

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

“Análisis de fallas en un sistema de distribución de combustible
de alta presión en una planta de generación eléctrica”

Trabajo de investigación presentado
por Esteban David Mata Lemus
para optar al grado de Licenciado en
Ingeniería Mecánica

Guatemala
2005

BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

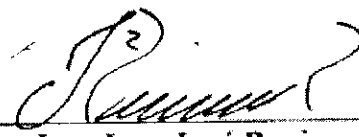
**“Análisis de fallas en un sistema de distribución de combustible
de alta presión en una planta de generación eléctrica”**

Vo.Bo.:

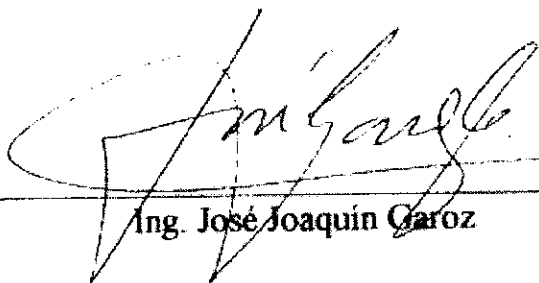
(f) 

Ing. Juan José Recinos


Tribunal:

(f) 

Ing. Juan José Recinos

(F) 

Ing. José Joaquín Garoz

(F) 

Ing. Manuel Ruano

Fecha de aprobación:

17 de octubre de 2005

RESUMEN

El trabajo consistió en un análisis de los distintos tipos de fallas que se presentan en los diversos componentes del sistema de alta presión de distribución de combustible de las unidades de generación instaladas en una planta de generación de electricidad ubicada en Puerto San José, Escuintla.

En este trabajo se definió y determinó las modalidades de falla más comunes presentadas en el sistema de distribución de combustible de las unidades instaladas en la planta, cuantificando la incidencia de éstas en los componentes del sistema para luego plantear las posibles causas que promueven su ocurrencia.

Adicionalmente se describen las características y propiedades del combustible utilizado en la planta, el cual se considera como una nueva fuente energética sostenible debido a las grandes reservas existentes y su bajo costo.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	vi
CONTENIDO	vii
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
 Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
A. Objetivos.....	2
II. LA ORIMULSION®	3
A. Historia.....	3
B. Composición	5
C. Propiedades.....	9
1. Viscosidad.....	9
2. Densidad	11
3. Calor específico	11
4. Conductividad térmica.....	12
5. Estabilidad estática.....	12
6. Estabilidad dinámica.....	15
D. Aplicaciones en plantas de generación	16
1. Estación Generadora New Brunswick Power Dalhousie.....	17
2. Kansas Electric Power Company Osaka No. 4.....	21
III. PLANTAS DE GENERACIÓN CON MOTORES ESTACIONARIOS.....	24
A. Características.....	24
B. Distribución general.....	26
1. Sistema de combustible.....	26
2. Sistema de aire comprimido.....	27
3. Sistema de aceite de lubricación	29
4. Sistema de agua de enfriamiento	31
5. Sistema de aire de carga y de gases de escape.....	34
6. Sistema de vapor.....	35

C.	Combustibles.....	37
IV.	Sistema de combustible en la planta	44
A.	Almacenamiento	47
B.	Transferencia.....	48
C.	Tratamiento	49
D.	Suministro.....	52
V.	Sistema de combustible en el motor	57
A.	Sistema de baja presión.....	57
B.	Sistema de alta presión.....	58
1.	Bomba de inyección de combustible	60
2.	Línea de inyección de combustible.....	61
3.	Válvula de inyección.....	63
4.	Características del diseño Orimulsion®	64
5.	Situación del sistema de combustible en el motor	67
VI.	ANÁLISIS DE FALLAS EN EL SISTEMA DE ALTA PRESIÓN.....	69
A.	Tipos de fallas	69
B.	Registro de fallas.....	71
C.	Análisis del registro de fallas.....	73
D.	Posibles causas.....	81
E.	El nuevo diseño.....	84
VII.	CONCLUSIONES	91
VIII.	RECOMENDACIONES	93
IX.	BIBLIOGRAFÍA	93

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1: Características principales de los combustibles.....	6
Tabla 2.2: Valores típicos y rangos de la composición de Orimulsion® 100 (Bitor Europa, 1994).....	8
Tabla 2.3: Elementos radioactivos presentes en la Orimulsion®.....	8
Tabla 2.4: Valores típicos para la Orimulsion® 400.....	9
Tabla 2.6 Emisiones medidas durante la prueba realizada a la unidad 1 de la planta NB Power Dalhousie.	20
Tabla 6.1: Resultados de la evaluación de la tubería principal de inyección.....	73
Tabla 6.2: Resultados de la evaluación de las piezas de conexión.....	74

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1: Reservas recuperables de bitumen natural en la Faja del Orinoco expresadas en millones de barriles.	3
Figura 2.2: Proceso de producción de la Orimulsion®.....	5
Figura 2.3: Viscosidad aparente de la Orimulsion® 400 en flujo en tuberías a tasas de variación del esfuerzo cortante típicas para la mayoría de las aplicaciones.	10
Figura 2.4: Efecto de la temperatura en la densidad de la Orimulsion® 400.....	11
Figura 2.5: Efecto de la temperatura en el calor específico de la Orimulsion® 400.....	11
Figura 2.6: Efecto de la temperatura en la conductividad térmica de la Orimulsion® 400	12
Figura 2.7: Efecto de la temperatura en la conductividad térmica de la Orimulsion® 400	12
Figura 2.8: Cambio en el diámetro promedio de las gotas de Orimulsion® 400 relativo a su valor inicial bajo condiciones controladas de almacenamiento.	14
Tabla 2.5 Plantas que operan u operaban comercialmente con Orimulsion® hasta Diciembre de 2000.....	17
Figura 2.9: Distribución del tamaño de partículas emitidas por la combustión de Orimulsion® 100 y combustible No. 6 durante las pruebas realizadas en la planta NB Power Dalhousie.	19
Figura 2.10: Carbono en la ceniza de las partículas emitidas por la combustión de Orimulsion® 100 y combustible No. 6 durante las pruebas realizadas en la planta NB Power Dalhousie.	20
Figura 2.11: Valores de emisiones de CO, NO _x y SO ₂ en la planta generadora de Kansai Electric Company Osaka No. 4.....	22
Figura 2.12: Valores de emisiones de partículas, Carbono no quemado y SO ₃ en la planta generadora de Kansai Electric Company Osaka No. 4.....	23
Figura 3.1: Planta flotante tipo barcaza en Puerto Quetzal Guatemala, 114 MW.....	25
Figura 3.2: Esquema general de distribución de una planta de generación con motores estacionarios.....	26

Figura 3.3: Esquema de distribución del sistema de combustible en una planta de generación con motores estacionarios	28
Figura 3.4: Distribución del sistema de aire de arranque.....	29
Figura 3.5: Distribución del sistema de aire de trabajo e instrumentos	30
Figura 3.6: diagrama del sistema de aceite de lubricación	31
Figura 3.7: Sistema completo de aceite de lubricación.....	32
Figura 3.8: Sistema de agua de enfriamiento: alta temperatura.....	33
Figura 3.9: Sistema de agua de enfriamiento: baja temperatura.....	33
Figura 3.10: Distribución del sistema de agua de enfriamiento de la planta.	34
Figura 3.11: Sistema de aire de carga	35
Figura 3.12: Sistema de gases de escape.....	36
Figura 3.13: Sistema de vapor	37
Figura 3.14: Distribución de los equipos auxiliares dentro de la planta.....	38
Figura 3.15: Venta de unidades del segmento de 1-5 MW.....	39
Figura 3.16: Proceso de combustión de los motores a gas encendidos por chispa.....	39
Figura 3.17: Balance energético para motores duales	40
Figura 3.18: Principio de operación de la modalidad gas para el motor dual.....	41
Figura 3.19: Principio de operación de la modalidad diesel en un motor dual.....	41
Figura 3.20: Generación de potencia y calor combinados – CHP -.....	42
Figura 3.21: Parámetros de operación de un sistema de generación combinado.....	42
Figura 3.22: Generación de la modalidad trigeneración.....	43
Figura 3.23: Sistema de trigeneración en modalidad de enfriamiento y calefacción	43
Figura 4.1: Unidades Wärtsilä 18V46	45
Figura 4.2: Unidad y sistemas auxiliares dentro de la sala de máquinas.....	46
Figura 4.3: Distribución general de la planta.....	46
Figura 4.4: Tanque de almacenamiento de Orimulsion®	48
Figura 4.5: Diagrama de la unidad separadora	50
Figura 4.6: Distribución de los componentes del tazón de la unidad separadora	51
Figura 4.7: Tanques de combustible en la planta.....	52
Figura 4.8: Sistema de suministro de combustible de la planta.....	53
Figura 4.9: Sistema de combustible en la planta.....	56

Figura 5.1: Sistema de distribución de combustible de baja presión.....	57
Figura 5.2: Sistema de distribución de baja presión en un motor típico.....	58
Figura 5.3: Sistema de distribución de alta presión en el motor.....	59
Figura 5.4: Componentes del sistema de distribución de alta presión.....	60
Figura 5.5: Diagrama de una bomba de inyección.....	61
Figura 5.6: Tubería principal de inyección.....	61
Figura 5.7: Sello generado entre la tubería principal de inyección y la cabeza de bomba	62
Figura 5.8: Pieza de conexión.....	62
Figura 5.9: Sello generado entre la tubería principal de inyección y la pieza de conexión	62
Figura 5.10: Sello generado entre la pieza de conexión y la válvula de inyección.....	63
Figura 5.11: Válvula de inyección del sistema de alta presión.....	63
Figura 5.12: Viscosidad como función de la temperatura de la Orimulsion® invertida ..	65
Figura 5.13: Sistema de combustible “common rail”.....	66
Figura 6.1: Erosión-corrosión en una superficie metálica.....	70
Figura 6.2: Elementos que generan “fretting” en una superficie metálica.....	71
Figura 6.3: Cavitación en una superficie metálica.....	71
Figura 6.4: Patrón de intensidad para un tipo de falla en la sección adyacente al tubo principal de inyección en la tubería de conexión.....	72
Figura 6.5: Proporción de fallas por componente.....	74
Figura 6.6: Secciones de la tubería principal de inyección.....	75
Figura 6.7: Ubicación de fallas en tubería principal de inyección.....	75
Figura 6.8: Incidencia de las modalidades de desgaste en la sección adyacente a la cabeza de bomba de la tubería principal de inyección.....	75
Figura 6.9: Incidencia de las modalidades de desgaste en la sección adyacente a la pieza de conexión de la tubería principal de inyección.....	76
Figura 6.10 Tipos de desgaste en la tubería principal de inyección.....	76
Figura 6.11: Nivel de intensidad para el “fretting” en la tubería principal de inyección .	77
Figura 6.12: Niveles de intensidad de erosión en la tubería principal de inyección.....	77
Figura 6.13: Niveles de intensidad para la tubería principal de inyección.....	77
Figura 6.14: Niveles de intensidad para las fallas en la tubería principal de inyección ...	78

Figura 6.15: Secciones de la pieza de conexión	78
Figura 6.16: Ubicación de fallas en la pieza de conexión.....	78
Figura 6.17: Fallas en la sección adyacente a la tubería principal de inyección de la pieza de conexión	79
Figura 6.18: Fallas en la sección adyacente a la válvula de inyección.....	79
Figura 6.19: Tipos de desgaste en piezas de conexión	79
Figura 6.20: Niveles de intensidad para el “fretting” en la pieza de conexión.....	80
Figura 6.21: Niveles de intensidad de erosión en la pieza de conexión	80
Figura 6.22: Niveles de intensidad de cavitación en la pieza de conexión.....	80
Figura 6.23: Niveles de intensidad de fallas en piezas de conexión.....	81
Figura 6.24: Superficie de la sección cónica de la tubería principal de inyección	82
Figura 6.25: Componentes modificados del sistema de alta presión.....	85
Figura 6.26: Diseño original de la superficie plana de la sección adyacente a la válvula de inyección de la pieza de conexión.	85
Figura 6.27: Diseños de la sección adyacente a la válvula de inyección de la pieza de conexión.....	86
Figura 6.28: Unión modificada de la tubería principal de inyección con la pieza de conexión.....	86
Figura 6.29: Diseño original de la sección cónica de 60°.....	87
Figura 6.30: Nuevo diseño con sección cónica de 90°	87
Figura 6.31: Nueva superficie en la cual actúa la presión de combustible durante la inyección.....	87
Figura 6.32: Presiones de fuga calculadas para la unión pieza de conexión – tubería principal de inyección.....	88
Figura 6.33: Unión tubería principal de inyección – cabeza de bomba.....	89
Figura 6.34: Presiones de fuga calculadas para la unión tubería principal de inyección – cabeza de bomba.....	89

I. INTRODUCCIÓN

Una nueva forma de generación de electricidad ha revolucionado el mercado energético en el mundo, la cual involucra el uso de un nuevo tipo de combustible con características y propiedades que entrevén un futuro prometedor. Entre estas características se pueden resaltar las grandes reservas existentes, las cuales superan las reservas actuales de petróleo en Arabia y sobre todo los bajos costos de explotación y comercialización debido a su no dependencia de la OPEP por ser un combustible no convencional, cotizándose a un precio bastante similar al del carbón mineral.

Este combustible es, en realidad, una emulsión conformada en un 70% de bitumen y en un 30% de agua. Este nuevo combustible fue adoptado como combustible principal de operación en una planta generadora de electricidad en Guatemala, lo cual viene a diversificar el mercado energético local y a ofrecer una alternativa más eficiente y competitiva. De hecho, Guatemala es el primer país de la región con una planta de generación de este tipo, con la cual se pretende demostrar el potencial de esta nueva modalidad de generación.

Las características especiales de este nuevo tipo de combustible generaron que se suscitaran diversas situaciones que involucran fugas de combustible en el sistema de distribución de alta presión de los motores de la planta, las cuales han repercutido en la operación y desempeño de las unidades generadoras y de la planta misma. Este problema se originó como consecuencia de aspectos no considerados en el diseño original del sistema, promoviendo una investigación que resultó en una fase de rediseño.

Durante este trabajo se procedió a evaluar los componentes damnificados para cuantificar la incidencia de las modalidades de las fallas suscitadas y así plantear las posibles causas que generaron este tipo de situaciones en el sistema de distribución de combustible de alta presión de las unidades de la planta de generación.

A. Objetivos

1. Generales

- a. Determinar y definir los tipos de falla más comunes en el sistema de alta presión de distribución de combustible en las unidades instaladas en la Planta de estudio.

2. Específicos

- a. Cuantificar la incidencia de fallas en cada uno de los distintos componentes del sistema de alta presión.
- b. Plantear las posibles causas de las fallas en los distintos componentes del sistema de alta presión de distribución de combustible.

II. LA ORIMULSION®

A. Historia

Orimulsion® es el nombre comercial registrado por Bitor de Venezuela para una emulsión que contiene 70% de bitumen natural finamente disperso en agua. La emulsión se estabiliza por un paquete de aditivos específicamente formulados.

El bitumen es extraído en una zona conocida como Cerro Negro ubicado en la Faja del Orinoco, la cual abarca un área de alrededor de 50,000 kilómetros cuadrados. En esta área existen enormes reservas de bitumen que actualmente se estiman en 270 billones de barriles, cantidad que es comparable a todas las reservas de petróleo conocidas hoy en día, como se puede apreciar en la Figura 2.1. La Orimulsion® es producida por una subsidiaria de Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA), Bitúmenes Orinoco (PDVSA-Bitor) y el nombre de este combustible deriva de la combinación de Orinoco y emulsión.

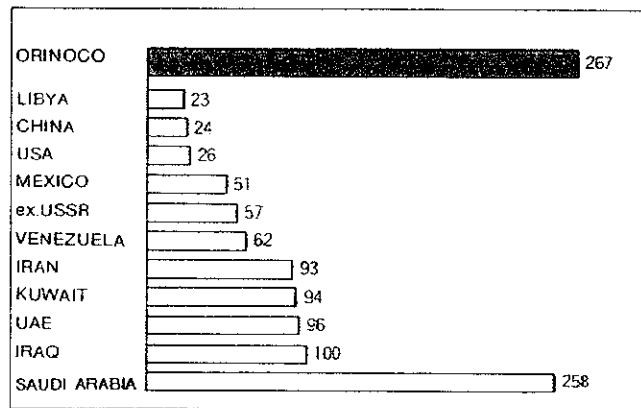


Figura 2.1: Reservas recuperables de bitumen natural en la Faja del Orinoco expresadas en millones de barriles.

Por definición los petróleos que presentan una viscosidad dinámica mayor que 10,000 milipascales segundo se denominan bitumen; y los petróleos más pesados que el agua, es decir con un peso específico superior a los 1,000 kilogramos por metro cúbico se denominan extrapesados. Con estas definiciones se dice que la Faja del Orinoco contiene petróleos extrapesados y bitúmenes.

Fue en mayo de 1985 cuando se realizó un estudio con el fin de establecer las bases técnicas para la explotación, manejo, transporte y quema del combustible que para ese entonces se había denominado con el nombre de bitumen del Orinoco. Se realizó pruebas experimentales para soportar los estudios, las cuales se llevaron a cabo en el plan piloto de combustión.

La primera prueba de combustión con Orimulsion® se realizó en 1985. El mercado principal para la Orimulsion® hasta hoy en día ha sido como combustible para calderas de plantas generadoras de electricidad con más de 3386 MWe de capacidad instalada alrededor del mundo.

Para el proceso de producción de la Orimulsion® primero se extrae el bitumen en una emulsión primaria, la cual es formada y bombeada por una bomba diseñada para este proceso y patentada como "Bomba Morichal". Esta emulsión primaria es bombeada a una estación para su degasificación donde la emulsión es conducida a través de un calentador para facilitar separación del gas del bitumen y para mejorar la estabilidad de la emulsión. Luego es transportada a una estación de proceso donde pasa por una etapa de rompimiento, en la cual se elimina el agua salada que se encuentra químicamente ligada al bitumen, pues éste se formó a partir de millones de micro organismos marinos fósiles cuyo principal componente es el agua de océano. El agua salada es separada mediante el uso de separadores electrostáticos y al concluir el proceso, al bitumen le queda menos del 1% de agua. A este producto se le llama Orinoco, el cual es un bitumen limpio y apto para la manufactura de la Orimulsion®.

Hasta el momento se le ha quitado al bitumen gran cantidad de agua salada con lo que se remueve gran cantidad de sodio. Se procede entonces a mezclar con agua dulce y agentes emulsificantes (surfactante) para formar una Orimulsion® concentrada, la cual es posteriormente diluida hasta obtener las especificaciones finales del producto comercial. Este proceso se puede apreciar de manera simplificada en la Figura 2.2.

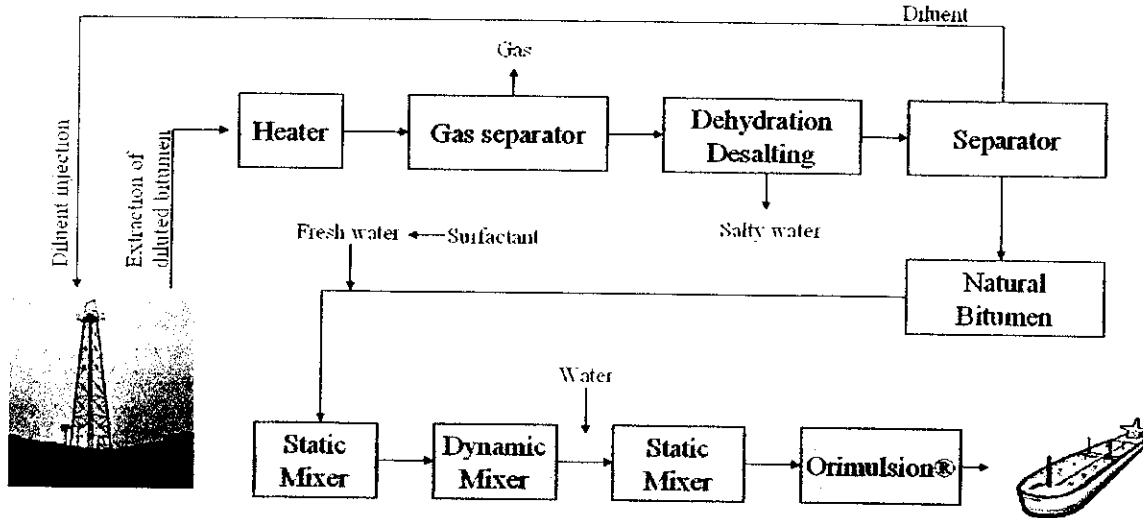


Figura 2.2: Proceso de producción de la Orimulsion®

Este tipo de combustible presenta varias ventajas sobre los combustibles utilizados hoy en día, entre las cuales destacan que por ser denominado como un combustible no convencional se encuentra fuera de la cuota de producción de la OPEP. Además cuenta con una fuente de suministro segura, ya que existen grandes reservas en la Faja del Orinoco y su precio no se cotiza en el mercado bursátil lo cual garantiza su estabilidad.

B. Composición

Las principales características físicas y químicas de la Orimulsion® pueden ser apreciadas en la Tabla 2.1, donde a la vez se pueden apreciar las características del HFO – Heavy Fuel Oil – y del bitumen.

	Orinoco Bitumen	Orimulsion®100	Orimulsion®400	HFO
Density kg/m ³	1003-1017	1090-1130	1090-1130	960
Viscosity mPa s (50°C)	6000-40000	1200 ¹⁾	500 ¹⁾	378
Flash Point °C	120	120	120	124
Pour Point °C	20	3	3	12
Gross calorific value (MJ/kg)	39.8-41.9	29.6-31.0	29.6-31.0	
Net calorific value (MJ/kg)		27.4-28.6	27.4-28.6	40.9
Ash content wt %	0.05-0.15	<0.25	<0.1	<0.1
Carbon wt %	79.0-86.0	80.0		
Hydrogen wt %	9.8-10.8	7.3		
Nitrogen wt %	0.6-0.8	2.7		
Sulphur wt %	3.5-4.0	3.0	3.0	0.97
Vanadium ppm	400-500	<360	<360	20
Sodium ppm	<120	<40	<30	
Water wt %	<1	27-31	27-31	0.95
CCAI	840			824
1) 30 °C shear stress 20 s ⁻¹				

Tabla 2.1: Características principales de los combustibles

Existe información de dos tipos de formulaciones de Orimulsion® las cuales difieren de acuerdo al surfactante utilizado y al uso del Magnesio (Mg) como aditivo para minimizar la corrosión en la superficie de las calderas. La formulación original era conocida simplemente como Orimulsion®, pero luego de la introducción de la nueva formulación en 1998 cada una de éstas se distinguía al denominar a la formulación original como Orimulsion® 100 y a la nueva formulación como Orimulsion® 400.

Actualmente la compañía productora Bitor, ha reemplazado por completo la formulación original de Orimulsion® 100 por Orimulsion® 400, produciendo a la fecha únicamente esta última. Los términos 100 y 400 se refieren a la nomenclatura utilizada por Bitor para los agentes emulsificantes utilizados en las diferentes formulaciones. No se ha producido Orimulsion® 200 o 300.

La Orimulsion® 100 consistía aproximadamente de 70% en peso de bitumen del Orinoco, 29.8% de agua, 0.2% de nonyl phenol ethoxylato como surfactante y aproximadamente 350 ppm de nitrato de magnesio. Por otro lado la Orimulsion® 400 consiste en aproximadamente 70% de bitumen del Orinoco, 29.8% de agua, 0.13% de tridecylalcohol ethoxylate y 0.03% de monoethanolamine como surfactante.

La Orimulsion® 100 consistía de gotas de bitumen en modo simple de aproximadamente 17-18 μm de diámetro, con un valor medio de 10-15 μm de diámetro y con menos del 1% de las gotas mayores a 150 μm de diámetro. En algunas instancias, el valor medio del tamaño de la gota y el porcentaje de gotas mayores a 150 μm se incrementaba bajo ciertas condiciones de operación, pero este cambio no tenía relación con cambios en el desempeño de las calderas o problemas operacionales.

La Orimulsion® 400 es producida con una distribución bimodal de tamaño de Bitumen, con modos de aproximadamente 8 μm y 24 μm de diámetro. La distribución bimodal permite un empaquetamiento más compacto de las gotas de bitumen resultando en una emulsión menos viscosa.

Adicionalmente, se ha sugerido que la distribución bimodal genera un efecto de reacción por etapas en el cual las gotas de menor tamaño se queman más rápido que las de mayor tamaño promoviendo una disminución en las emisiones NO_x y una mejor combustión.

La composición de ambas formulaciones de Orimulsion® es principalmente dependiente de la composición del bitumen de Orinoco del cual son producidas. El bitumen es mezclado con agua para crear una emulsión de aproximadamente 30% agua y 70% bitumen con pequeñas cantidades de agentes emulsificantes. El bitumen de Orinoco es generalmente alto en contenido de azufre, vanadio y níquel, por lo que la Orimulsion® presenta un alto contenido de estos elementos. En la Tabla 2.2 se puede apreciar los valores típicos y los rangos de la composición de la Orimulsion® 100.

Property or Constituent	Typical Value	Typical Range
C, % ⁽¹⁾	60	55-62
H, %	7.3	7-7.5
S, %	2.7	2.4-2.9
N, %	0.5	0.4-0.55
O, %	0.2	0.18-0.6
V, ppm	300	270-340
Ni, ppm	65	60-70
Na, ppm	30	15-50
Mg, ppm	350	300-450
Cr, ppm	1.1	NA ⁽²⁾
Fe, ppm	13	NA
Chloride, ppm	92	NA
Ash, %	0.2	0.12-0.25
Water Content, %	29	27-30
Specific gravity at 15° C	1.0113	NA
Average droplet size, μm	10	8-15
Droplets > 150 μm , %	0.7	0.5-1.5
Gross heating value, 10 ⁵ Btu/lb (MJ/kg)	12.860 (29.9)	12,480-13,340 (29-31)
Net heating value, 10 ⁵ Btu/lb (MJ/kg)	11.870 (27.6)	11,620-13,340 (27-29)

Tabla 2.2: valores típicos y rangos de la composición de Orimulsion® 100 (Bitor Europa, 1994)

Adicionalmente la Orimulsion® contiene varios elementos radioactivos. En la Tabla 2.3 se puede apreciar los valores de los elementos radioactivos presentes en la Orimulsion®.

Isotope	pCi/g
Cobalt 60	< 0.1
Cesium 137	< 0.1
Uranium (natural)	< 0.1
Radium 226	0.1
Radium 228	0.6
Thorium 230	0.5
Thorium 232	0.1
Thorium 228	0.2
Lead 210	0.1
Polonium 210	0.1

Tabla 2.3: Elementos radioactivos presentes en la Orimulsion®

C. Propiedades

En la Tabla 2.4 se puede apreciar los valores típicos establecidos para la Orimulsion® 400.

Characteristics:	Typical Value	Analytical Method or Equipment (1)
Water Content, % w/w	29,00	ASTM D-4006
Density at 15 °C, g/cm ³	1.0090	ASTM D-4052
Median droplet Size, Microns	14.50	Malvern Particle Sizer
Mean droplet Size, Microns	16.60	Malvern Particle Sizer
Droplets > 150 Microns, % w/w	0.20	Sieve Test
Apparent Viscosity at 30°C and 20s ⁻¹ , cP	230	Coaxial Cylinder Viscometer
Apparent Viscosity at 30°C and 100s ⁻¹ , cP	200	Coaxial Cylinder Viscometer
Apparent Viscosity at 70°C and 100s ⁻¹ , cP	80	Coaxial Cylinder Viscometer
Gross Calorific Value, MJ/Kg (BTU/lb)	30.20 (12984)	ASTM D-240
Net Calorific Value, MJ/Kg (BTU/lb)	27.80 (11952)	ASTM D-240, Calculated
Sulphur, % w/w	2.85	ASTM D-1552
Carbon, % w/w	61.80	Elemental analyzer
Hydrogen, % w/w	10.80	Elemental analyzer
Sodium, ppm w/w	12	Atomic Absorption
Magnesium, ppm w/w	6	Atomic Absorption
Vanadium, ppm w/w	320	Atomic Absorption
Pour Point, °C (°F)	3 (37.4)	ASTM D-97
Asphaltenes, % w/w	7.7	ASTM D-3279
Carbon Conradson, % w/w	13.00	ASTM D-189
Nickel, ppm w/w	75	Atomic Absorption
Iron, ppm w/w	5	Atomic Absorption
Ash, % w/w	0,07	ASTM D-482
Minimum Flash Point, °C (°F) (2)	> 95 (> 203)	ASTM D-92
Nitrogen, % w/w	0.5	Chemiluminescence

Tabla 2.4: Valores típicos para la Orimulsion® 400

1. Viscosidad. La Orimulsion® 400 es un fluido no Newtoniano lo cual significa que la viscosidad depende únicamente de la tasa de variación del esfuerzo cortante. La viscosidad de la Orimulsion® 400 se expresa como viscosidad aparente (viscosidad dinámica de fluidos no newtonianos). Los factores que ejercen influencia en esta viscosidad aparente son:

- Tasa de variación del esfuerzo cortante
- Temperatura
- Distribución y tamaño promedio de gotas
- Fracción de peso del bitumen

La Figura 2.3 muestra la viscosidad aparente típica de la Orimulsion® 400 contra la tasa de variación del esfuerzo cortante a diferentes temperaturas para un producto que contiene 70% de bitumen por peso y con un tamaño promedio de gotas menor de 30 micrones para un rango que cubre la mayoría de las aplicaciones. Los valores de viscosidad correspondientes a elevadas temperaturas y tasas de variación del esfuerzo cortante típicas en los quemadores no están incluidos.

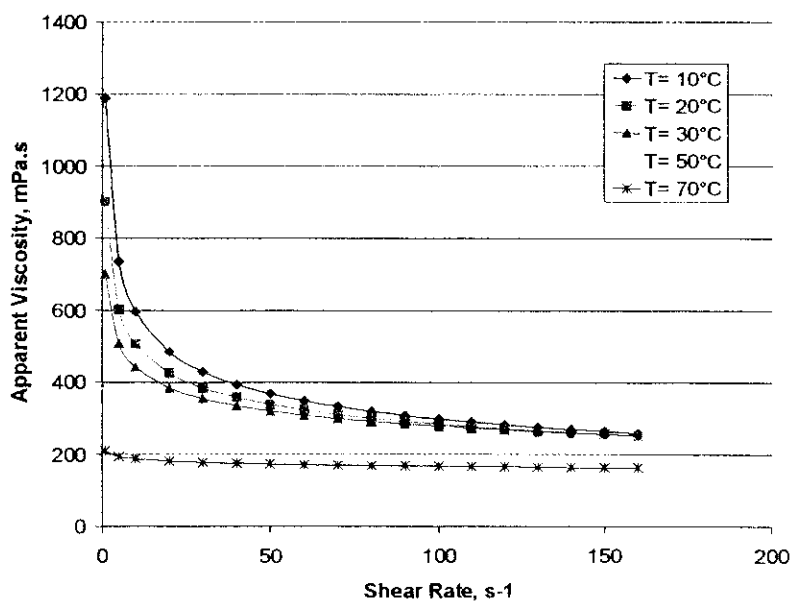


Figura 2.3: Viscosidad aparente de la Orimulsion® 400 en flujo en tuberías a tasas de variación del esfuerzo cortante típicas para la mayoría de las aplicaciones.

A cada temperatura, la viscosidad aparente decrece al incrementar la tasa de de variación del esfuerzo cortante, se dice que el fluido es pseudoplástico. Esta naturaleza

resulta más pronunciada a menores temperaturas y entre valores de tasa de variación de esfuerzo cortante entre 0 y 20 s^{-1} .

La viscosidad aparente de la Orimulsion® 400 a cualquier tasa de variación del esfuerzo cortante decrece al incrementar la temperatura. Este efecto debe ser considerado al diseñar sistemas de manejo de combustible.

2. Densidad. El bitumen del Orinoco presenta una densidad muy similar a la del agua fresca. Esta propiedad tiende a minimizar la cremación y sedimentación de la Orimulsion® 400, aspecto que se discutirá en una sección posterior. En la Figura 2.4 se puede apreciar el efecto que tiene la temperatura en la densidad de la Orimulsion® 400.

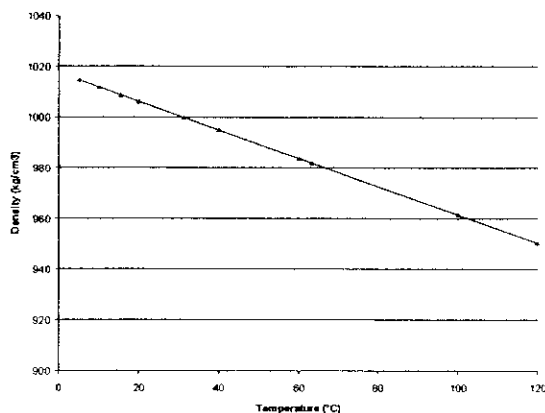


Figura 2.4: Efecto de la temperatura en la densidad de la Orimulsion® 400.

3. Calor específico. En la Figura 2.5 se puede apreciar el comportamiento del calor específico de la Orimulsion® 400 con respecto a la temperatura.

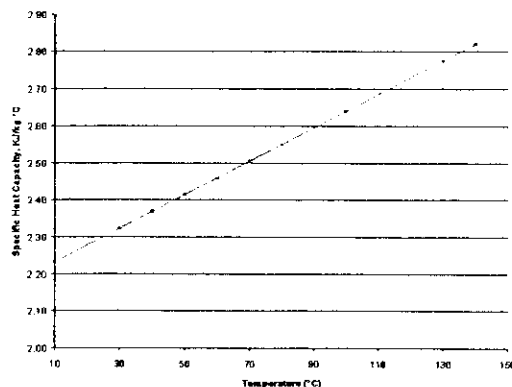


Figura 2.5: Efecto de la temperatura en el calor específico de la Orimulsion® 400.

4. Conductividad térmica. En la Figura 2.6 se puede apreciar el comportamiento de la conductividad térmica de la Orimulsion® 400 con respecto a la temperatura.

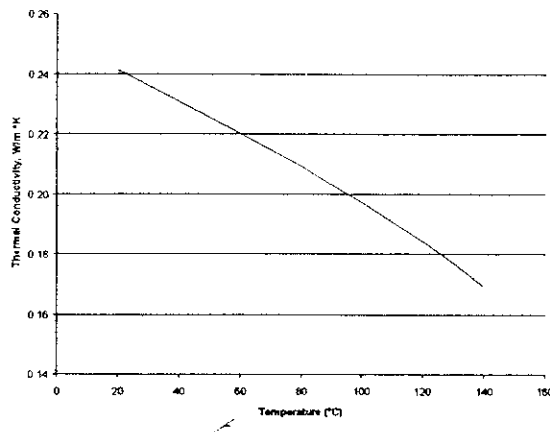


Figura 2.6: Efecto de la temperatura en la conductividad térmica de la Orimulsion® 400

5. Estabilidad estática. La Orimulsion® 400 es una emulsión y como tal puede exhibir algunos cambios estructurales si es sujeta a condiciones extremas de almacenamiento. Los cambios estructurales y los procesos físicos responsables de ellos se describen brevemente a continuación. La Orimulsion® 400 ha sido diseñada específicamente para no exhibir estos cambios bajo condiciones normales de operación. La Figura 2.7 muestra estos procesos de manera esquemática.

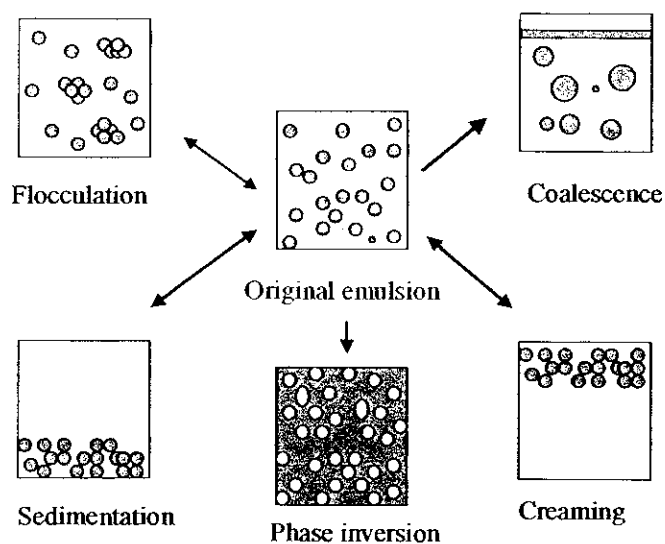


Figura 2.7: Efecto de la temperatura en la conductividad térmica de la Orimulsion® 400

a. Floculación. Es el proceso en el cual las gotas se agrupan manteniendo sus diámetros individuales. Las gotas se mantienen juntas debido a fuerzas de atracción débiles que se generan entre ellas. La atracción que se genera entre las gotas de bitumen en la Orimulsion® 400 es debido a las fuerzas de Van der Waals e interacciones electrostáticas entre las moléculas de surfactante absorbido en las gotas adyacentes.

Cuando se da este efecto de floculación en una emulsión es usual que la viscosidad aparente aumente con respecto a su valor original. Para evitar la floculación, es necesario generar fuerzas de repulsión electrostática por medio de los surfactantes añadidos a la emulsión. La formulación utilizada en la Orimulsion® 400 ha sido expresamente seleccionada para prevenir floculación y su éxito puede ser medido por medio de la viscosidad prácticamente constante que se ha observado durante extensos períodos de almacenamiento que van de 6 a 12 meses.

b. Coalescencia. Es el proceso en el cual las gotas se combinan para formar gotas más grandes. Para que esta unión tenga lugar entre dos o más gotas, éstas deben estar bastante próximas durante el suficiente tiempo para permitir el drenaje de la película de líquido (fase continua) que separa a las gotas para finalmente obtener el contacto a través de la ruptura de la película. Para que esto suceda bajo condiciones estáticas, la capa de surfactante que es absorbida por la superficie de la gota debe ser insuficiente para prevenir las fuerzas de atracción que generan un empaquetamiento más próximo de las gotas para finalmente obtener el drenaje de la película. Este comportamiento no se presenta en la Orimulsion® 400 por diseño. Pruebas de almacenamiento prolongado en condiciones controladas han mostrado que la actividad del surfactante se ha mantenido y la distribución del tamaño de las gotas permanece prácticamente constante como se puede apreciar en la Figura 2.8.

Debe notarse que al deteriorarse la actividad del surfactante debido a contaminación, puede ocurrir coalescencia en cierto grado la cual puede ser detectada por la formación de terrones.

El rompimiento de una emulsión consiste en la coalescencia de las gotas de la emulsión, la cual en última instancia conduce a dos fases líquidas separadas por completo. Este es un proceso irreversible a menos que las dos fases inmiscibles sean mezcladas nuevamente de tal manera que se promueva la emulsificación, de lo contrario las fases permanecerán como un sistema termodinámicamente estable. El rompimiento de una emulsión también se puede dar por la influencia de factores externos como cambios en la temperatura, la contaminación con combustible y por medios mecánicos en algunos casos.

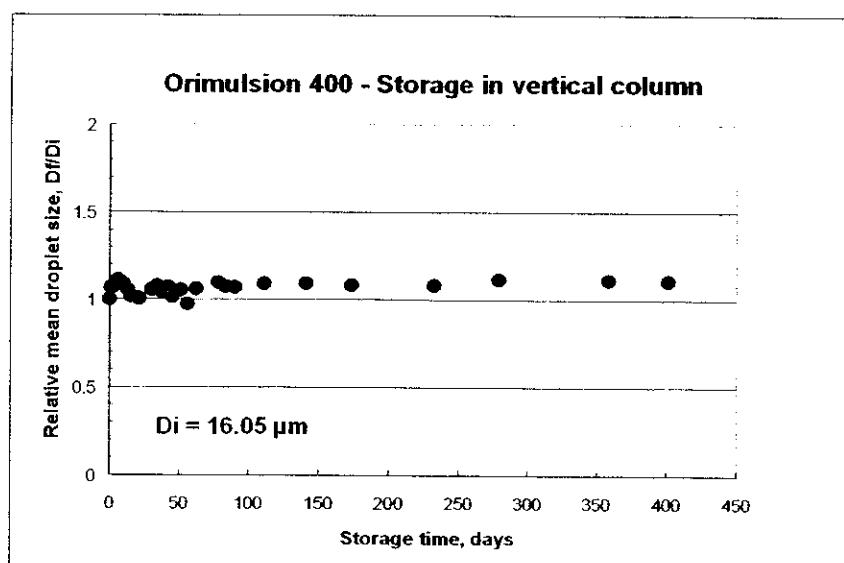


Figura 2.8: Cambio en el diámetro promedio de las gotas de Orimulsion® 400 relativo a su valor inicial bajo condiciones controladas de almacenamiento.

c. Inversión de fase. En el caso de la Orimulsion® 400 significaría un cambio de la dispersión normal del bitumen en agua a una de agua en bitumen. Este tipo de cambio sería un evento catastrófico ya que la viscosidad del producto se incrementaría en varios órdenes de magnitud. Para que se diera esta situación en la Orimulsion® 400 se requiere que sea sometida a una agitación mecánica extrema y/o elevadas temperaturas,

condiciones que no deben darse en las instalaciones de almacenaje o durante operaciones normales de la Orimulsion® 400.

La coalescencia e inversión de fase son procesos irreversibles para la mayoría de aplicaciones prácticas. Por esta razón es imperativo respetar los lineamientos de contaminación establecidos para la Orimulsion® 400 ya que es altamente improbable que el combustible pueda ser reconstituido al haber alcanzado niveles de degradación severos como lo es la producción masiva de coalescencia o inversión.

d. Sedimentación y cremación. Son fenómenos generados por la gravedad. La sedimentación es el asentamiento de partículas o gotas suspendidas mientras que la cremación es el desplazamiento de las mismas hacia arriba. Este fenómeno promueve la formación de dos capas claramente diferenciadas, una de las cuales es más rica en la fase dispersa que la emulsión original.

El bitumen en la Orimulsion® 400 tiene una densidad de masa marginalmente mayor que el agua en la fase continua en la cual está disperso. Por esta razón es posible que ocurra cierta sedimentación durante largos períodos de tiempo en condiciones estáticas. Sin embargo, la alta concentración de la fase dispersa (bitumen) sirve como inhibidor del proceso de sedimentación. La concentración local de gotas de bitumen no afectan la estabilidad del producto ni causa dificultades operacionales ya que el material sedimentado puede ser fácilmente dispersado nuevamente durante el manejo normal.

La cremación no es posible que ocurra en la Orimulsion® 400 con excepción si se introduce por ejemplo aire que pueda causar el flote de las gotas de bitumen. Este tipo de situación debe ser evitada por completo.

6. Estabilidad dinámica. El transporte de Orimulsion® 400 requiere ciertas consideraciones del sistema de manejo de manera que se pueda evitar algún cambio no deseado en la distribución del tamaño de las gotas.

En emulsiones de aceite en agua suficientemente concentradas puede darse coalescencia durante el flujo, donde las gotas se tocan unas con otras en regiones de concentraciones mayores a la nominal donde aplican fuerzas de deformación. Bombas, válvulas y otras restricciones son lugares que promueven el incremento en la concentración de una emulsión ya altamente concentrada. Este empaquetamiento más compacto favorece a coalescencia e incluso la inversión local de la emulsión debido al encapsulamiento del agua. La estabilidad de la Orimulsion® 400 en tales situaciones es consecuencia de la selección apropiada de la formulación del surfactante, distribución del tamaño de las gotas, y fracción de empaquetamiento basado en criterios de prueba que han reflejado y representan un arreglo completo de las condiciones normales y potencialmente más probables de manejo en el campo.

D. Aplicaciones en plantas de generación

La Orimulsion® fue utilizada por primera vez con un carácter comercial en el año de 1991 en dos plantas en el Reino Unido y una en Japón. Actualmente hay una capacidad instalada que supera los 3,500 MWe a nivel mundial de plantas generadoras que utilizan la Orimulsion® como combustible principal.

Actualmente existen plantas generadoras en Canadá, Dinamarca, Italia, Japón, Lituania, Reino Unido y Guatemala que utilizan la Orimulsion® como combustible principal. La Orimulsion® puede ser sustituto tanto del combustible pesado (Heavy Fuel Oil) como del carbón pulverizado.

Actualmente existe un número considerable de calderas en operación comercial que utilizan Orimulsion® como combustible principal. En la siguiente tabla se puede apreciar las plantas que se encontraban en operación comercial o que habían operado comercialmente hasta Diciembre de 2000. Adicionalmente a estas plantas, la Orimulsion® es utilizada como combustible para las calderas auxiliares de una planta de

generación a base de carbón mineral con capacidad de 770 MWe en Alemania. La planta Ibbenbüren utilizará alrededor de 22,000 toneladas de Orimulsion® anuales.

Country	Plant Name	Operation Date ⁽¹⁾	Original Fuel Design	Boiler Design	Plant/Unit Rating (MW)	Orimulsion Consumption, tons/yr
Canada	NB Power Dalhousie #1	1994	Heavy fuel oil	T-fired	105	700,000 ⁽²⁾
	NB Power Dalhousie #2	1994	Pulverized coal	T-fired	215	
Denmark	SK Power Asnaes #5	1995	Pulverized coal	Opposed wall-fired	640	1,400,000
Italy	ENEL Brindisi Sud #1	1997	Pulverized coal Heavy fuel oil	Opposed wall-fired	660	1,500,000
	ENEL Brindisi Sud #2	1999	Orimulsion	Opposed wall-fired	660	1,500,000
	ENEL Fumesanto #3. #4	1999	Pulverized coal Heavy fuel oil	T-Fired	2x320	1,300,000 (total for 2 units)
Japan	Mitsubishi Kasei	1992	Heavy fuel oil	T-fired	70 + steam	300,000
	Kashima-Kita #1	1991	Heavy fuel oil	T-fired	95 + steam	375,000 ⁽²⁾
	Kashima-Kita #2	1994	Heavy fuel oil	T-fired	125 + steam	
	Kansai Osaka #4	1994	Pulverized coal	T-fired	156	200,000
	Hokkaido Electric Shiriuchi	1997	Orimulsion	NA ⁽³⁾	350	100,000
Lithuania	Lietuvos Energija	1995	Heavy fuel oil	Wall-fired	150+steam	150,000
United Kingdom	PowerGen Ince "B" ⁽⁴⁾	1991	Heavy fuel oil	Wall-fired	500	1,300,000
	PowerGen Richborough ⁽⁵⁾	1991	Pulverized coal	NA	3x120	300,000

1. Initial commercial operation date using Orimulsion.

2. Combined consumption, Units 1 and 2.

3. Information not available.

4. Retired, May 1997.

5. Retired, 1996.

Tabla 2.5 Plantas que operan u operaban comercialmente con Orimulsion® hasta Diciembre de 2000.

A continuación se describe brevemente aspectos relevantes de la operación con Orimulsion® de las plantas generadoras mencionadas en la Tabla 2.5.

1. Estación generadora New Brunswick Power Dalhousie. La estación generadora Dalhousie propiedad de New Brunswick Power Corporation ha estado en operación comercial utilizando Orimulsion® desde el otoño de 1994. Esta planta se encuentra ubicada en Dalhousie, New Brunswick, Canadá y tiene dos unidades.

La unidad 1 tiene una capacidad de 103 MWe y fue originalmente diseñada para quemar combustible No. 6 con un contenido de Azufre del 2.6% cuando empezó

operaciones comerciales en 1967. Esta unidad fue diseñada por Combustión Engineering (CE) y tiene 12 quemadores ubicados en 3 niveles.

Por otro lado, la unidad 2 fue diseñada para quemar un tipo de carbón nativo de New Brunswick con un contenido de Azufre del 8%. Esta unidad tiene una capacidad de 212 MWe y empezó operaciones comerciales en 1978.

La conversión de la planta para quemar Orimulsion® inició en 1991 seguida de un período de demostración de 18 meses de operación con Orimulsion® de la unidad 1. Durante el período de prueba se modificó el tamaño de las boquillas de combustible en la unidad 1 para obtener una mayor capacidad de flujo en las mismas. Se incrementó el tamaño en aproximadamente 20% con respecto al tamaño utilizado al quemar combustible No. 6. La unidad fue capaz de generar 98 MWe al utilizar las 12 boquillas corriendo con Orimulsion®, contrastando con los 104 MWe que se alcanzaban a plena carga al utilizar combustible No. 6.

Durante la prueba, la eficiencia térmica de la caldera cayó de 87.2% al utilizar combustible No. 6 a 82.6% utilizando Orimulsion® 100. Esta reducción en la eficiencia se debe al efecto que genera el alto contenido de agua en la Orimulsion® 100 y al incremento en las fallas de la tubería de distribución.

El precipitador electrostático –ESP– estuvo en operación durante todas las pruebas y se logró determinar que a cargas menores del 50%, el ESP lograba una eficiencia de colección mayor del 95%, cayendo aproximadamente a un 86% cuando se operaba a plena carga. Esta caída en la eficiencia se atribuye al incremento en el volumen de flujo del gas (y mayores velocidades de partículas) debido a mayores temperaturas de admisión (450° operando con Orimulsion® 100 y aproximadamente 340°F al utilizar combustible No. 6). Otro factor que se cree contribuye a este efecto es la menor densidad de ceniza que se presenta al utilizar Orimulsion® 100 comparada con el combustible No. 6.

El tamaño de las partículas generadas por la combustión de Orimulsion® 100 durante la prueba resultó ser un 98% en peso menor de 10 μm de diámetro y un 50% en peso menor de 0.3 μm de diámetro. En la Figura 2.9 se aprecia la comparación referente al tamaño de las partículas generadas por la combustión de Orimulsion® 100 con respecto al combustible No. 6.

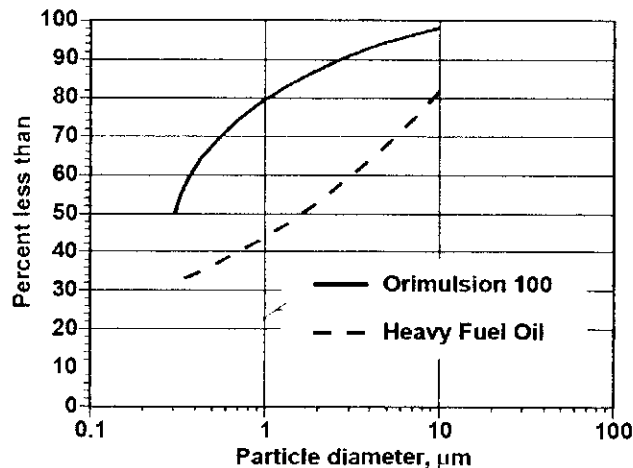


Figura 2.9: Distribución del tamaño de partículas emitidas por la combustión de Orimulsion® 100 y combustible No. 6 durante las pruebas realizadas en la planta NB Power Dalhousie.

La combustión de la Orimulsion® 100 consistió en 16% de S, 11% de V, 2% de C y 1% de Fe, siendo la mayor parte (un 55%) reportada como “otros” (oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y magnesio). Por otro lado, la ceniza del combustible No 6 consistió en 36% de C, 13% de V, 6% de S y 1% de Fe, con un 36% clasificado como “otros”. La ceniza de la Orimulsion® 100 presentó mucho menos carbono que la ceniza del combustible No. 6. Esta comparación puede ser apreciada en la Figura 2.10.

Las emisiones medidas durante la prueba en la planta NB Power Dalhousie pueden apreciarse de manera resumida en la Tabla 2.6.

Al momento de realizar la prueba, la planta Dalhousie no utilizó sistema alguno de desulfurización como el FGD o sistemas de control para emisiones NO_x. Por esta razón los resultados de las emisiones NO_x y SO_x reflejan niveles relativamente elevados.

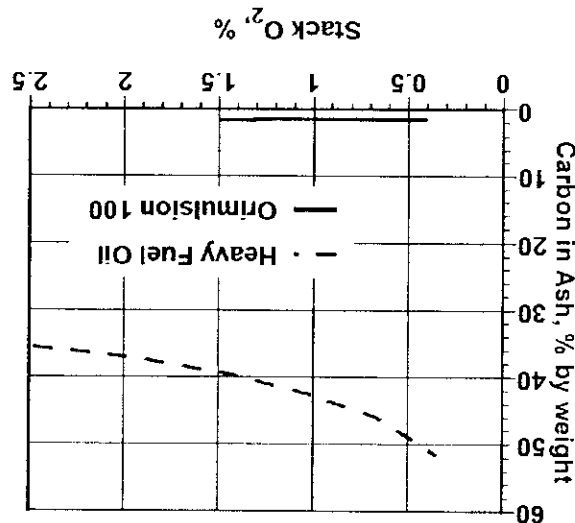
La conversión de la Estación Generadora NB Power Dalhousie para operación permanente con Orimulsion® fue completada en 1994. Como parte de la conversión, se instaló nueva infraestructura para el manejo, almacenamiento y transporte del combustible. De igual manera se instaló un nuevo sistema de desulfurización (FGD) y una planta de tratamiento de agua. Las puntas de los quemadores de la unidad 2 fueron cambiados mientras que los de la unidad 1 permanecieron sin cambio.

Tabla 2.6 Emisiones medidas durante la prueba realizada a la unidad 1 de la planta NB Power Dalhousie.

1. Reported estimated value of PM loading
2. Not available

SO ₂	2-15 ppm	NA ⁽²⁾
SO ₂ (at 3% O ₂ uncontrolled)	2270-2350 ppm	1540-1560 ppm
Particle Size Distribution	98% < 10 µm 50% < 0.3 µm	75% < 10 µm 35% < 0.3 µm
PM (at economizer exit)	250 mg/m ³ at 70 °F	105 mg/m ³ at 70 °F ⁽¹⁾
NO _x (at 3% O ₂ 90 MWe)	180-215 ppm	180-190 ppm
CO (at 0.7% O ₂)	30 ppm	60 ppm
	Orimulsion 100	HFO

Figura 2.10: Carbono en la ceniza de las partículas emitidas por la combustión de Orimulsion® 100 y combustible No. 6 durante las pruebas realizadas en la planta NB Power Dalhousie.



La eficiencia de la caldera resultó ser 82.4% al operar con Orimulsion® 100 y de 87.4% al operar con HFO. La tasa de calor neto para la unidad fue de 10,972 Btu/KW-hr al utilizar Orimulsion® 100 y de 9,743 Btu/KW-hr al utilizar HFO.

El sistema de desulfurización (FGD) se diseñó para reducir las emisiones de SO₂ en un 90% comparado con los niveles que se tenían antes de la conversión. El sistema FGD es un sistema de piedra caliza húmeda que utiliza una sola bandeja de absorción con cinco aspersores en un diseño de contra corriente. El sistema fue diseñado para producir yeso con un mínimo de 92% CaSO₄·2H₂O con Ca y S a una relación estequiométrica de 1.03.

Durante la operación comercial con Orimulsion® 100, las emisiones CO fueron reportadas como 30 ppm o menos. A niveles en la caldera de O₂ menores de 1% se midieron emisiones de NO_x resultando 290 ppm. Las emisiones SO₂ fueron medidas a 200 ppm, valor que contrasta con la concentración de 2300 pm medidas durante la prueba de demostración dando una reducción de aproximadamente un 91%.

En Septiembre de 1998 se hizo la conversión de la planta de la formulación original de Orimulsion® 100 a la nueva formulación de Orimulsion® 400. La formulación de Orimulsion® 400 presentó una disminución significativa en la viscosidad resultando en algunos cambios operacionales para alcanzar la presión óptima de combustible en los quemadores. Durante las seis semanas iniciales de operación con Orimulsion® 400, la planta mostró menores emisiones de CO y NO_x y menos carbono no quemado. Las emisiones de CO se reportaron muy cercanas a cero.

2. Kansas Electric Power Company Osaka No. 4. La caldera de Osaka No.4 de la compañía japonesa Kansai Electric Power fue modificada para operar Orimulsion® en 1994, y los resultados de la conversión fueron reportados en 1996. La caldera con capacidad de 156 MWe fue originalmente diseñada para carbón y combustible en 1960 y quemó únicamente combustible a partir de 1970. Las emisiones CO reportadas tanto para Orimulsion® 100 como para HFO fueron consistentemente menores de 100 ppm para niveles de O₂ que oscilaban entre 0.6 a 3.0%.

Las emisiones de CO para Orimulsion® 100 resultaron ser levemente mayores que para HFO al operar en niveles de O₂ menores de 1%, pero fueron muy similares para los demás valores para ambos combustibles. Las emisiones NO_x fueron de

aproximadamente 120 ppm a 0.6% de O_2 y aproximadamente de 200 ppm a 3% de O_2 al utilizar Orimulsion® 100 y de aproximadamente 80 ppm a 0.8% de O_2 y 120 ppm a 3% de O_2 al utilizar HFO.

Las concentraciones no controladas de SO_2 de la combustión de Orimulsion® 100 fueron reportadas aproximadamente con un valor de 2500 ppm. Las concentraciones de CO, NO_x y SO_2 para Orimulsion® 100, HFO, y bitumen de Orinoco no emulsificado durante la prueba realizada en Osaka No. 4 se muestran en la Figura 2.11.

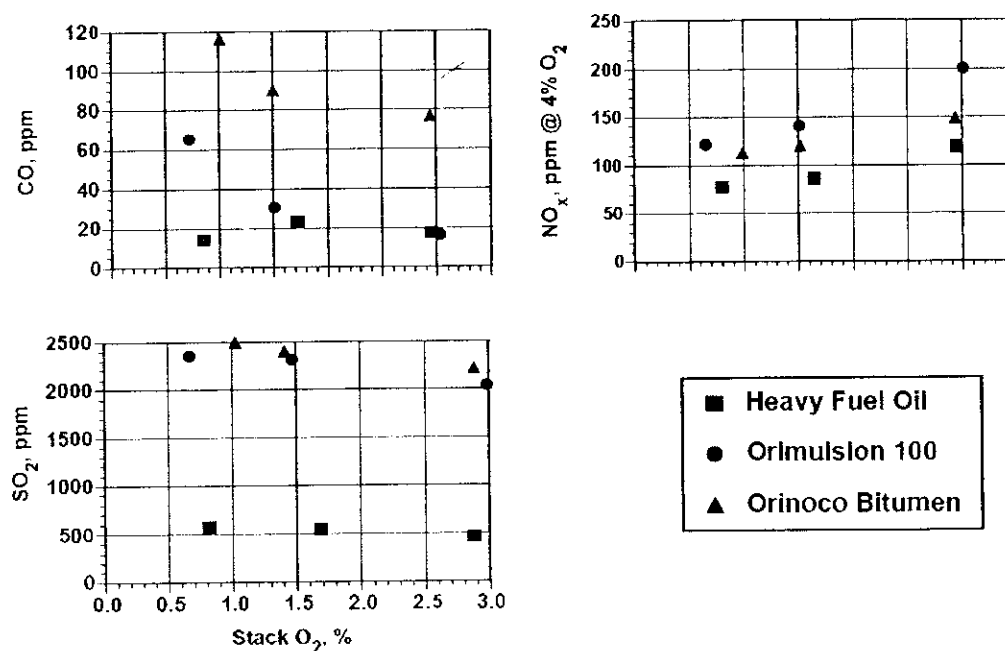


Figura 2.11: Valores de emisiones de CO, NO_x y SO_2 en la planta generadora de Kansai Electric Company Osaka No. 4

Las emisiones de partículas y carbono no quemado en la ceniza de la caldera de Osaka No. 4 medidas durante la operación con Orimulsion® 100, HFO y bitumen de Orinoco no emulsificado mostraron que decrecían al incrementar los niveles de O_2 .

Los niveles de emisión de partículas fueron levemente mayores y los niveles de carbono no quemado fueron aproximadamente iguales al utilizar Orimulsion® 100 comparada con HFO. Los valores de emisiones de partículas, carbono no quemado y SO_3 pueden ser apreciados en la Figura 2.12.

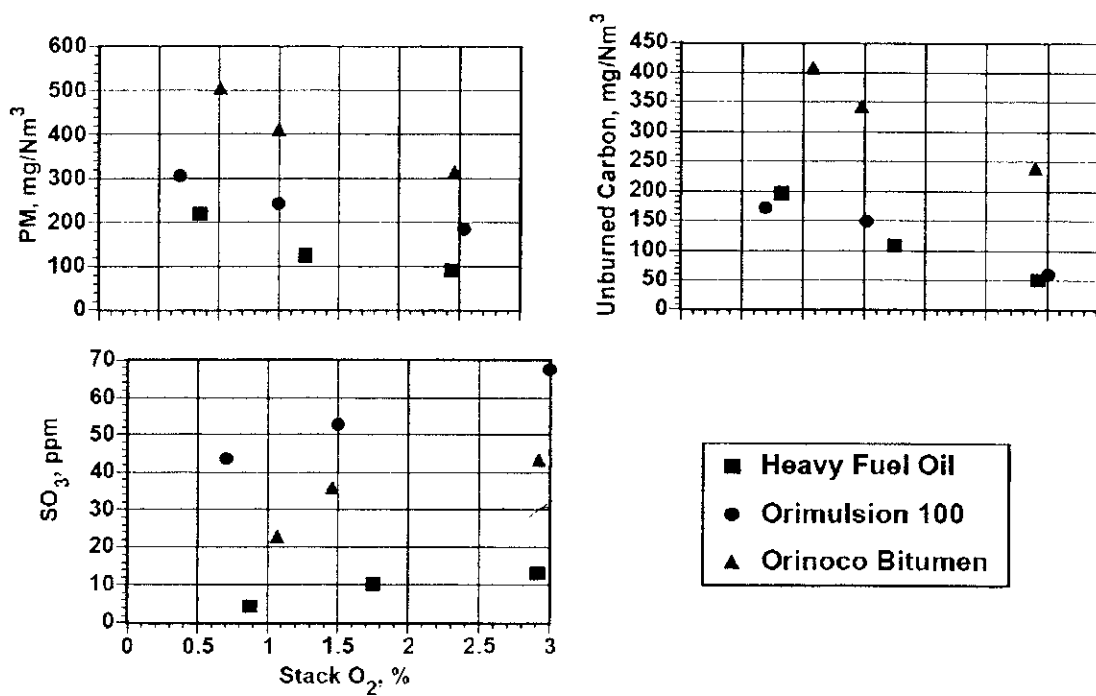


Figura 2.12: Valores de emisiones de partículas, Carbono no quemado y SO₃ en la planta generadora de Kansai Electric Company
Osaka No. 4

III. PLANTAS DE GENERACIÓN CON MOTORES ESTACIONARIOS

A. Características

La generación de electricidad mediante el uso de motores de combustión interna estacionarios representa una modalidad sumamente flexible y versátil, tanto en la aplicación como en la operación.

Este tipo de plantas normalmente abarca un rango de capacidad de generación que oscila entre 1 y 300 MW con la facilidad de adaptarse a las distintas necesidades de generación. Las plantas de generación con motores de combustión interna estacionarios pueden establecerse como plantas de generación base, de generación pico, de generación de reserva, de recuperación de calor y generación de electricidad combinados con la cual se puede alcanzar una eficiencia total mayor al 90%. Además, es posible operar con una amplia variedad de combustibles de acuerdo a la configuración seleccionada.

Por otro lado, el tiempo de construcción, instalación, montaje y puesta en operación de este tipo de plantas es sumamente reducido al ser comparado con los otros tipos de plantas de generación de electricidad conocidos, como es el caso de las plantas hidroeléctricas o de generación con turbinas de vapor cuya puesta en operación puede tardar hasta 5 años o más; mientras que una planta de generación con motores de combustión interna estacionarios puede estar operando comercialmente en un período de 6 meses.

En las instalaciones diseñadas para suplir las necesidades de una planta de generación tipo base, se puede contar con la versatilidad de instalar una planta flotante tipo barcaza para ser instalada en los lugares más demandantes cuando las condiciones locales hacen muy difícil la construcción de una planta estacionaria.

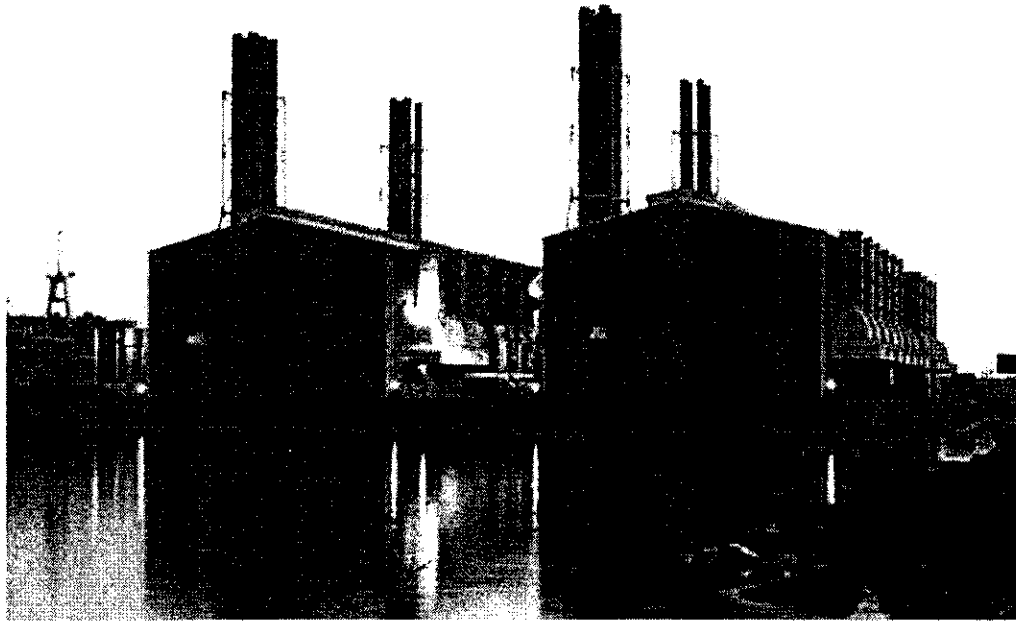


Figura 3.1: Planta flotante tipo barcaza en Puerto Quetzal Guatemala, 114 MW.

En el caso de las instalaciones de generación pico y de reserva se cuenta con la ventaja de poder poner en marcha y generar a plena carga en cuestión de minutos, adaptándose así a las necesidades de generación. Adicionalmente, la configuración de las unidades en las plantas de generación con motores de combustión interna están dispuestas de manera tal que cada unidad no representa más de un 10% de la capacidad total de generación de la planta, confiriendo así la confianza que ante cualquier eventualidad el porcentaje de capacidad de generación afectado no es de gran magnitud como suele suceder en el caso de falla de alguna unidad en una planta de generación con turbina de vapor o de gas, las cuales por lo general representan un gran porcentaje de la capacidad total de generación de la planta.

Por otro lado, se cuenta con la versatilidad y flexibilidad de poder establecer plantas de generación con motores de combustión interna que operen con diferentes combustibles como lo son el diesel, el Light Fuel Oil –LFO–, el Heavy Fuel Oil –HFO–, el gas natural, combustibles emulsificados como la Orimulsion® 400, y combinaciones de éstos como es el caso de plantas con motores Dual Fuel que operan normalmente con gas natural y LFO o HFO.

planificados de larga duración, el LFO se utiliza para evacuar el HFO del sistema de combustible de los motores.

El sistema de combustible está conformado básicamente por los tanques de almacenamiento, las unidades de transferencia y las unidades de alimentación. Un diagrama del sistema se puede apreciar en la Figura 3.3.

Al operar con HFO, éste es bombeado de los tanques de almacenamiento (storage tanks) a los tanques buffer (buffer tanks) mediante la unidad de bombeo de transferencia de HFO (transfer pump unit). De estos tanques el combustible es transferido a los tanques diarios (day tanks) por medio de la unidad separadora de HFO. De los tanques diarios el combustible es bombeado por la unidad alimentadora (feeder unit) al "booster unit". Del "booster unit" el combustible circula al motor. El LFO es bombeado directamente del tanque de almacenamiento al motor por medio de la unidad alimentadora (Feeder Unit).

2. Sistema de aire comprimido. El sistema de aire comprimido consiste de un sistema de aire de arranque y un sistema de aire para instrumentos. La unidad de aire de arranque provee al motor del aire comprimido necesario para iniciar y controlar el motor (30bar). La unidad de aire para instrumentos provee aire de trabajo para instrumentos y auxiliares, mantenimiento y propósitos de limpieza (7bar).

El aire comprimido se genera en compresores de aire de arranque. El aire comprimido es almacenado en recipientes de aire (30 bar) los cuales están equipados con un manómetro y una válvula de seguridad de resorte.

El sistema de aire de arranque consiste esencialmente de un compresor de aire y recipientes de aire de arranque los cuales están instalados fuera de los motores.

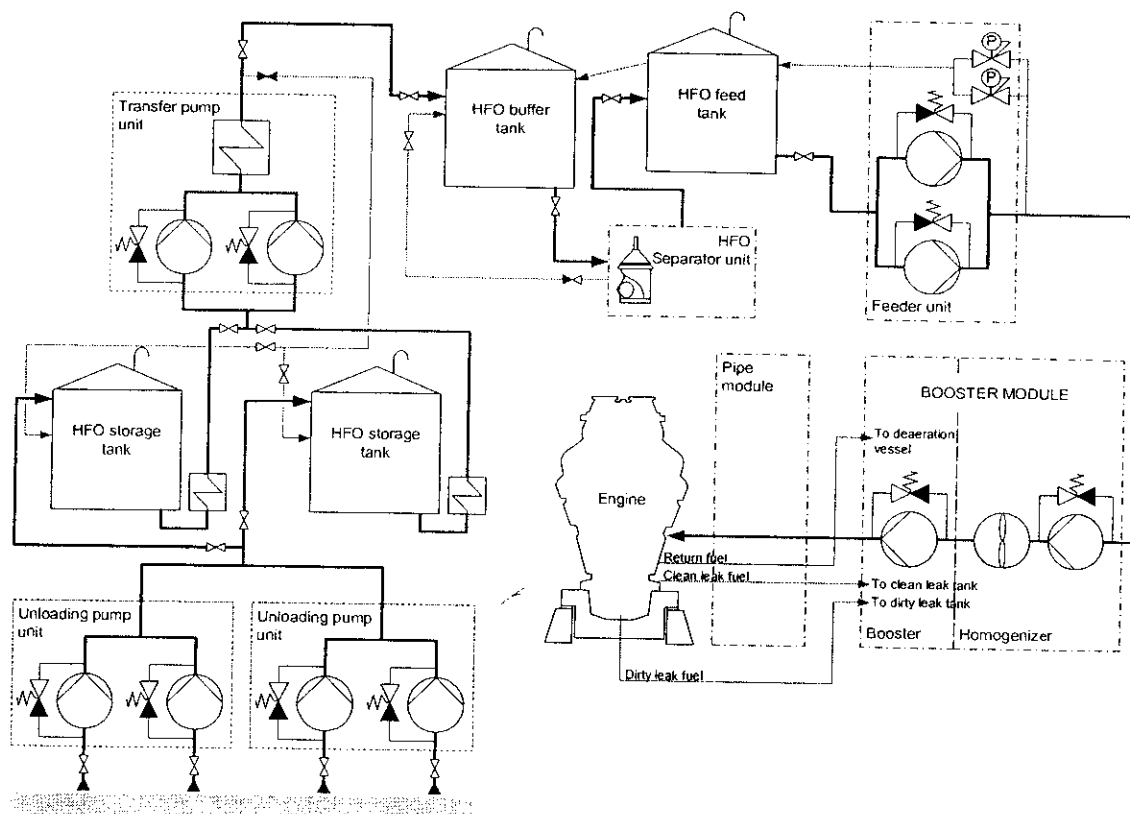


Figura 3.3: Esquema de distribución del sistema de combustible en una planta de generación con motores estacionarios

La función principal del sistema de aire de arranque de la planta es proveer a los motores con la cantidad suficiente de aire comprimido que permita un arranque seguro y confiable. Los motores son arrancados al introducirles aire comprimido directamente en los cilindros. El aire de arranque es generado por los compresores de aire de arranque y luego almacenado en recipientes de aire de 3000 litros hasta que es utilizado para el arranque de algún motor. Un diagrama simplificado del sistema se puede apreciar en la Figura 3.4.

El aire de trabajo e instrumentos para auxiliares es generado en un compresor de aire de instrumentos y almacenado en recipientes de aire (7 bares), los cuales están equipados con un manómetro y una válvula de seguridad. Este es un sistema independiente para proveer aire a todos los controles neumáticos y equipos de seguridad utilizados en la planta. Para tener mayor flexibilidad en la instalación, los compresores de aire de arranque y los de aire para instrumentos se encuentran interconectados. De esta manera

la unidad de aire de arranque puede actuar como unidad de soporte para la unidad de aire para instrumentos en caso de falla, o si el consumo de aire se ha incrementado momentáneamente. Para este propósito se ha instalado una válvula para reducción de presión en la tubería de interconexión de ambos sistemas. Un diagrama simplificado del sistema puede ser apreciado en la Figura 3.5.

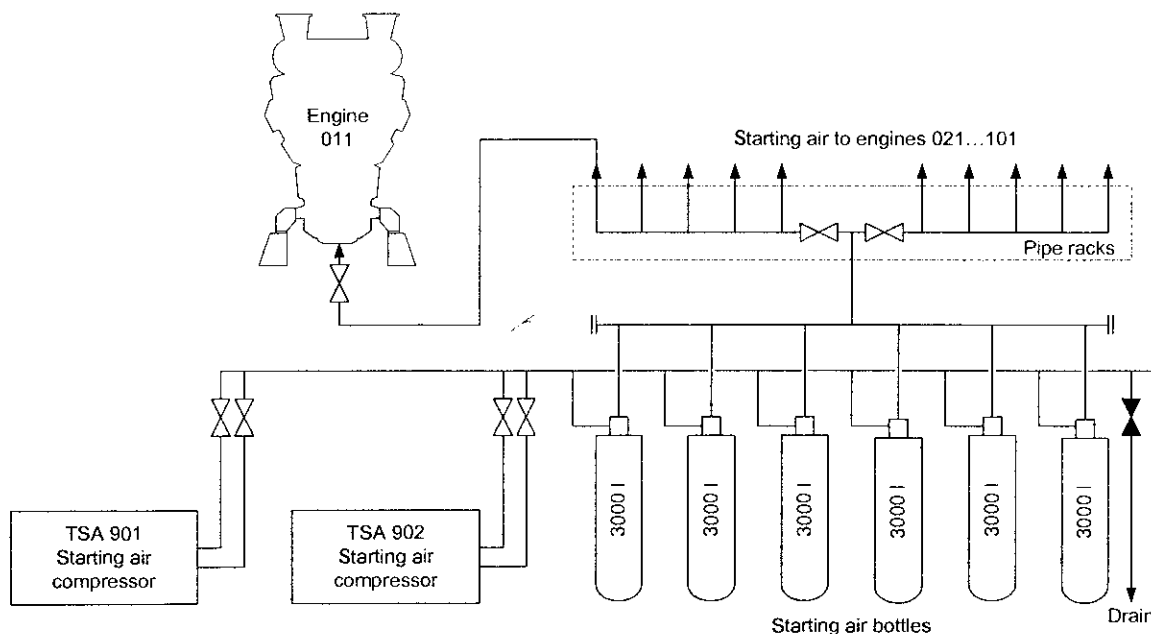


Figura 3.4: Distribución del sistema de aire de arranque

3. Sistema de aceite de lubricación. La función principal del sistema de lubricación es proveer al motor con suficiente aceite lubricante limpio a la temperatura y presión requerida. El aceite lubricante lubrica el motor y remueve el calor (enfía) y contaminantes del proceso de combustión (blow-by del pistón). El funcionamiento adecuado del sistema protege al motor de interrupciones debido a bajas presiones, alta temperatura, niveles bajos de presión de pre lubricación o impurezas en el aceite.

El sistema de aceite lubricante posee circuitos separados para enfriamiento y filtrado, purificación, e incluso para la adición de aceite lubricante al sistema. Adicionalmente se cuenta con un circuito para el drenado de aceite del cigüeñal cuando es necesario para fines de mantenimiento. El segmento principal del sistema de circulación de aceite consta de los siguientes componentes:

1. Bomba de circulación accionada por el motor
2. Bomba de prelubricación
3. Válvula termostática de control
4. Intercambiador de calor
5. Filtro Automático
6. Filtro de seguridad doble
7. Separador de aceite lubricante

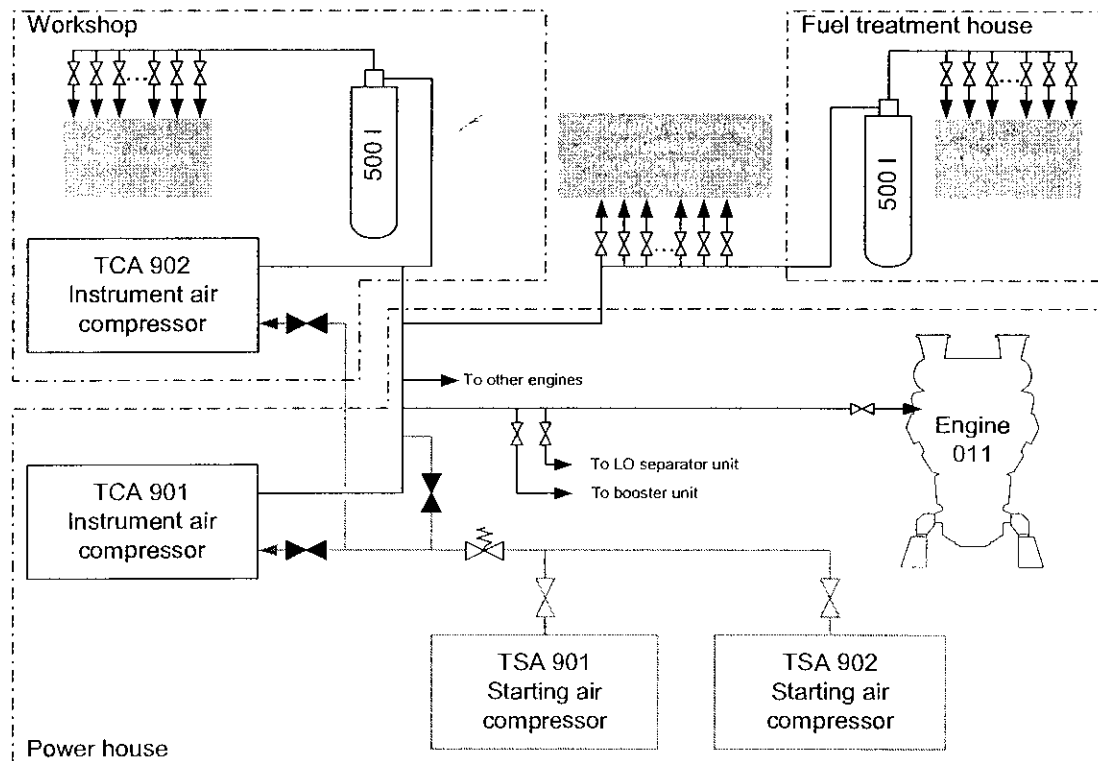


Figura 3.5: Distribución del sistema de aire de trabajo e instrumentos

Un diagrama simplificado del sistema puede ser apreciado en la Figura 3.6.

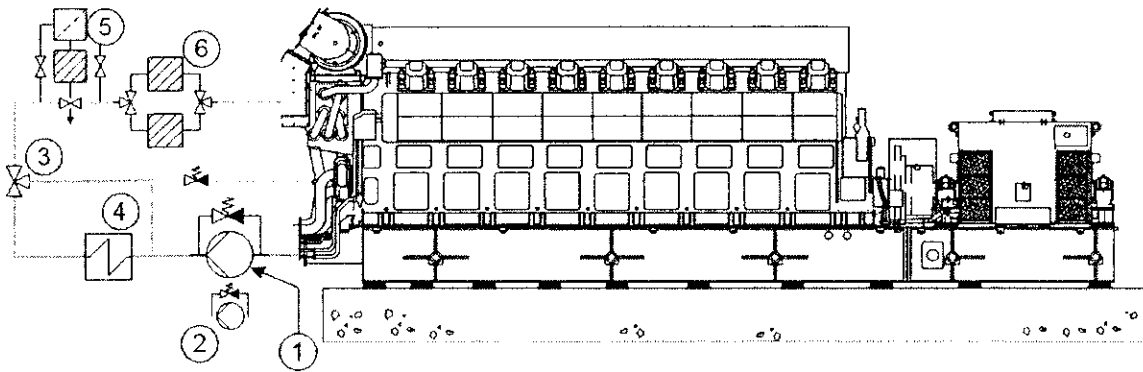


Figura 3.6: diagrama del sistema de aceite de lubricación

De acuerdo a la Figura 3.6, la bomba de lubricación (1) accionada por el motor toma el aceite del cárter y lo bombea a través del intercambiador de calor (4) quien lo enfría con el agua de enfriamiento del motor. La temperatura del aceite es regulada por una válvula termostática de tres vías (3). El aceite fluye y pasa a través del filtro de seguridad y luego a través de un filtro automático antes de entrar a la tubería de distribución dentro del motor.

Para mantener la calidad del aceite lubricante, éste es continuamente removido del cárter del motor y conducido hacia la unidad separadora de aceite lubricante (7) donde el agua y los contaminantes son removidos para retornar nuevamente el aceite al cárter. Un diagrama completo del sistema incluyendo los tanques de almacenamiento puede ser apreciado en la Figura 3.7.

4. Sistema de agua de enfriamiento. La función principal del sistema de enfriamiento es remover el calor generado por el funcionamiento normal del motor. La transferencia de calor al agua de enfriamiento tiene lugar esencialmente en el block, en el turbo y en los intercambiadores de calor de aire de carga.

El sistema de enfriamiento del motor está dividido en un sistema de circulación de alta temperatura y otro de baja temperatura. Cada sistema consta de su propia bomba de circulación y por lo general el enfriamiento del agua tiene lugar en los radiadores. Un diagrama simplificado del sistema puede ser apreciado en la Figura 3.8.

En el sistema de alta temperatura la bomba circula el agua del sistema a través del block del motor, del turbocargador y finalmente hacia los radiadores. El sistema de alta temperatura cuenta con una válvula termostática de tres vías controlada por el sistema de PLC de la planta. Esta válvula tiene un valor de temperatura predeterminado y cuando la temperatura del agua de enfriamiento del sistema se incrementa por encima de este valor, la válvula termostática de tres vías se abre permitiendo un flujo de agua directamente hacia los radiadores. De lo contrario el agua es recirculada al motor.

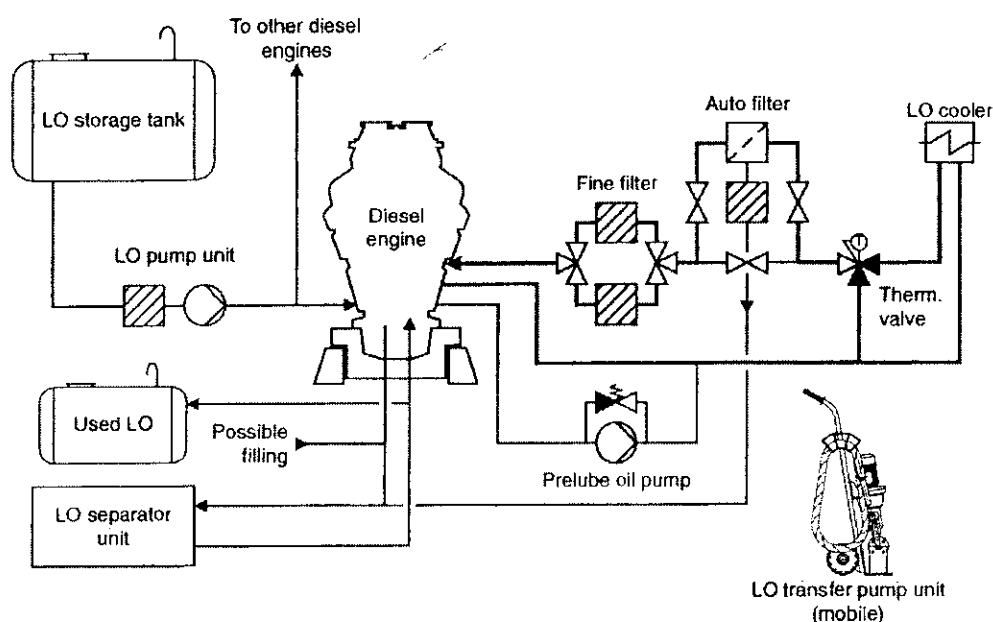


Figura 3.7: Sistema completo de aceite de lubricación

Para el sistema de baja temperatura, la bomba circula el agua a través del intercambiador de aire de carga y del enfriador de aceite lubricante para finalmente enviarlo a los radiadores (sección independiente de los de alta temperatura). La válvula de control termostática mantiene una temperatura estable en el agua de retorno al motor, independiente de la carga del motor. La válvula direcciona el agua hacia los radiadores cuando la temperatura se incrementa por encima del valor establecido. Un diagrama simplificado del sistema puede ser apreciado en la Figura 3.9.

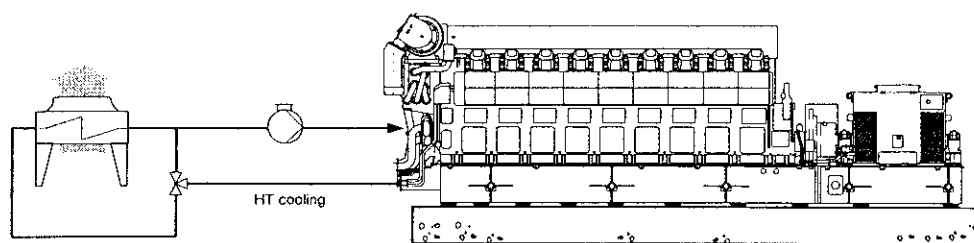


Figura 3.8: Sistema de agua de enfriamiento: alta temperatura

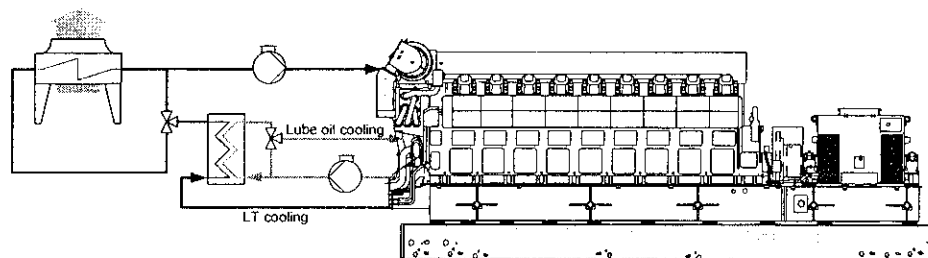


Figura 3.9: Sistema de agua de enfriamiento: baja temperatura

El sistema incluye adicionalmente una unidad de precalentamiento de agua, cuya función es precalentar el agua del sistema de alta temperatura antes del arranque de los motores. Los componentes principales de esta unidad son una bomba de circulación eléctrica y un calentador de vapor. El circuito se encuentra conectado al circuito de alta temperatura en paralelo con la bomba de este sistema. El agua del circuito de alta temperatura es calentada a 70° C aproximadamente antes del arranque de los motores.

Adicionalmente, el sistema de alta temperatura está equipado con un tanque de expansión ubicado antes de los radiadores que opera de manera automática. Su función es remover el aire y suciedad del sistema de enfriamiento.

El sistema de enfriamiento para un motor consiste de cinco unidades de radiadores cada una con 5 ventiladores (25 ventiladores en total para cada sistema de enfriamiento). El efecto de enfriamiento es controlado mediante la variación de la velocidad rotacional de los ventiladores la cual es determinada por el sistema de PLC de la planta. Un diagrama simplificado del sistema completo puede ser apreciado en la Figura 3.10.

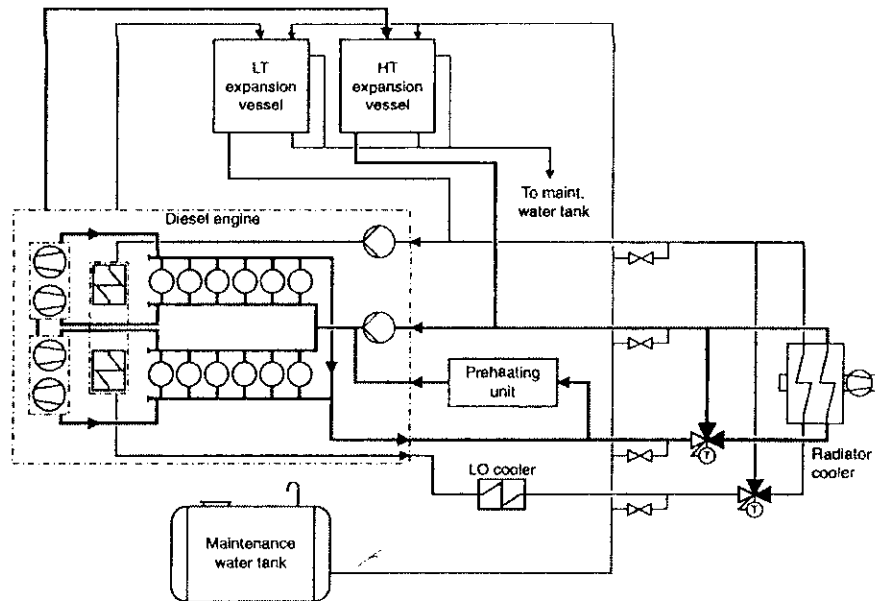


Figura 3.10: Distribución del sistema de agua de enfriamiento de la planta.

5. Sistema de aire de carga y de gases de escape. El sistema de aire de carga provee al motor de aire de combustión limpio y el sistema de gases de escape promueve el escape de los gases hacia fuera de la sala de máquinas.

La función principal del sistema de aire de carga es proveer al motor con aire de combustión limpio y seco en suficiente cantidad y calidad. El aire de combustión (aire de carga) para el motor se obtiene del aire que se encuentra fuera de la sala de máquinas y conducido hacia ella a través de la unidad de filtración de aire de admisión mediante un sistema de tuberías provisto de un silenciador de aire de carga que va hacia los turbocargadores que se encuentran instalados en el motor. El aire de carga comprimido es luego enfriado en el enfriador de aire de carga antes de ingresar los receptores de aire de carga en el motor.

El sistema de aire de carga está básicamente conformado por tubería (ductos), "bellows" flexibles para compensar la expansión térmica y la unidad de filtrado. El sistema de aire de carga está diseñado para minimizar las restricciones de flujo, utilizando

tubos cortos y con la menor cantidad de dobleces posible. Un diagrama simplificado del sistema se puede apreciar en la Figura 3.11.

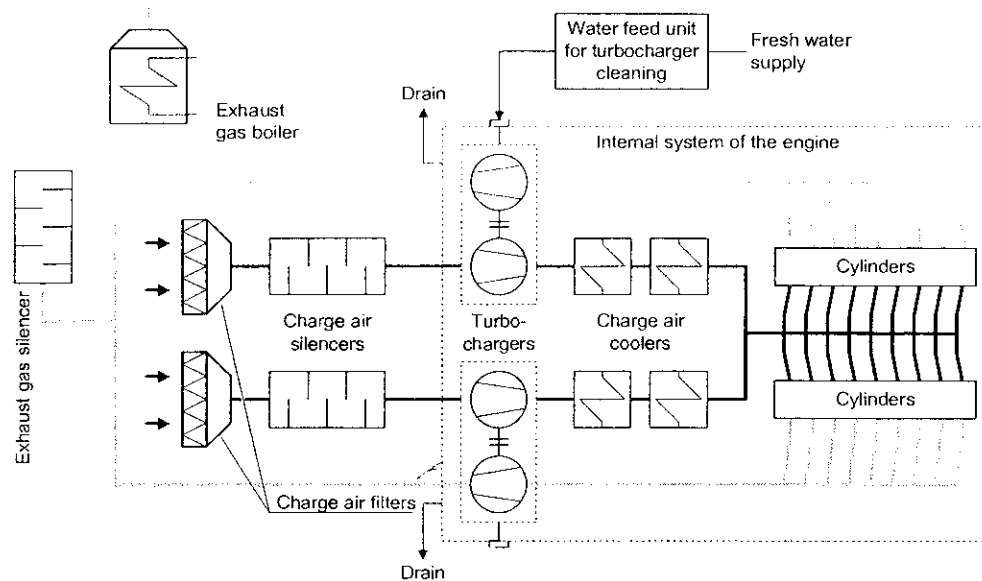


Figura 3.11: Sistema de aire de carga

La función principal del sistema de gases de escape es reducir el ruido y proveer los medios para la ventilación de los gases de manera segura hacia la atmósfera. El sistema consiste esencialmente de tubería, “bellows” flexibles para compensar la expansión térmica y un silenciador de gases de escape. Este silenciador se encuentra equipado con tubería para drenarlo.

Los gases de escape provenientes de los cilindros se dirigen hacia la turbina del turbocargador y luego fluyen a través de los ductos y silenciadores por los “expansion bellows” hacia la caldera de gases de escape. Un diagrama simplificado del sistema puede ser apreciado en la Figura 3.12.

6. Sistema de vapor. La función principal del sistema de vapor es calentar el HFO. Esto debe ser realizado por dos razones: tornar el HFO a una viscosidad bombeable y

tornar el HFO a una temperatura necesaria para el buen desempeño del motor y las separadoras.

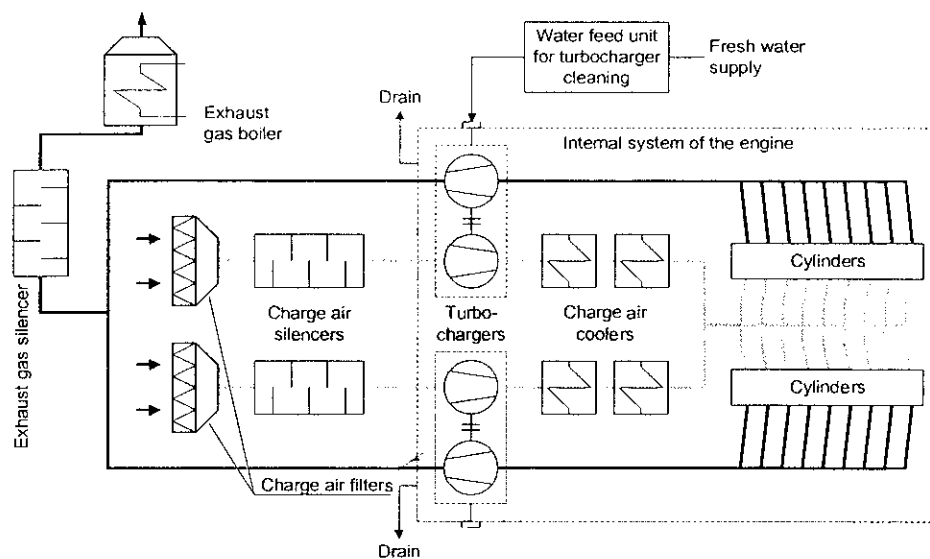


Figura 3.12: Sistema de gases de escape

El sistema genera vapor mediante la energía del calor de desecho de los gases de escape de los motores. El sistema está conformado normalmente por calderas de gases de escape y una caldera de soporte que opera con LFO, adicionalmente se cuenta con un tanque de agua de alimentación, una bomba de agua de alimentación, estaciones de reducción de presión, distribuidores de vapor, entre otros.

El agua de los tanques de agua de alimentación es bombeada mediante las bombas de agua de alimentación hacia los tambores de vapor, los cuales están integrados a las calderas de gases de escape. El diseño contempla dos bombas de agua de alimentación de las cuales una siempre está operando y la otra se mantiene de soporte. El agua fluye hacia la superficie calefactora la cual está conformada de tubos verticales los cuales están en contacto con los gases de escape del motor. El agua en los tubos se evapora y el vapor fluye de nuevo hacia el tambor donde el vapor y el agua se separan para luego ser enviado a los consumidores.

Existen dos niveles de presión en el sistema de vapor. Las calderas normalmente operan a una presión de 12 bares y el vapor producido se envía hacia los calentadores de las unidades booster. Otros consumidores requieren vapor a presión de 8 bares y 4.5 bares los cuales son proporcionados mediante estaciones de reducción de presión. Un diagrama simplificado del sistema puede ser apreciado en la Figura 3.13.

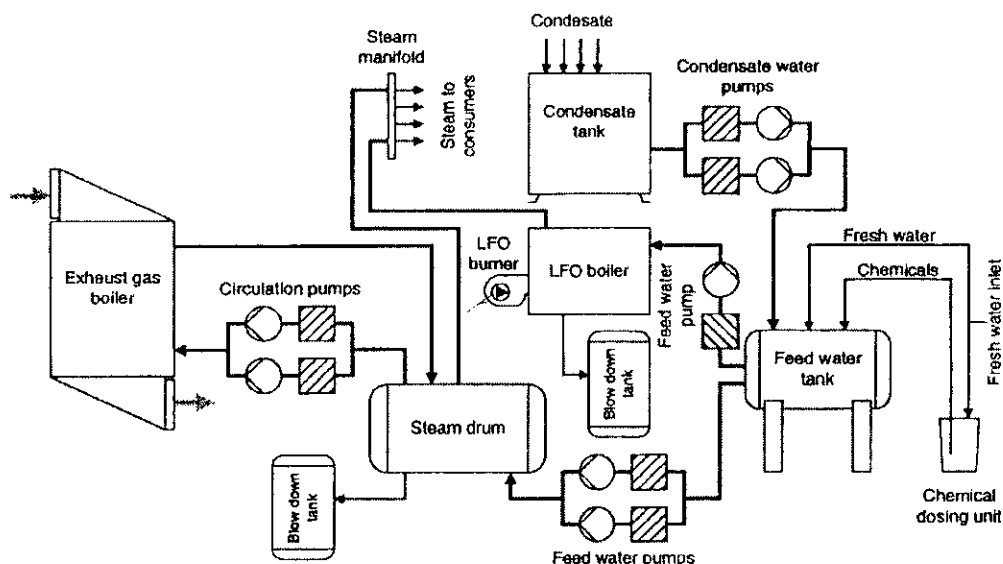


Figura 3.13: Sistema de vapor

C. Combustibles

Como se mencionó con anterioridad las plantas de generación con motores de combustión interna presentan la versatilidad y flexibilidad de poder ser operadas con distintos combustibles entre los cuales destacan el HFO, LFO, el gas natural, combustibles emulsificados, bio combustibles, entre otros. A continuación se describirá brevemente la aplicación de algunos de estos combustibles y las modalidades de generación con motores estacionarios.

1. LFO-HFO. La generación con HFO, Diesel, LFO es la modalidad más conocida y común de generación con motores de combustión interna estacionarios. Normalmente se utiliza el HFO como combustible principal de operación y el LFO como combustible de soporte. Para plantas base en tierra se maneja un rango de capacidad de generación de

1 a 300 MW y para plantas flotantes se maneja una capacidad de generación de 34-170 MW.

Los motores estacionarios son motores de combustión interna de 4 tiempos que operan normalmente en un ciclo Diesel y en algunos casos en su variante el ciclo Miller y manejan un porcentaje de eficiencia energética del orden del 40%. Un esquema estándar de la distribución del motor con sus sistemas auxiliares en la planta puede ser apreciado en la Figura 3.14.

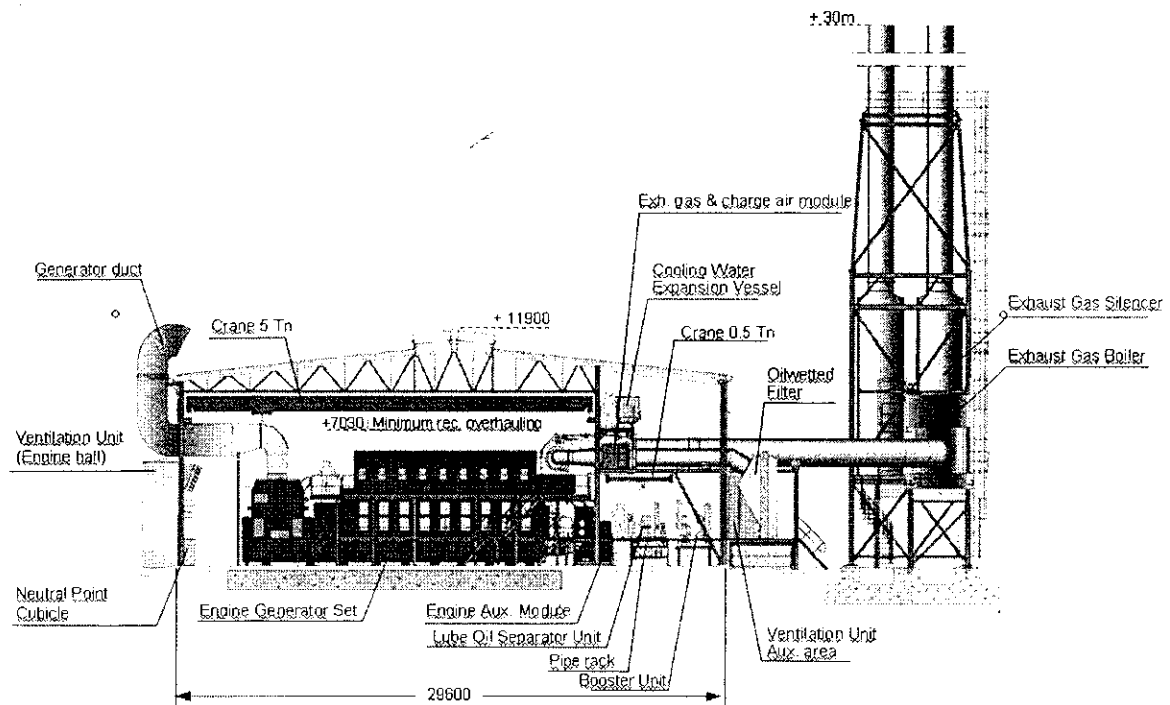


Figura 3.14: Distribución de los equipos auxiliares dentro de la planta

2. Motores de gas encendidos por chispa. Los motores estacionarios para generación de electricidad que utilizan gas como combustible de operación cada día son más cotizados debido a la combustión más limpia, reducidas emisiones y rapidez de montaje y puesta en marcha de las unidades. Prueba de ello es el incremento notable que se ha dado en las unidades de 1-5 MW como se puede apreciar en la Figura 3.15.

Con este tipo de motores se maneja un rango de generación de 4 a 150 MW donde se maneja eficiencias del 44% y relaciones de compresión de 12:1 y 11:1, con una capacidad de generación de 435 KW para un motor con diámetro de pistón de 340 mm con una carrera de 400 mm y con una presión media efectiva de 19.8/19.9 bares.

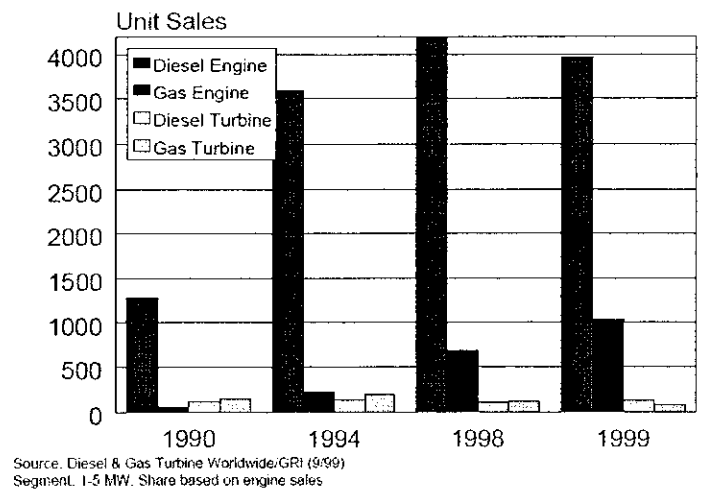


Figura 3.15: Venta de unidades del segmento de 1-5 MW

En la Figura 3.16 se puede apreciar el proceso de combustión de estas unidades en las cuales el gas es encendido mediante la asistencia de una chispa generada por un electrodo que se ubica en la cámara de combustión.

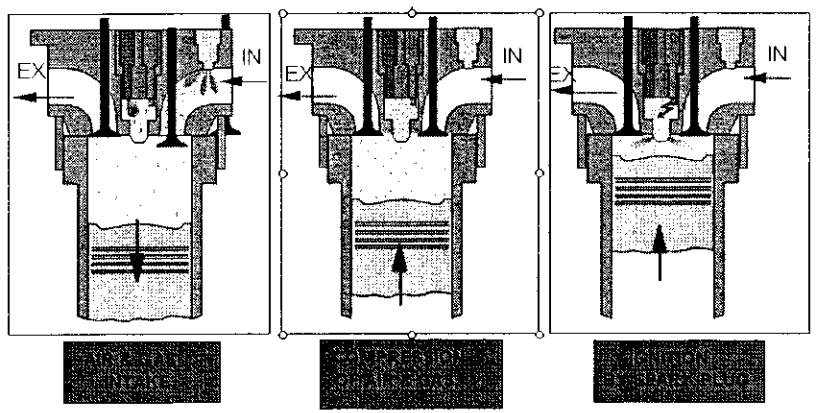


Figura 3.16: Proceso de combustión de los motores a gas encendidos por chispa

3. Motores duales: gas – diesel. Las plantas operadas con motores “Dual Fuel” presentan la versatilidad de poder ser operados con gas natural y otro combustible, normalmente el HFO o LFO. La ignición se da por medio de un combustible piloto al operar en modalidad de gas. En este tipo de motor se tiene una capacidad de generación de 925 KWe por cilindro a una presión media efectiva de 20.0/19.5 bares para un pistón de 500 mm de diámetro con 580 mm de carrera. Este tipo de motor presenta una eficiencia al eje de 46.3%. Un balance de energía para este tipo de motor puede ser apreciado en la Figura 3.17.

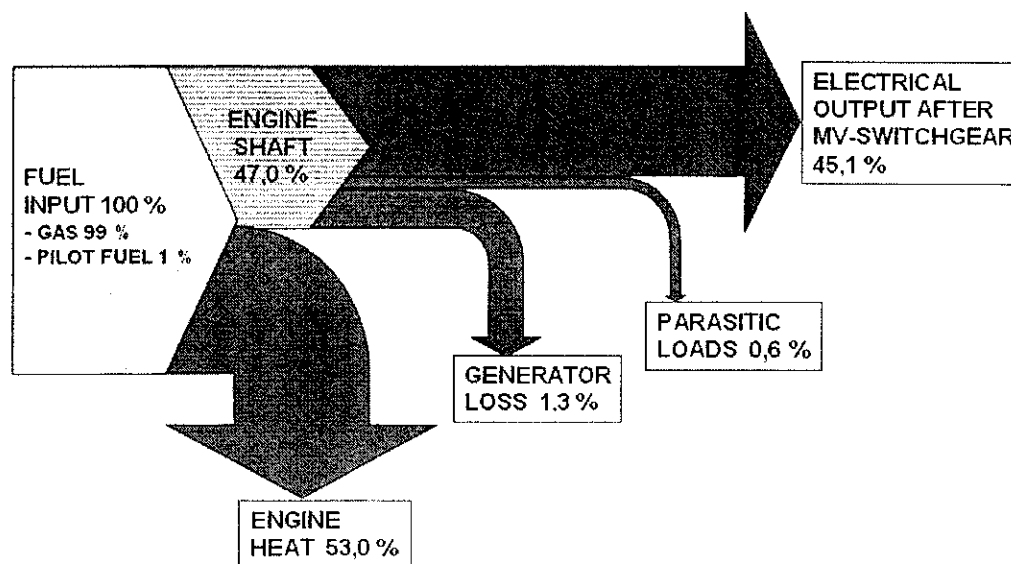


Figura 3.17: Balance energético para motores duales

El principio básico de operación para la modalidad gas puede ser apreciado en la Figura 3.18. El gas es encendido mediante la admisión de HFO o LFO como combustible piloto el cual es autoencendido en las condiciones de admisión generando el encendido del gas.

Al operar en la modalidad diesel, el motor actúa como un motor diesel convencional en el cual el combustible (HFO o LFO) es introducido en la cámara de combustión y autoencendido debido a las condiciones que se generan dentro de ella. La secuencia simplificada puede ser apreciada en la Figura 3.19.

Principle of dual-fuel engine process

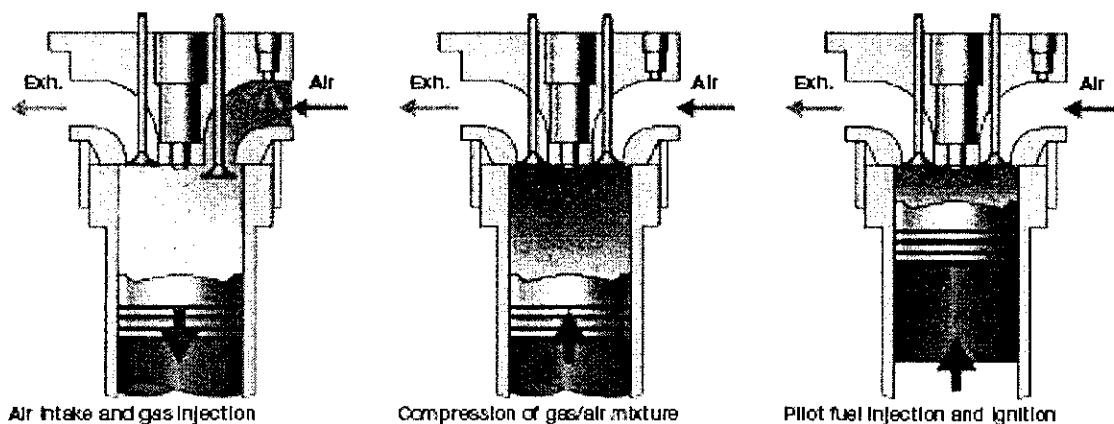


Figura 3.18: Principio de operación de la modalidad gas para el motor dual

Principle of diesel engine process

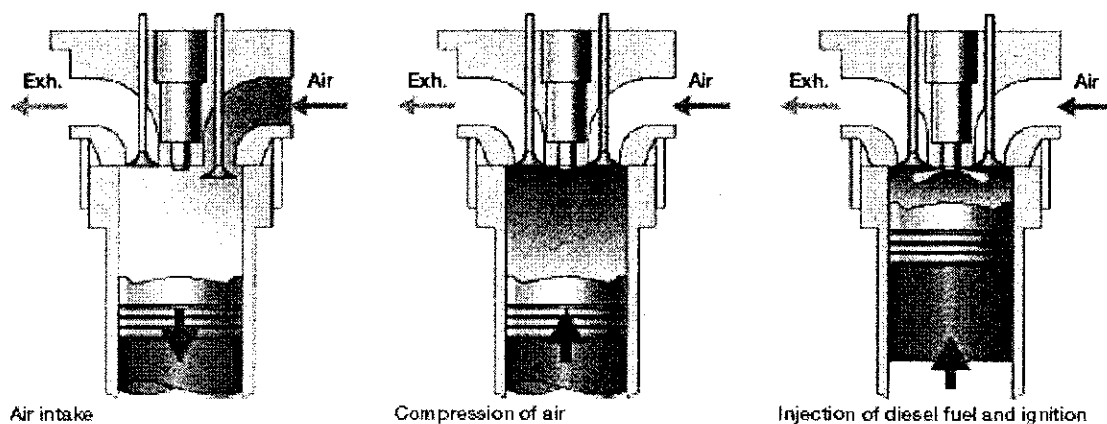


Figura 3.19: Principio de operación de la modalidad diesel en un motor dual

4. Potencia y calor combinados – CHP –. Este tipo de generación incorpora, tanto la generación de electricidad, como la recuperación de calor. En el caso de una planta que opera con gas como combustible principal al generar electricidad y calor de manera combinada, la eficiencia total de la planta puede ser elevada. Por ejemplo un motor de 18 cilindros que opera con gas encendido por chispa utilizado solamente para generación de electricidad puede generar 6000 kWe con una eficiencia del 44%.

Si el motor anterior lo utilizamos para generar de manera combinada calor, vapor y electricidad es posible incrementar la eficiencia total del sistema. Es posible generar 6000 KWe con una eficiencia de 43.5% y adicionalmente generar de manera combinada vapor saturado a 9 bares a una tasa de 3.6 ton/h y generar agua caliente a 50-90°C a 2350 kwth a una eficiencia total del sistema de 77%. Un diagrama simplificado del sistema puede ser apreciado en la Figura 3.20.

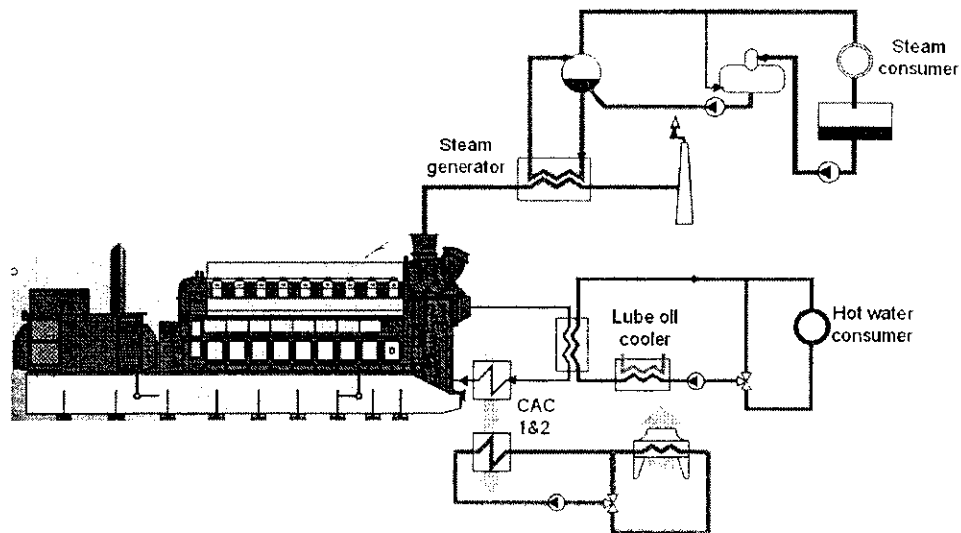


Figura 3.20: Generación de potencia y calor combinados – CHP –

Si esta modalidad de generación se lleva a su punto óptimo para generación de calor de manera combinada con la generación de electricidad se puede alcanzar un nivel de eficiencia total mucho mayor, siendo éste del orden del 95%. Un diagrama del sistema con los parámetros de operación puede ser apreciado en la Figura 3.21.

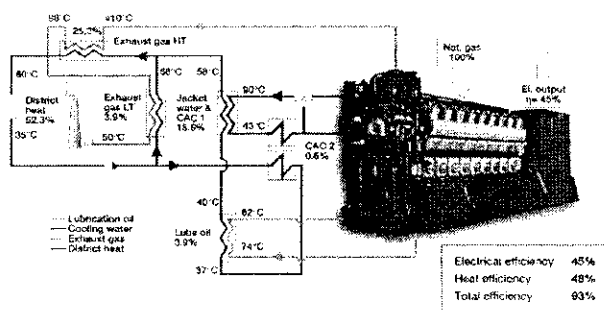


Figura 3.21: Parámetros de operación de un sistema de generación combinado

5. Trigeneración. Es la conversión simultánea de un combustible en tres productos utilizables: electricidad, agua caliente o vapor y enfriamiento de agua. En términos generales es una cogeneración llevada a un paso más al incluir un enfriador. Este tipo de generación se utiliza para el fin común de generación de electricidad y calefacción durante el invierno y enfriamiento durante el verano.

Este tipo de generación tiene la capacidad de proveer la misma cantidad de energía pero con un consumo de combustible considerablemente menor que al tener los sistemas de calefacción y refrigeración por separado. Este tipo de generación ha empezado a introducirse en aeropuertos, donde las necesidades de generación de electricidad, calefacción y refrigeración son bastante palpables. Un diagrama general del sistema puede ser apreciado en la Figura 3.22.

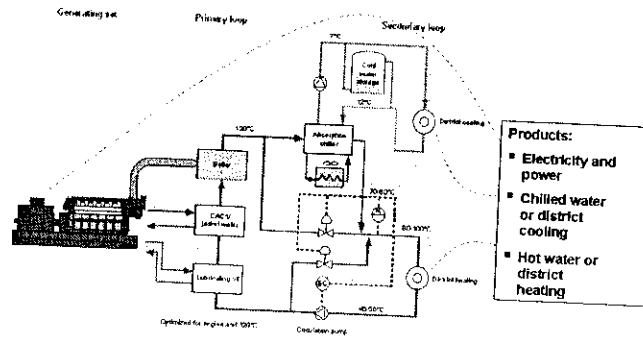


Figura 3.22: Generación de la modalidad trigeneración.

Las ventajas de la trigeneración pueden ser apreciadas en la Figura 3.23 donde se muestra las aplicaciones de generación de electricidad, generación de calor para calefacción y absorción para enfriamiento en un aeropuerto.

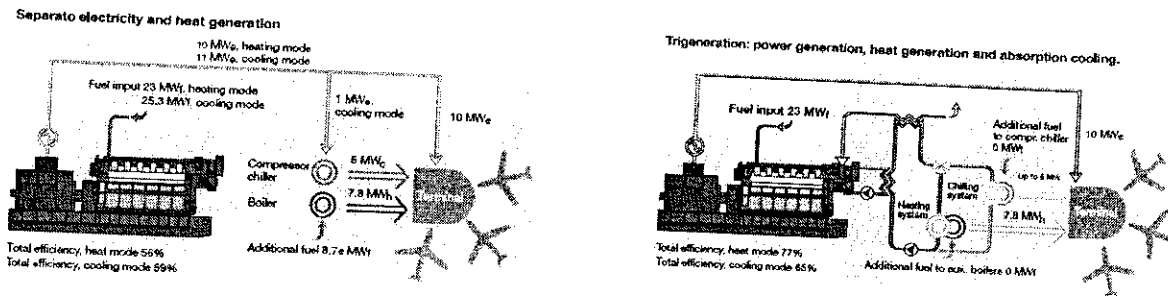


Figura 3.23: Sistema de trigeneración en modalidad de enfriamiento y calefacción

IV. Sistema de combustible en la planta

El proyecto Arizona es una planta base equipada con diez (10) unidades Wärtsilä 18V46 de tipo dual, es decir, que tienen la capacidad de operar con dos combustibles diferentes, en este caso Orimulsion® 400 y HFO. De acuerdo al combustible de operación seleccionado se puede obtener la siguiente capacidad neta de generación a las condiciones ambiente de diseño para la planta:

- HFO 160 000 kW_e
- Orimulsion® 400 150 000 kW_e

Las condiciones ambiente de diseño fueron las siguientes:

- Temperatura del aire: 35° C
- Altitud 30 m snm
- Humedad Relativa 80 %

La mayor capacidad de generación para todas las unidades a condiciones ambiente de diseño resulta de 16.5 MW para operación con HFO y 15.62 MW para operación con Orimulsion® 400.

Cada unidad de generación consiste de un motor Wärtsilä 46 que conduce un generador ABB de corriente alterna de tres fases. El motor y el generador se conectan mediante un acople flexible para asegurar que no se genere algún tipo de daño por pequeñas variaciones en la alineación, movimientos ocasionados por la temperatura o cualquier otra fuerza dinámica. Un diagrama simplificado de las unidades se puede apreciar en la Figura 4.1.

Cada unidad Wärtsilä 46 es un motor de combustión interna de cuatro tiempos, de inyección directa turbocargado y con interenfriamiento con las siguientes características:

- Configuración.....forma de V
- Número de cilindros.....18
- Diámetro del cilindro.....460mm
- Carrera.....580mm
- Volumen de barrido p/cil..96,4 dm³
- Velocidad.....514 rpm
- Número de válvulas p/cil..2 de admisión y 2 de escape
- Relación de compresión...16:1

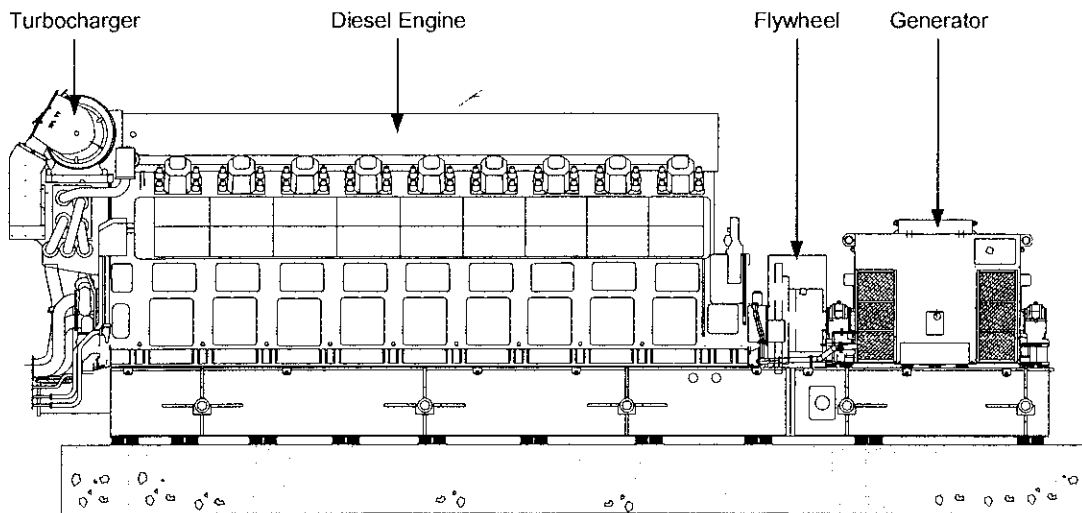


Figura 4.1: Unidades Wartsilä 18V46

Cada unidad dentro de la sala de máquinas se encuentra asistida por una serie de sistemas auxiliares los cuales ya fueron descritos en una sección anterior. Cada unidad en conjunto con los sistemas auxiliares dentro de la sala de máquinas de la planta se encuentran distribuidos como se presenta en la Figura 4.2.

La distribución general de la planta puede ser apreciada en la Figura 4.3. Esta distribución es muy similar a las plantas convencionales de HFO. La mayor diferencia radica en que la Orimulsion® 400 es un combustible cuyos productos luego de la combustión son altamente contaminantes lo que hace necesario contar con un sistema de tratamiento de gases de escape.

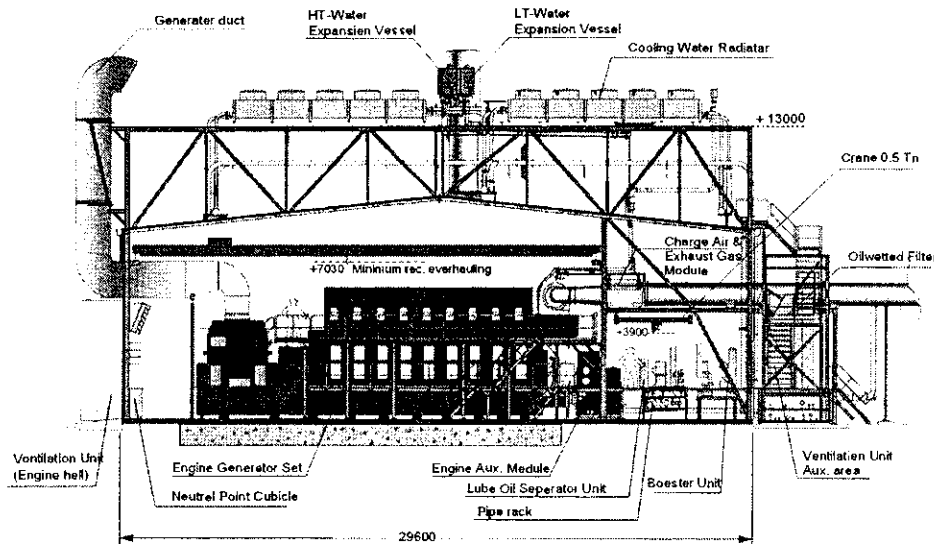


Figura 4.2: Unidad y sistemas auxiliares dentro de la sala de máquinas

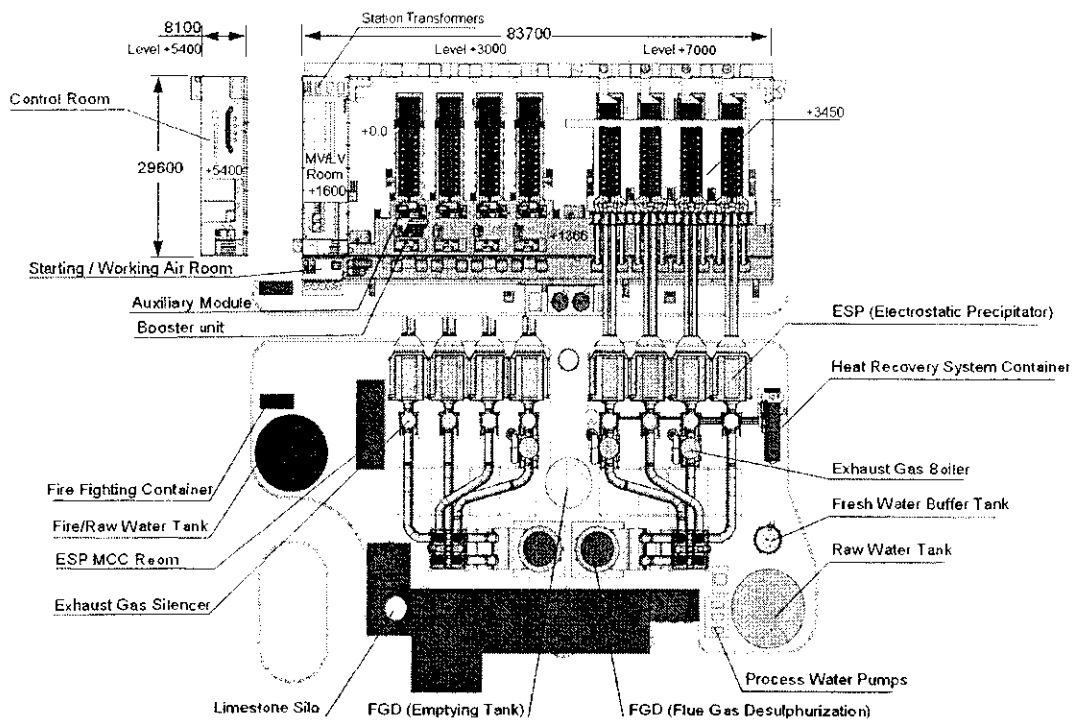
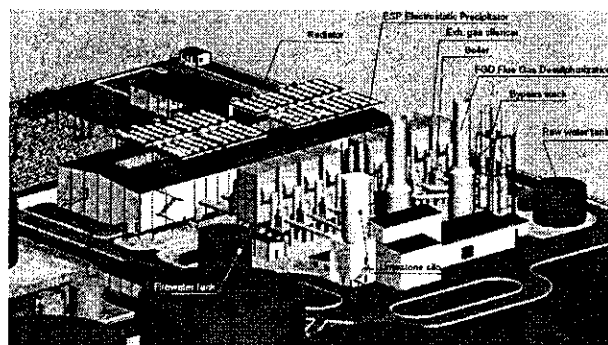
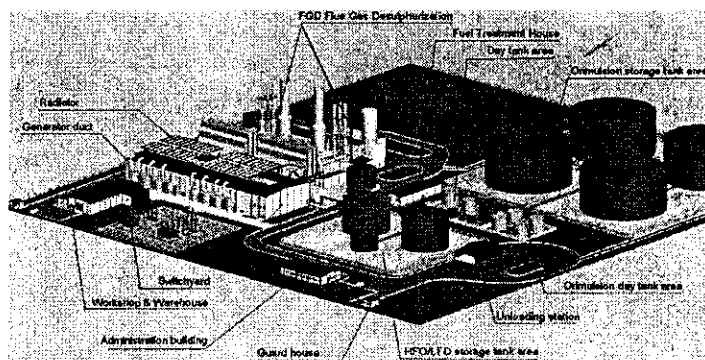


Figura 4.3: Distribución general de la planta

El sistema de combustible de la planta tiene como propósito proveer a las unidades (motores) con un suministro ininterrumpido y confiable de combustible limpio a la presión y viscosidad correcta. El sistema de combustible está diseñado como un sistema dual en el cual la Orimulsion® es utilizada como el combustible principal y el HFO es el combustible alternativo utilizado durante el arranque, apagado y en situaciones de emergencia en las cuales el sistema de Orimulsion® no trabaja de manera apropiada.

El sistema completo de combustible comprende los componentes instalados en el motor como también el equipo externo instalado en la planta. En esta sección se tratará el equipo externo del sistema de Orimulsion® el cual está conformado por un sistema de almacenamiento y descarga, un sistema de transferencia, un sistema de tratamiento y un sistema de suministro.

A. Almacenamiento

El sistema de combustible de Orimulsion® es el sistema principal de combustible de la planta y fue diseñado para satisfacer las especificaciones establecidas por Bitor (fabricante de la Orimulsion®) en cuanto al almacenamiento y transferencia de la Orimulsion®. Toda la Orimulsion® que va a ser utilizada en la planta es descargada de una embarcación (tanquero) en Puerto Quetzal y transferida a los tanques de almacenamiento mediante un oriducto.

La planta cuenta con cuatro tanques de almacenamiento de Orimulsion® de 16 000 m³ cada uno con las siguientes dimensiones: 127 pies de diámetro nominal y una altura nominal de 48 pies con una capacidad nominal de 108298 barriles lo cual equivale a aproximadamente 4548516 galones por tanque. Cada tanque se encuentra equipado con un sistema de calentadores de vapor internos para mantener la Orimulsion® a la temperatura óptima de almacenamiento. Además, estos tanques cuentan con medidores de nivel con alarmas indicadoras de bajo y alto nivel de combustible. Un diagrama simplificado de este tipo de tanques se puede apreciar en la Figura 4.4.

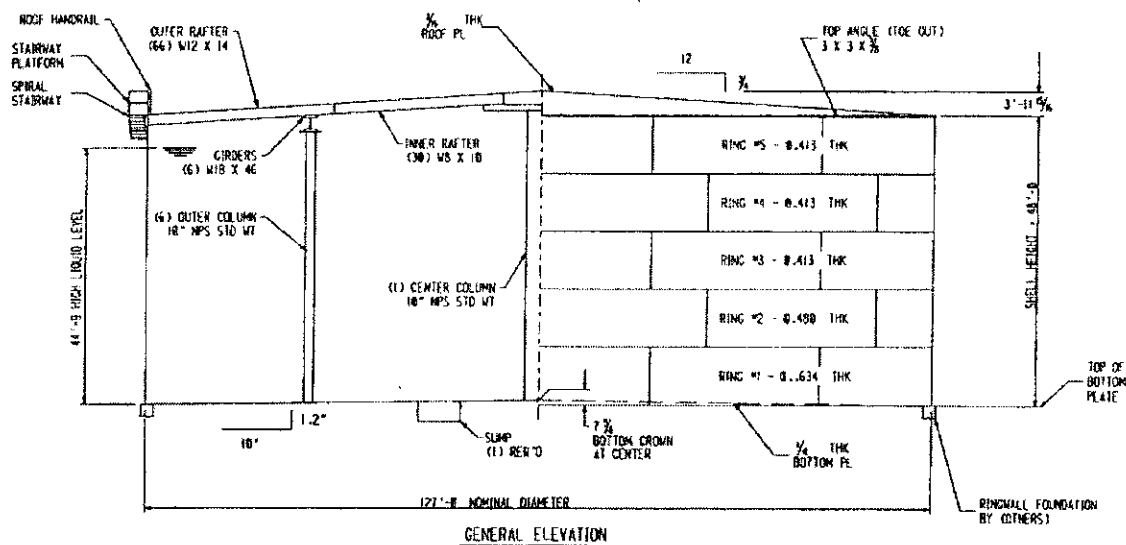


Figura 4.4: Tanque de almacenamiento de Orimulsion®

El sistema cuenta adicionalmente con dos unidades de bombeo para descarga de Orimulsion® de los tanques de almacenamiento. Estas unidades se utilizan para descargar Orimulsion® de los tanques de almacenamiento hacia camiones de transporte de combustible que llevan la Orimulsion® hacia otra planta de la corporación. Cada unidad tiene dos bombas idénticas las cuales pueden operar por separado o al mismo tiempo. Estas unidades son operadas manualmente en el panel de control de la estación y no deben ser accionadas si la temperatura del combustible es menor a 60° C. La capacidad de diseño para cada bomba es de 30 m³/h.

B. Transferencia

El sistema de transferencia se utiliza para transferir el combustible de los tanques de almacenamiento hacia los tanques denominados como “buffer tanks”. La cantidad de combustible transferido depende del flujo de separación de Orimulsion® en un momento dado (señal de “feed forward”) y del nivel del “buffer tank” (señal bias).

La señal de “feed forward” se calcula al dividir el flujo total de separación de Orimulsion® por la capacidad nominal de las separadoras multiplicado por 60 Hz. La

señal bias es un valor que depende únicamente del nivel de combustible en el “buffer tank”. Este valor es negativo si el nivel de combustible se encuentra por encima del valor predeterminado y es positivo si se encuentra por debajo de este valor. La frecuencia de referencia para las bombas de transferencia es la suma de la señal de “feed forward” y la señal bias.

Se cuenta con dos unidades de bombeo de transferencia que son operadas eléctricamente y consisten de dos bombas cada una. Las bombas de las unidades son de tipo tornillo con una válvula de liberación de presión incorporada. Las bombas de transferencia toman el combustible del tanque de almacenamiento de Orimulsion® y lo bombean a los “buffer tanks”. La unidad de bombeo es manualmente activada y debe permanecer en operación mientras se requiera suministro de combustible a uno o más motores de la planta. La capacidad de diseño de cada bomba es de 30 m³/h (flujo máximo). La capacidad de cada bomba fue dimensionada para suplir las necesidades de la planta al 50% de carga.

La planta cuenta con dos “buffer tanks” con una capacidad de 300 m³ cada uno. Estos tanques aseguran una temperatura constante y una altura de succión para las separadoras de combustible, mejorando así el proceso de limpieza del combustible.

C. Tratamiento

La Orimulsion® se bombea de los buffer tanks hacia la unidad de separación, donde la Orimulsion® se limpia antes de ser utilizada en los motores. La unidad de separación de Orimulsion® separa únicamente sólidos, mientras que las unidades de separación de HFO separan tanto sólidos y agua.

La planta Arizona cuenta con dos unidades de separación cada una conformada por tres separadoras centrífugas que remueven los contaminantes sólidos del combustible que pueden ser dañinos para el motor.

Cada separadora comprende una sección de procesamiento y una sección impulsora. La separadora se impulsa por un motor eléctrico (9) el cual tiene un eje impulsor con acoples (7,8), un engranaje de gusano (5) y un árbol vertical (3) que moviliza el tazón. Un diagrama esquemático de este tipo de separadora puede ser apreciado en la Figura 4.5.

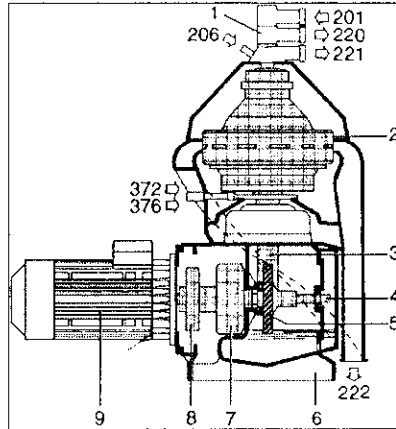


Figura 4.5: Diagrama de la unidad separadora

En la parte inferior de la separadora se cuenta con un baño de aceite para los engranajes, un freno y un contador de revoluciones. En la parte superior se cuenta con las partes de procesamiento de la separación y la tubería de entrada y salida (1). El combustible que entra es limpiado en el tazón separador (2) el cual está ajustado en el árbol vertical que rota a altas velocidades. Este tazón cuenta con un mecanismo de descarga el cual vacía el lodo del mismo.

En este sistema de separación el combustible no separado entra al tazón a través de la tubería de admisión (6) y es bombeado por medio del distribuidor (7) hacia la periferia del tazón. Cuando el combustible alcanza las aberturas del distribuidor, éste se eleva a través de los canales formados por la pila de discos (8) donde es equitativamente distribuido. El combustible es continuamente limpiado mientras viaja hacia el centro del tazón. Cuando el combustible limpio deja la pila de discos se eleva para fluir sobre el anillo de nivel (5) y entra a la cámara delimitada por el disco (4). De este punto es bombeado para dejar la separadora por medio de la tubería de salida (220). El lodo y partículas sólidas que son más pesadas que el combustible son forzadas hacia la periferia del tazón y colectadas en el espacio para lodos (12). Cuando este espacio para lodo se llena, algunas gotas de agua empiezan a salir con el combustible limpio, lo cual es

sensado y se genera una señal para el inicio del ciclo de descarga de lodos. En la Figura 4.6 se puede apreciar la distribución de los componentes del tazón.

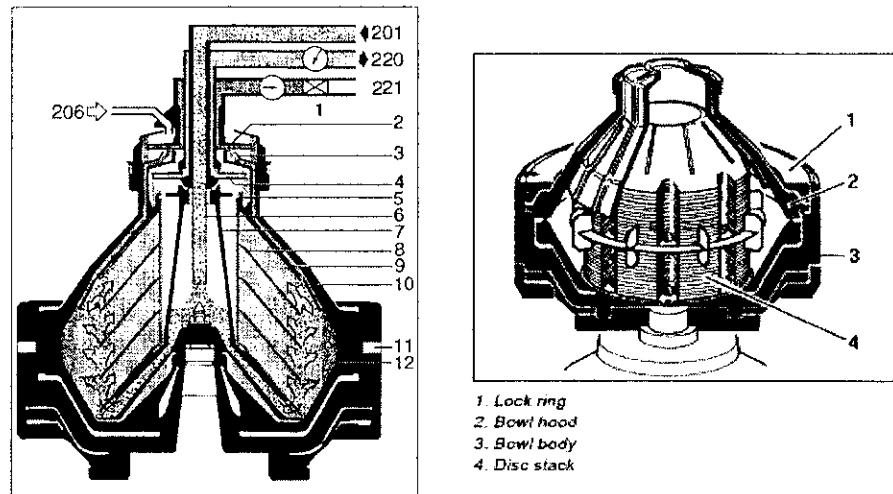


Figura 4.6: Distribución de los componentes del tazón de la unidad separadora

Este tipo de separadoras ha sido diseñado para la limpieza de combustibles cuyo punto de flama no sea inferior a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ con densidad de 1000 kg/m^3 y densidad del sedimento no mayor a 2112 kg/m^3 . El tazón tiene una capacidad de 29 litros con una velocidad de giro de 4125 rev/min. Este tazón tiene capacidad de operar con combustibles a un rango de temperatura de $0\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$, tiene un volumen de descarga de 8.6 litros con intervalos de descarga de 1 minuto. El tiempo requerido para detener por completo el tazón es de 6-10 minutos si se aplica el freno y de aproximadamente 60 minutos sin aplicar el freno.

La capacidad de separación para cada separadora por diseño es del 20% de la carga de la planta, por lo que operando cinco separadoras se satisface las necesidades de la planta operando al 100% de carga.

El combustible ya tratado es luego transferido a los tanques diarios o de suministro por medio de las bombas de alimentación de las unidades separadoras cuya frecuencia puede ser controlada y el flujo depende del consumo total de combustible en ese momento (señal feed forward) y el nivel del tanque diario (señal bias). El consumo de combustible es medido en cada unidad booster.

En la Figura 4.7 se puede apreciar la distribución de los tanques de combustible en la planta.

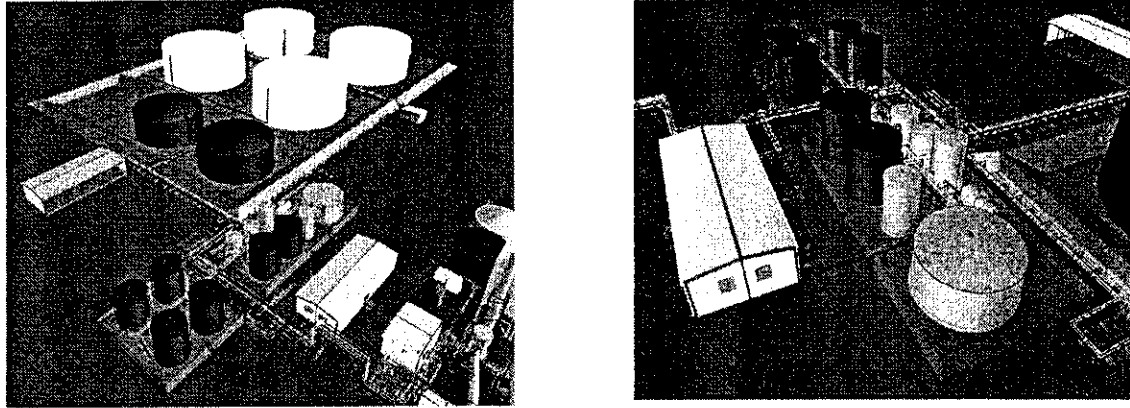


Figura 4.7: Tanques de combustible en la planta

D. Suministro

El sistema de suministro tiene como función principal el proveer a los motores con combustible limpio a la tasa de flujo requerida, presión y viscosidad correctas. Este sistema cuenta con dos unidades de bombeo alimentadoras de Orimulsion® las cuales extraen el combustible de los tanques de almacenamiento diario para alimentar a la unidad booster.

El sistema está conformado por dos tanques diarios de Orimulsion® los cuales tienen una capacidad de 300 m³ cada uno y están completamente aislados, cuentan con un sistema de calefacción de vapor, indicadores de temperatura e indicadores de nivel electrónicos para controlar el nivel de los tanques remotamente.

Se cuenta con dos unidades alimentadoras de Orimulsion® cuya función principal es proveer a la unidad booster con combustible limpio al flujo requerido y presión apropiada. Cada unidad está diseñada para satisfacer las necesidades de cinco motores y

cada una cuenta con dos bombas de alimentación (una de trabajo y una de soporte) diseñadas para satisfacer las necesidades del 50% de la planta.

Las unidades de alimentación pueden ser operadas en modo automático o manual. En modo automático la unidad es controlada de acuerdo a la presión en la línea de alimentación. En caso de falla en la bomba principal o en el controlador de frecuencia se da el inicio de la bomba de soporte.

Se cuenta con un circuito de alivio de presión que opera a 10 bares. Este normalmente no es utilizado pero si varios motores son apagados o su modo de operación es cambiado a HFO al mismo tiempo se va a generar un incremento en la presión repentinamente. En este caso la válvula reguladora de presión de 10 bares se abrirá y circulará el combustible de vuelta hacia el tanque diario. Esta línea puede captar el flujo de cinco motores, aproximadamente $25.4 \text{ m}^3/\text{h}$. El esquema puede ser visualizado en la Figura 4.8.

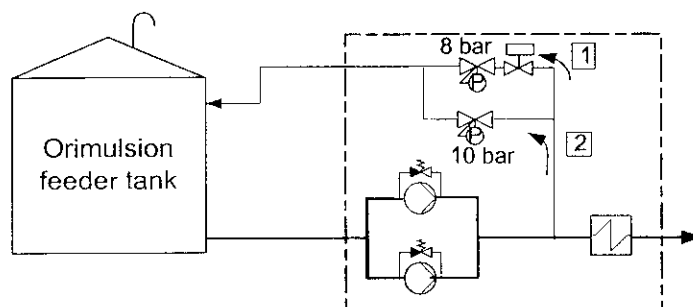


Figura 4.8: Sistema de suministro de combustible de la planta

Las condiciones de diseño para las unidades de alimentación son de un consumo máximo de $5,235 \text{ ton}^3/\text{h}$ por motor, una presión de operación de 8 bares con una temperatura mínima de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ de la Orimulsion® en el tanque diario con una viscosidad máxima de 170 mPa a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ y 50 s^{-1} . Con estos datos se estableció la capacidad de bomba de alimentación de $35.7 \text{ m}^3/\text{h}$ para operar a una presión de 8 bares a una viscosidad de 350 mPa y 50 s^{-1} . Adicionalmente se tiene un precalentador de vapor a 170°C y 8 bares que consume 1675.6 kg/h de vapor.

Las bombas de alimentación suministran el combustible a un flujo correcto del tanque diario hacia la bomba de la unidad booster. Esta bomba de la unidad booster eleva la presión y el flujo al nivel requerido. Adicionalmente se cuenta con un calentador que mantiene la viscosidad de inyección en el nivel apropiado. La unidad booster circula el combustible hacia y del motor con un flujo de $25 \text{ m}^3/\text{h}$ el cual es aproximadamente cinco veces el consumo de Orimulsion® a plena carga. El exceso de combustible es retornado a un tanque degasificador para luego ser reutilizado.

Cada motor cuenta con un módulo booster el cual comprende una unidad homogenizadora y una unidad booster. Es en esta unidad donde se hace la selección del combustible de operación, ya sea LFO, HFO u Orimulsion®.

En la unidad homogenizadora la Orimulsion® se invierte a una emulsión en la cual las gotas de agua están dispersas en el bitumen. Luego de la inversión las características del combustible cambian drásticamente y resulta un combustible que requiere de altas temperaturas para mantenerlo a un nivel de viscosidad que sea bombeable.

La inversión de la Orimulsion® se logra en una bomba homogenizadora, la cual es una bomba de engranajes que aplica una presión en el combustible para homogenizarlo. La inversión es un proceso irreversible lo cual significa que el combustible luego de ser homogenizado debe mantenerse a una alta temperatura para que pueda ser bombeado. Antes del ingreso del combustible a la unidad homogenizadora se controla su temperatura con un calentador de vapor a 110°C lo cual equivale a una viscosidad de aproximadamente 240 cSt, la cual es una viscosidad bombeable pero que no aplica para la inyección de combustible. Luego del homogenizador la viscosidad del combustible es ajustada para que sea apropiada para el sistema de inyección de combustible del motor: 35 cSt para Orimulsion® lo cual es aproximadamente 160°C . Esto es ejecutado en el circuito de la unidad booster con calentadores de vapor controlados por un viscosímetro.

Adicionalmente se cuenta con un control de presión el cual no es crítico en la operación con HFO/LFO ya que las características del combustible no varían significativamente con la presión. Sin embargo, al operar con Orimulsion® se toma crítico ya que este combustible contiene 30% de agua la cual tiene una relación crítica entre la temperatura de ebullición y la presión. Como el combustible fue calentado a 160°C la presión debe mantenerse por encima de los 10 bares para eliminar la posibilidad de ebullición. En caso el agua llegara a su punto de ebullición, ésta formaría gases los cuales generarían cavitación en las bombas y detendrían la circulación de combustible.

Las condiciones de diseño para las unidades de homogenización son: un consumo máximo de 5,235 ton³/h por motor, una viscosidad de Orimulsion® máxima de 150 cSt para una temperatura máxima de homogenización de 120 °C a 12 bares. El homogenizador cuenta con un precalentador de vapor que consume 621 kg/h de vapor a 11 bares y 184° C. La bomba del homogenizador tiene una capacidad de 8.05 m³/h a 8 bares y 150 cSt.

La unidad booster está diseñada para operar a una viscosidad máxima de Orimulsion® de 350 cSt a una temperatura máxima de 100°C. El valor de referencia de la viscosidad de la Orimulsion® es de 30 cSt para una inyección de combustible a una temperatura no mayor a 170° C y a una presión de 17 bares. La bomba de la unidad booster tiene una capacidad de flujo de 23.7 m³/h a 12-16 bares y 30 cSt. Esta unidad posee un precalentador de vapor que consume 672 kg/h de vapor a 11 bares y 184° C.

Un diagrama completo del sistema puede ser apreciado en la Figura 4.9:

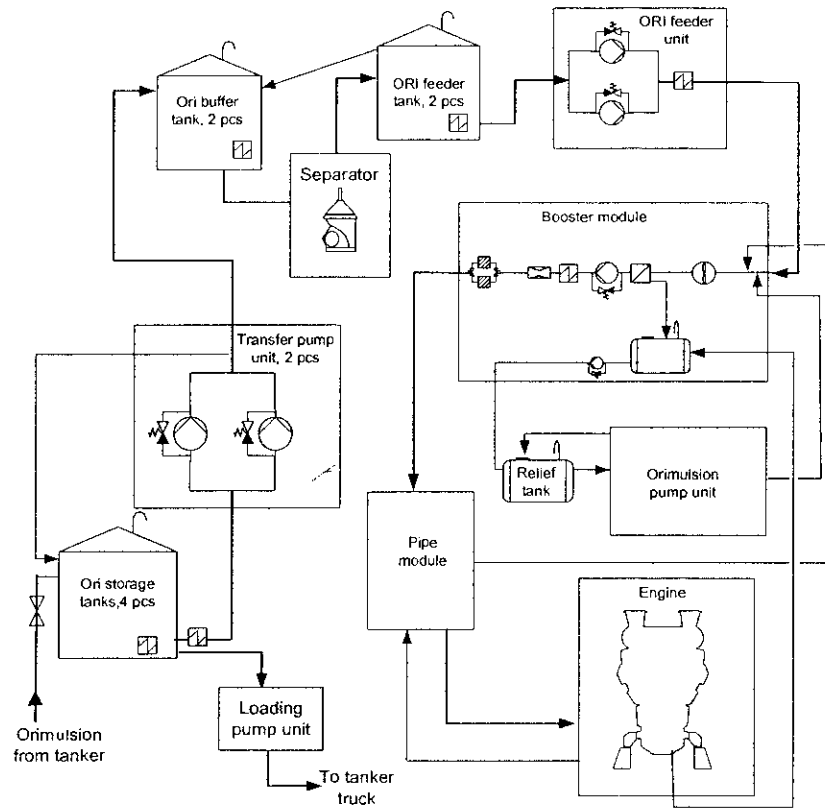


Figura 4.9: Sistema de combustible en la planta

V. Sistema de combustible en el motor

En esencia, el sistema completo de combustible en el motor está situado dentro del espacio denominado como caja caliente, el cual es un espacio aislado ubicado en la parte lateral del block del motor. El combustible en circulación junto con la radiación de calor proveniente del motor mantienen este espacio caliente de tal manera que no son necesarias tuberías adicionales para calefacción del espacio.

A. Sistema de baja presión

El combustible proveniente del módulo “booster” ingresa al sistema de baja presión de combustible en el motor. Este sistema está conformado básicamente por un sistema de tubería gemela que se encuentra dispuesta a lo largo de cada bancada del motor. Una sección de tubería corresponde al combustible que ingresa a la bomba de inyección y la otra sección al combustible que sale de la misma el cual no fue bombeado al sistema de alta presión. Un diagrama simplificado del sistema se puede apreciar en la Figura 5.1.

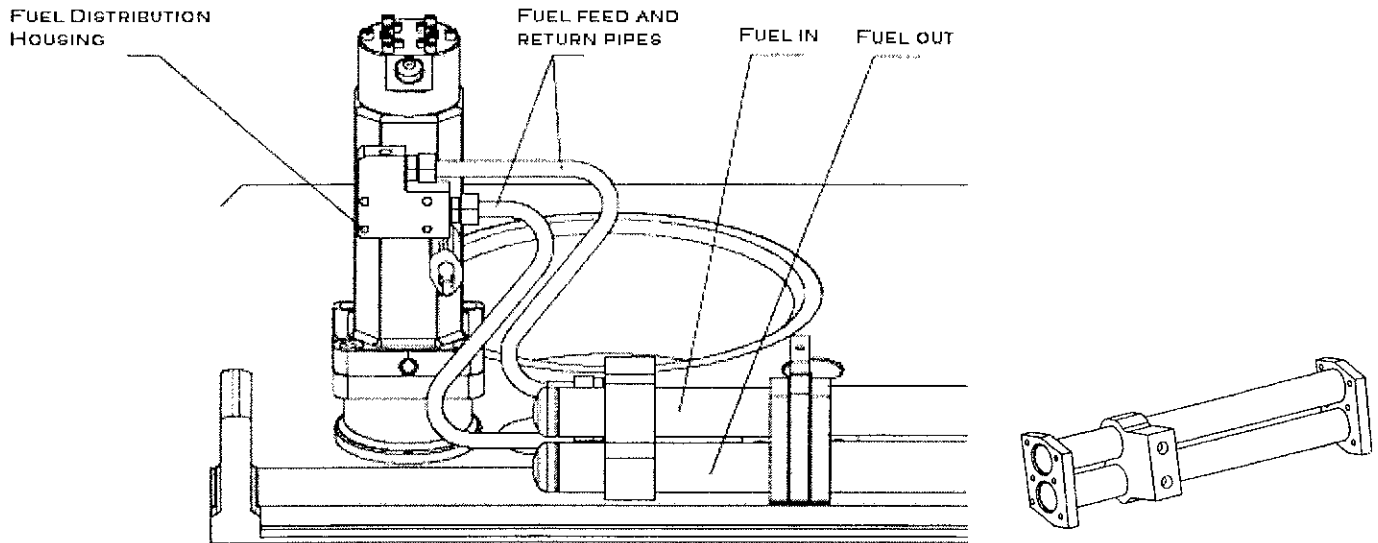


Figura 5.1: Sistema de distribución de combustible de baja presión

V. Sistema de combustible en el motor

En esencia, el sistema completo de combustible en el motor está situado dentro del espacio denominado como caja caliente, el cual es un espacio aislado ubicado en la parte lateral del block del motor. El combustible en circulación junto con la radiación de calor proveniente del motor mantienen este espacio caliente de tal manera que no son necesarias tuberías adicionales para calefacción del espacio.

A. Sistema de baja presión

El combustible proveniente del módulo “booster” ingresa al sistema de baja presión de combustible en el motor. Este sistema está conformado básicamente por un sistema de tubería gemela que se encuentra dispuesta a lo largo de cada bancada del motor. Una sección de tubería corresponde al combustible que ingresa a la bomba de inyección y la otra sección al combustible que sale de la misma el cual no fue bombeado al sistema de alta presión. Un diagrama simplificado del sistema se puede apreciar en la Figura 5.1.

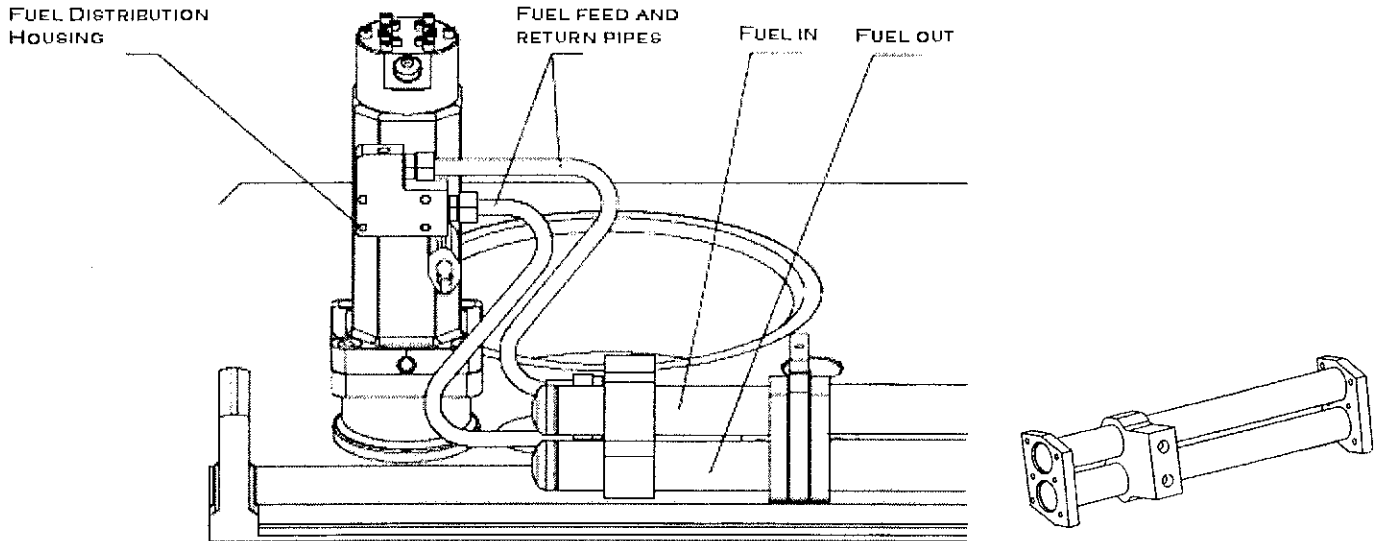


Figura 5.1: Sistema de distribución de combustible de baja presión

El combustible se mantiene en constante circulación y es trasladado a la bomba de inyección mediante los tubos alimentadores de combustibles comúnmente conocidos como tubos “Z” debido a su geometría. El tubo “Z” de alimentación traslada el combustible del tubo gemelo al distribuidor de combustible ubicado en la bomba de inyección; éste distribuye el combustible hacia el interior de la bomba o lo envía de vuelta al tubo gemelo mediante el tubo “Z” de retorno dependiendo del ciclo de la bomba de inyección. En la Figura 5.2 se puede apreciar como luce este sistema en la bancada de un motor típico.

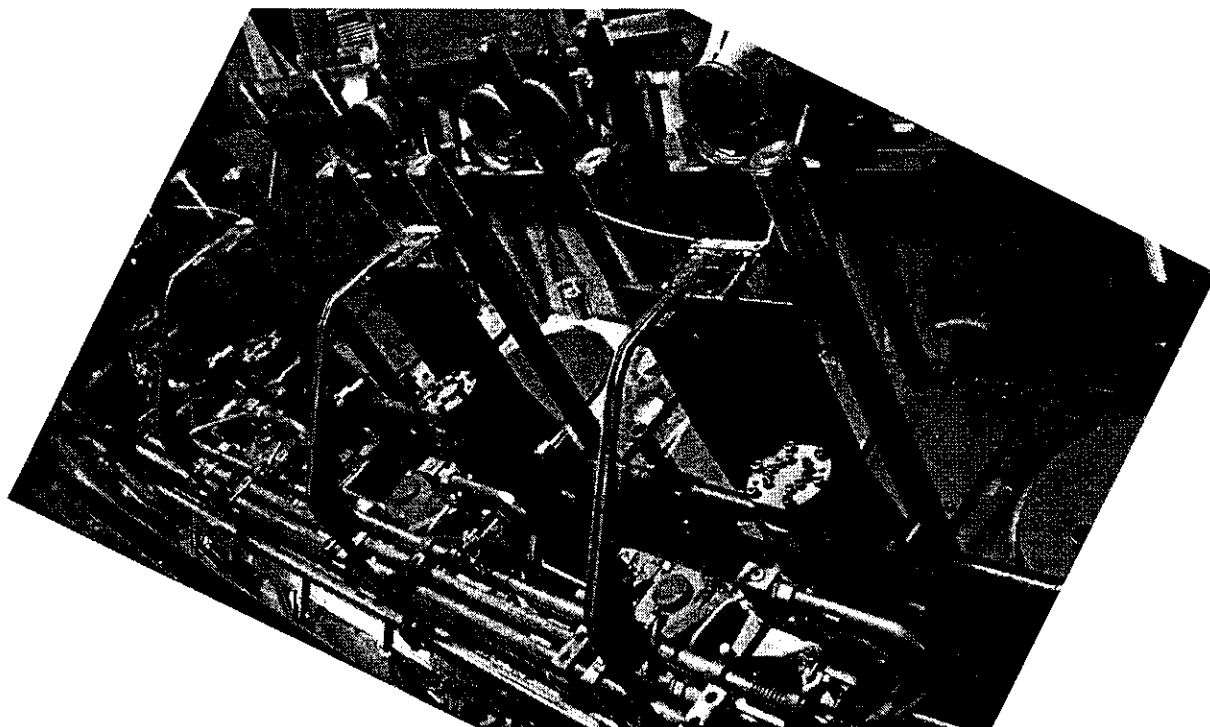


Figura 5.2: Sistema de distribución de baja presión en un motor típico

B. Sistema de alta presión

El sistema de inyección de alta presión está conformado por una bomba de inyección, tubería de alta presión y una válvula de inyección (inyector). El inyector no requiere enfriamiento directo y se encuentra localizado en el centro de la culata. En las Figuras 5.3 y 5.4 se aprecia una vista general de los componentes del sistema de distribución de combustible de alta presión en el motor.

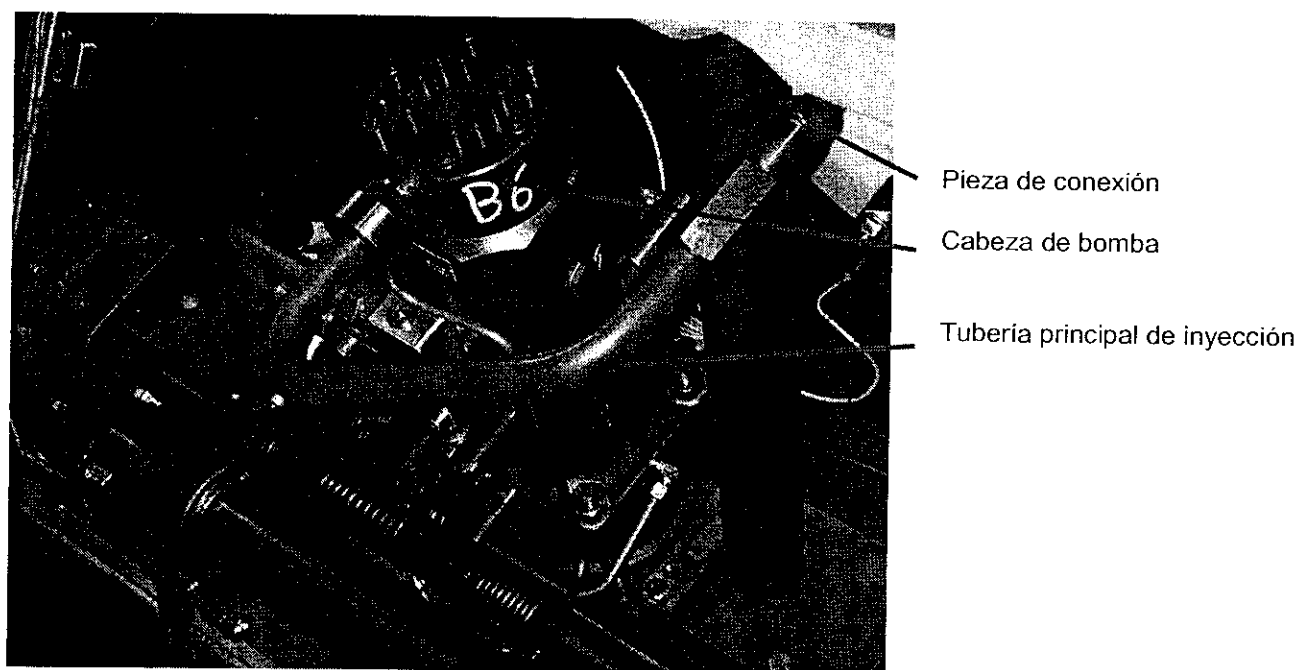
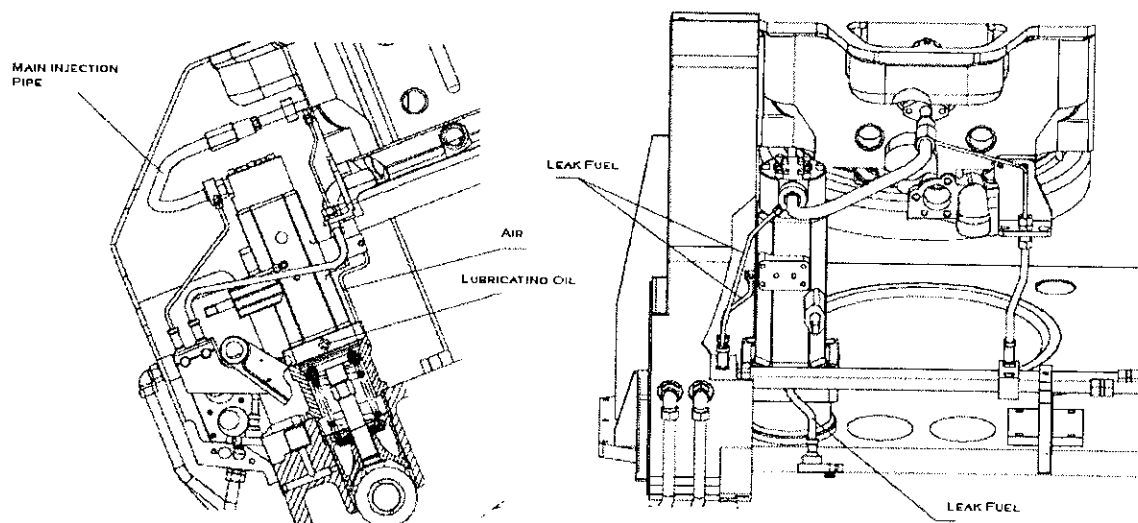


Figura 5.3: Sistema de distribución de alta presión en el motor

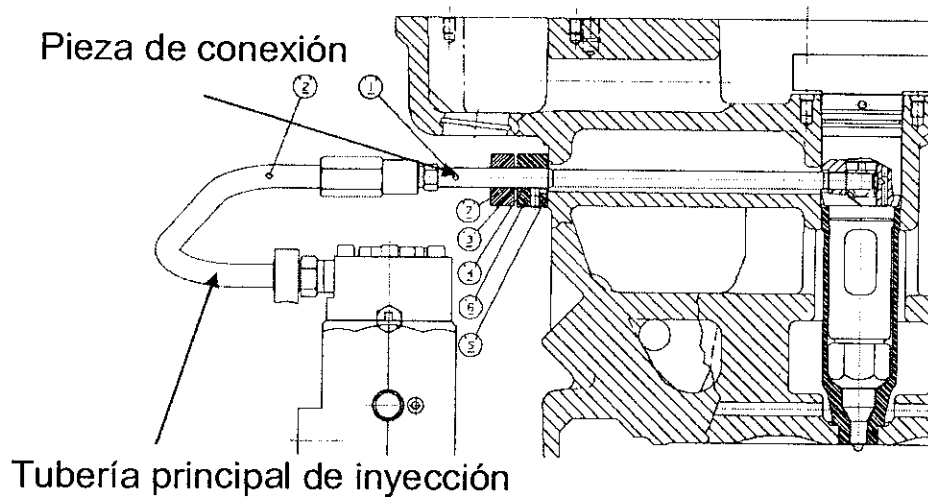


Figura 5.4: Componentes del sistema de distribución de alta presión

1. Bomba de inyección de combustible. La bomba de inyección es del tipo monocilindro y monobloque en la cual el cilindro y la tapa del mismo están integrados. Cada bomba se encuentra equipada con una válvula principal de salida, una válvula de presión constante y un cilindro de parada de emergencia.

La bomba de inyección es totalmente mecánica y es accionada por el eje de levas a través de un mecanismo que permite el movimiento de un émbolo dentro de la cámara de la bomba. El principio de operación consiste en una circulación constante del combustible dentro de la bomba el cual es interrumpido por el movimiento del émbolo quien define la inyección del combustible en su posición superior. Este émbolo envía el combustible hacia la sección de las válvulas quienes regulan el suministro hacia la tubería de inyección. En la Figura 5.5 se puede apreciar las diferentes vistas de las secciones de la bomba de inyección.

La válvula principal de salida controla el caudal de combustible que llega al inyector y a la vez evita que los picos de alta presión provenientes de la línea de inyección lleguen a la cámara de la bomba.

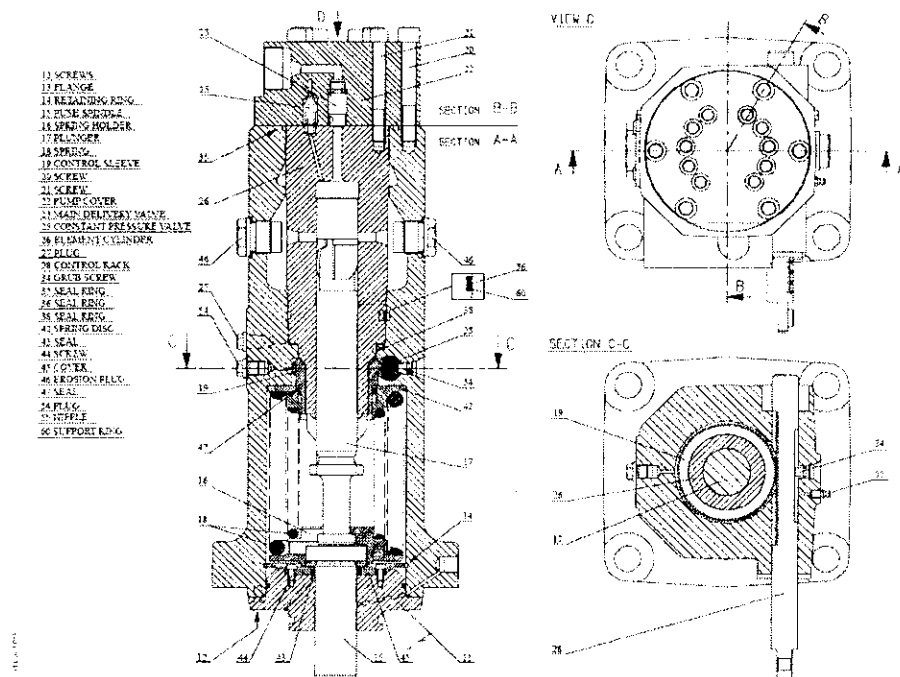


Figura 5.5: Diagrama de una bomba de inyección

La válvula de presión constante estabiliza las pulsaciones de presión en el tubo de inyección. El cilindro de parada de emergencia empuja la bomba de combustible a su posición cero usando la presión del aire de control (30 bar) cuando el control electrónico de sobrevolución es activado.

2. Línea de inyección de combustible. La línea de inyección de combustible está conformada por un tubo de inyección principal de dos capas y una pieza de conexión. La tubería principal de inyección permite el flujo de combustible proveniente de la bomba hacia la pieza de conexión. Un diagrama de este elemento puede ser apreciado en la Figura 5.6.

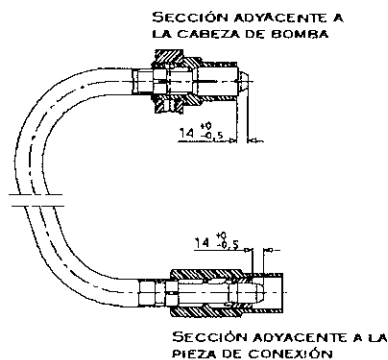


Figura 5.6: Tubería principal de inyección

En este sistema se desplaza combustible a una presión de aproximadamente 1100 bares y debido a las condiciones de operación se utiliza únicamente sellos mecánicos (metal con metal) entre componentes. Para lograr estos sellos se utiliza secciones cónicas en los extremos de los componentes del sistema. En la Figura 5.7 se puede apreciar el sello generado entre la tubería principal de inyección y la cabeza de bomba. El diseño de la sección de sello presenta una inclinación de cono de 60° .

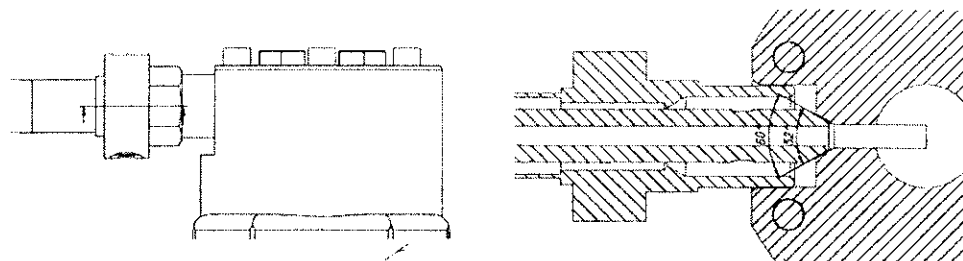


Figura 5.7: Sello generado entre la tubería principal de inyección y la cabeza de bomba

La pieza de conexión es una tubería recta la cual conecta la tubería principal de inyección con la válvula de inyección. Un diagrama de este elemento se puede apreciar en la Figura 5.8.

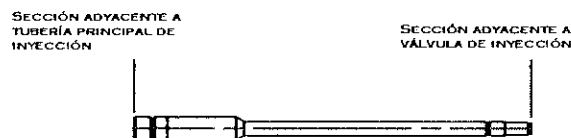


Figura 5.8: Pieza de conexión

La sección que conecta la tubería principal de inyección con la pieza de conexión presenta un sello mecánico similar al generado en la cabeza de bomba y la tubería principal de inyección. El diseño de la sección de sello presenta una inclinación de cono de 60° . En la Figura 5.9 se puede apreciar un diagrama de este sello.

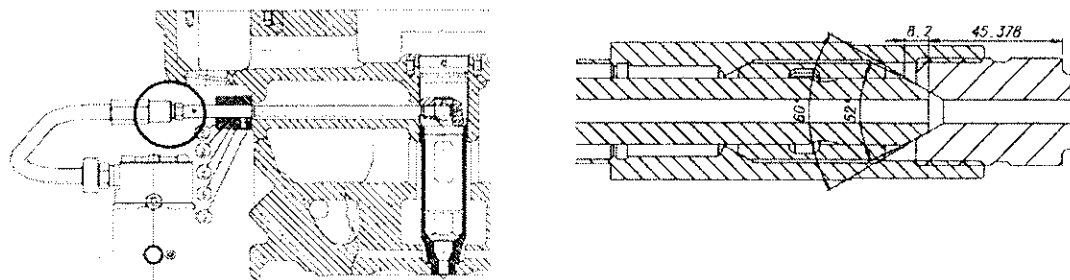


Figura 5.9: Sello generado entre la tubería principal de inyección y la pieza de conexión

Adicionalmente se presenta un sello mecánico en la sección que conecta la pieza de conexión con la válvula de inyección. En este caso el sello es generado por una superficie totalmente plana. Un diagrama de este sello se puede apreciar en la Figura 5.10.

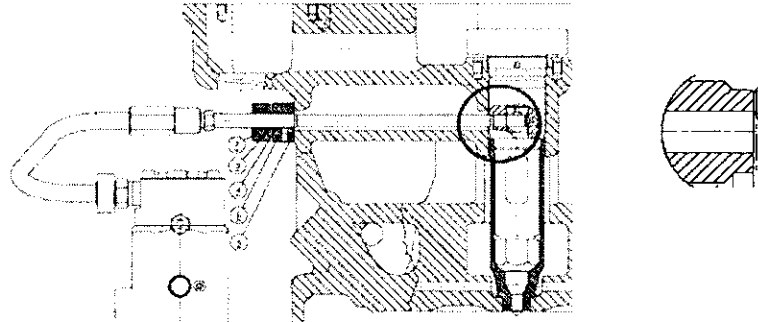


Figura 5.10: Sello generado entre la pieza de conexión y la válvula de inyección

3. Válvula de inyección. El sistema de inyección del motor está conformado adicionalmente por una válvula de inyección (inyector) la cual se ubica en la parte central de la culata. Esta válvula está constituida por un portatoberas y una tobera. El combustible entra en el portatoberas a través de la pieza de conexión (connection piece) de la línea de inyección por uno de los lados. Un diagrama de esta válvula puede ser apreciado en la Figura 5.11.

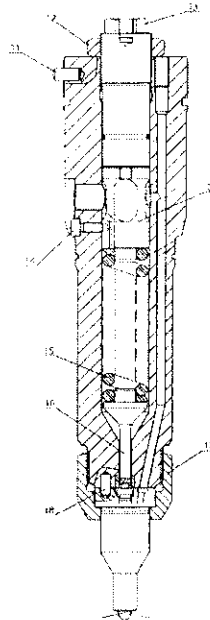


Figura 5.11: Válvula de inyección del sistema de alta presión

4. Características del diseño Orimulsion®. Uno de los problemas más importantes que involucra la aplicación de la Orimulsion® en motores diesel es la estabilidad de la emulsión en las condiciones existentes en el equipo de inyección. Como se pudo apreciar en las propiedades del combustible en una sección anterior, la viscosidad aparente de la emulsión del bitumen en agua es relativamente baja y del mismo orden que la viscosidad aparente del HFO promedio. En base a esto se puede suponer que la Orimulsion® puede ser tratada como si fuera cualquier combustible de características similares al HFO. Lamentablemente la estabilidad de la emulsión no es suficiente para resistir los esfuerzos a los que está sujeta en el sistema de inyección, en particular en la bomba de inyección durante la fase de aspersión.

Los esfuerzos a los cuales se somete la Orimulsion® en combinación con la temperatura generan un decaimiento de la emulsión. Este decaimiento consiste en los problemas estructurales descritos con anterioridad entre los cuales destaca la coalescencia y floculación, entre otros, los cuales tienden a destruir la homogeneidad de la emulsión.

Un caso extremo es cuando se da la inversión de la emulsión, la cual promueve la formación de una nueva emulsión cuya fase continua es el bitumen en el cual se dispersa la fase acuosa. Siempre que este fenómeno ocurra bajo condiciones controladas se generará una dispersión fina y homogénea de agua en bitumen la cual resulta ser una emulsión perfectamente estable. Este proceso se da de manera natural en la bomba de inyección durante la fase de aspersión pero es más conveniente si se lleva a cabo antes del ingreso del combustible al motor para asegurar características más constantes del resultado. La emulsión obtenida presenta las características de un fluido Newtoniano de alta viscosidad que debe ser precalentado a 170-180° C para alcanzar la viscosidad compatible con la buena operación del equipo de inyección. En la Figura 5.12 se puede apreciar una curva de la viscosidad como función de la temperatura de la Orimulsion® invertida.

En los estudios realizados por el fabricante se ha destacado que los mayores problemas que presenta la Orimulsion® al ser aplicada como combustible para motores diesel son los siguientes:

- Alta viscosidad y por consiguiente la necesidad de altas temperaturas de calentamiento.
- Alto contenido de agua el cual incrementa de manera considerable el riesgo de cavitación en el equipo de inyección.
- Mayores propiedades abrasivas de la ceniza al compararse con los combustibles tradicionales.
- Dificultad del manejo del combustible drenado debido a la alta viscosidad.

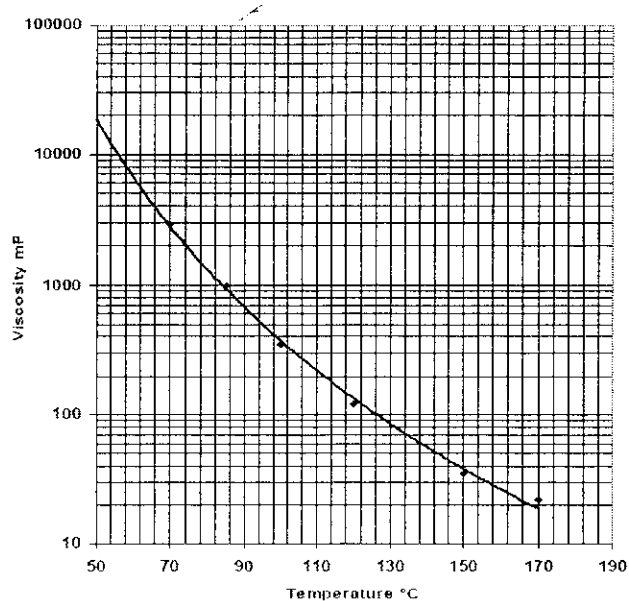


Figura 5.12: Viscosidad como función de la temperatura de la Orimulsion® invertida

Se realizó pruebas en un laboratorio con un motor prototipo para analizar la operación con Orimulsion®, y de manera paralela se realizó pruebas en una planta en operación comercial con un motor similar equipado con un sistema de inyección convencional. Esta prueba fue realizada en una planta de generación ubicada en Guatemala.

Las pruebas preliminares en el laboratorio demostraron que las mayores dificultades al utilizar Orimulsion® en motores de mediana velocidad recaían en la resistencia

insuficiente contra la cavitación y desgaste del equipo tradicional de inyección. Para poder tratar este problema se decidió rediseñar por completo los elementos del motor para resolver del todo los problemas presentados por la Orimulsion®. Los requerimientos a satisfacer se resumen en los siguientes puntos.

- Alta resistencia a cavitación
- Alta resistencia al desgaste abrasivo.
- Flexibilidad de uso
- Ausencia de cualquier modalidad de fuga.

Al considerar estos aspectos se determinó que lo mejor era adoptar el sistema de inyección de combustible conocido como “common rail” (riel común). Este sistema está constituido básicamente por una bomba de inyección conectada a un acumulador al cual se conecta el riel común y luego a dos inyectores por cada acumulador; es decir, se requiere una bomba y un acumulador por cada par de cilindros. Un diagrama simplificado puede ser apreciado en la Figura 5.13.

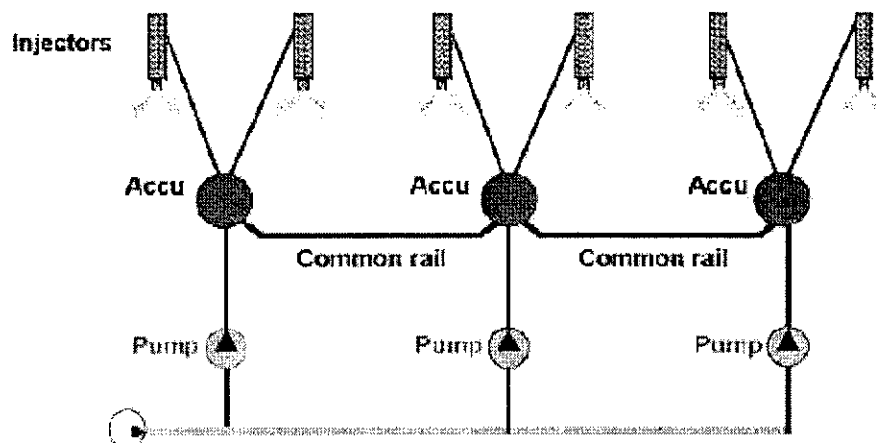


Figura 5.13: Sistema de combustible “common rail”

El sistema presentaba varias ventajas que apuntaban a resultados prometedores entre las cuales se pueden destacar la operación del combustible bajo una presión prácticamente constante, un menor número de componentes y un combustible sometido a menores esfuerzos. Estas ventajas apuntaban a un combustible más estable lo cual permitiría mejores condiciones de operación.

Al aplicar estos conceptos se pudo apreciar que efectivamente se presentaban estas ventajas, sin embargo se presentaron diversos problemas que no se había contemplado. Por ejemplo se puede mencionar que para el momento de las pruebas con este sistema se utilizaba la Orimulsion® 100, la cual tenía un alto contenido de Magnesio y agentes abrasivos que causaban serios desgastes y corrosión en los componentes de las bombas de inyección. Adicionalmente debido al diseño de las bombas de inyección para este sistema y a las características de la Orimulsion® 100, en ocasiones éstas quedaban atoradas y no era posible concretar su función.

Adicionalmente se presentaron problemas en las válvulas de inyección (inyectores) los cuales debido a su diseño y características del combustible en ocasiones no lograban concretar su finalidad de regular el flujo y quedaban atorados en la posición de aspersion, permitiendo el paso del combustible todo el tiempo.

Por el contrario, al evaluar el motor en operación comercial en una planta de generación en Guatemala el cual operó con el sistema de inyección de combustible convencional, se obtuvo resultados que superaron las expectativas de manera considerable. Por esta razón se tomó la decisión de descartar el diseño del sistema de “common rail” (riel común) como sistema de inyección para el proyecto de la planta de Orimulsion® y se efectuó con el sistema convencional de inyección de combustible.

5. Situación del sistema de combustible en el motor. Como se mencionó en la sección anterior, la planta fue diseñada para operar con el sistema de inyección de combustible convencional. Actualmente se tiene un promedio de 17,000 horas de operación en cada unidad de la planta. A lo largo de este tiempo se han suscitado diversas situaciones que involucran fugas de combustible en cada uno de los componentes del sistema de distribución de combustible en el motor, especialmente en el sistema de alta presión.

Las fugas se generan en los puntos críticos del sistema, es decir en las uniones metal-metal que presenta la línea de distribución de combustible de alta presión. Se ha detectado un desgaste prematuro y severo en los diversos componentes de este sistema lo cual ha llevado a realizar una investigación exhaustiva y a plantear posibles alternativas para remediar esta situación las cuales se describirán a detalle en la siguiente sección del presente trabajo.

VI. ANÁLISIS DE FALLAS EN EL SISTEMA DE ALTA PRESIÓN

El sistema de distribución de combustible de alta presión de los motores de la planta ha presentado una serie de fallas que se manifiestan como fugas de combustible. Estas fugas han repercutido de manera sustancial en la operación y desempeño de la planta, lo cual ha promovido una investigación que resultó en la modificación del diseño del sistema.

A. Tipos de fallas

Como se describió en una sección anterior, el sistema de distribución de combustible de alta presión en el motor está conformado por una bomba de inyección, tubería de alta presión y una válvula de inyección (inyector), donde la tubería de alta presión está conformada por una sección denominada como pieza de conexión y otra sección denominada como tubería principal de inyección.

Al evaluar los componentes de este sistema que han sido desechados como resultado de un desgaste excesivo, se ha determinado que las modalidades de fallas con un mayor índice de incidencia corresponden a un desgaste abrasivo, en el cual las partículas carcomen la superficie. Bajo la connotación de desgaste abrasivo se contempla la erosión-corrosión, el “fretting” (micromovimiento) y la cavitación.

La erosión-corrosión básicamente es un deterioro a una tasa acelerada causado por el movimiento relativo entre un fluido corrosivo y una superficie metálica. Generalmente la velocidad del fluido es alta y se presenta abrasión cuando el flujo contiene sólidos suspendidos. La erosión-corrosión es el resultado de la combinación de un ambiente químicamente agresivo y altas velocidades superficiales de un fluido. Este tipo de desgaste resulta cuando un fluido recorre a altas velocidades un objeto estacionario o cuando se da un movimiento rápido de un objeto sobre un fluido estacionario.

Las superficies que presentan este tipo de desgaste generalmente se encuentran bastante limpias a diferencia de las superficies en otros tipos de corrosión. Esta modalidad de desgaste es usualmente asociada con un flujo turbulento, ya que la mayor parte de los sistemas prácticos involucran este tipo de flujo el cual es lo suficientemente rápido para satisfacer las necesidades de distribución. La erosión-corrosión se atribuye en la mayoría de los casos a flujos de fluidos multifásicos. En la Figura 6.1 se puede apreciar como se genera este tipo de desgaste.

En esta modalidad de desgaste, el movimiento relativo entre el fluido corrosivo y la superficie metálica esencialmente remueve (erosiona) las capas protectoras que pueda tener la superficie metálica, exponiendo el metal a un flujo corrosivo que puede causar un ataque rápido.

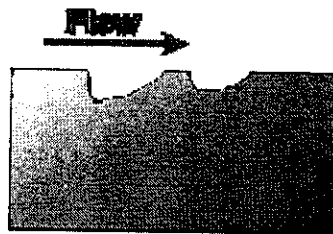


Figura 6.1: Erosión-corrosión en una superficie metálica

Otra modalidad de desgaste es el “fretting” (micromovimiento), el cual ocurre cuando dos superficies bajo una carga son sujetas a ciclos con un movimiento relativo de baja amplitud, usualmente del orden de 0.01 a 0.20 mm. Esta modalidad de desgaste ocurre en la interfase de dos superficies altamente cargadas que no fueron diseñadas para desplazarse entre ellas. El tipo más común de “fretting” es causado por la vibración, generando pequeños hoyuelos o ranuras los cuales caracterizan esta modalidad de desgaste. En la Figura 6.2 se puede apreciar como se genera este tipo de desgaste.

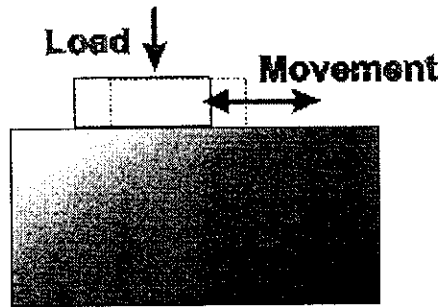


Figura 6.2: Elementos que generan "fretting" en una superficie metálica.

Adicionalmente están las fallas ocasionadas por cavitación, las cuales surgen por la formación y colapso de burbujas de vapor cercanas a la superficie metálica. El fácil colapso de las burbujas puede generar ondas de impacto que causan la deformación local de la superficie metálica. La cavitación ocurre cuando la presión operacional del fluido cae por debajo de su presión vapor, generando burbujas que luego colapsan. En la figura 6.3 se puede apreciar este tipo de desgaste.

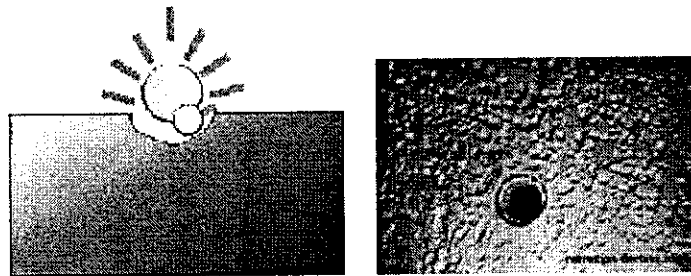


Figura 6.3: Cavitación en una superficie metálica

B. Registro de fallas

El análisis se realizó tomando como muestra los componentes del sistema que eran desechados, los cuales en su mayoría correspondían al sistema de tubería de alta presión (pieza de conexión y tubería principal de inyección). El tipo de falla en cada uno de los componentes fue registrado excluyendo la bomba de inyección y la válvula de inyección, los cuales no conformaron ni el 10% de la muestra total.

De esta manera se procedió a evaluar cada uno de los componentes (piezas de conexión y tubería principal de inyección) registrando el tipo de falla encontrado, su ubicación y la intensidad del mismo. Para definir la intensidad se estableció una escala de cuatro valores cuyo valor mínimo corresponde a la letra A y cuyo valor máximo corresponde a la letra D, es decir, una falla con el daño más severo le corresponde una letra D. En la Figura 6.4 se puede apreciar el patrón de intensidad anteriormente descrito para un mismo tipo de falla.

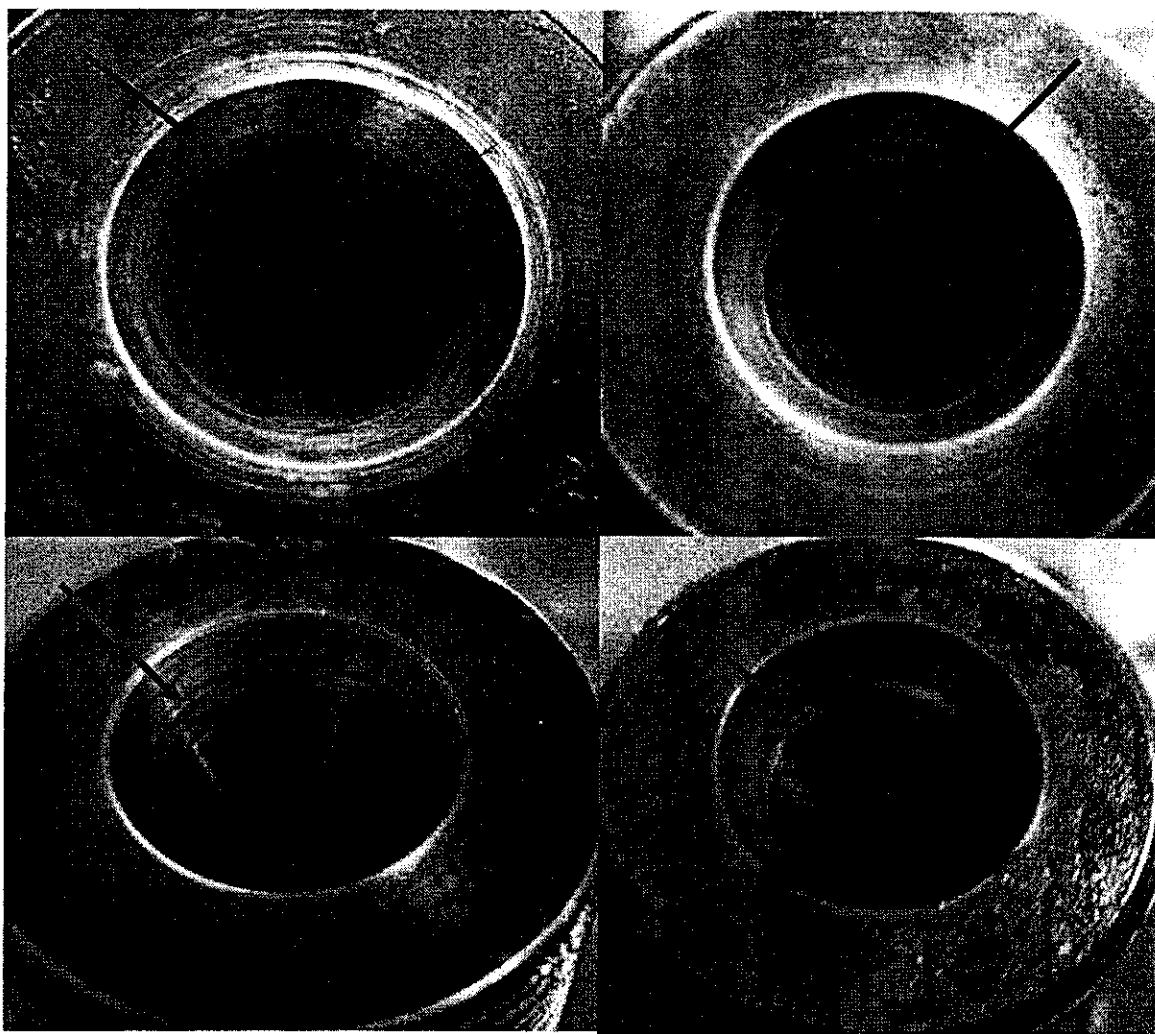


Figura 6.4: Patrón de intensidad para un tipo de falla en la sección adyacente al tubo principal de inyección en la tubería de conexión

Se analizó 61 tubos de inyección principal (main injection pipes) cuyos resultados se tabularon y pueden ser apreciados en la Tabla 6.1.

Tubería Principal de Inyección

No	Extremo Cabeza de Bomba	Tipo de Daño	Extremo Pieza de Conexión	Tipo de Daño	Intensidad
1	X		X	fretting	D
2	X	fretting			C
3	X	erosión			B
4	X	fretting	X	fretting	D
5	X	fretting	X	erosión	B
6			X	erosión	D
7	X	erosión	X	fretting	D
8	X	cavitación	X	erosión	D
9	X	erosión			C
10			X	erosión	D
11	X	erosión			C
12	X	erosión			C
13	X	erosión			C
14	X	erosión	X	erosión	D
15			X	erosión	D
16			X	erosión	D
17	X	cavitación			D
18			X	fretting	A
19	X	cavitación			C
20			X	cavitación	B
21			X	fretting	A
22			X	fretting	A
23			X	erosión	C
24	X		X	fretting	C
25			X	fretting	A
26	X	erosión	X	fretting	C
27	X	fretting	X	fretting	A
28	X	fretting	X	fretting	A
29			X	fretting	A
30			X	fretting	B
31			X	fretting	A
32			X	cavitación	B
33	X	erosión			C
34			X	cavitación	C
35			X	cavitación	D
36			X	cavitación	C
37	X	cavitación	X	fretting	C
38			X	cavitación	D
39	X	cavitación	X	erosión	D
40			X	cavitación	D
41	X	fretting	X	fretting	A
42	X	fretting	X	fretting	A
43			X	erosión	D
44			X	cavitación	D
45			X	erosión	C
46	X	erosión			C
47	X	erosión			C
48	X	fretting	X	fretting	A
49			X	cavitación	B
50	X	fretting	X	cavitación	B
51			X	erosión	D
52			X	erosión	B
53			X	erosión	B
54			X	fretting	B
55			X	fretting	B
56			X	fretting	B
57			X	erosión	C
58			X	fretting	A
59			X	erosión	C
60	X	fretting	X	fretting	B
61	X	fretting	X	fretting	A

Tabla 6.1: Resultados de la evaluación de la tubería principal de inyección

De igual manera se analizó 47 piezas de conexión (connection pieces) cuyos resultados se tabularon y pueden ser apreciados en la Tabla 6.2.

C. Análisis del registro de fallas

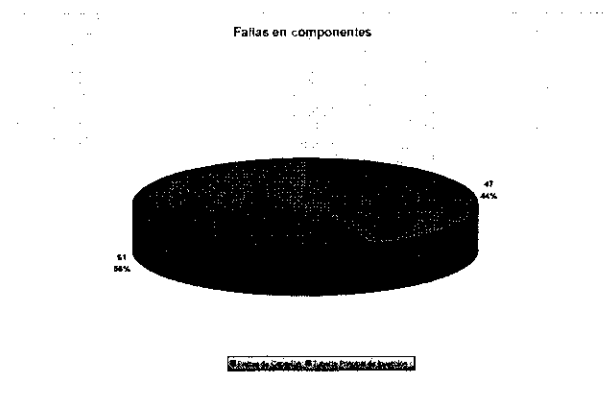
Como se mencionó con anterioridad, la evaluación de los componentes se realizó tomando como muestra todos aquellos componentes que eran desechados como resultado de alguna falla en su estructura. De acuerdo a la muestra evaluada, se obtuvo una relación de 47 piezas de conexión con alguna falla en su estructura y 61 tuberías principales de inyección con alguna falla en su estructura. La relación obtenida puede ser apreciada en la Figura 6.5.

Piezas de Conexión

No	Extremo Tubería Principal de Inyección	Tipo de Desgaste	Extremo Válvula de Inyección	Tipo de Desgaste	Integridad
1	X	erosión			C
2	X	fretting			B
3	X	fretting / erosión			D
4	X	fretting			A
5	X	fretting			A
6	X	fretting			B
7	X	fretting			B
8	X	fretting			C
9	X	fretting / erosión			D
10	X	fretting			C
11	X	fretting	X	cavitación	D
12	X	erosión			D
13	X	erosión			C
14	X	fretting / erosión			D
15	X	erosión			D
16	X	fretting / erosión			D
17	X	erosión			C
18	X	cavitación			C
19	X	cavitación			C
20	X	erosión	X	cavitación	C
21	X	fretting			B
22	X	fretting			A
23	X	fretting			B
24	X	fretting			C
25			X	erosión	C
26	X	fretting			C

No	Extremo Tubería Principal de Inyección	Tipo de Desgaste	Extremo Válvula de Inyección	Tipo de Desgaste	Integridad
27	X	fretting			B
28	X	fretting	X	cavitación	B
29			X	fretting	A
30	X	fretting	X	fretting	A
31	X	fretting			A
32	X	fretting	X	fretting	A
33	X	fretting			
34	X	erosión			B
35	X	fretting			A
36	X	fretting			A
37	X	erosión	X	fretting	D/A
38	X	fretting			A
39	X	fretting			B
40	X	fretting	X	fretting	A
41	X	fretting			B
42	X	fretting	X	cavitación	A/D
43	X	fretting			B
44	X	fretting			A
45	X	fretting	X	fretting	A
46	X	erosión			D
47	X	fretting			A

Tabla 6.2: Resultados de la evaluación de las piezas de conexión



En la tubería principal de inyección se distinguió las fallas que incidieron en la sección adyacente a la cabeza de bomba y las fallas que incidieron en la sección adyacente a la pieza de conexión, como referencia ver Figura 6.6.

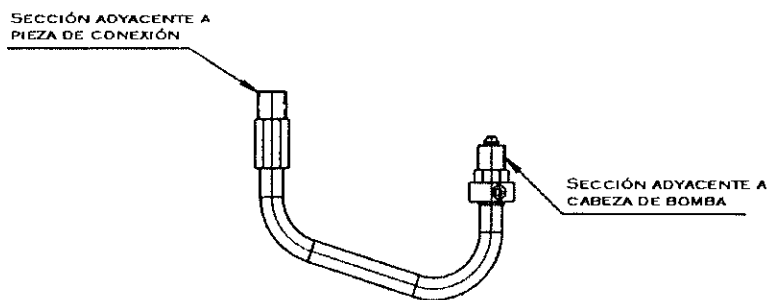


Figura 6.6: Secciones de la tubería principal de inyección

La relación obtenida puede apreciarse en la Figura 6.7.

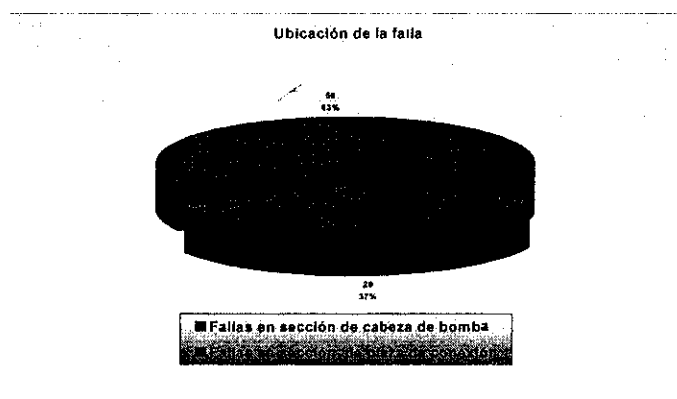


Figura 6.7: Ubicación de fallas en tubería principal de inyección

Para cada sección de la tubería principal de inyección se evaluó la incidencia de cada una de las modalidades de desgaste abrasivo, en la Figura 6.8 se puede apreciar para la sección adyacente a la cabeza de bomba.



Figura 6.8: Incidencia de las modalidades de desgaste en la sección adyacente a la cabeza de bomba de la tubería principal de inyección

En la Figura 6.9 se puede apreciar la relación obtenida para la sección adyacente a la pieza de conexión.

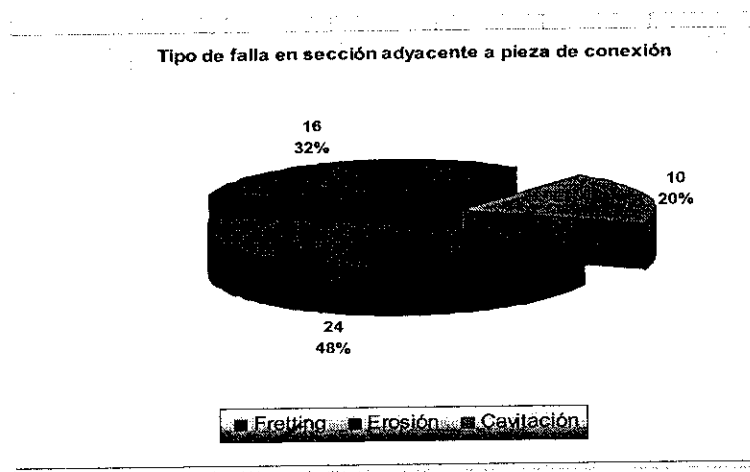


Figura 6.9: Incidencia de las modalidades de desgaste en la sección adyacente a la pieza de conexión de la tubería principal de inyección

En la Figura 6.10 se puede apreciar la relación obtenida para la tubería principal de inyección en general.

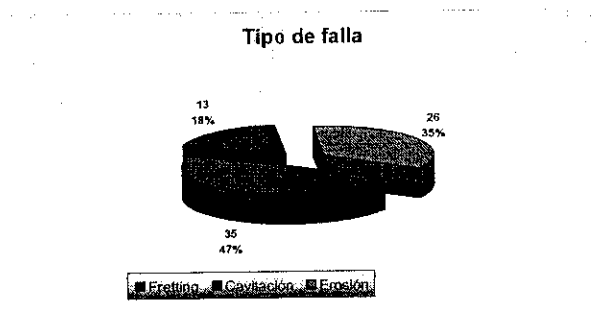


Figura 6.10 Tipos de desgaste en la tubería principal de inyección

Adicionalmente se evaluó los niveles de intensidad para cada modalidad de desgaste. En la Figura 6.11 se puede apreciar la relación para la modalidad de “fretting” (micromovimiento).

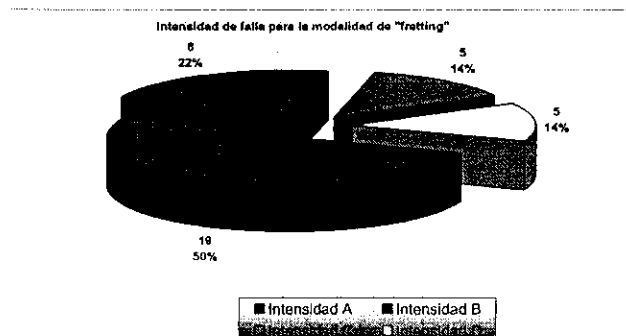


Figura 6.11: Nivel de intensidad para el "fretting" en la tubería principal de inyección

En la Figura 6.12 se puede apreciar el nivel de intensidad para la modalidad de erosión en la tubería principal de inyección.

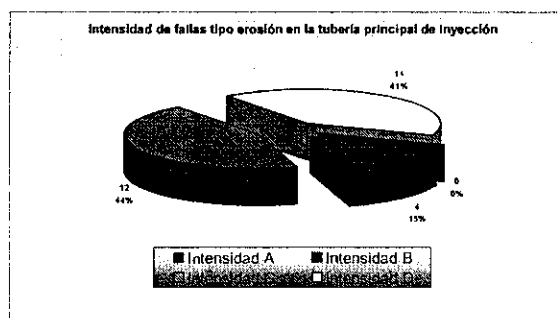


Figura 6.12: Niveles de intensidad de erosión en la tubería principal de inyección

En la Figura 6.13 se puede apreciar el nivel de intensidad para la modalidad de cavitación en la tubería principal de inyección.

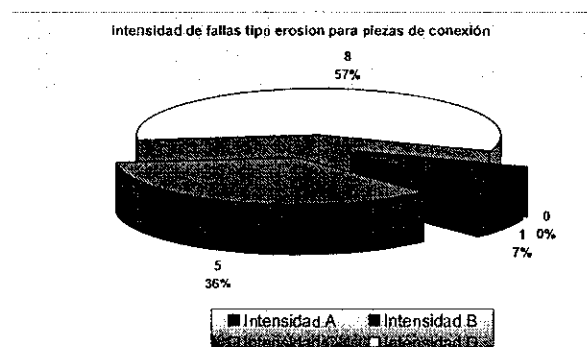


Figura 6.13: Niveles de intensidad para la tubería principal de inyección

En la Figura 6.14 se puede apreciar la relación para el nivel de intensidad de todas las fallas en la tubería principal de inyección.

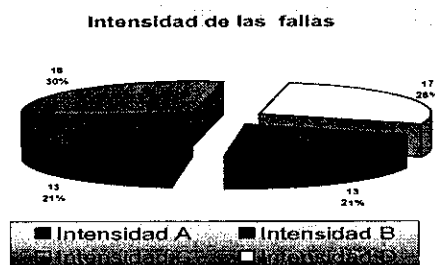


Figura 6.14: Niveles de intensidad para las fallas en la tubería principal de inyección

En las piezas de conexión se distinguió las fallas que incidieron en la sección adyacente a la tubería principal de inyección y las fallas que incidieron en la sección adyacente a la válvula de inyección, como referencia ver Figura 6.15.



Figura 6.15: Secciones de la pieza de conexión

La relación obtenida puede apreciarse en la Figura 6.16.

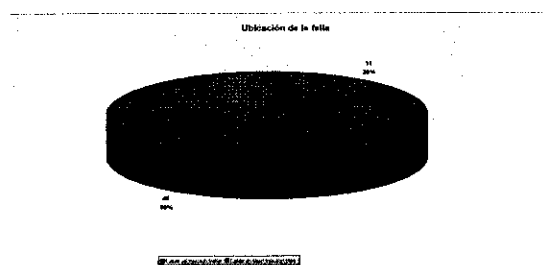


Figura 6.16: Ubicación de fallas en la pieza de conexión

Para cada sección se determinó la incidencia de cada una de las modalidades de desgaste, en la Figura 6.17 se puede apreciar para la sección adyacente a la tubería principal de inyección.

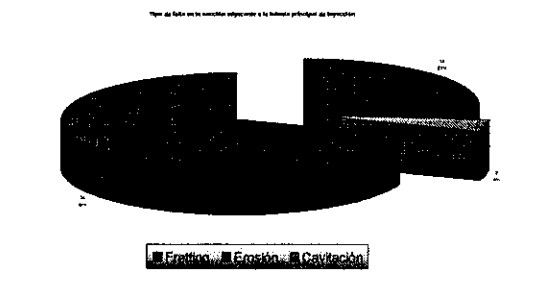


Figura 6.17: Fallas en la sección adyacente a la tubería principal de inyección de la pieza de conexión

En la Figura 6.18 se puede apreciar la relación para la sección adyacente a la válvula de inyección.

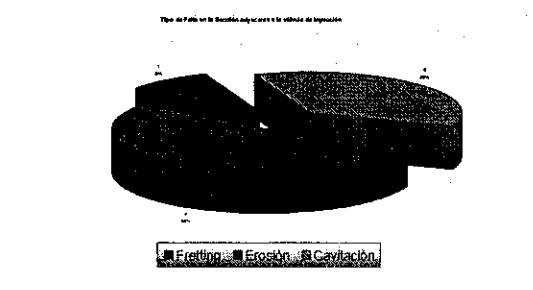


Figura 6.18: Fallas en la sección adyacente a la válvula de inyección

En la Figura 6.19 se puede apreciar la relación de los tipos de falla para la pieza de conexión en general.

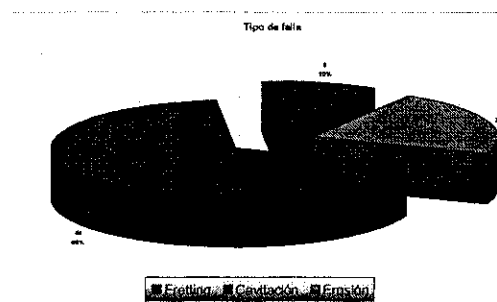


Figura 6.19: Tipos de desgaste en piezas de conexión

Adicionalmente se evaluó los niveles de intensidad para las modalidades de desgaste. En la Figura 6.20 se puede apreciar la relación para la modalidad de “fretting” (micromovimiento)

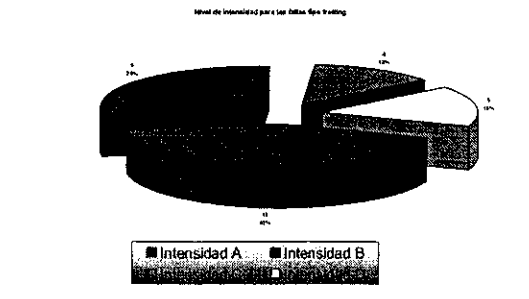


Figura 6.20: Niveles de intensidad para el “fretting” en la pieza de conexión

En la Figura 6.21 se puede apreciar el nivel de intensidad para la modalidad de erosión en la pieza de conexión.

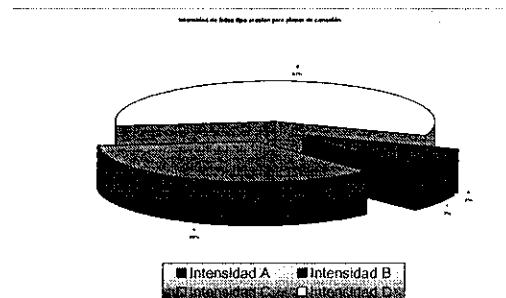


Figura 6.21: Niveles de intensidad de erosión en la pieza de conexión

En la Figura 6.22 se puede apreciar el nivel de intensidad para la modalidad de cavitación en la pieza de conexión.

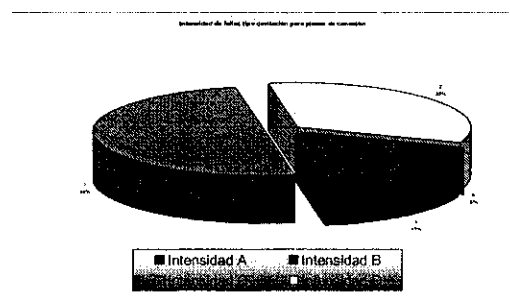


Figura 6.22: Niveles de intensidad de cavitación en la pieza de conexión

En la Figura 6.23 se puede apreciar la relación para el nivel de intensidad de todas las fallas en la pieza de conexión.

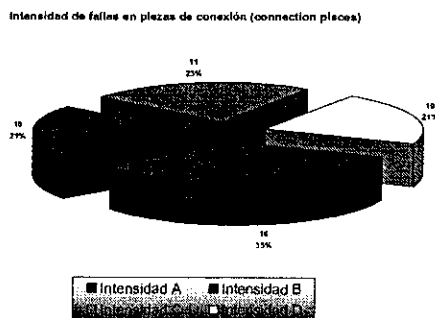


Figura 6.23: Niveles de intensidad de fallas en piezas de conexión

D. Posibles causas

De acuerdo al análisis de fallas expuesto en la sección anterior se puede constatar una pequeña diferencia en cuanto al nivel de incidencia de fallas en la pieza de conexión con respecto a la tubería principal de inyección. Es importante resaltar que la muestra a la que se tuvo acceso es relativamente limitada, ya que la planta cuenta con diez motores de 18 cilindros cada uno lo cual resulta en un total de ciento ochenta (180) componentes de alta presión bajo la suposición que cada uno falló por lo menos una vez. Con esta aseveración se quiere señalar que la proporción de falla de cada componente expuesto de acuerdo al total podría presentar cierta incertidumbre no cuantificable en este estudio. Sin embargo, a pesar de ser relativamente limitada la muestra evaluada, se puede considerar como representativa en el análisis de las modalidades de falla en cada componente debido a la aleatoriedad con la que fueron depositados los componentes en el período que se realizó el estudio. La muestra se generó a partir de elementos de varios motores, los cuales fueron depositados conforme se fueron generando las fallas.

En las piezas de conexión se presentó una notable diferencia en la incidencia de las fallas en cada sección, concentrándose el 80% en la sección adyacente a la tubería principal y únicamente un 20% en la sección adyacente a la válvula de inyección (inyector). Se puede atribuir la poca incidencia en la sección adyacente a la válvula de

inyección a dos aspectos. Como primer aspecto se puede considerar el nivel de sujeción que presenta este elemento en su sección colindante con la válvula de inyección, sumado a que éste último está totalmente fijo a la culata. Este factor reduce al máximo las posibilidades de movimiento del sello generado en esta sección lo cual minimiza las posibilidades de un desgaste abrasivo como lo es el “fretting”. Otro aspecto a considerar es lo lejano que se encuentra este punto de la bomba de inyección lo que resulta en una menor incidencia de las pulsaciones generadas por este elemento disminuyendo así la fuerza ejercida para desestabilizar el sello formado en esta sección.

Para la pieza de conexión la modalidad de desgaste que presentó una mayor incidencia fue el “fretting”. Este tipo de desgaste tuvo una mayor ocurrencia en la sección adyacente a la tubería principal de inyección. Al evaluar las posibles causas se puede atribuir como principal responsable de este tipo de desgaste al movimiento al que está sujeta la unión de estas piezas. Este movimiento se genera como resultado de la fuerza que ejerce la presión que actúa sobre la superficie expuesta en la sección cónica de la tubería principal de inyección, ver Figura 6.24. Esta fuerza actúa en dirección opuesta al sello promoviendo un movimiento que es detrimental para la integridad del componente. Adicional a este factor se puede considerar que el combustible presenta un contenido de partículas sólidas, lo cual causa un desgaste abrasivo en la sección.

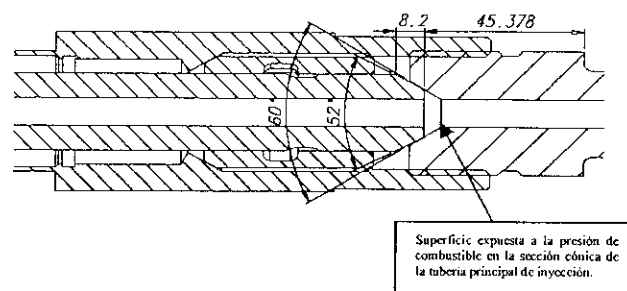


Figura 6.24: Superficie de la sección cónica de la tubería principal de inyección

La cavitación se detectó en un menor grado de incidencia. Esta modalidad de desgaste se genera al momento de colapsar las burbujas de agua en un punto cercano a la superficie metálica, o cuando varias colapsan generando ondas que se propagan e inciden en dicha superficie. La emulsión que circula es controlada y tratada para evitar que se

generen condiciones que promuevan la cavitación por su alto contenido de agua; sin embargo, es posible que esta modalidad de desgaste abrasivo se presente debido a la susceptibilidad de la sección a erosionarse, permitiendo el alojamiento de gotas de agua que eventualmente colapsan. Por otro lado es posible que en ocasiones el contenido de agua del combustible no sea totalmente parte de la emulsión y sea más susceptible a colapsar.

En la tubería principal de inyección el 63% de las fallas se concentró en la sección adyacente a la pieza de conexión, y 37% restante en la sección adyacente a la cabeza de la bomba de inyección. La menor incidencia en la sección adyacente a la cabeza de la bomba de inyección se atribuye al nivel de sujeción que presenta la bomba de inyección lo cual resulta en una unión más sólida. La sección adyacente a la pieza de conexión es un elemento cónico macho como se aprecia en la Figura 6.6. Esta unión está sujeta a un leve movimiento generado por las pulsaciones provenientes de la bomba de inyección que sumadas a la superficie expuesta del cono macho a fuerzas en contra del sello causan un desgaste abrasivo de la modalidad de “fretting”. Esta es una situación similar a la anteriormente expuesta para la sección cónica de la pieza de conexión; sin embargo cabe destacar que de acuerdo a la morfología que presenta el cono en esta sección, al generarse algún tipo de contra flujo local ocasionado por la turbulencia, las partículas contenidas en la emulsión tienden a causar cierto desgaste abrasivo el cual es más susceptible en esta sección.

Para la tubería principal de inyección se detectó cavitación en un menor grado de incidencia, situación similar a la acontecida en las piezas de conexión. Esta modalidad de desgaste se atribuye al colapso de las burbujas de agua por las razones anteriormente expuestas. En la sección adyacente a la pieza de conexión, el desgaste abrasivo en la modalidad de “fretting” presentó la mayor incidencia, situación que es comprensible y congruente de acuerdo al nivel de interacción que se tiene con la sección correspondiente en la pieza de conexión.

En la sección adyacente a la cabeza de la bomba el desgaste abrasivo en forma de “fretting” y erosión tuvo una incidencia en la misma proporción. El sello en este punto es formado por una sección cónica del tipo macho para la parte correspondiente a la tubería principal de inyección. Se atribuye un nivel menor de incidencia de desgaste en términos generales de la proporción debido al nivel de sujeción que se genera en este sello, ya que la bomba está totalmente fija en su posición lo cual promueve un sello un poco más sólido. Sin embargo, es importante resaltar que esta sección está más susceptible a las pulsaciones generadas por la bomba de inyección y dada la naturaleza de la forma cónica tipo macho de la tubería principal de inyección, esta sección se vuelve vulnerable tanto para el desgaste abrasivo en forma de erosión como al “fretting” por el movimiento que se puede generar.

En el análisis de la sección anterior se pudo constatar los diferentes niveles de intensidad de las fallas reportados para las diferentes secciones de los componentes del sistema de distribución de combustible de alta presión. Es importante resaltar que el nivel de intensidad reportado es dependiente del tiempo que transcurrió desde que se originó la fuga de combustible y la posibilidad de reemplazar el componente, ya que es necesario detener la unidad para realizar el cambio respectivo. De esta manera, la intensidad de la falla es primordialmente dependiente del tiempo que llevó realizar su reemplazo y no así de la modalidad del desgaste presentado.

E. El nuevo diseño

Dada la naturaleza de las fallas anteriormente descritas se propuso un nuevo diseño para los componentes más afectados: piezas de conexión y tubería principal de inyección, como referencia ver Figura 6.25. Las características de este nuevo diseño se describen a continuación.

El primer componente a considerar fue la pieza de conexión (connection piece). Este elemento conecta la tubería principal de inyección con la válvula de inyección. El extremo que conecta con la tubería principal de inyección es una sección cónica hembra y

de inyección no actúa en todo el diámetro de la tubería lo cual reduce la fuerza que promueve la apertura del sello. En la Figura 6.27 se puede apreciar los dos diseños.

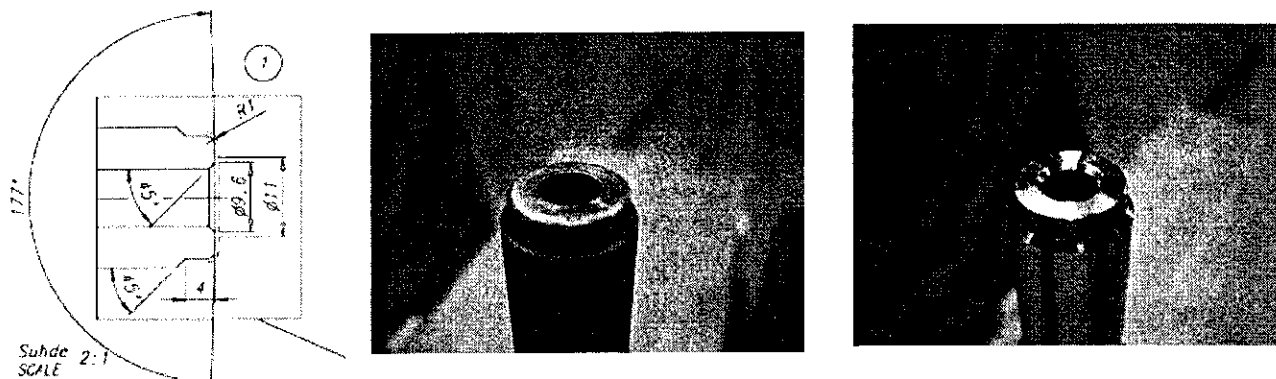


Figura 6.27: Diseños de la sección adyacente a la válvula de inyección de la pieza de conexión.

El siguiente componente a considerar es la tubería principal de inyección (main injection pipe). En este componente se modificó la morfología de la unión con la pieza de conexión (connection piece), la cual se resalta en la Figura 6.28. El diseño original presentaba una sección cónica con un ángulo de 60° como se puede apreciar en la Figura 6.29. El nuevo diseño contempla una ampliación de este ángulo, modificando así la superficie sobre la cual actúa la presión durante la inyección de combustible. El nuevo ángulo es de 90° como se puede apreciar en la Figura 6.30.

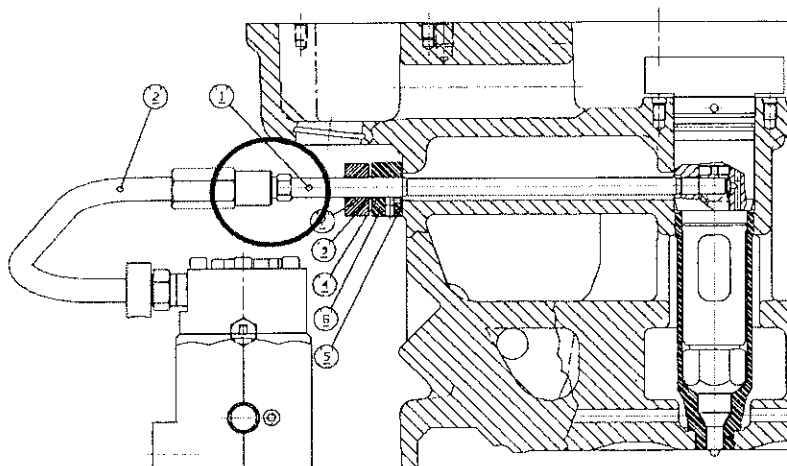


Figura 6.28: Unión modificada de la tubería principal de inyección con la pieza de conexión

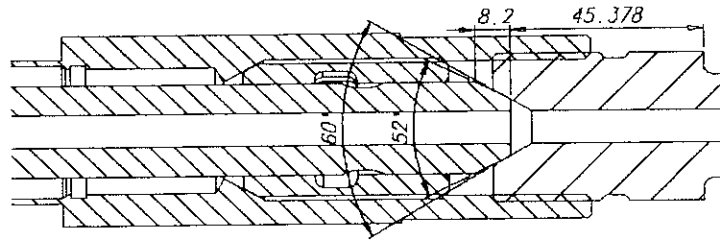


Figura 6.29: Diseño original de la sección cónica de 60°

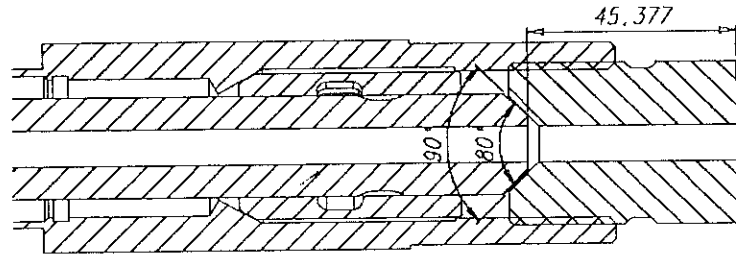


Figura 6.30: Nuevo diseño con sección cónica de 90°

Al incrementar el ángulo del cono de 60° a 90° se logra una disminución en la superficie en la cual actúa la presión de combustible durante la inyección. Esta nueva superficie se puede apreciar en la Figura 6.31.

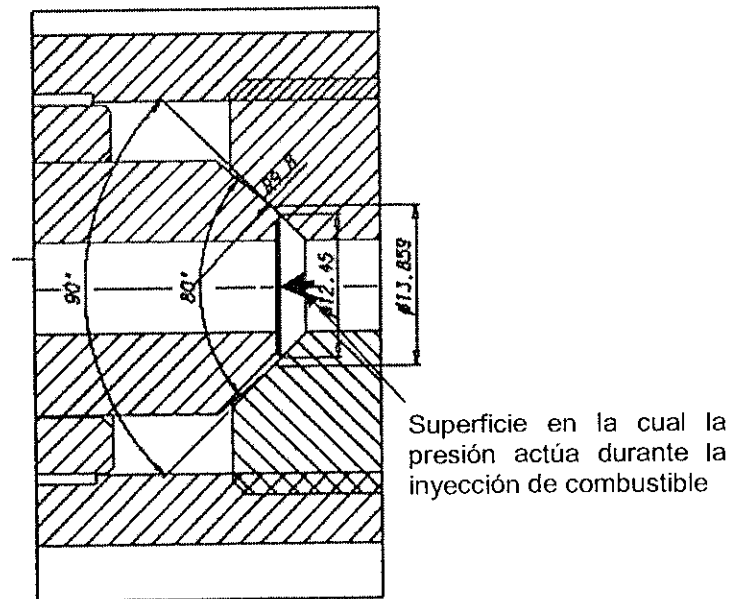


Figura 6.31: Nueva superficie en la cual actúa la presión de combustible durante la inyección

Al disminuir la superficie de contacto donde actúa la presión, se obtiene una disminución en la fuerza que actúa en contra de la unión. Adicionalmente el nuevo diseño involucró un endurecimiento de la sección cónica de la pieza de conexión lo cual promueve un incremento en el torque de apriete. La sección cónica de la tubería principal de inyección es rolada en frío lo cual permite mayores presiones de contacto y disminuye el riesgo de fretting. Para este nuevo diseño se simuló la presión de fuga en la unión, obteniendo los resultados que se aprecian en la Figura 6.32.

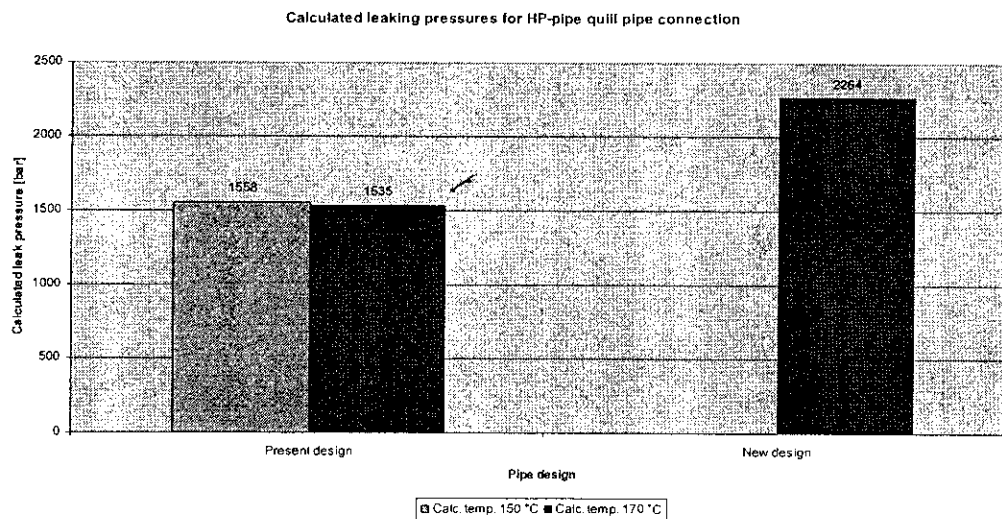


Figura 6.32: Presiones de fuga calculadas para la unión pieza de conexión – tubería principal de inyección.

La sección que conecta la tubería principal de inyección con la cabeza de la bomba también fue modificada. Esta sección puede ser apreciada en la Figura 6.33. En esta sección la superficie de contacto fue disminuida de 3.61mm a 2.95mm, logrando así una disminución en la fuerza ejercida en contra de la unión. Adicionalmente se modificó el material de la tuerca y la modalidad de manufactura del cono para disminuir el riesgo “fretting” y permitir mayores presiones de contacto. En la Figura 6.34 se puede apreciar los valores simulados de presión de fuga para esta unión.

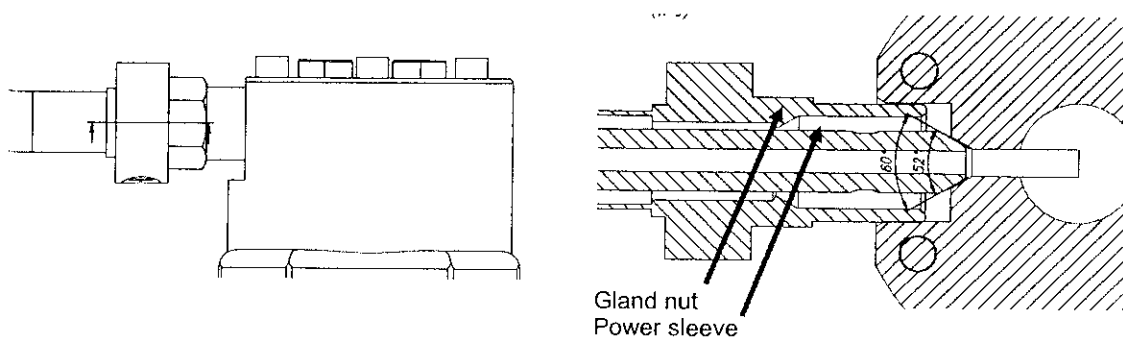


Figura 6.33: Unión tubería principal de inyección – cabeza de bomba.

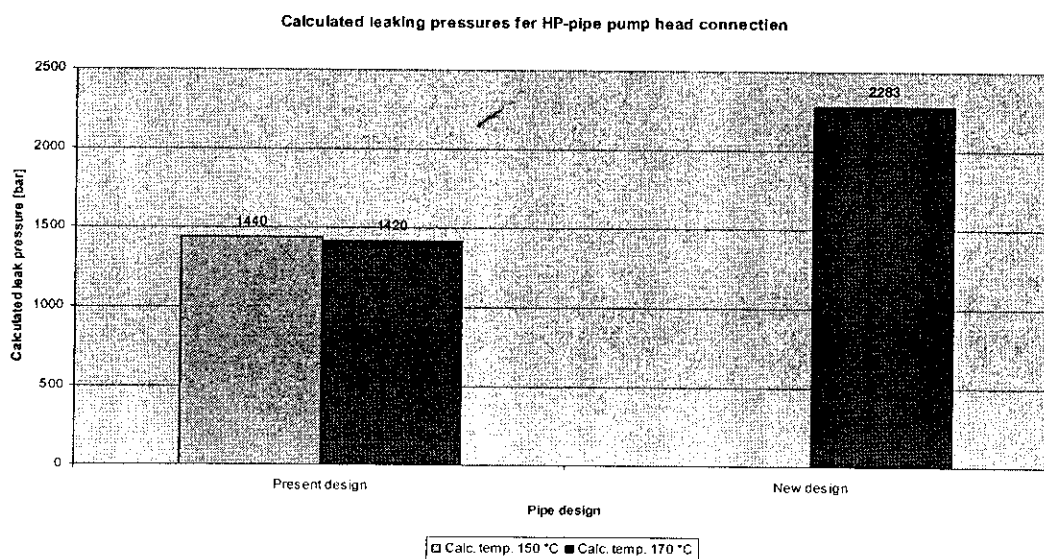


Figura 6.34: Presiones de fuga calculadas para la unión tubería principal de inyección – cabeza de bomba.

Este nuevo diseño propone una buena alternativa para solucionar los problemas presentados a la fecha, sin embargo durante el período de realización del presente trabajo, el nuevo diseño todavía no había sido instalado en todos los motores de la planta y se encontraba bajo período de prueba.

Los factores más importantes a resaltar como influyentes para el buen desempeño del nuevo sistema son:

- Disminución en las superficies de contacto expuestas a la presión de combustible en las secciones cónicas de los extremos de la tubería principal de inyección. La disminución en la superficie genera una disminución en la

fuerza que actúa en dirección opuesta al sello promoviendo una mayor estabilidad que reduce el movimiento y la tendencia de la generación del “fretting”.

- Modificación de la superficie en contacto en la sección plana de la pieza de conexión para reducción de fuerzas que desestabilizan el sello.
- Modificación de la dureza del material para disminuir el riesgo de desgastes abrasivos.
- Modificación del nivel de sujeción de la pieza de conexión para promover una mayor estabilidad en este componente.

VII. CONCLUSIONES

- La Orimulsion® representa una alternativa energética sin precedentes. Puede ser considerada como combustible alternativo a los combustibles pesados debido a sus características y propiedades, se cuenta con reservas similares a las existentes en el mundo, se cotiza a un precio mucho menor y se encuentra fuera de la cuota de producción de la OPEP.
- Las condiciones en las cuales ingresa la Orimulsion® al sistema de distribución de combustible en el motor son determinantes para el buen desempeño del sistema. La presión, la temperatura y la viscosidad son factores influyentes en la estabilidad estructural de la Orimulsion® lo cual influye en la integridad de los componentes.
- La modalidad de desgaste que presentó una mayor incidencia en los componentes del sistema de distribución de combustible de alta presión fue el “fretting” (micromovimiento). Esto se atribuye a las condiciones existentes que permiten un movimiento en las uniones de los elementos en conjunto con la influencia de fuerzas generadas por el flujo que promueven un desgaste en la interfase de dos superficies altamente cargadas.
- La tubería principal de inyección es el elemento más propenso al desgaste abrasivo en la modalidad de “fretting”. Esto se atribuye al bajo nivel de sujeción que se presenta en este elemento y a la morfología cónica de sus extremos con una superficie en la que incide una fuerza de oposición al sello mecánico.
- El nuevo diseño propone una buena alternativa para solucionar los problemas de desgaste prematuro de los componentes del sistema de distribución de combustible de alta presión. Esto se atribuye a las modificaciones realizadas en materia de sujeción de los componentes, modificación de la dureza de los materiales y disminución de las superficies de contacto expuestas a la presión de combustible que generan fuerzas que se oponen a los sellos mecánicos.

VIII. RECOMENDACIONES

- Disminución en las superficies de contacto expuestas a la presión de combustible en las secciones cónicas de los extremos de la tubería principal de inyección. La disminución en la superficie genera una disminución en la fuerza que actúa en dirección opuesta al sello promoviendo una mayor estabilidad que reduce el movimiento y la tendencia de la generación del “fretting”.
- Modificación de la superficie en contacto en la sección plana de la pieza de conexión para reducción de fuerzas que desestabilizan el sello.
- Modificación de la dureza del material para disminuir el riesgo de desgastes abrasivos.
- Modificación del nivel de sujeción de la pieza de conexión para promover una mayor estabilidad en este componente.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Brasil 2003. Jacob Klimstra, Power Gen Latin America. *Orimulsion®: The new fuel for energy efficient Diesel-Engine-Driven Power Plants in Latin America.*
- Estados Unidos 2001. Environmental Protection Agency (Agencia Protectora del Ambiente). Office of Research and Development (Oficina de Investigación y Desarrollo) *Environmental Impacts of the Use of Orimulsion®*. 184 págs.
- Finlandia 2004. *Power Plants product programme* Wärtsilä brochure. 39 págs.
- Finlandia 2001. Power Master Multifuel Power Plants. *Preliminary Technical Specification for Project Id: WP-02513.*
- Finlandia 2005. Wärtsilä Finland Oy, Power Plants. *Plant Description Orimulsion System.* 13 págs.
- Finlandia 2005. Wärtsilä Finland Oy, Power Plants. *Plant Description Heavy Fuel Oil System.* 14 págs.
- Finlandia 2003. Wärtsilä Finland Oy, Power Plants, *Wärtsilä combined heat and Power Plants.* 12 págs.
- Finlandia 2004. Wärtsilä Finland Oy, Power Plants. *Wärtsilä Gas Power Plants, Power for the Future.*
- Finlandia 2004. Wärtsilä Finland Oy, *Wärtsilä combined heat and power plants, Trigeneneration solutions.*
- Martínez, Aníbal. 2004. «*La faja 65 años de su descubrimiento (1936)*» Soberanía (Venezuela). 13 de febrero de 2004.
- Martínez, Aníbal. 2005. «*Las reservas y los recursos del área principal de producción Cerro Negro y el campo Faja del Orinoco*» Soberanía (Venezuela). 4 de agosto de 2005.
- Operation & Maintenance Manuals, Wärtsilä Finland Oy, Power Plants. *Technical Information*
- Suecia 2000. Alfa Laval Separation AB, Alfa Laval Separation FOPX 616, *Separator Manual.* 222 págs.
- Venezuela 2000. Petróleos de Venezuela, S.A. Bitor, *Orimulsion® 400 Properties.* 15 págs.