones que quedaron disponibles de la reacción anódica o reacción de corrosión, para dar como resultado la formación de iones oxidrilo.

La reacción del hidrógeno también consume electrones provenientes de la reacción anódica o de corrosión, pero en este caso el resultado es la formación de burbujas de hidrógeno gaseoso. La presencia de iones hidrógeno en un medio húmedo es común en los medios ácidos.

Es importante señalar que si no existiese reacción catódica capaz de consumir los electrones que se generan en la reacción de corrosión, el fenómeno se detendría porque de acuerdo a las leyes básicas de la electricidad, no se puede acumular electrones. Por ello, algunos métodos de protección contra la corrosión se basan en neutralizar las posibles reacciones catódicas que complementan la reacción de corrosión, consumiendo los electrones que en ella se liberan.

Existe un fenómeno que reduce la corrosión, se conoce como *polarización*. En el ánodo, ocurre la polarización cuando los productos de corrosión forman una capa adherente que inhibe el avance de la corrosión, y en el cátodo sucede cuando los iones hidróxido (OH^-), hidrógeno gaseoso o productos de la reacción, forman una barrera en la superficie catódica que inhibe la difusión del oxígeno y el hidrógeno sobre ésta. La polarización produce una disminución en la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, bajando la velocidad de corrosión.

La *despolarización* ocurre por destrucción de la película anódica, con lo cual se inicia nuevamente el proceso de corrosión. La despolarización se produce cuando baja el pH del agua. En este momento los iones hidrógeno reaccionan con los iones hidróxido del cátodo, destruyendo la barrera protectora. Otra forma de producir la despolarización es a través de una alta velocidad del agua, que produce una remoción de los iones OH^- y H_2 en el cátodo y los productos de reacción en el ánodo.

B) Tipos de corrosión

Existen dos tipos de corrosión: general y localizada. De éstas, la más peligrosa y dañina es la segunda. En la figura 2.5 se observa la forma que adquieren sobre la superficie metálica ambos tipos de corrosión[15].

- **Corrosión general o uniforme:** la corrosión uniforme puede ser descrita como una reacción de corrosión que ocurre por igual en toda la superficie del material, causando una pérdida general del metal.
- **Corrosión localizada:** hay varias formas de corrosión localizada: picadura, lixiviación selectiva, corrosión galvánica, corrosión por fisura y corrosión por tensión[15]. La picadura es la corrosión localizada más perjudicial en un sistema de enfriamiento.

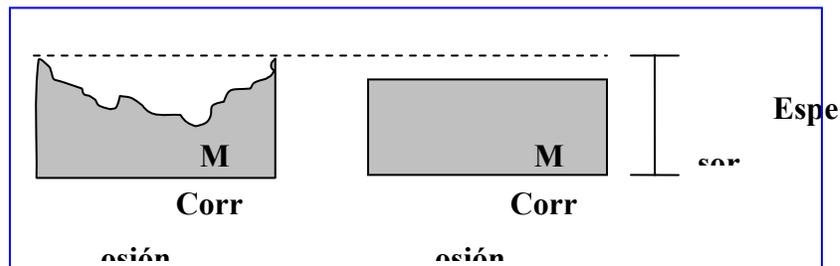


Figura 2.5 Esquema general de los tipos de corrosión

- **Picadura:** es una de las formas más destructivas de corrosión. Es promovida por baja velocidad del agua, puntos inactivos y por la presencia de iones cloruro. La corrosión por picadura es una forma de ataque localizado que resulta en agujeros que penetran rápidamente el metal expuesto. La mayoría de las fallas por picaduras ocurren en soluciones que contienen iones cloruro o iones cloro[12]. Todas las soluciones que contienen iones cloruro (Cl⁻) son peligrosas, debido a su alta tendencia a la picadura. El incremento de la velocidad de corrosión en la picadura produce un exceso de iones metálicos cargados positivamente, los cuales atraen los iones cloruro. Si hay hidrólisis en la picadura, se produce un aumento de iones hidrógeno que genera una baja en el pH, ocasionando una mayor velocidad de corrosión.

Este tipo de corrosión se caracteriza por producir agujeros de pequeño diámetro y cierta profundidad en el material metálico. Este tipo de ataque causa el fallo de tuberías y equipos por perforación con pérdidas metálicas relativamente pequeñas. A menudo es difícil descubrir las picaduras, debido a su pequeño diámetro y a que generalmente están cubiertas de productos de corrosión. Las picaduras, lo mismo pueden aparecer aisladas o tan juntas que la superficie metálica puede parecer rugosa.

Las picaduras pueden presentarse a consecuencia de:

- Los depósitos de capas de corrosión que dificultan el acceso de oxígeno a algunas partes del material metálico, en relación con el resto, lo cual provoca celdas de concentración que ocasionan ataques localizados en pequeñas zonas y que en su parte más profunda perforan el material. Esta es la causa común de las picaduras en el hierro o acero al carbono no pasivado.
- Los materiales que presentan frecuentemente este tipo de ataque, son los materiales pasivos y la causa más característica es la ruptura de la capa pasiva de estos materiales, como consecuencia de la presencia de aniones de los halógenos: Cl^- , Br^- , I^- y algunos otros aniones como: ClO^- y ClO_4^- .

Las picaduras también requieren un período de inducción o iniciación antes de que se hagan visibles, que depende de la concentración de iones cloruros, la temperatura y la presencia de sustancias acelerantes. Una vez iniciado el ataque de las picaduras, éstas proliferan y crecen en profundidad rápidamente.

La picadura aparece en un punto de la superficie metálica en la que la pasividad ha desaparecido. Posiblemente el primero paso es la adsorción de iones cloruro en la superficie pasiva, en sitios donde la capa pasiva presentó irregularidades en su estructura superficial (centros activos); luego, los iones cloruro penetran la capa pasiva en estos sitios, destruyéndola. Una vez que se produce el camino libre al medio oxidante, tiene lugar la corrosión en este sitio y la perforación aumenta en profundidad, ya que más iones cloruro llegan para neutralizar los cationes del metal. Entonces se forma un par galvánico, en el que el comienzo de la picadura constituye el ánodo, y los alrededores de la picadura, que todavía están pasivos, constituyen zonas catódicas (ver figura 2.6).

En medios neutros y moderadamente básicos, el hierro y los aceros al carbono no se pasivan espontáneamente, la corrosión es por oxígeno con formación de óxidos de hierro (Fe_2O_3 y Fe_3O_4), que permiten la formación de celdas de concentración entre zonas con más o menos productos de corrosión, pudiendo producirse picaduras debajo de las capas más gruesas[16]. En la figura 2.7 se observa este tipo de corrosión en una bomba de agua, originado por la exposición de la misma a cavitación.

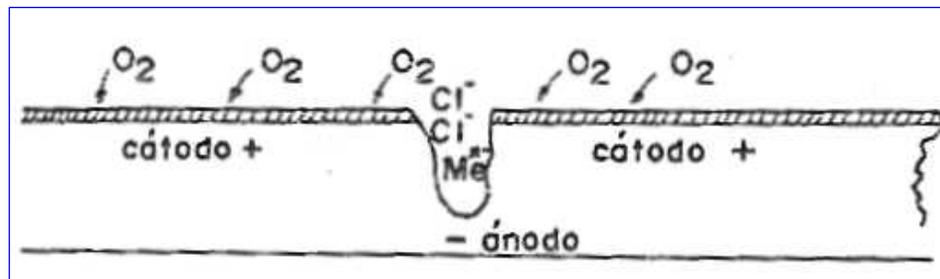


Figura 2.6 Corrosión por picadura en el metal debido a la presencia de iones cloruros



Figura 2.7 Corrosión por picadura de bomba expuesta a cavitación

La *Corrosión por fisura* se trata de una corrosión localizada que ocurre dentro de una fisura u otra área. La solución dentro de la fisura tiende a ser más concentrada y ácida. En la figura 2.8 se observa este tipo de corrosión.



Figura 2.8 Corrosión en las camisas del motor

C) Resistencia a la corrosión de varios metales

Bajo condiciones similares, el **hierro** y el **acero** se corroen prácticamente con la misma rapidez, pero la distribución de la corrosión puede ser diferente en los dos. La escoria esparcida en el hierro dulce puede dar por resultado, bajo la corrosión atmosférica, un ataque distribuido de una manera general, más bien que un ataque fuertemente localizado (picadura).

Las condiciones externas sobrepasan el efecto de la composición del metal, al determinar las velocidades de corrosión. El oxígeno determina el comienzo de la corrosión del hierro y el acero bajo condiciones ordinarias; no sólo actúa como despolarizador, sino que además se une con el hierro ferroso en los ánodos de corrosión[14]. En la ausencia general de oxígeno, la corrosión desciende a una rapidez despreciable, mientras que en la ausencia local de oxígeno se puede establecer una célula diferencial de oxígeno que sirve para acelerar la corrosión en la porción pobre de oxígeno.

La **herrumbe** o formación de hematita (Fe_2O_3), puede acelerar la corrosión y causar picaduras. La explicación probable es, que las acumulaciones superficiales de herrumbe protegen al metal que recubren, del acceso libre de oxígeno, volviéndolas así, anódicas (corroibles) a esas porciones, con respecto a las zonas no cubiertas, las cuales tienen más libre acceso de oxígeno (zona catódica).

Las aleaciones de hierro comercialmente puro, con cobalto, níquel o cobre en pequeñas cantidades, entre 0,25 a 0,30%, son resistentes a la corrosión atmosférica porque forman revestimientos protectores contra la herrumbe.

D) Efectos del pH sobre la corrosión

Variaciones en el pH afectan notablemente la velocidad de corrosión de los materiales metálicos. En el rango de pH entre 4 y 10, la velocidad de corrosión es independiente del pH, y permanece constante. En este rango, la velocidad de corrosión dependerá de la velocidad de difusión del oxígeno llegando al metal; mientras que en el rango ácido (pH's menores de 4), la velocidad de corrosión no es determinada por la difusión de oxígeno, sino por la evolución del

hidrógeno, y esta evolución sí depende de la composición del acero y/o de su tratamiento térmico. Si el acero posee inclusiones, partículas de otras fases, sulfuros, etc., que poseen una baja sobre tensión de hidrógeno, al ponerse ese acero en un ambiente de pH 4 o menor, ocurrirá mayor evolución del hidrógeno, y por ende, mayor corrosión, al compararse con un acero similar pero sin esas inclusiones.

A pHs mayores de 10, la alcalinidad del ambiente aumenta, lo cual conduce a un aumento del pH en la superficie del metal; la velocidad de corrosión disminuye, ya que el hierro se pasiva en presencia de álcalis y oxígeno disuelto.

Es importante resaltar que la mayoría de las aguas naturales caen en el rango de pH entre 4 y 10, donde la velocidad de corrosión es independiente del pH. Lo que determina la velocidad de corrosión del hierro o del acero al carbono en este rango, es lo siguiente:

- La concentración del oxígeno (dependiente de la temperatura y de la concentración de sales en el agua).
- La temperatura del agua y/o suelo.
- La velocidad del agua.
- La presencia de cloruros.
- Presencia de microaleantes en el metal.

Lo anterior significa que al escoger un acero de alto o bajo carbono, o una fundición, o hierro dulce y un acero aleado (sin considerar los aceros inoxidable) para servicio en agua fresca, dulce o en agua de mar, la velocidad de corrosión sería esencialmente la misma[16].

E) Efecto de la temperatura sobre la corrosión

Si el medio está exento de aire, la corrosión será determinada por la evolución del hidrógeno, y se ha observado que la velocidad de corrosión aumenta casi el doble por cada 30°C de aumento en la temperatura. Si el medio tiene aire, la difusión del oxígeno es el factor que controla la corrosión. El aumento de la temperatura disminuye el sobrevoltaje de ionización del oxígeno y acelera la difusión de éste hacia la superficie del material metálico, pero disminuye la solubilidad del oxígeno.

La curva de corrosión de un sistema cerrado, es prácticamente una línea recta. Al aumentar la temperatura, la velocidad de reacción química entre el metal y el oxígeno aumenta, por lo tanto, ocurre un aumento de la velocidad de corrosión respectiva. Ésta continúa hasta que el oxígeno se consume. La curva que representa un sistema abierto, indica que inicialmente habrá un aumento de la corrosión, debido a que toda reacción química se incrementa con la temperatura; sin embargo, ocurre una disminución posterior de la corrosión por encima de los 70°C a 80°C, debido a una notable reducción en la solubilidad del oxígeno con la temperatura[16].

2.5.2 Ensuciamiento y formación de escamas dentro de los intercambiadores de calor

El ensuciamiento se define como la precipitación de materiales que no forman incrustaciones, es decir, son depósitos originados por material suspendido en el agua, que se diferencian de las incrustaciones, porque estos últimos, se forman a partir de material disuelto o que está en solución[15]. Un depósito por ensuciamiento puede formarse de:

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

El ensuciamiento tiene aspectos negativos sobre la eficiencia de un sistema de enfriamiento, debido a que influye sobre los aspectos siguientes:

- Permite la corrosión e inhibe la formación de la película inhibidora.
- Absorbe los productos químicos del tratamiento: inhibidores de corrosión e incrustaciones.
- Reduce la transferencia de calor.

El ensuciamiento descontrolado en un sistema de enfriamiento causa severos problemas de corrosión, incrustaciones y crecimiento microbiológico que a su vez, originan una baja eficiencia del sistema, altos costos de mantenimiento y pérdidas de producción por paradas no programadas[15].

El ensuciamiento es el resultado directo de temperaturas extremas en la superficie de transmisión de calor, y pueden reducirse disminuyendo la diferencia de temperaturas entre la superficie de intercambio de calor y la corriente de fluido. El sentido común indica que debe aumentarse la velocidad, lo que se traduce en un aumento del coeficiente local de transmisión de calor, llevando la superficie de transmisión de calor a una temperatura más próxima a la del fluido; sin embargo, sólo es posible aumentar el coeficiente local de transmisión de calor al aumentar la velocidad.

El ensuciamiento se refiere a cualquier cambio en la pared sólida que separa dos fluidos, a través de los cuales se lleva a cabo la transmisión de calor, ya sea por acumulación de suciedad o por otras causas, cuyo resultado sea una disminución en la velocidad de transmisión de calor a través de la citada pared sólida. El ensuciamiento puede clasificarse también según el mecanismo por el que se lleve a cabo:

- ***Ensuciamiento por corrosión:*** la superficie sólida de la transmisión de calor reacciona químicamente con elementos de la corriente fluida, originando una capa de corrosión menos conductora, sobre toda o parte de la superficie sólida de intercambio.
- ***Ensuciamiento por partículas:*** las partículas que se mantienen en suspensión en el seno de la corriente fluida se depositan en la superficie sólida externa de transmisión de calor, en zonas de baja velocidad. En el caso de presentarse este ensuciamiento por partículas, uno de los tipos más frecuentes, se hace frente al problema asegurando una velocidad de flujo suficientemente alta, y minimizando las áreas de baja velocidad y flujo estancado, para ayudar a mantener las partículas en suspensión. Para el agua, la mínima velocidad recomendada en el lado del tubo es de 0,9 a 1,0 m/s.

2.5.3 Incrustaciones

El agua tiene una serie de compuestos disueltos que son denominados sólidos disueltos, los cuales permanecen solubles en el agua bajo una determinadas condiciones, tales como: pH, temperatura, concentración, etc. Mientras estos sólidos permanecen disueltos no existe posibilidad de que se formen incrustaciones. El problema está en que en un sistema de

enfriamiento, las condiciones son tan dinámicas que la probabilidad para formarse las incrustaciones es bastante alta[15].

En los intercambiadores de un sistema de enfriamiento pueden formarse incrustaciones o lodo, por lo tanto, es importante diferenciarlos:

- ***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 diferentes cristales.
- ***Lodo:*** es la precipitación de minerales o compuestos orgánicos, que están débilmente adheridos a la superficie metálica y a otras partículas. En la figura 2.9 se puede observar la camisa de un cilindro taponeada por lodo.



Figura 2.9 Obstrucción de camisa por lodo [10]

A) Factores que afectan la formación de incrustaciones

- **pH:** la mayoría de las sales presentes en el agua disminuyen su solubilidad cuando el pH aumenta, por lo tanto, incrementan su potencial incrustante. 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 una especie incrustante disuelta en agua, excede su punto de saturación, se producen incrustaciones. Mientras mayor sea el contenido de sólidos, mayor será la posibilidad de formación de incrustaciones.
- **Sólidos suspendidos:** un mayor contenido de sólidos suspendidos (sólidos naturales, productos de corrosión, actividad microbológica, etc.), favorece la formación de incrustaciones.
- **Factores dinámicos:** las velocidades de flujo menores a 2 ft/s (0,6 m/s) ocasionan un flujo laminar en los tubos de los intercambiadores, creando condiciones favorables para la formación de incrustaciones. Otro factor dinámico que afecta la formación de incrustaciones, es el cambio en las velocidades de flujo, tal es el caso de un codo.

2.6 INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Son sustancias que cuando son agregadas a un metal, disminuyen la velocidad de ataque del medio sobre el metal. Los inhibidores son generalmente agregados en pequeñas cantidades y en forma continua para mantener la concentración requerida y, de esta forma, lograr su efecto inhibidor[15].

2.6.1 Tipos de inhibidores

Existen tres tipos de inhibidores de corrosión para agua de enfriamiento: anódicos, catódicos y orgánicos.

A) Inhibidores anódicos: Éstos funcionan deteniendo la reacción de oxidación en el ánodo, y rompiendo el circuito electroquímico. Con el uso de inhibidores anódicos debe tenerse siempre el cuidado de mantener el suficiente residual en el sistema, para prevenir el ataque por picadura, debido a que, si no hay suficiente residual para cubrir todos los sitios anódicos, éstos continuarán el proceso de corrosión a gran velocidad frente a una gran área catódica,

produciéndose rápidamente la picadura. Estos inhibidores se clasifican en precipitantes y oxidantes, dependiendo de la manera como formen la película.

- *Precipitantes*: reaccionan con los productos de corrosión para producir una sal o un complejo insoluble que precipita y forma una película sobre los sitios anódicos. El silicato es uno de los inhibidores más usados y reacciona con los productos de corrosión para formar un gel que se deposita sobre los sitios anódicos, produce una película muy resistente y con una menor sensibilidad al pH que otros inhibidores.
- *Oxidantes*: oxidan rápidamente la superficie metálica para formar una película muy adherente con los productos de corrosión.

B) Inhibidores catódicos: Los más comerciales son bases de aminas, conteniendo compuestos nitrogenados, en este estado, el nitrógeno tiene una poderosa carga positiva y puede ser atraído por varias superficies. Cuando los metales se corroen, los electrones negativos se descomponen fácilmente en el cátodo debido a la atracción de cargas opuestas; cuando un inhibidor catódico entra en las proximidades del cátodo, es atraído con relativa facilidad y forma una película sobre el metal, protegiéndolo de la corrosión.

C) Inhibidores orgánicos: para algunos sistemas de enfriamiento cerrado, se emplean aceites solubles o emulsionados en agua. Estos forman una película protectora sobre el metal, minimizando el proceso de corrosión.

2.6.2 Mecanismo de acción de los inhibidores

Existen tres formas en que actúan los inhibidores, éstas son:

A) 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 estos productos mediante el efecto umbral, es que el inhibidor se adsorbe sobre los puntos de crecimiento del cristal incrustante, alterando de este modo su modelo de crecimiento, de manera tal que los cristales se forman lentamente y totalmente distorsionados.

B) Secuestrantes: actúan formando un complejo estable y soluble en agua con el ión metálico. La relación de producto-ión metálico es un balance molecular 1:1.

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

2.7 Compuestos comunes en el agua

- **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. A altas temperaturas, el calcio, debido a su tendencia a precipitarse como CaCO_3 , puede representar un problema en los sistemas de enfriamiento.
- **Sílice:** la solubilidad de la sílice aumenta cuando la temperatura y el pH aumentan.
- **Óxido de hierro:** el hierro en forma ferrosa es totalmente soluble, el problema se presenta cuando en un medio saturado de oxígeno, como el agua de un sistema de enfriamiento recirculante abierto, el hierro se oxida, o cuando al sistema se le agrega un agente oxidante fuerte como el cloro, el hierro se oxida a 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.

2.7.1 Caracterización del agua

Respecto a la calidad del agua, se utilizan las siguientes propiedades para medirla:

- Turbiedad.
- Dureza (sales de Ca^{++} y Mg^{++} expresadas como CaCO_3).
- Alcalinidad (expresada como CaCO_3).
- pH.
- Sílice.
- Sólidos disueltos.
- Sólidos suspendidos.
- Sólidos totales (disueltos más suspendidos).

Para efectos de clasificar la calidad del agua por su dureza (como CaCO_3), o sólidos totales disueltos, se emplea la siguiente estructura.

Tabla 2.3 Clasificación del agua de acuerdo a su dureza y al contenido de sólidos disueltos

Dureza como CaCO_3	Parte por millón por peso
Suave	0 – 60
Moderadamente dura	61 – 120
Dura	121 – 180
Muy dura	Más de 180
Sólidos totales disueltos	Parte por millón por peso
Fresca	0 – 1.000
Salobre	1.000 – 10.000
Salada	10.000 – 100.000
Salmuera	Más de 100.000

En la mayoría de las aguas crudas, la dureza está presente como CaCO_3 y es el tipo de dureza llamada temporal, pues se elimina al llevar al agua hasta su punto de ebullición.

2.8 Índices de estabilidad

Uno de los principales problemas en un sistema de enfriamiento es la formación de incrustaciones de carbonato de calcio en las áreas de transferencia de calor y la tendencia corrosiva del agua utilizada como refrigerante. 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.

Los índices de estabilidad más comunes son el de Langelier y el de Ryznar, los cuales se calculan mediante las ecuaciones siguientes[15]:

$$\text{Índice de Langelier (IL)} = pH - pHs \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$\text{Índice de Ryznar (IR)} = 2pHs - pH \quad (\text{Ec. 2.5})$$

donde:

pH: pH del agua

pHs: pH de saturación

El pH de saturación se calcula por la siguiente ecuación:

$$PHs = A + B - \log[Ca^{+2}] - \log[M]$$

(Ec. 2.6)

donde:

A y B: constantes relacionadas con la temperatura y el contenido de sólidos disueltos, los cuales se muestran en el anexo B (tabla B.1).

[Ca⁺²]: concentración de dureza cálcica, como CaCO₃.

[M]: concentración de alcalinidad total, como CaCO₃.

Estos índices señalan solamente la tendencia del carbonato de calcio a depositarse si se trata de un agua corrosiva, medianamente corrosiva o no corrosiva. El anexo B.2 muestra los índices y sus respectivas tendencias.

Un agua suave, con índice de estabilidad negativo puede ser tratada con Ca(OH)₂ o con Na₂SO₃, o ambos, a fin de aumentar el índice, lo cual haría el agua menos corrosiva[16].

El valor del índice de estabilidad dependerá mucho de la temperatura. A mayor temperatura, el índice aumenta. Se debe buscar que el índice no aumente mucho en el rango de temperatura de trabajo, a fin de evitar la deposición excesiva de CaCO₃.

Hay limitaciones para el uso del índice:

- Si el agua natural contiene materia orgánica o sílice en forma coloidal, el CaCO₃ puede precipitar sobre las materias coloidales o sobre las materias orgánicas como algas, en lugar de la superficie del metal. Esto conducirá a corrosión, aunque el índice sea positivo.
- Si hay NaCl u otras sales de haluros, disueltas en el agua o a altas temperaturas, la película de CaCO₃ puede perder su carácter protector en ciertos puntos, lo cual conducirá a un grado avanzado de corrosión en dichos puntos con el resultado final de picadura.

- Si el agua contiene iones complejos en ella, como polifosfatos, que se añaden al agua tratada, el índice de estabilidad no se aplica como índice de corrosividad.
- El índice no indica la corrosividad, si los metales en contacto con el agua son pasivos, como: níquel, aluminio, etc., o en aceros inoxidable.

2.9 Intercambiadores de calor

En las industrias de proceso, la transferencia de calor entre dos fluidos casi siempre se lleva a cabo en intercambiadores de calor. El tipo más común es uno en el cual el fluido caliente y el frío no entran en contacto directo el uno con el otro, sino que están separados por una pared de tubos o una superficie plana o curva. La transferencia de calor se efectúa por convección desde el fluido caliente a la pared o la superficie de los tubos, a través de la pared de tubos o placa por conducción, y luego por convección al fluido frío.

2.9.1. Tipos de intercambiadores.

- *Intercambiadores de doble tubo:* Es el intercambiador más simple. Éste se muestra en la figura 2.10, donde uno de los fluidos fluye en el interior de una tubería y el otro lo hace en el espacio anular entre ambas tuberías. Los fluidos pueden circular en paralelo o a contracorriente. El intercambiador puede fabricarse con un simple par de tubos adaptando las conexiones en los extremos, o con varios pares interconectados en serie. Este tipo de intercambiador es útil principalmente para velocidades de flujos bajas.

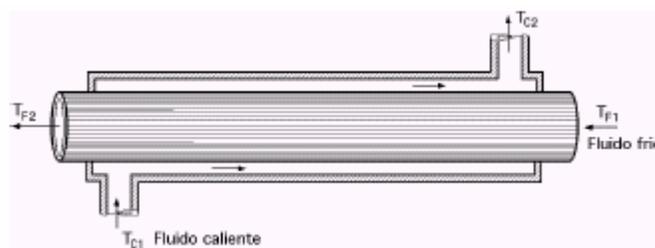


Figura 2.10 Flujo en un intercambiador de calor de doble tubo [18]

▪ *Intercambiadores de tubos y coraza.* Cuando se manejan flujos más grandes se usa un intercambiador de tubos y coraza, que es el tipo más importante en las industrias de proceso. Los flujos de estos intercambiadores son continuos. Se usan muchos tubos en paralelo con uno de los líquidos circulando en su interior. Los tubos, distribuidos en forma de manojo, están encerrados en una sola coraza y el otro fluido fluye por el exterior de los tubos, dentro de la coraza. En la figura 2.11 se muestra el modelo más simple de intercambiador de tubos y coraza que corresponde a un solo paso por los tubos y un solo paso por la coraza, es decir, se trata de un intercambiador 1-1 a contracorriente.

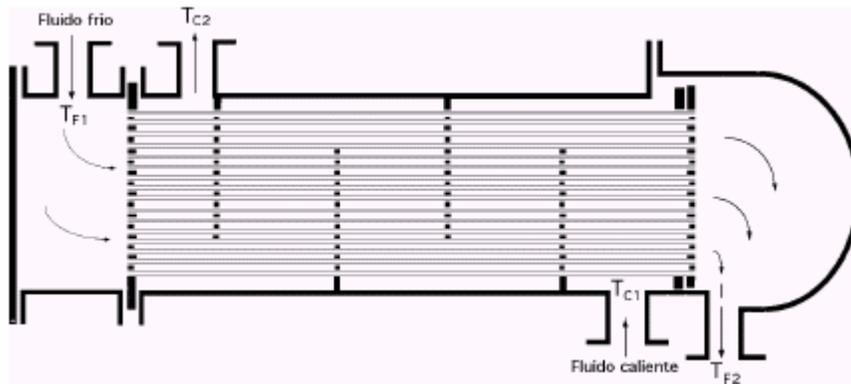


Figura 2.11 Intercambiador de calor de tubos y coraza: un paso por la coraza y un paso por los tubos (intercambiador 1-1) [18]

▪ *Intercambiadores de flujo cruzado.* De manera alternativa dos fluidos se pueden mover en flujo cruzado, es decir, perpendiculares entre sí. La configuración tiene una efectividad intermedia entre la de un intercambiador de circulación doble directa y la de circulación doble inversa. En muchos aparatos industriales por ejemplo radiadores de tubos de agua o de tubos de aceite para vehículos, los dos fluidos se intercambian calor mientras atraviesan el intercambiador en ángulo recto.

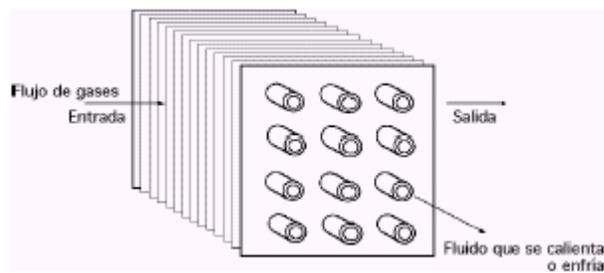


Figura 2.12 Patrón de flujo en intercambiadores de calor de flujo transversal [18]

2.10 Coeficientes convectivos de película

En muchos casos prácticos de transmisión de calor, éste se transmite de un fluido a otro a través de una pared que los separa, en donde la mayor parte del fluido no ofrece resistencia a la transmisión de calor, sino que una delgada película del fluido adyacente a la pared ofrece una resistencia considerable [14]. De acuerdo a ello, y observando la figura 2.13, el flujo de calor será:

$$q = h_i A_i (T_i - T_i') = h_o A_o (T_o' - T_o) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde los términos h_i y h_o son los **coeficientes convectivos de película** referidos a la superficie interna y externa, respectivamente; T_i y T_i' , representan las temperaturas internas del fluido cuando se forma la película, T_o y T_o' representan las temperaturas externas del fluido cuando se forma la película, mientras que A_i y A_o son las áreas internas y externas de la tubería.

Las propiedades físicas importantes que inciden sobre los coeficientes de película son: conductividad térmica, viscosidad, densidad y el calor específico. En el caso de flujo forzado de gases o de agua, el flujo es turbulento, por lo que el coeficiente de película puede aumentarse al elevar la velocidad del fluido. El coeficiente de película, para una velocidad y un fluido dados, depende de la dirección del flujo del fluido en relación con la superficie de calentamiento.

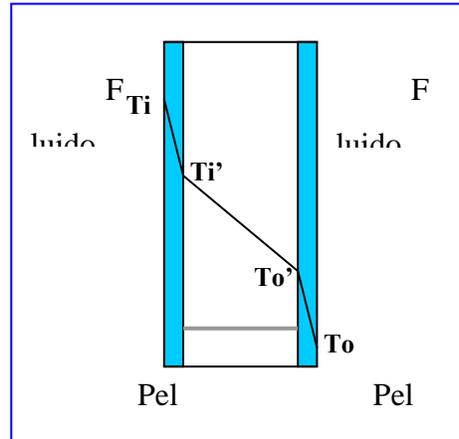


Figura 2.13 Flujo de calor a través de una pared

El coeficiente convectivo de película interno basado en el área interna del tubo, se calcula por la expresión:

$$hi = 0,0225 \left(\frac{k_h}{D_i} \right) Pr^{0,495} Re^{0,795} e^{-0,0225(Ln Pr)^2} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

donde k_h es la conductividad térmica del fluido que fluye dentro de los tubos, D_i es el diámetro interno de la tubería, mientras que Pr y Re representan el número de Prandlt y Reynolds, respectivamente.

Los datos sobre superficies extendidas de calentamiento, para el caso de aire que fluye hacia fuera en un conjunto de tubos aleteados, se pueden expresar mediante la ecuación dimensional:

$$h_0 = \frac{bV_\infty^{0,6}}{D_0^{0,4}} \left(\frac{p'}{p' - D_0} \right)^{0,6}$$

(Ec. 2.9)

donde b tiene un valor de $5,39 \times 10^{-3}$ en el Sistema Inglés, h_o es el coeficiente de película de transmisión de calor del lado del aire o basado en la superficie exterior del tubo, V_∞ es la velocidad del aire, p' es el espaciamiento de centro a centro de los tubos en una hilera, y D_o es el diámetro exterior del tubo desnudo (diámetro en la base de las aletas) [17].

2.11 Coeficiente global de transferencia de calor

La velocidad de transferencia de calor de un fluido a otro, a través de una pared de metal es proporcional al coeficiente global de transferencia de calor, el área de la pared y a la diferencia de temperatura entre el fluido caliente y el frío:

$$q = U_o A \Delta T_{efectiva} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde:

q = velocidad de transferencia de calor [Btu/h].

U_o = coeficiente global de transferencia de calor basado en la superficie externa del tubo [Btu/h·ft²·°F].

A = área externa de la superficie del metal a través de la cual ocurre la transferencia de calor [ft²].

$\Delta T_{efectiva}$ = diferencia efectiva de temperaturas [°F]

Cuando se especifica un intercambiador de calor, el diseñador casi siempre conoce o puede calcular sin mucha dificultad los términos q y $\Delta T_{efectiva}$ para las condiciones de proceso dadas. Para obtener el valor apropiado del **área de transferencia de calor** requerida, se necesita evaluar solamente el coeficiente U_o .

El coeficiente global de transmisión de calor se relaciona con los coeficientes individuales de transmisión de calor de película y con las resistencias de las paredes y de los depósitos de suciedad[17]. Los diseños finales de los intercambiadores de calor se hacen sobre la base de cálculos de U_o , aunque es útil disponer de valores establecidos del coeficiente global de transferencia de calor para cambiadores de calor de tubo con aletas, aire transversalmente a los

tubos, los cuales están entre 25 y 55 W/m²·°C (5 a 10 Btu/h·ft²·°F)[18]. El valor de U_o viene determinado en muchos casos por sólo uno de los coeficientes de transferencia de calor por convección o de película. La mayoría de las veces la resistencia a la conducción es menor comparada con las resistencias a la convección; entonces, si uno de los valores de h es notablemente más bajo que el otro, tenderá a dominar en la ecuación de U_o .

Si un coeficiente de película es pequeño y otro muy grande, el coeficiente menor proporciona la mayor resistencia, y el coeficiente total de transferencia de calor para el intercambiador es muy cercano al recíproco de la resistencia mayor[19].

Cuando el calor fluye desde un fluido que circula por el lado de un tubo, a otro fluido que circula por el otro lado del tubo, dicho calor debe vencer las resistencias siguientes:

- R_{io} , resistencia de la película laminar del fluido en el interior del tubo, referida al área externa del tubo.
- r_{io} , resistencia (factor de ensuciamiento) del material extraño depositado en el interior del tubo, referida al área externa del tubo.
- r_w , resistencia de la pared del tubo.
- r_o , resistencia (factor de ensuciamiento) del material extraño depositado en el exterior del tubo.
- R_o , resistencia de la película laminar del fluido en el exterior del tubo.

La suma de estas cinco resistencias se denomina resistencia total R_t , y se define como:

$$U_o = \frac{1}{R_t} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

2.11)

Los factores de ensuciamiento r_{io} y r_o se estiman utilizando los valores típicos para intercambiadores de calor, mostrados en el anexo F. El término r_w se calcula a partir del espesor y la conductividad térmica del metal, por medio de la ecuación:

$$r_w = \frac{r_o}{k_w} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

2.12)

donde r_o y r_i son el radio externo e interno del tubo, respectivamente, k_w es la conductividad térmica del metal. El término r_o utilizado en la ecuación 2.12 no debe confundirse con la resistencia del material extraño depositado en el exterior del tubo, la cual también se representa como r_o .

R_{io} y R_o son funciones de la velocidad másica y de las propiedades físicas del fluido, y se evalúan a partir de las correlaciones dadas a continuación, estas correlaciones están dadas en términos de h_o y h_{io} , donde:

$$h_o = \frac{1}{R_o} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

2.13)

$$h_{io} = \frac{1}{R_{io}} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

2.14)

Los términos de resistencia se expresan por unidad de área (ft^2). El área se refiere a los pies cuadrados de superficie, donde ocurre la resistencia. Como las resistencias se suman para obtener una resistencia total, cada resistencia debe estar referida a una mínima área en lugar de su propia área. Esto racionaliza los términos y hace posible que puedan adicionarse. Es práctica común utilizar el área externa de los tubos, como base para los cálculos y la especificación de los intercambiadores. Esto se indica normalmente con el subíndice “io”, como se mostró anteriormente. Por ejemplo, “hio” es el “coeficiente convectivo de película interno basado en el área externa del tubo”[20].

Para un tubo:

$$h_{io} = h_i \cdot \left(\frac{D_i}{D_o} \right) \quad (\text{Ec. 2.15})$$

2.15)

donde, h_i es el coeficiente convectivo de película interno basado en el área interna del tubo, el cual se calcula por la ecuación 2.8.

Dos coeficientes totales de transferencia de calor deben ser calculados: un coeficiente limpio y otro sucio. El coeficiente limpio (Commercially Clean Coefficient) es el coeficiente total que puede esperarse cuando un intercambiador nuevo se pone por primera vez en servicio. Este coeficiente se calcula de la manera siguiente:

$$\frac{1}{U_c} = R_{io} + R_o + r_w + F_1$$

(Ec. 2.16)

El factor F_1 ($F_1 = 0,0002 \text{ m}^2$ °C/W = 0,001 h·pie² °F / Btu) es una resistencia que se estima por el ensuciamiento de un intercambiador nuevo debido a los lubricantes utilizados durante la expansión de los tubos (*Tube Roller Lubricants*), la corrosión causada por la prueba hidrostática del equipo, etc. Se supone que esta resistencia se divide uniformemente entre las superficies del lado de la carcasa y del lado de los tubos.

Los tubos dentro de intercambiadores de calor poseen un coeficiente de película particular y las temperaturas de entrada y salida varían. Un método para calcular la diferencia de temperaturas entre los fluidos del intercambiador de calor, emplea sólo las temperaturas del proceso, ya que generalmente son las únicas conocidas. Para ello, se establece diferencias de temperatura entre la temperatura general del fluido caliente (T) y alguna temperatura del fluido frío (t), haciéndose estimaciones también para todas las resistencias entre las dos temperaturas[19].

El coeficiente de transferencia de calor sucio (U_s) por su parte, se calcula mediante la ecuación:

$$\frac{1}{U_s} = R_f + \frac{1}{U_0}$$

(Ec. 2.17)

donde R_f es el factor de ensuciamiento.

2.11.1 Factor de ensuciamiento

Las resistencias a la transferencia de calor debidas al ensuciamiento son causadas por sedimentos, polímeros y otros depósitos que se forman en las paredes internas y externas de los tubos de los intercambiadores de calor. Los valores que se utilizan en el diseño toman en cuenta las resistencias que se esperan durante la operación normal del equipo y un tiempo de servicio razonable entre los períodos de limpieza.

La importancia de los factores de ensuciamiento depende del valor del coeficiente de transferencia de calor limpio, U_c ; mientras mejor sea este coeficiente más importante es el factor de ensuciamiento. Después de un cálculo preliminar de U_c , es fácil determinar el efecto que tiene el doblar (o disminuir a la mitad) los factores de ensuciamiento que se han supuesto sobre el tamaño del intercambiador. Si este efecto es pequeño (5% o menos), no se justifica determinar un factor de ensuciamiento más preciso. Sin embargo, muchas veces el U_c es tan grande que el tamaño del intercambiador depende exclusivamente del valor del factor de ensuciamiento[20]. En estos casos, se debería examinar minuciosamente los datos de la planta que se encuentran disponibles.

Es importante considerar los siguientes criterios sobre ensuciamiento:

- El ensuciamiento no es usualmente severo por debajo de los 120 °C (250 °F).
- La vaporización en un intercambiador puede causar ensuciamiento severo, debido a la concentración de depósitos en el líquido remanente hasta el punto de sobresaturación.
- Altas velocidades tienden a reducir el ensuciamiento. Esto se cumple esencialmente en los casos de agua de enfriamiento que contiene sal, crudo con arena y gases con partículas.

Luego de un período de funcionamiento, las superficies de transferencia de calor en un intercambiador de calor se cubren con depósitos presentes en las corrientes, o las superficies pueden corroerse como resultado de la interacción entre los fluidos y el material del cual está fabricado el intercambiador de calor. Esta capa o depósito supone una resistencia adicional al flujo de calor. El efecto global se representa mediante el factor de suciedad, el cual se incluye dentro de las otras resistencias térmicas para obtener así el coeficiente global de transferencia de calor[18].

2.11.2 Diferencia de temperatura media logarítmica

La diferencia de temperaturas entre los dos fluidos empleados en el intercambiador de calor varía de un punto a otro. La diferencia de temperatura media logarítmica (MLDT) puede calcularse mediante las temperaturas finales de las dos corrientes, siempre que sean válidas las siguientes hipótesis:

- El intercambiador opera en estado estacionario.
- El calor específico es constante para cada corriente de fluido.
- El coeficiente global de transmisión de calor permanece constante.
- Las pérdidas de calor se consideran constantes.

Para un flujo en contracorriente, la diferencia media logarítmica de temperatura se define como:

$$MLDT = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)}$$

(Ec. 2.18)

donde: T_1 , T_2 , representan las temperaturas de entrada y salida del fluido caliente en el intercambiador de calor, respectivamente; t_1 y t_2 son las temperaturas de entrada y salida de fluido frío en el intercambiador de calor, respectivamente.

2.11.3 Diferencia efectiva de temperatura

La diferencia de temperatura efectiva, entre los fluidos caliente y frío es la fuerza impulsora del mecanismo de transferencia de calor. Esta temperatura se calcula a partir de la diferencia de temperatura media logarítmica en contracorriente, la cual se corrige mediante factores, los cuales toman en consideración el arreglo de flujo que se vaya a utilizar[18]. La diferencia efectiva de temperatura, se define como una diferencia media de temperaturas apropiada al intercambiador de calor, la cual combina los términos MLDT y un **factor de**

corrección F, que se evalúa mediante la combinación de dos factores: factor de eficiencia (S) y factor de rango (R), definidos como:

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

(Ec. 2.19)

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

(Ec. 2.20)

Los distintos factores de corrección para los diferentes valores de S y R, se muestran en el anexo G.

La ecuación que define la diferencia media de temperatura efectiva, es el producto entre la diferencia media de temperatura logarítmica y el factor de corrección, de la forma siguiente:

$$\Delta T_{efectiva} = F \cdot MLDT$$

(Ec. 2.21)

2.12 Eficiencia de un intercambiador de calor

La eficiencia de un intercambiador de calor se define como la razón de la cantidad de calor removido a un fluido y la máxima transferencia de calor posible. Esto es:

$$Eficiencia (\varepsilon) = \frac{\text{transferencia de calor real}}{\text{máxima transferencia de calor posible}}$$

(Ec. 2.22)

La transferencia de calor removida realmente al fluido se obtiene calculando la energía perdida por el fluido caliente o la energía absorbida por el fluido frío, de acuerdo a la Primera Ley de la Termodinámica. Para determinar la máxima transferencia de calor posible se admite en primer lugar que este valor máximo se alcanzaría si uno de los fluidos experimentase una variación de temperatura igual a la diferencia máxima de temperaturas que se da en el intercambiador, es decir, la diferencia entre las temperaturas de entrada de los fluidos caliente y frío. El fluido que podría experimentar esta diferencia máxima de temperatura sería aquel que tuviese el valor de capacidad térmica mínima ($C_{mínimo}$), puesto que la Primera Ley de la Termodinámica exige que la energía recibida por uno de los fluidos sea igual a la cedida por el otro; si fuese el fluido con mayor capacidad térmica el que alcanzara la máxima diferencia de temperaturas, esto exigiría que el otro fluido experimentase una diferencia de temperaturas mayor que la máxima, siendo esto imposible.

El calor real involucrado en el proceso, puede expresarse de la siguiente manera:

Calor cedido por el fluido caliente:

$$q = m_h \cdot C_{p_h} \cdot (T_{h1} - T_{h2})$$

(Ec. 2.23)

donde:

m_h : flujo másico de fluido caliente [lb/s]

C_{p_h} : calor específico del fluido caliente [Btu/lb·°F]

T_{h1} : temperatura de entrada del fluido caliente al intercambiador de calor [°F]

T_{h2} : temperatura de salida del fluido caliente al intercambiador de calor [°F]

Calor absorbido por el fluido frío:

$$q = m_c \cdot C_{p_c} \cdot (T_{c1} - T_{c2})$$

(Ec. 2.24)

donde:

m_c : flujo másico de fluido frío [lb/s]

Cp_c : calor específico del fluido frío [Btu/lb·°F]

T_{c1} : temperatura de entrada del fluido frío al intercambiador de calor [°F]

T_{c2} : temperatura de salida del fluido frío al intercambiador de calor [°F]

El fluido con la capacidad térmica mínima ($C_{mínimo}$) puede ser el fluido frío o caliente, dependiendo de los flujos másicos y los calores específicos de los fluidos, de acuerdo con las expresiones:

Para el fluido caliente:

$$C_h = m_h \cdot Cp_h$$

(Ec. 2.25)

Para el fluido frío:

$$C_c = m_c \cdot Cp_c$$

(Ec. 2.26)

En un intercambiador de calor, si el valor de $C_{mínimo}$ pertenece al fluido caliente, entonces la eficiencia viene dada por:

$$\varepsilon_h = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c1}}$$

(Ec. 2.27)

Si es en cambio, el fluido frío es el que experimenta el $C_{mínimo}$, la eficiencia viene dada por:

$$\varepsilon_c = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}}$$

(Ec. 2.28)

Para un fluido cuya composición líquida esté representada por m-etilenglicol y agua, se tiene que la capacidad calorífica viene expresada por la siguiente ecuación[17]:

$$C_p = -0,42X + 1$$

(Ec. 2.29)

donde:

C_p : es la capacidad calorífica del fluido en [cal/g·°C]

X : es la fracción volumétrica de m-etilenglicol presente en el fluido

CAPITULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO

En este capítulo se muestran en forma detallada y progresiva, las etapas por medio de las cuales se desarrolló el trabajo de grado. En ellas se presentarán una serie de datos, presentados en tablas, así como información importante que se recopiló, con la finalidad de alcanzar los objetivos trazados.

3.1 Revisión bibliográfica

Se revisaron textos, revistas técnicas, manuales de operación, tesis de grado y sitios en Internet relacionados con el funcionamiento de los motocompresores, sistema de enfriamiento en circuitos cerrados, causas de la corrosión en el sistema de enfriamiento y formas de prevenirla, refrigerantes; utilizando la biblioteca del Departamento de Ingeniería Química, el Centro de Información Técnica San Tome (CITST), PDVSA y otras fuentes bibliográficas disponibles.

3.2 Determinación de las condiciones de operación del sistema de enfriamiento de los motocompresores

Se realizaron visitas a la planta compresora de gas Guara Este, con la finalidad de tomar nota de las temperaturas de operación del intercambiador, así como las características y propiedades del agua utilizada para el sistema de enfriamiento de los motocompresores. Además se identificaron los tipos de materiales con los que están elaboradas las piezas involucradas en el sistema de enfriamiento, con la finalidad de saber el tipo de protección que deben ofrecer los productos.

3.2.1 Características del Motocompresor White Superior K-6

Tabla 3.1 Características del Motocompresor White Superior K-6

Motor		Cilindros Compresores			
Marca	White Superior	Primer a etapa	Diámetro del cilindro	17,5 pulg	
			Diámetro del vástago	2 pulg	
Carrera	6 pulg				
Presión de succión	65 psi				
Presión de descarga	180 psi				
Temperatura de succión	313,15 K				
% Volumen muerto(atrás)	23,8				
% Volumen muerto(adelante)	17,4				
Potencia	1200 HP		Segun da etapa	Diámetro del cilindro	11 pulg
				Diámetro del vástago	2 pulg
		Carrera		6 pulg	
Presión de succión	175 psi				
Presión de descarga	380 psi				
% Volumen muerto(atrás)	18,7				
Cilindros de fuerza	12	Tercer a etapa	% Volumen muerto(adelante)	15,3	
			Diámetro del cilindro	7 pulg	
			Diámetro del vástago	2 pulg	
Volumen manejado	5 MMPCND	Tercer a etapa	Carrera	6 pulg	
			Presión de succión	370 psi	
			Presión de descarga	830 psi	
R.P. M.	900	Tercer a etapa	% Volumen muerto(atrás)	23,7	
			% Volumen muerto(adelante)	26,5	
			Temperatura máx. de agua a la salida	200 °F, (366,4 K)	

Temperatura máx. de aceite a la salida	195 °F, (363,7 K)
Temperatura máx. de descarga del gas	250 °F, (394 K)
Capacidad del sistema de enfriamiento	850 Litros

Tabla 3.2 Datos del Motocompresor utilizando Agua en el Sistema de Enfriamiento

Fecha	R. P.M.	Temperatura Agua Motor		Presiones de succión y descarga para cada etapa de compresión (psi)								Temperaturas de succión y descarga para cada etapa de compresión (°F)						
		Ent.	Sal.	Aceite	Etapas								Etapas					
					Succión	ra. Sal.	da. Ent.	da. Sal.	ra. Ent.	ra. Sal.	Succión	ra. Sal.	da. Ent.	da. Sal.	ra. Ent.	ra. Sal.		
15/02/2004	8:42	80	90	48	60	55	50	70	65	50	08	12	20	30	40	40		
16/02/2004	8:40	84	90	46	60	60	50	80	75	60	10	12	22	35	30	40		
17/02/2004	8:38	72	80	46	65	60	50	80	75	30	10	12	16	05	22	40		
18/02/2004	8:30	80	00	45	60	60	48	60	55	60	15	10	16	30	40	42		
19/02/2004	8:30	75	90	46	65	60	50	60	55	30	15	15	20	35	30	42		
20/02/2004	8:19	70	90	48	65	60	48	70	55	30	15	10	22	35	20	40		
21/02/2004	8:25	80	00	47	65	60	48	60	55	30	10	12	20	35	20	40		
22/02/2004	8:00	80	90	48	60	60	50	70	65	50	08	12	20	30	40	40		

/2004	30	80	90	6	5	60	50	60	55	30	12	10	19	35	20	40
23/02 /2004	8 45	1 80	1 90	4 8	6 5	1 65	1 48	3 60	3 50	8 25	1 10	2 15	1 20	2 25	1 30	2 48
24/02 /2004	8 36	1 80	1 90	4 7	6 5	1 65	1 50	3 45	3 40	8 20	1 10	2 15	1 16	2 28	1 40	2 45
25/02 /2004	8 40	1 90	2 00	4 7	6 5	1 65	1 55	3 70	3 40	8 25	1 15	2 15	1 20	2 35	1 40	2 47
Prom edio	8 34,1	1 79,2	1 91,8	4 6,7	6 3,6	1 60,9	1 49,7	3 65,0	3 56,4	8 35,5	1 11,8	2 12,5	1 19,2	2 29,8	1 30,2	2 42,2

3.2.2 Caracterización del agua utilizada en el sistema de enfriamiento

Se tomó una muestra del agua utilizada en el sistema de enfriamiento del motocompresor White Superior K-6, la cual fue llevada al Centro de Análisis de San Tomé, donde se le practicó análisis químico a fin de verificar si las características y componentes de la misma causan los problemas de recalentamiento presentados en el motocompresor. Los resultados obtenidos del análisis son mostrados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Componentes y propiedades del agua utilizada en el sistema de enfriamiento del motocompresor White Superior K-6

Determinaciones	ppm	Norma
Sodio [Na ⁺]	0,06	
Calcio [Ca ⁺⁺]	4,00	
Magnesio [Mg ⁺⁺]	0,00	
Hierro	0,08	SM 303-80
Sulfatos	4,00	MÉTODO HACH
Carbonatos (como CaCO ₃)	0,00	
Bicarbonatos (como CaCO ₃)	10,00	
Dureza total (como CaCO ₃)	10,00	ASTM D 1126-86
Alcalinidad parcial (P)	0,00	ASTM D 1067-92
Alcalinidad total (M)	10,00	ASTM D 1067-92
Sólidos disueltos	522,00	SM 2540 C
Sólidos suspendidos	8,00	SM 2540 D
Sólidos totales	530,00	SM 2540 B
Propiedades		
Gravedad específica (60°F)	0,9980	
pH	6,5	ASTM D 1125-93
Turbidez	52 NTU	SM 2130-89
Condiciones ambientales		
Temperatura	25 °C	
Humedad relativa	84%	
Presión barométrica	744 mmHg	

3.2.3 Determinación de las fallas más frecuentes en el sistema de enfriamiento atribuibles al refrigerante.

Se realizó análisis a estadístico de fallas de los motocompresores y las fallas más frecuentes son mostradas en la figura 3.1.

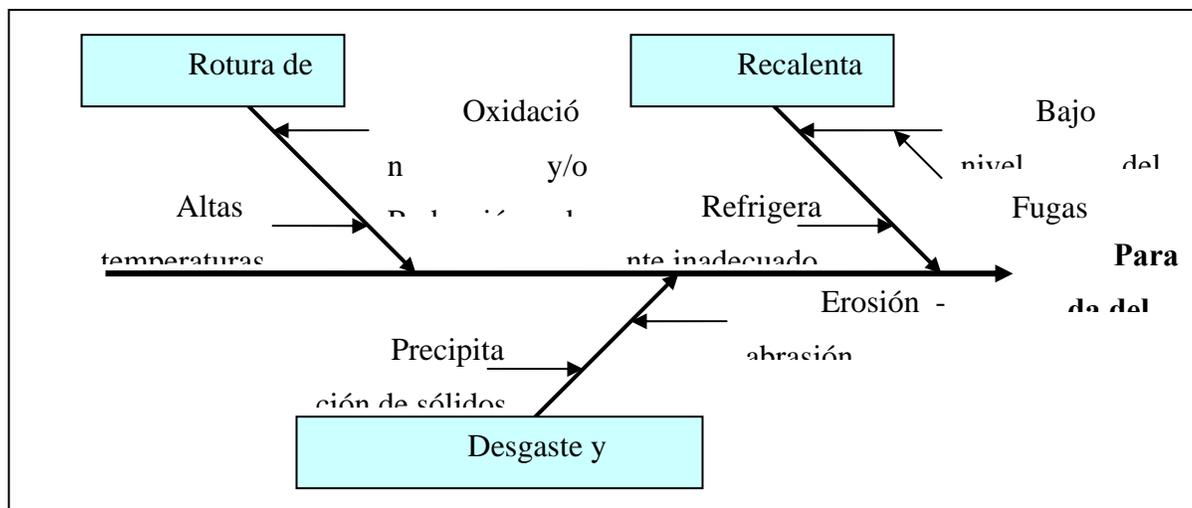


Figura 3.1 Análisis de fallas más frecuentes atribuibles al líquido refrigerante

3.3 Pruebas de laboratorio para determinación de las propiedades fisicoquímicas de los refrigerantes.

Se realizaron pruebas a los refrigerantes para determinar punto de ebullición, gravedad específica, pH, capacidad amortiguadora de pH, tendencia a la formación de espumas y corrosividad a los principales metales contenidos en las piezas que componen el sistema de enfriamiento de los motocompresores.

3.3.1 Obtención de las muestras de refrigerantes para realizar análisis

Para obtener estas muestras se llamó a 4 empresas, las cuales suministran distintos tipos de refrigerantes, los mismos pueden ser observados en la figura 3.2.



Figura 3.2 Muestras de refrigerantes a analizar

Tabla 3.4 Refrigerantes a evaluar

Fabricante		Nombre Comercial	Refrigerantes
Industrias Zomal	Químicas	IQZ-RM-610	A
Industrias Tamara	Químicas	Refrigerante-50	B
P&M Químicos		CICa-38a	C
Industrias Celta		Cel Cool MP	D

3.3.2 Determinación de la temperatura de ebullición

Para esta prueba se aplicó el procedimiento establecido en la norma ASTM D-1120-94 (Reaprobada 1998), ver anexo A.1, el cual consiste en agregar 60 mL de refrigerante y 6 piedritas porosas en un balón de destilación, tapar el balón con un tubo de condensación dispuesto en forma vertical e introducir un termómetro en forma diagonal. Colocar el balón sobre un calentador eléctrico y comenzar a suministrarle calor hasta observar la condensación de las primeras gotas (las cuales condensan dentro del mismo balón), luego se regula el calentador hasta observar que condensan de 1 a 2 gotas por segundo hasta mantenerse

constante durante 10min. Transcurridos los 10min se lee en el termómetro la temperatura y se reporta ésta como temperatura de ebullición del refrigerante.

3.3.3 Determinación del pH

Para esta prueba se aplicó el procedimiento establecido en la norma ASTM D-1287-91 (Reaprobada 2002), ver anexo A.2, el cual consiste en colocar 50 mL de refrigerante en un beaker, luego se introduce el electrodo del medidor de pH (previamente calibrado con soluciones buffer con pH de 4, 7 y 10) en el refrigerante y se toma el valor de pH arrojado por el equipo. En la figura 3.3 se observa medidor de pH utilizado.



Figura 3.3 Medidor de pH digital

3.3.4 Determinación de la reserva alcalina

Para esta prueba se aplicó el procedimiento establecido en la norma ASTM D-1121-98, ver anexo A.3, el cual consiste en tomar 10mL de refrigerante y diluir con agua destilada en un matraz aforado de 100mL. El pH en el agua a utilizar para la dilución debe ser ajustado a un valor de 7 agregándole al agua gradualmente una solución buffer. Luego el refrigerante diluido es colocado en un beaker, en el que posteriormente se introduce el electrodo de un titulador automático que previamente es programado para agregar al beaker la cantidad de solución HCl 0,1N necesaria para que el pH del refrigerante diluido llegue a 5,5. La reserva

alcalina se reporta como el volumen de HCl 0,1N gastado durante la titulación. En la figura 3.4 se observa equipo de titulación automático.



Figura 3.4 Titulador automático

3.3.5 Determinación de la gravedad específica

Para esta prueba se aplicó el procedimiento establecido en la norma ASTM D-1122-97a (Reaprobada 2002), ver anexo A.4, el cual consiste en colocar 200mL de refrigerante en un cilindro sin graduación; luego se introduce un hidrómetro hasta que el mismo se queda estático flotando en la solución sin tocar el fondo del cilindro y se lee la gravedad específica. Inmediatamente se introduce un termómetro en el refrigerante para tomar la temperatura a la cual se realizó la prueba y utilizando tablas de correlación ASTM se convierte el valor de gravedad específica obtenido a la temperatura de trabajo para ser reportado a 25°C.

3.3.6 Determinación del contenido de agua y m-etilenglicol

Para obtener estos valores se construye una curva de calibración. Para la construcción de la curva se parte de m-etilenglicol puro, se hacen diluciones sucesivas de m-etilenglicol hasta 10% v/v, se le debe determinar la gravedad específica a cada dilución incluyendo el m-etilenglicol puro, luego se grafican los datos de % v/v de m-etilenglicol vs gravedad específica y se ajusta trazando la mejor recta. Luego los valores de gravedad específica previamente

obtenidos para los refrigerantes se introducen en la ecuación de la línea recta obtenida y se calcula el % v/v de m-etilenglicol y por diferencia el % v/v de agua.

3.3.7 Determinación de la tendencia a formar espuma

Para esta prueba se aplicó el procedimiento establecido en la norma ASTM D-1881-97 (Reaprobada 2002, ver anexo A.5), el cual consiste en colocar 145mL de refrigerante en un cilindro graduado de 1000mL de capacidad e introducir en el cilindro un termómetro y un tubo para suministrarle aire a la solución. El tubo debe estar provisto de una piedra porosa en la punta para que las burbujas de aire suministrado sean homogéneas. El cilindro se introduce en un baño de María que debe permanecer regulado a 80°C. Cuando el refrigerante alcance los 80°C se conecta el tubo a un flujometro de aire, que debe ser regulado a 1000mL/min. Se comienza a suministrar aire al refrigerante durante 5 min. Transcurridos los 5 min se lee en el cilindro el volumen alcanzado por la espuma formada, inmediatamente se cierra el flujo de aire y se toma el tiempo en que la espuma desaparece completamente, repitiendo el procedimiento 2 veces. Se reporta en una tabla el promedio de las 3 lecturas de volumen de espuma y el promedio del tiempo de ruptura de la espuma.

3.3.8 Determinación de la corrosividad

Para esta prueba se aplicó el procedimiento establecido por la norma ASTM D-1384-01, ver anexo A.6, el cual consiste en agregar 333mL de refrigerante en un cilindro graduado de 1000mL de capacidad, completar con agua corrosiva hasta 1L. El agua corrosiva deberá contener 100ppm de iones sulfato, 100ppm de iones cloruro y 100ppm de iones bicarbonato, tal y como se observa en la figura 3.5. Colocar la solución preparada en un beaker e introducir un cupón de corrosión con los siguientes metales: cobre, bronce, estaño, aluminio hierro y acero, en la figura 3.6 se observa el arreglo de los cupones de corrosión con los metales indicados y en la figura 3.7 se observan los cupones de corrosión dentro de cada una de las muestras. Luego se tapa el beaker y se coloca a través del tapón un termómetro, un tubo de condensación y un tubo para suministrarle aire a razón de 100mL/min. Se coloca un calentador regulado a 80°C y deja montada la prueba durante 14 días, como se observa en la

figura 3.8. Transcurridos los 14 días se extrae el cupón de corrosión, se lavan por separadas cada una de las láminas de metal, se colocan en la estufa para secar y posteriormente se pesan. Por diferencia de pesada se obtiene el peso perdido durante la prueba y se reporta como miligramos de metal perdido.



Figura 3.5 Preparación de agua corrosiva



Figura 3.6 Arreglo de los cupones de corrosión



Figura 3.7 Muestras con los cupones de corrosión

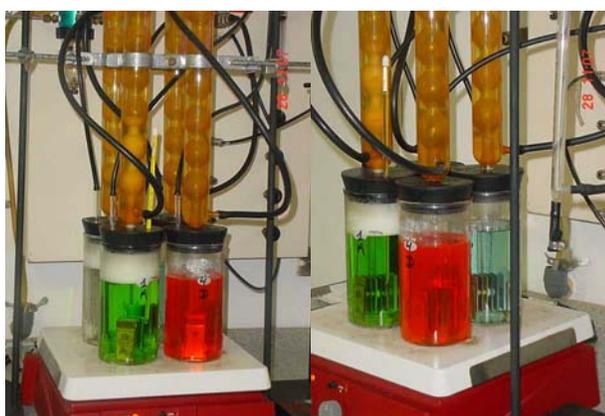


Figura 3.8 Inicio de la prueba de corrosividad

3.4 Acondicionamiento del sistema de enfriamiento

Una vez seleccionado el refrigerante, se acondicionará el sistema para garantizar el buen desempeño del producto, para lo cual se deben sustituir los tubos del intercambiador de calor agua-aceite y los tubos del radiador. Realizar limpieza a las líneas por donde circula el refrigerante y a las camisas del motor, verificar y corregir todas las fugas.

Seguidamente, colocar un tanque de 1000 litros de capacidad para facilitar la recuperación de fluido en caso de realizar una parada al motor y colocar una bomba de doble diafragma para

bombear el refrigerante desde el tanque hacia el motocompresor, y en caso de paradas, desde el motocompresor hacia el tanque.

3.5 Muestra de cálculo

3.5.1 Determinación de los índices de estabilidad

Para el cálculo de los índices de estabilidad de Langelier (IL) y de Ryznar (IR), se utilizaron los datos mostrados en la tabla 3.3, sobre análisis fisicoquímico realizado al agua del sistema de enfriamiento.

Para calcular los índices de estabilidad de esta muestra de agua fue necesario calcular primero el pH de saturación (pH_s) mediante la ecuación 2.6.

Para ello, fue necesario calcular las constantes A y B empleando la tabla de las constantes A y B mostrada en el anexo B.

La constante A depende de la temperatura de la muestra, en este caso se toma 25 °C, por lo que según el anexo B.1 tiene un valor de 2,0; mientras que la constante B depende de la cantidad de sólidos disueltos, de acuerdo a la tabla 3.3 es de 522 ppm, entonces el valor de la constante B es igual a 9,87. Por lo tanto, el pH_s quedó de la siguiente manera:

$$pH_s = 2,0 + 9,87 - \log[4] - \log[10]$$

$$pH_s = 10,32$$

El valor de pH_s obtenido es sustituido en las ecuaciones 2.4 y 2.5 para obtener los índices de Langelier y Ryznar respectivamente, y los resultados fueron los siguientes:

$$\text{Índice de Langelier (IL)} = 6,5 - 10,32$$

$IL =$ $-3,82$

$$\text{Índice de Ryznar (IR)} = 2*(10,32) - 6,5$$

$$IR = 14,14$$

3.5.2 Cálculo de la capacidad calorífica para distintas concentraciones de m-etilenglicol

Para determinar la capacidad calorífica de distintas muestras de m-etilenglicol diluido en agua, se utiliza la ecuación 2.29. Así para un 10% (0,1v/v) de m-etilenglicol y 90% de agua se tiene:

$$Cp = -0,42*(0,1)+1$$

$$Cp = 0,958 \text{ Cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$$

De igual manera se realizan los cálculos para distintos porcentajes de m-etilenglicol y los resultados son mostrados en la tabla 4.8.

3.5.3 Determinación del % de m-etilenglicol de los refrigerantes estudiados

Para determinar el % de m-etilenglicol se construyó una curva de calibración, la cual se construyó a partir de diluciones sucesivas de una muestra de m-etilenglicol puro. En la figura 4.1 se observa la gráfica obtenida con los datos contenidos en la tabla 4.6.

Para obtener la ecuación de la recta trazada se debe obtener primero la pendiente, utilizando la ecuación de la pendiente para una recta, la cual se muestra a continuación:

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

(Ec. 3.1)

donde:

Y_2 : Valor de % v/v de m-etilenglicol en el punto 2

Y_1 : Valor de % v/v de m-etilenglicol en el punto 1

X_2 : Valor de gravedad específica en el punto 2

X_1 : Valor de gravedad específica en el punto 1

Tomando como punto 1 (1,0884 ; 60) y como punto 2 (1,0310 ; 20) y sustituyendo en la Ec. 3.1 se obtiene:

$$m = \frac{60 - 20_1}{1,0884 - 1,0310} = 696,86$$

La ecuación de la recta trazada se obtiene utilizando la ecuación punto-pendiente, la cual se muestra a continuación:

$$Y - Y_1 = m(X - X_1)$$

(Ec.3.2)

donde:

Y : Valor de % v/v de m-etilenglicol

Y_1 : Valor de % v/v de m-etilenglicol en el punto 1

X : Valor de gravedad específica en el punto 2

X_1 : Valor de gravedad específica en el punto 1

Sustituyendo el valor de la pendiente obtenida y como punto 1 (1,0000 ; 0) en la Ec. 3.2, se tiene:

$$Y - 0 = 696,86 (X - 1)$$

$Y = 696,86 X - 696,86$

Tomando los datos de gravedad específica obtenidos para cada refrigerante de la tabla 4.5, y sustituyéndolo en la ecuación de la recta obtenida, se tiene como resultado para la muestra A:

$$\% \text{ m-etilenglicol} = 696,86 (1,0551) - 696,86$$

$\% \text{ m-etilenglicol} =$ $38,40$

De igual manera se realizan los cálculos para las restantes muestras y los valores son mostrados en la tabla 4.7.

CAPITULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Discusión de resultados

4.1.1 Análisis de la caracterización del agua utilizada en el sistema de enfriamiento

Los índices de estabilidad, como una tendencia de la formación de incrustaciones y de la corrosividad del agua, se calcularon en el capítulo 3, tomando como datos para realizar los cálculos los valores de la tabla 3.3. Los resultados se muestran a continuación en la tabla 4.1. Estos índices se compararon con los mostrados en el anexo A, en la tabla sobre los índices de estabilidad y sus tendencias.

Tabla 4.1 Índices de estabilidad de la muestra de agua tomada del sistema de enfriamiento

Muestra de Agua No.	Índice de Langelier (IL)	Índice de Ryznar (IR)
1	-3,82	14,14
2	-3,76	13,82
3	-3,73	14,16
Promedio	-3,77	14,04

Estos valores de índice de estabilidad son comparados con los mostrados en el anexo B, en la tabla sobre los índices de estabilidad y sus tendencias. En la tabla 4.1 se muestran los resultados del análisis del agua utilizada en el sistema de enfriamiento, en esta tabla se

muestran los resultados para tres repeticiones, con lo cual se obtuvo un valor promedio de los Índices de Langelier y de Ryznar, determinándose que la muestra de agua presenta una tendencia altamente corrosiva ($IL < 0$ e $IR > 8$).

En la muestra se observó la presencia de sílice. El sílice se considera como la cantidad de arena presente en el agua, este valor debería ser lo más pequeño posible para evitar así el taponamiento de las tuberías, en la figura 2.9 se observa la obstrucción total de una camisa de cilindro. Su contenido en esta muestra se debe a que es un agua proveniente directamente de pozos y no pasa por ningún tipo de filtro. Su presencia puede traer problemas en el sistema de enfriamiento, pues cuando el pH baja, aumenta la corrosión del agua y se incrementa el potencial incrustante de algunos tipos de sílice [15].

La dureza total de la muestra fue de 10 ppm; ésto representa una dureza del tipo temporal, ya que son sales solubles de bicarbonato de calcio, las que se encuentran contenidas en el agua [10]. El contenido de dureza de la muestra no sobrepasa el límite máximo permisible para aguas en sistemas de enfriamiento de motores, que es de 170 ppm [15].

Comparando la cantidad de sólidos disueltos contenidos en esta muestra (530 ppm) con el contenido máximo permisible para aguas usadas en sistemas de enfriamiento de motores, el cual es de 340 ppm, se observa que esta muestra de agua se ubica por encima de las características recomendadas para los sistemas de enfriamiento de motores; es decir, es un agua sumamente cargada de partículas contaminantes en sistemas de enfriamiento. A pesar de que el contenido de sólidos suspendidos es bajo, el de sólidos disueltos es muy alto.

4.1.2 Análisis de la caracterización de los refrigerantes, mediante pruebas fisicoquímicas

Una vez realizadas las pruebas a los distintos refrigerantes para determinar punto de ebullición, gravedad específica, pH, capacidad amortiguadora de pH, tendencia a la formación de espumas y corrosividad a los principales metales contenidos en las piezas que componen en el sistema de enfriamiento de los motocompresores, se compararon los resultados obtenidos con los valores mostrados en las tablas 2.1 y 2.2.

4.1.2.1 Determinación de la temperatura de ebullición

El líquido refrigerante debe ser capaz de absorber el calor proveniente de las camisas del motor, de la cámara de combustión y del aceite. Durante esta transferencia de calor, el líquido refrigerante no debe evaporarse, ya que los gases originados en la evaporación traería consigo problemas tales como: *cavitación de la bomba de agua*, originada por los diferenciales de presión a los que es sometida la bomba durante la succión, *disminución de la capacidad de transferencia*, originado por la pérdida de líquido en forma de vapor. En la tabla 4.2 se muestran los valores de temperatura de ebullición obtenidos para los distintos refrigerantes estudiados.

Tabla 4.2 Temperatura de ebullición de los refrigerantes estudiados

Refrigerantes antes	Temperatura (°C)
A	108
B	110
C	110
D	106

Mientras mayor es la temperatura de ebullición, menor será la evaporación, minimizando las pérdidas de líquido refrigerante y evitando la cavitación de la bomba. En la tabla 4.2 se observa que el líquido con mayor punto de ebullición es el correspondiente a la muestra C, seguido en orden descendente por el A, el B y por último el D. La diferencia de puntos de ebullición en los refrigerantes se debe a la cantidad de m-etilenglicol, mientras mayor es el contenido de m-etilenglicol, mayor será el punto de ebullición.

4.1.2.2 Determinación del pH

Las variaciones en el pH afectan notablemente la velocidad de corrosión de los materiales metálicos. En el rango de pH entre 4 y 10, la velocidad de corrosión es independiente del pH; mientras que en el rango de pH < 4, la velocidad de corrosión es determinada por la evolución del hidrógeno, y esta evolución depende del acero y/o de su

tratamiento térmico. En la tabla 4.3 se observan los valores obtenidos de pH para los refrigerantes estudiados.

Tabla 4.3 Valores obtenidos de pH para los refrigerantes estudiados

Refrigerantes	pH
A	8,80
B	6,80
C	6,32
D	8,53

Es importante resaltar que todos los refrigerantes estudiados se ubicaron en el rango de pH entre 4 y 10, donde la velocidad de corrosión es independiente del pH. Sin embargo, se puede notar que las muestras B y C se encuentran más cercanas al valor inferior del rango (4-10), donde el pH comienza a determinar la velocidad de corrosión. En las muestras A y D se observan valores aceptables de pH.

4.1.2.3 Determinación de la reserva alcalina

La *reserva alcalina* es la capacidad reguladora que tiene un líquido para mantener su pH por encima de 5,5, donde no se favorece la velocidad de corrosión. Para obtener el valor de reserva alcalina para una determinada muestra, se titula la muestra con ácido clorhídrico 0,1N hasta que el pH de solución alcance el valor de 5,5. La reserva alcalina se reporta como el volumen de HCl 0,1N gastado durante la titulación. Mientras mayor sea el volumen gastado, mayor será la reserva alcalina, por lo tanto, mayor será la capacidad amortiguadora de pH del líquido. En la tabla 4.4 se observan los volúmenes de HCl 0,1N gastado en la titulación de cada una de las muestras estudiadas. Según estos resultados, la muestra D es la que posee mayor capacidad amortiguadora, ya que durante la titulación esta muestra requirió mayor volumen de HCl para alcanzar el pH de 5,5, seguida por la muestra A con un valor muy cercano. Las muestras B y C no presentaron capacidad amortiguadora de pH, ya que los valores de reserva alcalina fueron muy bajos.

Tabla 4.4 Volúmenes de HCl 0,1N gastado en cada refrigerante estudiado

Refrigerantes	mL de HCl gastados
A	2,40
B	0,37
C	0,89
D	2,69

4.1.2.4 Determinación de la gravedad específica, % de m-etilenglicol y % de agua.

Se determinó la gravedad específica para cada muestra de refrigerante con la finalidad de obtener el % v/v de m-etilenglicol y de agua contenido en cada muestra. En la tabla 4.5 se observan los valores de gravedad específica obtenidos para cada muestra.

Tabla 4.5 Gravedad específica de los refrigerantes estudiados

Refrigerantes	Gravedad Específica
A	1,0551
B	1,0724
C	1,0721
D	1,0245

Para determinar el % de m-etilenglicol se construye una curva de calibración, a partir de diluciones sucesivas de una muestra de m-etilenglicol puro. A cada dilución se le determinó la gravedad específica y los valores se observan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Gravedad específica para cada dilución de m-etilenglicol

%v/v de m-etilenglicol	Gravedad Específica
0	1,0000

10	1,0167
20	1,0310
30	1,0454
40	1,0597
50	1,0741
60	1,0884
70	1,1028
80	1,1171
90	1,1314
100	1,1458

Los valores de la tabla 4.6 fueron graficados y se trazó la mejor recta para obtener la ecuación con la cual se determina el % de m-etilenglicol de cada muestra. En la figura 4.1 se presenta la curva de calibración obtenida.

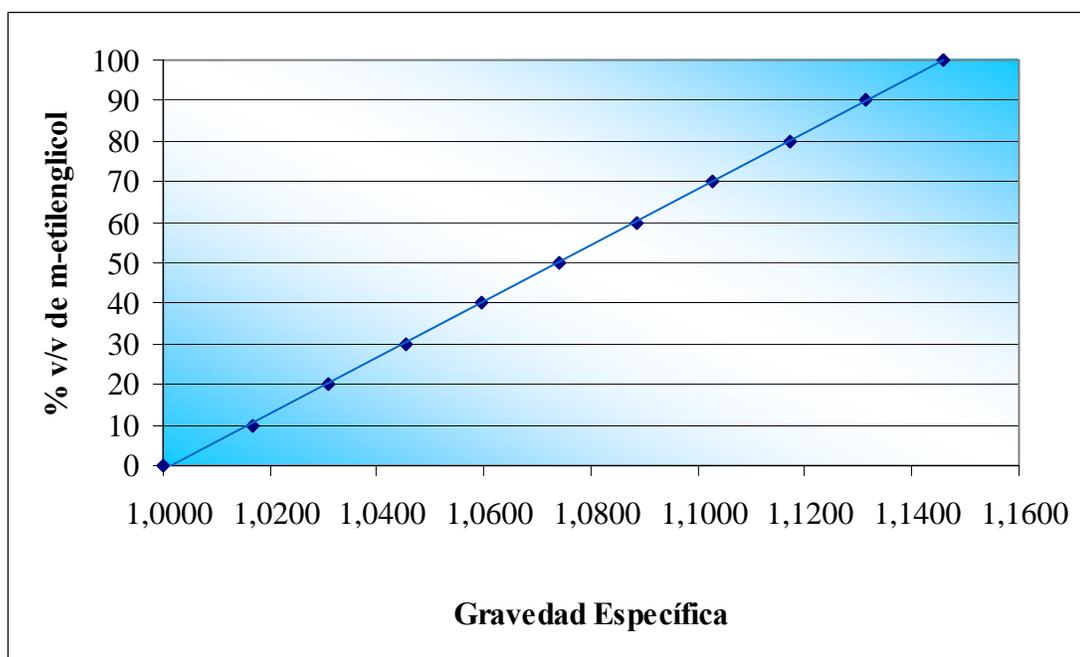


Figura 4.1 Curva de calibración de % v/v de m-etilenglicol vs gravedad específica

Utilizando la figura 4.1 se obtuvieron los % v/v de m-etilenglicol contenidos en cada muestra. En la tabla 4.7 se observan los % v/v de m-etilenglicol obtenidos.

Tabla 4.7 % v/v de m-etilenglicol de los refrigerantes estudiados

Refrigerantes	% v/v m-etilenglicol
A	38,40
B	50,45
C	50,24
D	17,07

El m-etilenglicol es uno de los componentes utilizado en la mayoría de los líquidos refrigerantes. Una razón por la cual se utiliza este aditivo es la protección anticongelante que ofrece, ya que a medida que se incrementa el % de m-etilenglicol en el sistema, el punto de congelamiento disminuye, como se muestra en la figura 4.2. Esta bondad que ofrece el m-etilenglicol al sistema es aprovechada en países donde la temperatura del ambiente alcanza valores sumamente bajos y un sistema basado 100% en agua correría el riesgo de congelarse, impidiendo la circulación del líquido a través del sistema de enfriamiento. La temperatura ambiente a la cual están sometidos los motocompresores del Distrito San Tomé es superior a los 20°C; por ende no sería necesario modificar el punto de congelación.

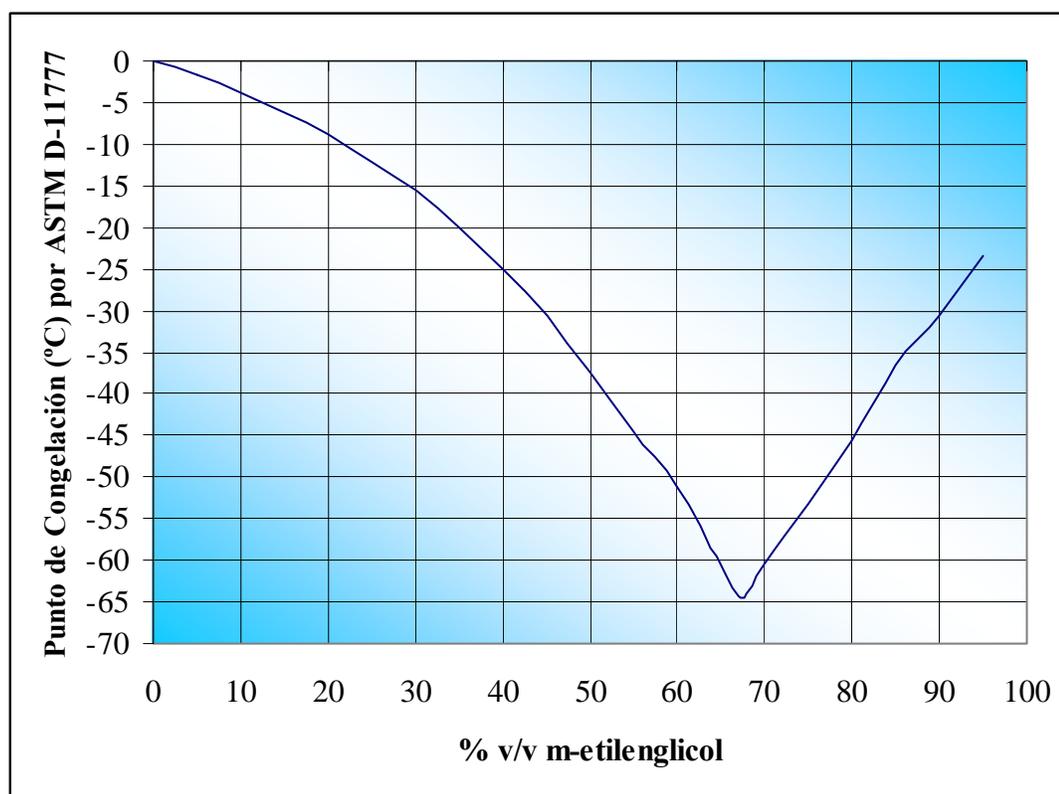


Figura 4.2 Punto de congelación para soluciones acuosas de m-etilenglicol

Además de disminuir el punto de congelación del sistema, el punto de ebullición es directamente proporcional al porcentaje de m-etilenglicol. En la tabla 2.1 se observa la variación del punto de ebullición desde 100°C para sistemas 100% agua hasta 163°C para sistemas 100% m-etilenglicol. Mientras mayor sea el porcentaje de m-etilenglicol, mayor será el punto de ebullición del sistema, lo cual es favorable para evitar pérdidas por evaporación, sin embargo, a medida que varía el porcentaje de m-etilenglicol, también varía la capacidad calorífica.

En la tabla 4.8 se observa el valor de capacidad calorífica para distintos porcentajes de m-etilenglicol. Con los datos de la tabla 4.8 se construyó la curva de capacidad calorífica vs % m-etilenglicol (ver figura 4.3). En la figura 4.3 se observa un valor de pendiente negativo, lo cual implica que a medida que incrementa el porcentaje de m-etilenglicol, disminuye la

capacidad calorífica de la mezcla y por ende, disminuye la capacidad que tiene el fluido de enfriamiento para absorber el calor generado por el motocompresor.

Las condiciones de diseño de los motocompresores, tal y como se muestra en la tabla 3.1, establecen que la temperatura máxima de salida del líquido de enfriamiento es de 93°C (200°F), la cual se encuentra por debajo de la temperatura de ebullición del agua (100°C) a 1 atm de presión. Por lo tanto, el aporte del m-etilenglicol para incrementar el punto de ebullición resulta poco beneficioso al sistema, ya que al aumentar éste por incremento en el porcentaje de m-etilenglicol, se estaría disminuyendo la capacidad calorífica del líquido de enfriamiento y de esta manera disminuiría también la eficiencia del intercambiador de calor.

Tabla 4.8 Capacidad calorífica para distintos porcentajes de m-etilenglicol

%v/v de m-etilenglicol	Capacidad Calorífica cal/g · °C
0	1,00
10	0,96
20	0,92
30	0,87
40	0,83
50	0,79
60	0,75
70	0,71
80	0,66
90	0,62
100	0,58

Los valores de porcentaje de m-etilenglicol mostrados en la tabla 4.7, fueron introducidos en la figura 4.3, con lo cual se obtuvieron los valores de capacidad calorífica para cada refrigerante. Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 4.9.

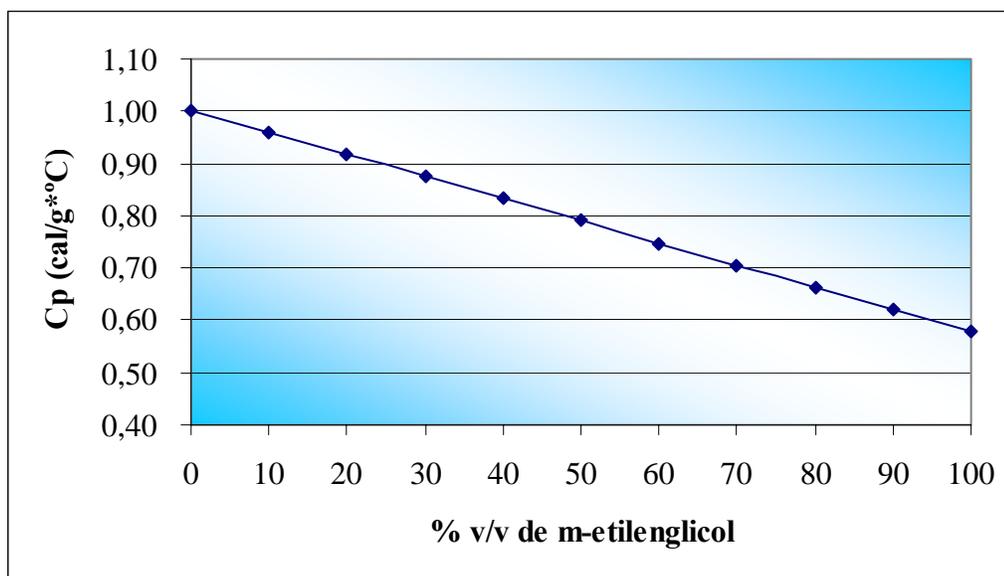


Figura 4.3 Capacidad calorífica vs % v/v de m-etilenglicol

Tabla 4.9 Capacidad calorífica para los refrigerantes estudiados

Refrigerantes	Capacidad Calorífica cal/g · °C
A	0,84
B	0,79
C	0,79
D	0,93

De los resultados obtenidos se tiene que el refrigerante que ofrece mayores beneficios de transferencia de calor es el refrigerante D, con una capacidad calorífica de 0,93 cal/g°C, debido a que contiene menor porcentaje de m-etilenglicol (17,07%), seguido por el refrigerante A con una capacidad calorífica de 0,84 cal/g°C y por último los refrigerantes B y C con una capacidad calorífica de 0,79 cal/g°C.

4.1.2.5 Determinación de la tendencia a formar espuma

El contenido de m-etilenglicol y las sales agregadas al refrigerante para la inhibición, son responsables de la formación de espuma del refrigerante. Aquel refrigerante cuya tendencia a la formación de espuma sea alta provocará problemas de corrosión por picadura (figura 2.7), debido a que la bomba de agua se expone a cavitación, por la aspiración en vacío que se produce cuando el agua u otro líquido refrigerante pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido.

Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo componen cambien inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o cavidades. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan (el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, aplastándose bruscamente las burbujas) produciendo una estela de gas y un rápido desgaste de la superficie que origina este fenómeno.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido, éstas pueden disiparse en la corriente del líquido o pueden chocar con una superficie. Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse metalúrgicamente y se inicia una erosión que, además de dañar la superficie, provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando implosionan, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida.

Por esta razón el líquido refrigerante debe ser pasivado de tal manera que no genere espuma mientras circula por el sistema de enfriamiento.

En la tabla 4.10 se observan los volúmenes de espuma alcanzados por cada muestra durante la prueba, siendo los mejores valores aquellos cuyo volumen alcanzado de espuma sea menor a 150mL y que el tiempo de ruptura de la misma sea en un tiempo no mayor a 5 segundos. De acuerdo a los volúmenes observados en la tabla 4.10, los refrigerantes B y D cumplen con los requerimientos establecidos en la norma ASTM D-1881-97 (Reaprobada 2002), mientras que para los refrigerantes A y C no se pudo obtener los volúmenes de espuma ya que se interrumpió la prueba antes de culminar debido a que el nivel máximo del cilindro (1000mL) fue alcanzado y rebosado. La espuma es originada por las sales utilizadas como inhibidores, las cuales están contenidas en los refrigerantes; adicionalmente, el m-etilenglicol

también origina espuma, por esta razón, los refrigerantes que contienen m-etilenglicol y/o sales disueltas, deben ser tratados con antiespumantes para minimizar la formación de espuma.

Tabla 4.10 Nivel de espuma alcanzado y tiempo de ruptura para cada muestra

Refrigerantes	Volumen de Espuma (mL)	Tiempo de Ruptura (s)
A	**	**
B	20	4,7
C	**	**
D	28	3,5

** : No pudieron ser medidos.

4.1.2.6 Determinación de la Corrosividad

El análisis de la velocidad de corrosión es una de las pruebas más importantes y determinantes a la hora de evaluar líquidos refrigerantes, ya que si se mantiene controlada la corrosión se alarga la vida útil del sistema de enfriamiento y por ende del motor.

En la tabla 4.11 se observan los valores de masa obtenidos durante la prueba de corrosión y en la tabla 4.12 se observa la variación de masa que sufrió cada lámina. Los valores negativos en la tabla 4.11 significan que la lámina tuvo ganancia de masa debido a que las sales disueltas en los refrigerantes (anticorrosivas), reaccionan con la superficie del metal, formando una película que impide la interacción entre el fluido y el metal, protegiéndolo contra los ataques del medio. Al finalizar la prueba, las láminas son limpiadas con la finalidad de pesarlas para obtener la masa perdida de cada lámina, y de esa manera se observa si la lámina es atacada o no por la corrosión. Al momento de limpiar las láminas, parte de las partículas que se encontraban formando la película protectora permanecieron adheridas al metal aumentando el peso de las láminas con respecto al peso inicial. Los valores en rojo significan que la pérdida de masa de las láminas fue superior al valor máximo que especifica la prueba. Es de resaltar que durante la aplicación de la prueba no se determinó la velocidad de corrosión, tal y como se expresa en ecuación contenida en la norma; esto debido a que los

valores de pérdida de masa obtenidos fueron determinantes y no fue necesario ahondar más en los resultados.

Tabla 4.11 Valores de masa obtenidos para diferentes láminas en la prueba de corrosión

Lámina	Refrigerante evaluado	Peso (g) al inicio de la prueba			Peso (g) al final de la prueba			Diferencia (mg)
		1	2	P	1	2	P	
				rom.			rom.	
Cobre	A	1 6,7610	1 6,7604	1 6,7608	1 6,7577	1 6,7580	1 6,7579	2,9
	B	1 6,7622	1 6,7613	1 6,7618	1 6,7670	1 6,7670	1 6,7670	-5,2
	C	1 6,7844	1 6,7838	1 6,7840	1 6,7569	1 6,7574	1 6,7572	26,9
	D	1 6,2940	1 6,2928	1 6,2932	1 6,2933	1 6,2935	1 6,2934	-0,2
Bronce	A	1 6,4336	1 6,4332	1 6,4335	1 6,4140	1 6,4146	1 6,4143	19,2
	B	1 6,5777	1 6,5769	1 6,5771	1 6,5786	1 6,5786	1 6,5786	-1,5
	C	1 6,3808	1 6,3807	1 6,3806	1 6,3150	1 6,3152	1 6,3151	65,5
	D	1 6,4772	1 6,4760	1 6,4765	1 6,4768	1 6,4767	1 6,4768	-0,3
Soldadura	A	1 6,6816	1 6,6811	1 6,6813	1 6,6171	1 6,6175	1 6,6173	64,0
	B	1 6,5895	1 6,5883	1 6,5888	1 6,5800	1 6,5801	1 6,5801	8,8
	C	1 6,6990	1 6,6981	1 6,6984	1 6,5152	1 6,5159	1 6,5156	182,9

	D	1 6,6255	1 6,6251	1 6,6251	1 6,6240	1 6,6239	1 6,6240	1,1
Alu minio	A	1 3,5232	1 3,5222	1 3,5224	1 3,2453	1 3,2450	1 3,2452	277, 3
	B	1 0,9939	1 0,9926	1 0,9928	1 0,9760	1 0,9770	1 0,9765	16,3
	C	1 0,6850	1 0,6834	1 0,6839	1 0,5983	1 0,5986	1 0,5985	85,5
	D	1 1,2877	1 1,2868	1 1,2869	1 1,2885	1 1,2887	1 1,2886	-1,7
Hier ro	A	3 0,1232	3 0,1228	3 0,1230	3 0,1348	3 0,1348	3 0,1348	-11,8
	B	3 0,3470	3 0,3459	3 0,3463	2 9,8345	2 9,8350	2 9,8348	511, 5
	C	2 9,6145	2 9,6132	2 9,6139	2 9,6445	2 9,6450	2 9,6448	-30,9
	D	3 1,2288	3 1,2279	3 1,2283	3 1,2294	3 1,2299	3 1,2297	-1,3
Acer o	A	1 4,9901	1 4,9890	1 4,9891	1 4,9929	1 4,9926	1 4,9928	-3,6
	B	1 5,0815	1 5,0805	1 5,0808	1 4,3824	1 4,3829	1 4,3827	698, 2
	C	1 5,0622	1 5,0613	1 5,0616	1 5,0856	1 5,0852	1 5,0854	-23,8
	D	1 4,8752	1 4,8748	1 4,8748	1 4,8751	1 4,8750	1 4,8751	-0,2

Tabla 4.12 Variación de la masa (mg) para diferentes láminas en la prueba de corrosión

Refrigerantes	C	Br	Solda	Alu	H	Ac
---------------	---	----	-------	-----	---	----

	obre	once	dura	minio	ierro	ero
A	2, 9	19 ,2	64,0	277, 3	- 11,8	- 3,6
B	- 5,2	- 1,5	8,8	16,3	51 1,5	69 8,2
C	2 6,9	65 ,5	182,9	85,5	- 30,9	- 23,8
D	- 0,2	- 0,3	1,1	-1,7	- 1,3	- 0,2
Especificación (variación de masa en mg)	≤ 10	≤ 10	≤ 30	≤ 30	≤ 10	≤ 10

En un sistema de enfriamiento, los metales procesados más comunes son: hierro, cobre, bronce, estaño, aluminio y acero. El hierro en su estado natural forma diferentes compuestos oxidados, tales como: Fe_2O_3 , FeO , Fe_3O_4 y otros, pero cuando son procesados pierden el oxígeno y quedan como hierro puro, Fe^0 . Cuando en un sistema este metal está expuesto al contacto con el oxígeno presente en el agua, se convierte a su forma natural u oxidada.

Cuando no es controlado en un sistema de enfriamiento, este proceso de corrosión causa dos problemas muy específicos: el primero, falla de equipos, lo que causa costos de reparación y reemplazo, además de costos por paradas de planta y pérdidas de producción; el segundo es la disminución progresiva de la eficiencia del sistema, debido a pérdidas en la transferencia de calor por ensuciamiento con los productos de corrosión.

En la figura 4.4 se observa cómo quedaron los refrigerantes al momento de finalizar la prueba. Si se observa a cada una de las muestras y se comparan con el aspecto que tenían las mismas antes de iniciar la prueba (ver figura 3.7), se puede apreciar que los refrigerantes A y C se tornaron un poco opacos; el refrigerante D no mostró ningún cambio significativo, mientras que en el refrigerante B se observa la presencia de barro marrón, lo cual se debe a la alta corrosión que sufrieron las láminas de hierro y acero expuestas a este refrigerante, tal y como se presenta en la tabla 4.12.



Figura 4.4 Aspecto de los refrigerantes al final de la prueba de corrosividad

En la figura 4.5 se observan las láminas de cobre utilizadas en cada muestra, donde se nota que la lámina utilizada en la muestra C quedó sin cambio de coloración aparente, sin embargo fue la que sufrió mayor desgaste de acuerdo a los datos mostrados en la tabla 4.11.



Figura 4.5 Aspecto de las láminas de cobre al final de la prueba de corrosividad

En la figura 4.6 se observan las láminas de bronce expuestas a cada refrigerante. Comparando los resultados mostrados en la tabla 4.12 se puede notar que en el refrigerante C la lámina sufrió el mayor desgaste para las láminas de bronce expuestas a los cuatro

refrigerantes; en segundo lugar para la lámina expuesta al refrigerante A, aunque en menor cantidad, pero también fuera de especificación. En los refrigerantes B y D no se observa ataque a esta lámina.

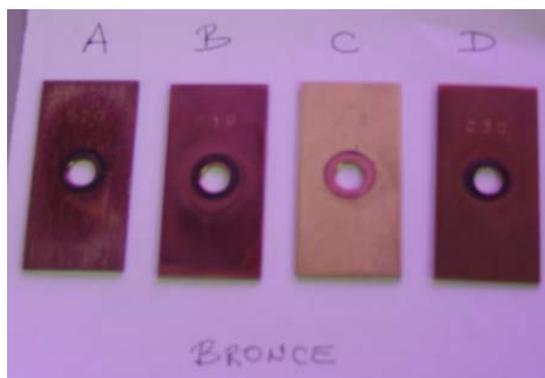


Figura 4.6 Aspecto de las láminas de bronce al final de la prueba de corrosividad

Es importante resaltar que el líquido refrigerante debe ofrecer protección contra la corrosión del bronce, ya que éste es el material con el que se fabrican los tubos de los intercambiadores de calor y los impulsores de la bomba de agua, utilizados en el sistema de enfriamiento de los motocompresores.

En la figura 4.7 se observan las láminas de soldadura utilizadas, observándose un comportamiento muy similar al ocurrido con las láminas de bronce. Los refrigerantes A y C resultan perjudiciales para las uniones de tuberías, mientras que los refrigerantes B y D ofrecen buena protección.



Figura 4.7 Aspecto de las láminas de soldadura al final de la prueba de corrosividad

En la figura 4.8 se presentan las láminas de aluminio utilizadas, observándose un comportamiento similar al observado en las láminas de bronce y de soldadura. Los refrigerantes A y C no ofrecen protección al aluminio, mientras que los refrigerantes B y D ofrecen buena protección. Es de resaltar que el sistema de enfriamiento en su diseño no contempla piezas que contengan aluminio como material de fabricación.

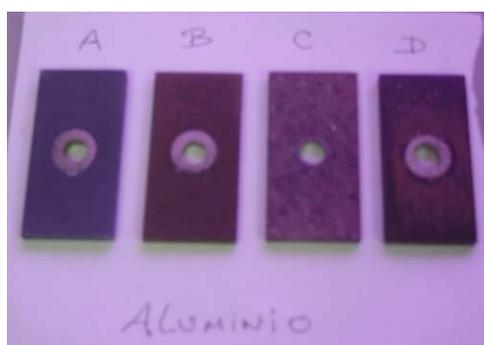


Figura 4.8 Aspecto de las láminas de aluminio al final de la prueba de corrosividad

En las figuras 4.9 y 4.10 se observan las láminas de hierro y acero respectivamente, siendo el refrigerante B el único en no ofrecer protección para estos materiales. Es de resaltar que la mayoría de las piezas y partes del sistema de enfriamiento de estos motocompresores es fabricada de acero o de hierro.

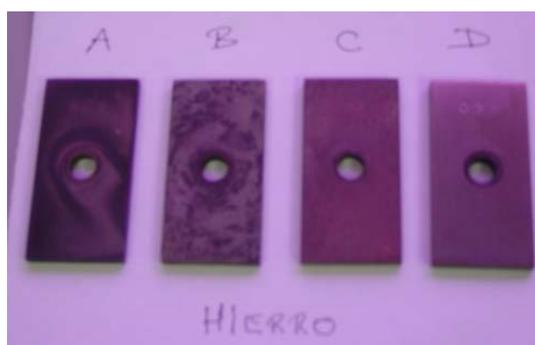


Figura 4.9 Aspecto de las láminas de hierro al final de la prueba de corrosividad

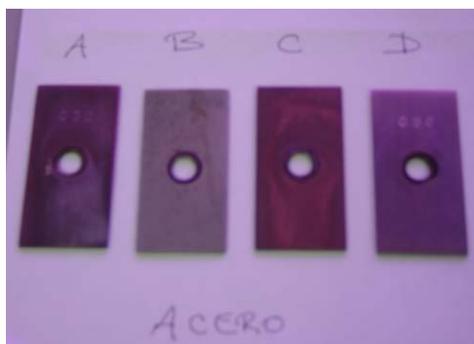


Figura 4.10 Aspecto de las láminas de acero al final de la prueba de corrosividad

De los refrigerantes analizados, únicamente el refrigerante D cumplió con las especificaciones de la prueba de corrosión, de acuerdo a norma ASTM D-4985, ya que ofrece buena protección a todas las láminas analizadas.

4.1.3 Selección del producto

Para la selección del producto se toma como base los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización de los distintos refrigerantes. Para ello se seleccionó el producto que cumple con los requerimientos del sistema de enfriamiento de los motocompresores. En la tabla 4.13 se muestra la matriz de evaluación utilizada.

Tabla 4.13 Matriz de evaluación para la selección del producto

Pruebas	MUESTRAS			
	A	B	C	D
Temperatura de ebullición	Cumple	cumple	cumple	cumple
pH	Cumple	no cumple	no cumple	cumple
Reserva alcalina	Cumple	no cumple	no cumple	cumple

Gravedad específica	Cum ple	cum ple	cump le	c umple
% m-etilenglicol	no cumple	no cumple	no cumple	c umple
Capacidad calorífica	no cumple	no cumple	no cumple	c umple
Formación de espuma	no cumple	cum ple	no cumple	c umple
Protección a la corrosión	no cumple	no cumple	no cumple	c umple

De acuerdo a los resultados obtenidos se seleccionó el refrigerante D (Cel Cool MP), ya que es el único en cumplir con todos los requerimientos de los equipos.

4.1.4 Condiciones de operación del sistema de enfriamiento utilizando el refrigerante seleccionado.

En la tabla 4.14 se presentan los resultados de operación obtenidos utilizando refrigerante D en el sistema de enfriamiento.

Comparando las condiciones de operación del sistema de enfriamiento con el refrigerante seleccionado (tabla 4.14) con las condiciones de operación del sistema de enfriamiento utilizando agua (tabla 3.2) se obtuvo lo siguiente:

La temperatura de entrada al motor disminuye desde 179,2°F (82°C) hasta 149,2°F (65°C) y la temperatura de salida disminuye desde 191,8°F (89°C) hasta 171,4°F (77°C). Con la disminución de las temperaturas de operación del motor se alarga la vida útil de las piezas, con lo que disminuyen los tiempos de parada del motor. Las temperaturas de operación del motor disminuyen debido a la limpieza del sistema de enfriamiento y a la sustitución de los tubos del radiador y del intercambiador de calor agua-aceite, con lo cual se incrementa la eficiencia del sistema de enfriamiento.

Sin embargo, la elección correcta del refrigerante es lo que garantiza que posteriormente no ocurran obstrucciones en las tuberías por precipitación de sales, fugas de líquido por desgaste de los sellos, colapso del sistema de enfriamiento por corrosión de piezas o partes u otras fallas asociadas al refrigerante.

La durabilidad de las distintas piezas que componen el motor está directamente asociada con el refrigerante, ya que los materiales pierden propiedades y sufren desgaste prematuro si el calor generado por la fricción, por la combustión del motor y por el proceso de compresión, no es retirado de manera eficiente.

Si se observa en la tabla 3.2, la temperatura de salida del agua de 191,8°F en condiciones iniciales (utilizando agua), está cercana a la temperatura máxima de salida del agua sugerida por el fabricante (tabla 3.1) de 200°F, lo cual quiere decir que el sistema se encontraba trabajando casi en condiciones extremas. Al sustituir el refrigerante por el seleccionado y acondicionar el sistema, se obtuvo una temperatura de salida del agua de 171,4°F, con lo que se garantiza un mejor funcionamiento del equipo.

Tabla 4.14 Datos operación del motocompresor utilizando refrigerante D en el sistema de enfriamiento

Fecha	R. P.M.	Temperatura Agua Motor		Presiones de succión y descarga para cada etapa de compresión (psi)							Temperaturas de succión y descarga para cada etapa de compresión (°F)						
		Ent. nt. (°F)	Sal. al. (°F)	Aceite	Etapas							Etapas					
					Succión	ra. Sal. 1	da. Ent. 2	da. Sal. 2	ra. Ent. 3	ra. Sal. 3	Succión	ra. Sal. 1	da. Ent. 2	da. Sal. 2	ra. Ent. 3	ra. Sal. 3	
14/06/04	8:20	50	75	40	64	65	58	60	50	25	8	05	82,8	19	00,2	28	34,6
15/06/04	8:25	48	70	11	62	62	55	59	45	28,5	8	06	85,9	19,5	05,1	30	32,1
16/06/04	8:30	50	70	04	64	64	56	60	50	28	8	05	82,8	20	02,3	28	30,4
17/06/04	8:30	48	72	24	63	63	55,5	58	50	29	8	04	83,6	20	02,3	30	35,2
18/06/04	8:25	50	70	04	63	63	55,5	61	52	28	8	05	83,8	19	02,6	25,5	30,2
Pro medio	8:26	49,2	71,4	0,6	63,4	63,4	56,0	59,6	49,4	27,7	8	05,0	83,8	19,5	02,5	28,3	32,5

4.2 Conclusiones

1. El agua utilizada en el sistema de enfriamiento presenta una tendencia altamente corrosiva y un potencial incrustante elevado.
2. Los refrigerantes A y D tienen mejores capacidades reguladoras del pH.
3. Los refrigerantes B y D no originan espuma.
4. El refrigerante D posee mayor capacidad calorífica (0,93 cal/g°C), que el resto de los refrigerantes estudiados: A(0,84 cal/g°C), B(0,79 cal/g°C) y C(0,79 cal/g°C).
5. De los refrigerantes estudiados, sólo el refrigerante D ofrece buena protección anticorrosiva.
6. El refrigerante D es el único, de los refrigerantes estudiados, que cumple con todos los requerimientos del sistema de enfriamiento de los motocompresores.
7. Con la utilización del refrigerante D en el sistema de enfriamiento se disminuyen las temperaturas de operación del motor.

4.3 Recomendaciones

1. Implementar el uso del refrigerante D o uno con características similares en los demás motocompresores del Distrito.
2. Realizar limpieza de las líneas del sistema de enfriamiento, así como los enfriadores y corregir las fugas de líquido antes de la implementación del producto.
3. Revisar los tubos de los intercambiadores, sustituyendo los tubos dañados y aquellos en los que se note posible daño.
4. Realizar seguimiento a las propiedades del refrigerante semanalmente y a las condiciones de operación del motocompresor, con lo cual se identificaría cualquier desviación del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

[1] O. López, **“Diseño de un Sistema de Enfriamiento Portátil para los Motocompresores White Superior de la Gerencia de Plantas Sur. PDVSA. San Tomé”**, Tesis de Grado, Coordinación de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional del Táchira, San Cristóbal (2002)

[2] A. Luna, **“Rediseño del Sistema de Enfriamiento de Aceite del Motocompresor White Superior K6 de la Planta Limón, e instalación del modelo propuesto. PDVSA, San Tomé, Estado Anzoátegui”**, Tesis de Grado, Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño, Maturín (2003)

[3] T. España, **“Reemplazo del Refrigerante utilizado en el Sistema de Enfriamiento de un Motocompresor Reciprocante”**, Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente, Puerto La Cruz (2004)

[4] H. Espinoza, **“Compresores Reciprocantes. Características, Funcionamiento y Selección”**, guía de trabajo, Universidad de Oriente, Puerto La Cruz (2000)

[5] **“Flujo Natural y Gas Lift”**, Shell de Venezuela LTD, Lagunillas (1971)

[6] P. Godoy, **“Manual de Operaciones de la Planta Guara Este”**, PDVSA, San Tomé (1995)

[7] S. Bustamante, **“Termodinámica y el Concepto de Entropía”**, <http://www.ilustrados.com/publicaciones/epzkapulkkgriqyxj.php> (2004)

[8] L. Sánchez, **“La Primera Ley de la Termodinámica y el Concepto de Calor y Trabajo”**, http://www.me.upvm.edu/fpla/primera_ley.html (2004)



-
- [9] White Superior, **“Manual de Operación”**, USA (2001)
- [10] **“Mejoramiento de la Calidad del Agua de Enfriamiento de Compresores”**, PDVSA, Distrito Anaco (1995)
- [11] Norma ASTM D4985-00a para refrigerante de motores de combustión interna.
- [12] C. Palacios, **“Corrosión”**, Gerencia de Ingeniería de Petróleo, PDVSA, San Tomé (1999)
- [13] J. Costa, **“Curso de Ingeniería Química”**, Editorial Reverté (1994)
- [14] E. Avallone y T. Baumeister III, **“Manual del Ingeniero Mecánico”**, Editorial McGraw-Hill, Novena Edición, Tomo I, España (2002)
- [15] Lipesa, **“Tratamiento Químico del Agua”**, Editorial Impregraf, Caracas (1998)
- [16] L. Gil, **“Fundamentos de Corrosión y Protección de los Metales”**, Fundacite, Ciudad Guayana (2002)
- [17] R. Perry y D. Green, **“Manual del Ingeniero Químico”**, Editorial McGraw-Hill, Séptima Edición, Tomos I y II, España (2001)
- [18] J. Holman, **“Transferencia de Calor”**, Editorial McGraw-Hill, Octava Edición, España (1998)
- [19] D. Kern, **“Procesos de Transferencia de Calor”**, Editorial Continental, Quinta Edición, España (1992)



[20] PDVSA MDP-05-E-01, **“Manual de Diseño de Proceso –Transferencia de Calor- Intercambiadores de Calor- Principio Básicos” (1995)**

[21] B. Karlekar y R. Desmond, **“Transferencia de Calor”**, Segunda Edición, Editorial McGraw Hill, México **(1990)**

ANEXOS

ANEXO A

NORMAS ASTM UTILIZADAS EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

ANEXO A.1

ASTM D-1120-94 (Reaprobada 1998)

Punto de Ebullición de Refrigerantes

ANEXO A.2

ASTM D-1287-91 (Reaprobada 2002)

pH de Refrigerantes

ANEXO A.3

ASTM D-1121-98

Reserva Alcalina de Refrigerantes

ANEXO A.4

ASTM D-1122-97a (Reprobada 2002)

Gravedad Específica de Refrigerantes

ANEXO A.5

ASTM D-1881-97 (Reaprobada 2002)

Tendencia de los Refrigerantes a la Formación de Espuma

ANEXO A.6

ASTM D-1384-01

Prueba de Corrosión para Refrigerantes

ANEXO B

Constantes A y B de los Índices de Estabilidad, así como los Índices con sus respectivas Tendencias

Anexo B.1 Constantes A y B relacionadas con la Temperatura y el Contenido de Sólidos Disueltos

Temperatura (°C)	Constante A
0 (32 °F)	2,6
4 (39,2 °F)	2,5
8 (46,4 °F)	2,4
12 (53,6 °F)	2,3
16 (60,8 °F)	2,2
20 (68 °F)	2,1
25 (77 °F)	2,0
30 (86 °F)	1,9
40 (104 °F)	1,7
50 (122 °F)	1,55
60 (140 °F)	1,4
70 (158 °F)	1,2
80 (176 °F)	1,15
Total de Sólidos Disueltos (ppm)	Constante B
0	9,7
100	9,77
200	9,83
400	9,86
800	9,89
1000	9,90

Anexo B.2 Índices de Estabilidad y sus Tendencias

IL	IR	Tendencias del agua
2,0	< 4	Severa formación de depósitos Agua no corrosiva
0,5	5 a 6	Ligeramente incrustante Medianamente corrosiva
0,0	6 a 6,5	Agua en equilibrio
-0,5	6,5 a 7	No incrustante Ligeramente corrosiva

-	> 8	Extremadamente corrosiva
---	-----	--------------------------

ANEXO C

**HOJA TÉCNICA Y HOJA DE SEGURIDAD DE LOS REFRIGERANTES
ESTUDIADOS**

ANEXO C.1

HOJA TÉCNICA Y HOJA DE SEGURIDAD DEL REFRIGERANTE CICa-38

ANEXO C.2

**HOJA TÉCNICA Y HOJA DE SEGURIDAD DEL REFRIGERANTE CEL COOL
MP**

ANEXO C.3

**HOJA TÉCNICA Y HOJA DE SEGURIDAD DEL REFRIGERANTE IQZ-RM-
610**

