



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Implementación de la Tecnología de Combustible Emulsionado
Fuel Oil N°4 Sin Agentes Tensioactivos en Calderos.”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN
(Proyecto de Graduación)

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERA MECÁNICA

Presentado por:

Verónica Alexandra Aguirre Patiño

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2014

AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios por todas sus bendiciones otorgadas a lo largo de mi vida; en segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia a mi papá, Guillermo Aguirre Célleri, a mi mamá, Alicia Patiño Fernández, a mis hermanas, Martha, María y Diana; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora. De igual forma, a un gran hombre, Gabriel Agila S., por todo su apoyo incondicional, por su amor y su nobleza. Finalmente a mi director de proyecto quién ha sido parte fundamental en todo momento, Msc. Gonzalo Zabala Ortiz.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios porque ha estado conmigo en cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, pilares fundamentales en mi vida, quienes han velado por mi bienestar y educación, depositando su entera confianza en cada reto que se me ha presentado. También dedico este proyecto a mi abuelito, Manuel Aguirre Palacios, a mi adorado sobrino Mathias Fernández Aguirre. A ti, Gabriel Agila S., por el fuego en mis ojos y el ser indetenible. A todos Uds. Gracias.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Jorge Duque R.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



Msc. Gonzalo Zabala O.
DIRECTOR

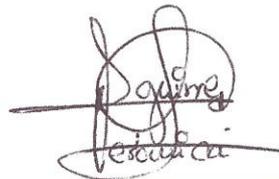


Ing. Mario Patiño A.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Trabajo Final Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Verónica Aguirre Patiño', written over a horizontal line.

Verónica Alexandra Aguirre Patiño

RESUMEN

En este proyecto de graduación se evaluó y se comparó el desempeño del equipo térmico con Fuel Oil Convencional (FO) y Fuel Oil Emulsionado (FOE) por medio de pruebas de campo y sus curvas bases. Se procedió a realizar cinco tipos de mezclas con porcentajes de agua diferentes para la emulsión del FO, esto fue de, 14.19%; 13.7%; 10.31%; 10.06%; y 5.01 hasta que se obtuvo que el porcentaje óptimo de agua fuese del 10.31%. Con este porcentaje del 10.31% se alcanzaron los objetivos planteados de un ahorro promedio de combustible fósil de 4.90%, la disminución de los gases de contaminantes como: el monóxido de carbono (CO) con el 95.15%, el dióxido de azufre (SO₂) con el 55.68%, óxidos nitrógenos (NO_x) con el 17.74% y material particulado (MP) con el 32.85% de reducción con similares parámetros de operación usando Fuel Oil Convencional.

La estructura del proyecto se encuentra dividida en los siguientes capítulos:

CAPÍTULO 1: En este capítulo se describe las principales características de los procesos de combustión, gases de escape, así como de las ventajas, desventajas y beneficios de la aplicación usando FO versus el FOE.

CAPÍTULO 2: Se da a conocer la descripción del sitio y condiciones en donde se implementó la tecnología de combustible emulsionado, incluyendo los objetivos que persigue el presente documento, dando una explicación

clara y concisa de cada uno de ellos. Adicional a ello, la metodología de la determinación de la eficiencia térmica, la descripción del caldero y los procedimientos operativos, de control de calidad y prevención de riesgos para las pruebas del FOE.

CAPÍTULO 3: En este capítulo se explica la descripción, dimensiones, regulaciones y especificaciones técnicas empleadas de la unidad microemulsificadora, incluyendo una descripción detallada de sus componentes. Se abordarán de cada componente de la unidad sus respectivas funciones que deben cumplir para poder generar el FOE.

CAPÍTULO 4: Este capítulo se centra en los resultados y análisis de la línea base del FO versus las pruebas realizadas con FOE. Se detalla los diferentes pasos para llegar al análisis comparativo del consumo de combustible, análisis de la eficiencia térmica, la temperatura y la reducción de las emisiones de los gases de escape.

CAPÍTULO 5: En este capítulo se expone el análisis de costos de la implementación del sistema de emulsión, ahorros del combustible FO, ahorro por mantenimiento y el cálculo del retorno económico, de acuerdo a los resultados de las pruebas del FOE, así como su interpretación y beneficios.

CAPÍTULO 6: Este apartado se centra en las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del proyecto de graduación, realizando recomendaciones y comparándolas con los objetivos iniciales del trabajo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
ABREVIATURAS.....	iv
SIMBOLOGÍA.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES DEL FUEL OIL CONVENCIONAL (FO) Y FUEL OIL EMULSIONADO (FOE).....	4
1.1. Características del Fuel Oil Convencional (FO).	4
1.2. Composición Química del Fuel Oil Convencional.	5
1.3. Proceso de Combustión Típica del Fuel Oil Convencional.	5
1.3.1. Características de las Emisiones de Gases de Combustión y Material Particulado (MP).....	7
1.4. Características del Fuel Oil Emulsionado (FOE).....	8
1.4.1. Ventajas, Desventajas y Beneficios de la combustión del Fuel Oil Emulsionado.....	16

1.4.2. Calidad de la Micro - Emulsión.....	18
1.4.2.1. Diámetro Medio de las Gotículas de Agua.....	18
1.4.2.2. Uniformidad de las Gotículas de Agua.....	20
1.4.3. Distribución y Población de las Gotículas de Agua.....	23
1.4.4. Proceso de Combustión Típica del Fuel Oil Emulsionado.	23
1.4.4.1. Determinación de la Temperatura de Preparación del Combustible Emulsionado.....	23
1.4.3.2. Características de las Emisiones de Gases de Combustión y Material Particulado (MP).....	23

CAPÍTULO 2

2. DESCRIPCIÓN DEL SITIO Y CONDICIONES EN DONDE SE IMPLEMENTÓ LA TECNOLOGÍA DE COMBUSTIBLE EMULSIONADO.	30
2.1 Descripción del Sitio para la Demostración del FOE.	30
2.2 Alcance del Convenio Pactado.	31
2.2.1 Objetivos General.....	32
2.2.2 Objetivos Específicos.....	32
2.2.3 Identificación de los Equipos.....	33
2.2.4 Adecuaciones e Instalaciones Requeridas.....	34
2.2.5 Logística de Abastecimiento del Combustible Emulsionado y Convencional.....	34

2.2.6	Recomendaciones de Seguridad Industrial.....	35
2.2.7	Cronograma de Actividades.....	35
2.28	Metodología de la Determinación de la Eficiencia Térmica.	35
2.3	Descripción del Caldero para Pruebas del FOE.....	36
2.4	Procedimientos Operativos Para La Obtención del Combustible Emulsionado.	38
2.4.1	Procedimiento para la Operación y Ejecución de una Planta de Emulsificación.....	38
2.4.1.1	Propósito.....	38
2.4.1.2	Aplicación.....	39
2.4.1.3	Requerimientos Necesarios para la Operación de la Unidad de Emulsificación.....	39
2.4.1.4	Manipulación del Combustible como Materia Prima...	40
2.4.1.5	Manipulación del Agua como Materia Prima.....	42
2.4.1.6	Operación de la Planta de Emulsificación.....	44
2.4.2	Procedimiento para la Ejecución del Control de Calidad del FOE.....	46
2.4.2.1	Propósito.....	46
2.4.2.2	Aplicación.....	47
2.4.2.3	Referencias Asociadas.....	47
2.4.2.4	Equipos.....	47
2.4.2.5	Reactivo y Materiales.....	47

2.4.2.6	Determinación del Contenido de Agua en el Combustible por el Método Karl Fischer.....	48
2.4.3	Procedimientos de Prevención y Respuestas a Derrames en los Procesos de Emulsificación del FOE.....	50
2.4.3.1	Propósito.....	50
2.4.3.2	Aplicación.....	50
2.4.3.3	Procedimiento.....	51

CAPÍTULO 3

3.	UNIDAD MICRO - EMULSIFICADORA.....	58
3.1.	Componentes de la Unidad Micro – Emulsificadora.....	59
3.2.	Regulaciones Técnicas Empleadas.	60
3.3.	Especificaciones de la Unidad Micro – Emulsificadora.	61
3.4.	Características Técnicas de la Unidad de Emulsificación.	62
3.5.	Dimensiones de la Unidad de Emulsificación.	62
3.5.1.	Consumo Diario de Fuel Oil Convencional.....	63
3.5.2.	Consumo Diario de Vapor Saturado.....	63
3.6.	Área de Instalación de la Unidad de Emulsificación.....	63
3.7.	Funcionamiento de la Unidad de Micro – Emulsificadora.	65
3.7.1.	Circuito de agua de alimentación presurizado.....	66
3.7.2.	Circuito de alimentación del Fuel Oil.....	68
3.7.3.	Circuito presurizado de combustible (circuito reforzador)...	70

3.7.4. Emulsor Estático.....	71
3.7.4.1. Criterio de Diseño del Emulsor Estático.....	73
3.7.4.2. Descripción del Emulsor Estático.....	77
3.7.4.3. Principio de Funcionamiento del Emulsor Estático....	79
3.7.5. Anillo Presurizado con Recalentamiento.....	80

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANALISIS	84
4.1. Línea Base – Fuel Oil Convencional Puro, Fo.	85
4.2. Fuel Oil Emulsionado, FOE.....	86
4.2.1. Análisis Comparativo del Consumo de Combustible Fuel Oil FO vs. FOE.....	87
4.2.2. Análisis de la Eficiencia Térmica	92
4.2.3. Reducción de Emisiones Gaseosas.....	103
4.2.4. Temperatura de Gases de Escape.....	112
4.2.5. Otras Evidencias – Presión de Inyección y Tipo de Llama.	114

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO	117
5.1. Costos de Implementación del Sistema.	117
5.2. Ahorro del Combustible Fuel Oil Convencional.....	119

5.3. Ahorro por Mantenimiento.....	122
5.4. Cálculo del Retorno Económico.....	124

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	126
---	------------

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

ASME	American Society of Mechanical Engineers I
ASTM	American Society of Testing Materials
bar	Unidad de Presión
BHP	Brake Horse Power – Caballos de Potencia
BTU	British Thermal Uni – Unidad de Energía
cm	Centímetro
CO	Monóxido de Carbono
cSt	Centistoke
FO	Fuel Oil Convencional
FOE	Fuel Oil Emulsionado
g	Gravedad (9.81 m/s ²)
gal	Galón
gal/h	Galón por Hora
gal/mes	Galones por Mes
gpm	Galones por minuto
H ₂ O	Agua
HFO	Fuel Oil a Alta Presión
HTP	Libras de Material Absorbente
Hz	Hertz
IP	Índice de Producción
Kg	Kilogramo
Kg/gal	Kilogramo por Galón
Kg/h	Kilogramo por Hora
kg/l	Kilogramo por Litro
Kg/m ³	Kilogramo por Metro Cúbico
l/h	Litro por Hora
lb	Libra
m	Metro Lineal
m/min	Metro por Minuto
m/s	Metro por Segundo

m/s ²	Metros por Segundos al Cuadrado
m ²	Metro Cuadrado
mg	Miligramos
mg/Nm ³	Miligramos por Metro Cúbico de Gas
min	Minuto
mm	Milímetros
mm ²	Milímetro Cuadrado
MP	Material Particulado
NO _x	Óxidos de Nitrógenos
OAE	Organismo de Acreditación Ecuatoriano
pH	Potencial de Hidrogeno
PLC	Programmable Logic Control
ppm	Partes por Millón
psi	Libras por Pulgada Cuadrada
psia	Libras por Pulgada Cuadrada Absolutas
psig	Libras por Pulgada Cuadrada Relativas o Manométricas
Q	Calor
Re	Número de Reynolds
SO ₂	Dióxido de Azufre
SO ₃	Ácido Sulfúrico
SO _x	Óxidos Sulfuros
TDS	Solidos Totales Suspendidos
USD	Dólares Americanos
\$/gal	Dólares Americanos por Galón
\$/kwh	Dólares Americanos por Kilovatios Hora
\$/Mes	Dólares Americanos por Mes
°C	Grado Centígrado
°F	Grado Fahrenheit
µm	Micra o Micrones

SIMBOLOGÍA

<i>A</i>	Área de Instalación de la Unidad de Emulsificación
<i>F</i>	Agua en unidad de mg
<i>F</i>	Filtro Tipo Y
<i>FL</i>	Medidor de Caudal
<i>H</i>	Altura
<i>L</i>	Largo
<i>M</i>	Manómetro
<i>N°</i>	Número
<i>P</i>	Bomba Dosificadora
<i>Q</i>	Calor
<i>R</i>	Regulador de Presión
<i>SP</i>	Sonda de Presión
<i>T</i>	Termómetro
<i>V</i>	Válvula de Globo
<i>W</i>	Ancho
<i>w</i>	Agua
<i>WE</i>	Tamaño de la muestra en mg
<i>WT</i>	Volumen Promedio de Agua en ml.
<i>\$</i>	Dólares Americanos
<i>%</i>	Porcentaje

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Flama típica de la combustión del Fuel Oil.....	6
Figura 1.2 Quema típica de combustible residual, combustión incompleta.....	7
Figura 1.3 Emulsión de Fuel Oil en agua.....	9
Figura 1.4 Emulsión de agua en Fuel Oil	9
Figura 1.5 Parámetros necesarios para la emulsión.....	10
Figura 1.6 Parámetros de medición para la emulsión.....	11
Figura 1.7 Flama de la emulsion de fuel oil.....	12
Figura 1.8 Proceso de la emulsión FOE.....	13
Figura 1.9 Secuencia del proceso de la microexplosión de la emulsión de Fuel Oil en agua.....	14
Figura 1.10 Microexplosión de la emulsión de Fuel Oil en agua.....	15
Figura 1.11 Uniformidad (a) e informidad (b) de las goticulas de agua.....	21
Figura 1.12 Distribucion de la goticula de agua: (a) correcta (b) incorrecta.....	.22
Figura 1.13 Poblacion de la goticula de agua: (a) correcta (b) incorrecta.....	22
Figura 1.14 Relacion entre el oxigeno y los compuestos SO ₂ y SO ₃	26
Figura 3.1 Área de instalación de la unidad micro-emulsificadora.....	64
Figura 3.2 Circuito general de proceso de producción de la microemulsión.....	66
Figura 3.3 Circuito general de agua de alimentación presurizado.....	68
Figura 3.4 Circuito general de alimentación del Fuel Oil.....	70
Figura 3.5 Circuito general presurizado de combustible (circuito reforzador).....	71
Figura 3.6 Circuito general emulsor estático o turbotransductor.....	78
Figura 3.7 Dispositivo dirección (Juego de Engranés).....	79
Figura 3.8 Cono de la cámara central del emulsor estático de flujo laminar.....	80
Figura 3.9 Circuito general anillo quemador.....	82
Figura 4.1 Gráfico de Comparación del consumo promedio del FO y FOE con diferentes porcentajes de agua.....	90
Figura 4.2 Gráfico de Ahorro de combustible Fuel Oil N° 4 en galones por hora y en porcentajes de consumo.....	91
Figura 4.3 Gráfico de Comparación del índice de producción del FO y FOE con diferentes porcentajes de agua.....	95
Figura 4.4 Gráfico de Porcentaje del aumento del índice de producción	

	con respecto al IP del FO.....	96
Figura 4.5	Gráfico de Comparación de la eficiencia térmica – operativa del FO y FOE con diferentes porcentajes de agua...	101
Figura 4.6	Gráfico de Porcentajes de la eficiencia térmica usando FOE.....	102
Figura 4.7	Gráfico de Comparación de las emisiones de gases y material particulado del FO y FOE con diferentes porcentajes de agua.....	107
Figura 4.8	Comparación de las temperatura de gases de escape con FO y FOE.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Diámetros de las gotículas en dependencia del volumen de agua..... 19
Tabla 2	Clasificación del contenido de azufre en los combustibles..... 25
Tabla 3	Características del caldero de prueba..... 37
Tabla 4	Requerimientos para la unidad de emulsificación..... 39
Tabla 5	Dimensiones de la unidad micro – emulsificadora.....63
Tabla 6	Dimensiones principales del área.....65
Tabla 7	Datos de línea base – fuel oil convencional..... 85
Tabla 8	Porcentajes de agua utilizados en la emulsión.....86
Tabla 9	Ahorro de combustible con diferentes porcentajes de agua en la emulsión..... 89
Tabla 10	Índice de producción – promedio..... 93
Tabla 11	Eficiencia térmica – operativa..... 99
Tabla 12	Promedio de emisiones de gases de combustión y material particulado con fuel oil N°4 y fuel oil emulsionado a diferentes porcentajes de agua..... 104
Tabla 13	Porcentajes de reducción promedio de emisiones de gases de combustión y material particulado con fuel oil N°4 y fuel oil emulsionado a diferentes porcentajes de agua..... 108
Tabla 14	Temperatura de gases de escape en pruebas de FO y FOE con diferentes porcentajes de agua..... 114
Tabla 15	Presión de inyección y temperatura del combustible..... 115
Tabla 16	Desglose del costo total de la implementación del sistema de emulsificación..... 119
Tabla 17	Detalle del ahorro mensual y anual..... 120
Tabla 18	Costo mensual bruto y neto en USD.....120
Tabla 19	Consumo mensual de FO y FOE en galones..... 121
Tabla 20	Ahorro mensual y anual incluyendo dos operadores..... 122
Tabla 21	Costo de mano de obra y materiales para el mantenimiento..... 123
Tabla 22	Ahorro incluyendo los gastos de mantenimiento..... 123
Tabla 23	Ahorros totales mensuales y anuales..... 124
Tabla 24	Cálculo del retorno económico.....125

INTRODUCCIÓN

Las empresas que utilizan un combustible económico, tipo bunker (FO N° 4), procedente de la columna de destilación del petróleo, presentan problemas de contaminación al medio ambiente durante su combustión, ocasionando problemas de incrustación en las calderas, bajas eficiencias de combustión y la presencia de humo negro que escapa por la chimenea. Este humo tiene alta concentración de hollín que es un combustible no quemado, cuya granulometría varía con un pH muy ácido cercano a tres, que es muy nocivo y corrosivo al contacto con las partes metálicas, debido a que se trata de sulfuros presentes en el combustible, especialmente cuando se combina con el agua produciendo ácido sulfúrico, dando inicio a reacciones químicas en el proceso.

La reducción de estas emisiones es importante para una empresa que procura obtener beneficios económicos al utilizar este tipo de combustible. Es notorio que para mejorar la combustión de un combustible se puede utilizar un sistema de agregación de oxígeno para pulverizar el combustible en finas gotas y crear el más íntimo contacto de cada gota de combustible con el oxígeno.

Un medio conocido es la utilización de agua en el interior de la gotícula de combustible, llamado también Emulsión de Agua en el Fuel Oil (FOE), por lo

que, en este trabajo de graduación se presenta el desarrollo de un proceso de emulsificación para obtener una mezcla estable de combustible FO N° 4 y agua, cuya mezcla debe ser estable para un uso óptimo en la generación de energía térmica.

Por efecto físico el agua siempre queda separada del combustible, en este caso el equipo y el sistema propuesto permite una estrecha relación de las gotículas de agua dentro de las gotas del combustible, de manera que cuando la mezcla entra en la cámara de combustión de una caldera, por efecto de la alta temperatura, la gotícula de agua explota y provoca una doble atomización del combustible, denomina también nebulización.

Finalmente, cuando la gotícula de agua se evapora, cambia su fase de líquido a vapor liberando oxígeno e hidrógeno, alcanzándose el objetivo principal de una mejora notable que es la eficiencia de la combustión, el ahorro de combustible, la reducción de los gases contaminantes, la minimización de corrosión, minimización de humo negro, y disminución de frecuencias de mantenimientos.

El implementar en la industria ecuatoriana la tecnología de combustible emulsionado (FOE) usando Fuel Oil N°4 (FO) sin agentes tensioactivos (aditivos), tiene la finalidad de un replanteo tecnológico y estratégico en el

actual modelo de producción de energía térmica utilizada en las industrias; ahorro en el consumo de combustible fósiles, mejorar la eficiencia térmica operativa del caldero y reducir en forma significativa las emisiones de gases contaminantes en el aire que se generan durante los procesos de combustión de los combustibles convencionales.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES DEL FUEL OIL CONVENCIONAL (FO) Y FUEL OIL EMULSIONADO (FOE).

1.1 Características del Fuel Oil Convencional (FO).

El fuel Oil N° 4 es usualmente una mezcla de fue oil destilado y de residuos, tales como el N° 2 y 6; sin embargo, algunas veces es tan solo un fuerte destilado, que puede ser clasificado como diésel, destilado o fuel oil residual.

El Fuel Oil es el combustible más utilizado en calderas de centrales eléctricas e industriales. Sin embargo, el Fuel Oil durante su combustión genera cantidades significativas de residuos de carbono que ensucian las cámaras de combustión y reduce la eficiencia de las termomáquinas.

1.2 Composición Química del Fuel Oil Convencional.

El fuel oil ecuatoriano es la fracción remanente obtenida de la destilación atmosférica y de otros procesos como destilación al vacío, craqueo térmico y catalítico.¹

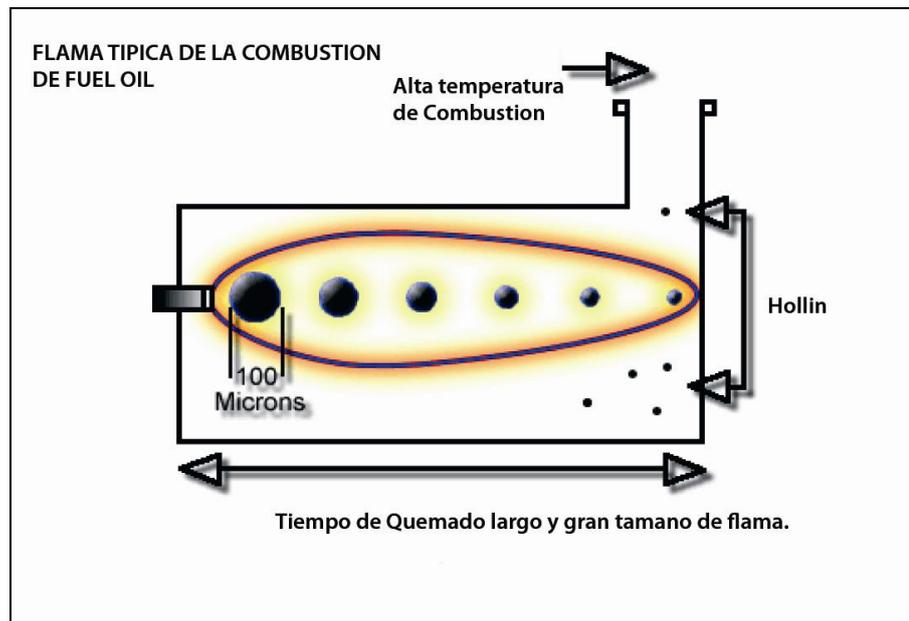
Según estudios dados, el 40% de la cantidad de petróleo que es ingresado en las refinerías se transforma en fracciones conocidas como residuo.

La composición química de estas fracciones son moléculas grandes con ciclos de doble enlace, pobre en hidrógeno, que se oxidan fácilmente, con tendencia a formar resinas y asfáltenos. Las resinas y compuestos asfálticos le confieren el color negro y alta viscosidad.

1.3 Proceso de Combustión Típica del Fuel Oil Convencional.

El Fuel Oil atomizado en un quemador fragmenta en gotas de 100 a 200 micrones de diametro equivalente, como se ilustran en la Figura 1.1.

¹ CAMARA DE INDUSTRIAS DE PICHINCHA, Precio del Crudo Reducido, Quito, Abril 2007.



FUENTE [Ignition and Combustion Behavior of Asphalt/Water-Emulsified Fuels, K. Namba and K. Kumuto, "JSME International Journal"]

FIGURA 1.1 – FLAMA TÍPICA DE LA COMBUSTIÓN DEL FUEL OIL.

Las gotas más grandes tienen una combustión incompleta, escapando en forma de material particulado y reduciendo la eficiencia térmica, ver Figura 1.2.



FUENTE [Ignition and Combustion Behavior of Asphalt/Water-Emulsified Fuels, K. Namba and K. Kumuto, "JSME International Journal"]

**FIGURA 1.2 QUEMA TÍPICA DE COMBUSTIBLE RESIDUAL,
COMBUSTIÓN INCOMPLETA.**

1.3.1 Características de las Emisiones de Gases de Combustión y Material Particulado (MP).

El uso de este combustible puede generar diversos problemas como las emisiones elevadas de partículas que afectan la eficiencia de una caldera, obscurecen la visibilidad por el humo que sale de las chimeneas y se emiten al medio ambiente.

Además se produce trióxido de azufre, el cual reacciona con el vapor de agua presente en los gases de combustión, formando

ácido sulfúrico que, al emitirse, también afecta la visibilidad de la pluma y puede condensarse, originando corrosión e incrementando la acumulación de depósitos en las calderas.

1.4 Características del Fuel Oil Emulsionado (FOE).

El uso de FUEL OIL emulsionado (FOE) en los hornos, calderos y motores es una de las tecnologías más ampliamente consideradas como combustible alternativo que puede ser utilizado sin mayores o ninguna modificación en los equipos.

Los combustibles emulsionados contribuyen a reducir entre el 4% y 16% de las emisiones de NO_x, hasta un 40% del Material Particulado, y en porcentajes mayores al 75% el CO. Referencia [1]

La emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales (la fase interna) está dispersa en la otra (la fase continua), mostradas en las Figuras 1.3 y 1.4.

Existen dos tipos de emulsiones:

- Emulsión de Fuel Oil en Agua: el agua es el elemento continuo.

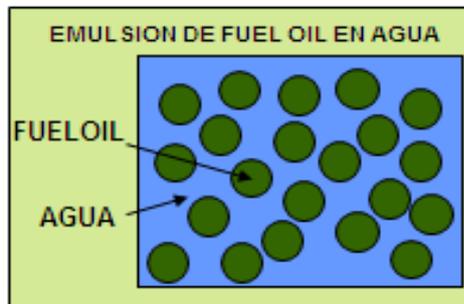


FIGURA 1.3 – EMULSIÓN DE FUEL OIL EN AGUA.

- Emulsión de Agua en Fuel Oil: el crudo es el elemento continuo.

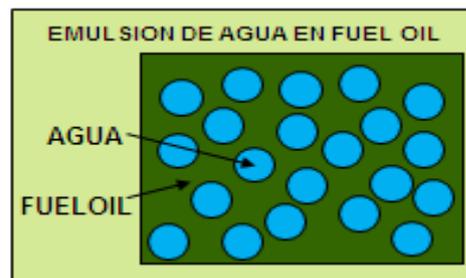


FIGURA 1.4 – EMULSIÓN DE AGUA EN FUEL OIL.

Entre las varias categorías de combustibles emulsionados, la más relevante es la de hidrocarburo con agua, con 40 años de investigación y 15 años de utilización, con la finalidad de mejorar la combustión y reducir las emisiones al medio ambiente.

La fácil ignición y mayor eficacia de combustión de los combustibles emulsionados genera una reducción en el consumo del combustible hasta valores cercanos al 10% dependiendo del contenido de agua.

La reducción del exceso de aire y la atomización secundaria neutraliza la pérdida de calor gracias a la presencia de agua en el combustible.

Para llevar a cabo el proceso de emulsión se deberá disponer de los siguientes parámetros mostrados en las Figuras 1.5 y 1.6:



FIGURA 1.5 PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA EMULSIÓN.

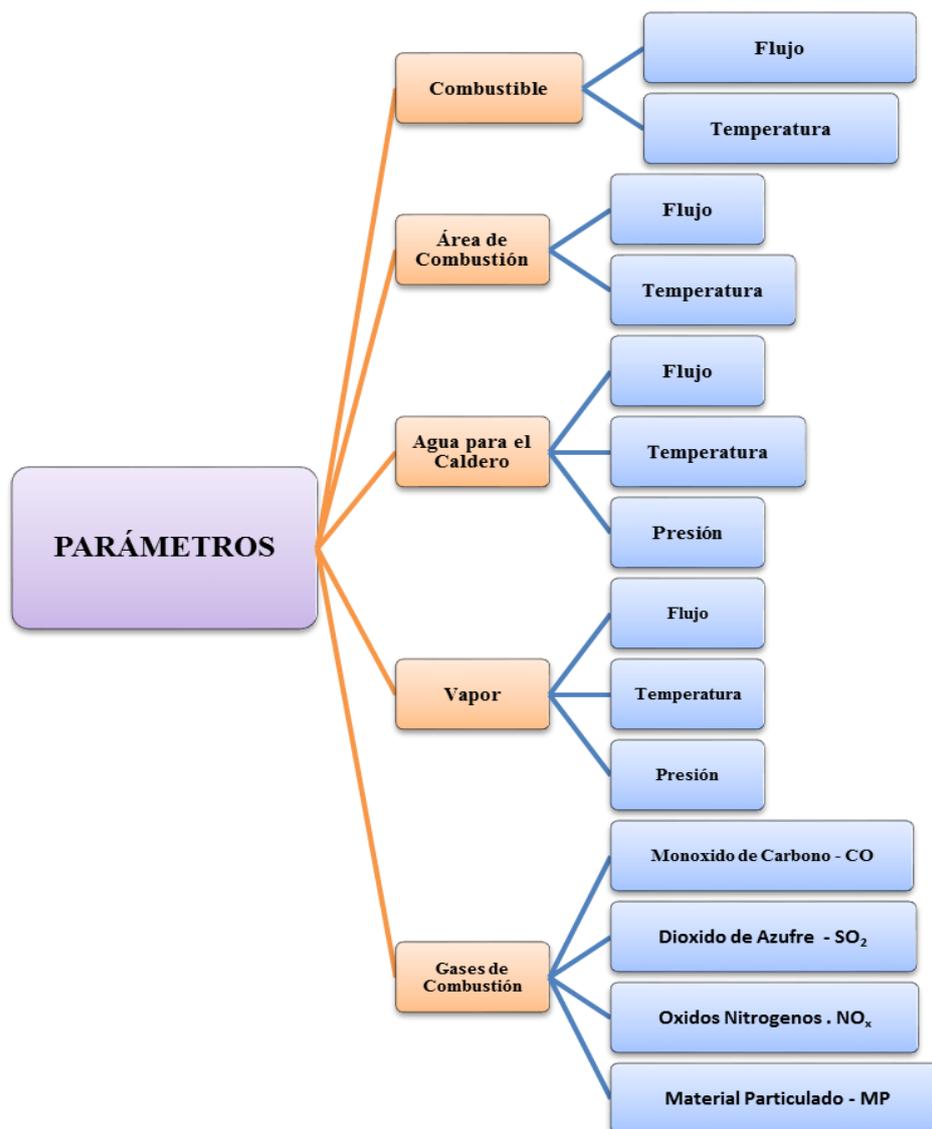
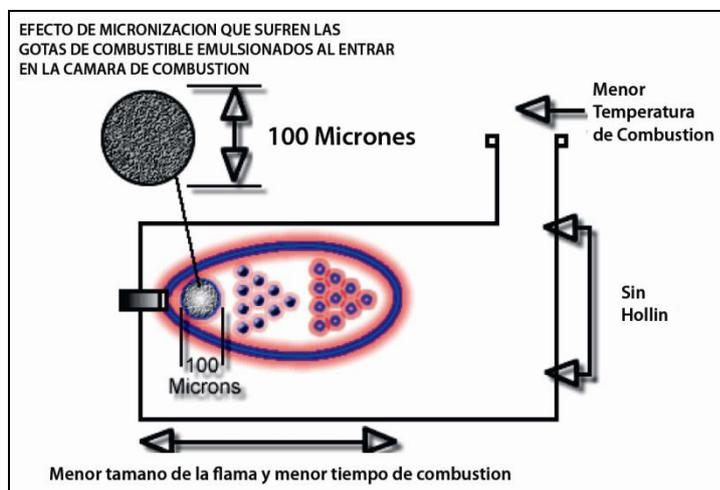


FIGURA 1.6 – PARÁMETROS DE MEDICIÓN PARA LA EMULSIÓN.

PROCESO DE LA COMBUSTIÓN DE FUEL OIL EMULSIONADO

La flama de la emulsion del Fuel Oil se puede observar en la Figura 1.7, donde por el aumento de la temperatura se da la atomización

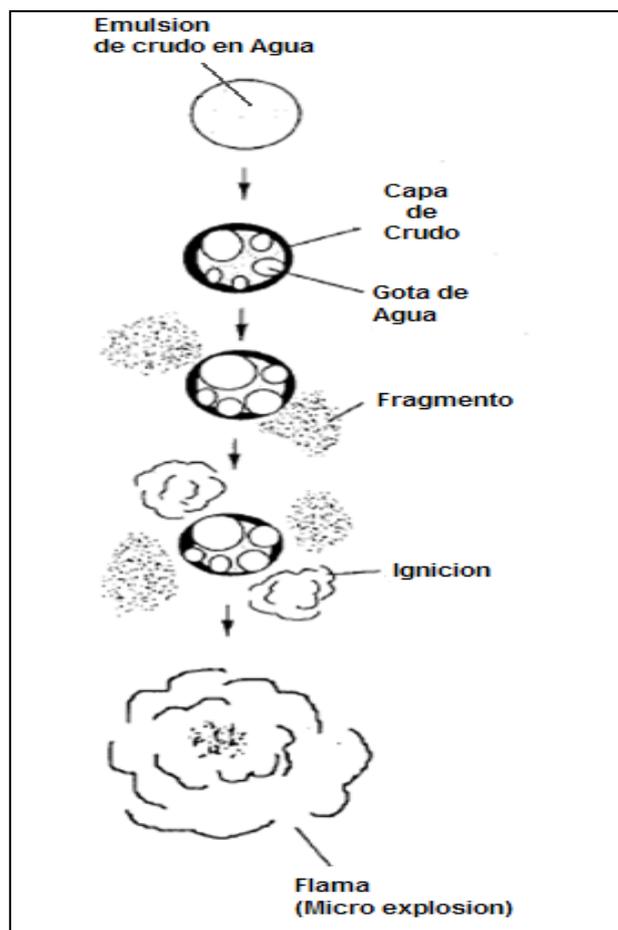
primaria de las gotas de combustible conteniendo agua en su interior. Luego de ello se da la atomización secundaria, debido que las gotas de agua explotan por la rápida evaporación rompiendo la gota del hidrocarborno, obteniendose asi una mejora sustancial de la combustión y consecuentemente la reducción de emisiones.



FUENTE [Ignition and Combustion Behavior of Asphalt/Water-Emulsified Fuels, K. Namba and K. Kumuto, "JSME International Journal"]

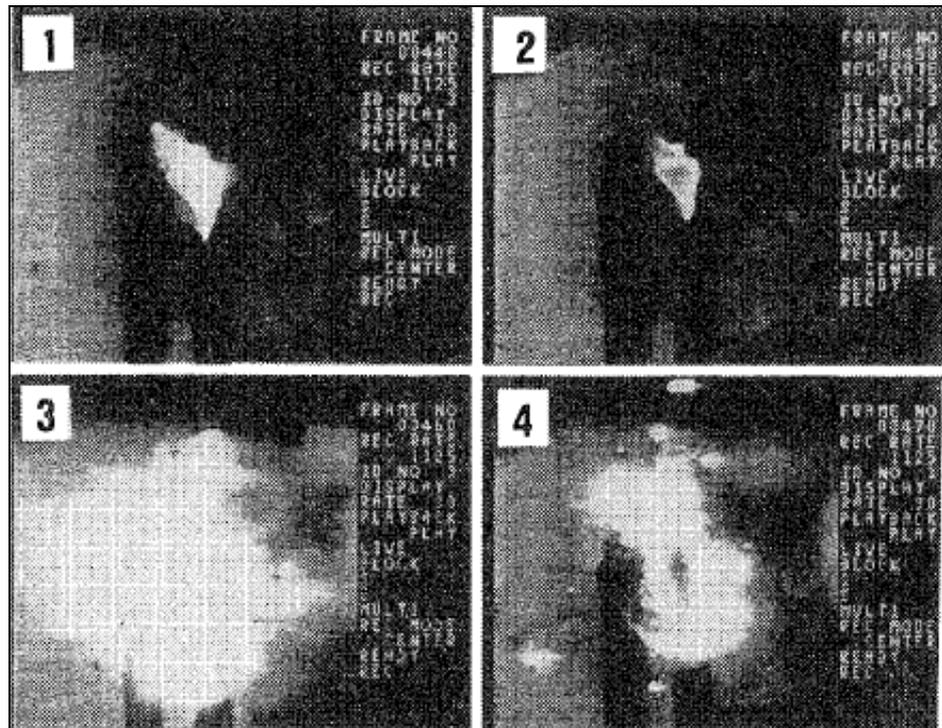
FIGURA 1.7 – FLAMA DE LA EMULSIÓN DE FUEL OIL.

Para mayor detalle en la Figura 1.8 se presenta el proceso de la mejora de la emulsión, donde una capa de agua que está en la superficie de la gota es vaporizada, el resto del agua se separa antes de llegar al punto de ebullición y se aglomera en gotas de agua dentro del crudo.



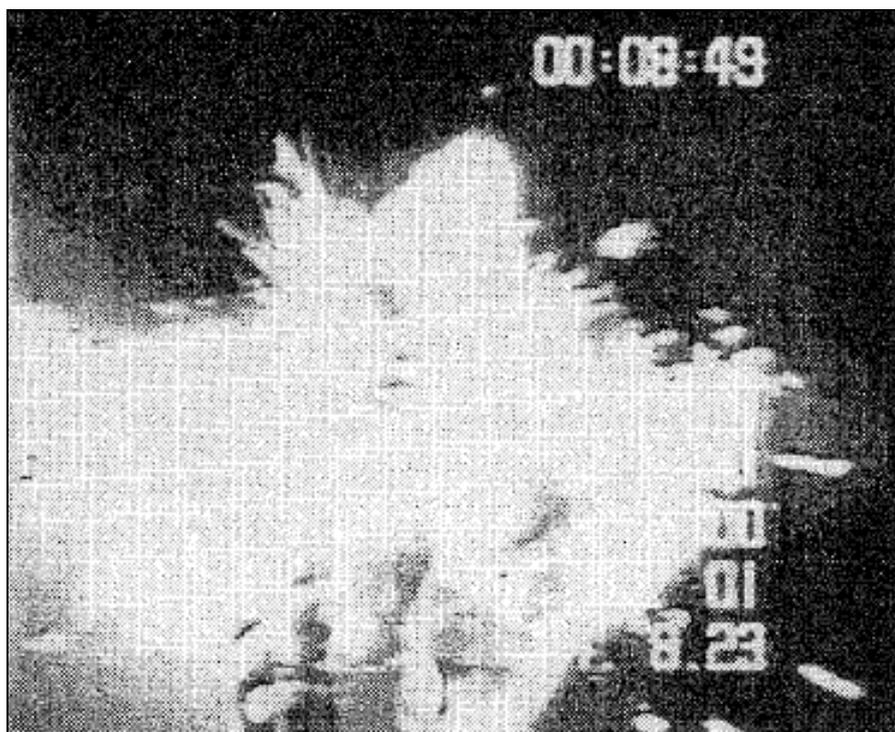
FUENTE [Ignition and Combustion Behavior of Asphalt/Water-Emulsified Fuels, K. Namba and K. Kumuto, "JSME International Journal"]
FIGURA 1.8 – PROCESO DE LA EMULSIÓN FOE.

La presión dentro de la gota de combustible aumenta debido a la vaporización del agua cuyo vapor rompe la capa exterior que lo cubre, provocando su fragmentación. Finalmente los fragmentos se queman y generan la explosión de la gota base, mostradas en las Figuras 1.9 y 1.10.



FUENTE [Ignition and Combustion Behavior of Asphalt/Water-Emulsified Fuels, K. Namba and K. Kumuto, "JSME International Journal"]

FIGURA 1.9 SECUENCIA DEL PROCESO DE LA MICROEXPLOSIÓN DE LA EMULSIÓN DE FUEL OIL EN AGUA.



FUENTE [Ignition and Combustion Behavior of Asphalt/Water-Emulsified Fuels, K. Namba and K. Kumuto, "JSME International Journal"]

FIGURA 1.10 MICROEXPLOSIÓN DE LA EMULSIÓN DE FUEL OIL EN AGUA.

La eficiencia en combustión permite compensar el menor poder calorífico de la emulsión, lo que se comprueba con el análisis de la composición de gases donde no hay presencia de monóxido de carbono.

El agua presente dentro del sistema se mezcla con el azufre, que es eliminado a través de la chimenea y que al condensarse y ser

mezclado con el agua se transforma en oxisal neutra, reduciendo a un nivel permisible las emisiones de azufre.

1.4.1 Ventajas, Desventajas y Beneficios de la combustión del Fuel Oil Emulsionado.

Ventajas

- Genera una reducción en el consumo del combustible cercano al 6%, en razón a la fácil ignición y mayor eficiencia de su combustión. Referencia [2]
- El combustible es menos viscoso, requiere menos precalentamiento y una menor presión de inyección
- Para su implementación no se requiere de una mayor inversión.
- Reduce el costo para el sector eléctrico.
- Facilita su bombeo y transporte.

Desventajas

Dificultad en obtener el diámetro de la gotícula de agua y el porcentaje de agua a utilizar en la emulsión.

Beneficios - Efectos en el Medio Ambiente

NO_x – Óxidos de Nitrógeno

Existen 4 factores que influyen en la generación de NO_x en procesos de combustión y que se ven reducidos al utilizar la emulsión del Fuel Oil:

- Temperatura pico.
- Concentración de oxígeno.
- Tiempo de residencia.
- Concentración de nitrógeno en el combustible.

CO – Monóxido de Carbono

La principal razón para la presencia de CO es la combustión incompleta, al mejorar la combustión es posible lograr una reducción sustancial de CO.

SO_x – Óxidos de Sulfuro

La emulsión de Fuel Oil es amigable con el medio ambiente al reducir notoriamente las emisiones contaminantes.

El aire requerido para la combustión se reduce por la mezcla efectiva de las gotas fragmentadas de combustible y el agua

contenida en la emulsión. Así, al reducir el exceso de aire se disminuye la generación de SO_3 .

MP – Material Particulado

Se puede reducir al mejorar la atomización del combustible y la aerodinámica de la combustión. También es importante el mantenimiento apropiado del equipo.

1.4.2 Calidad de la Micro - Emulsión.

Los parámetros que se deben considerar y medir para que una emulsión de Fuel Oil y agua sea de óptima calidad, son los siguientes:

- Diámetro Medio de las Gotículas de Agua.
- Uniformidad de las Gotículas de Agua.
- Distribución y Población de las Gotículas de Agua.

1.4.2.1 Diámetro Medio de las Gotículas de Agua.

La práctica confirma que el diámetro medio óptimo de la gotícula de agua, emulsionada en el combustible Fuel Oil, es de 2 a 5 μm . Con valores por debajo de 2 μm en la gotícula al evaporarse no tiene la

presión necesaria para realizar el fenómeno de la microexplosión que fracciona la gota de combustible; por otra parte, con valores mayores de 5 μm se incrementa la pérdida de energía por concepto de absorber calor la gotícula de agua para evaporarse.

Con el empleo del emulsor estático de flujo laminar varía el diámetro medio de la gotícula, en dependencia de los diferentes porcentajes de agua empleada en la emulsión. Es por ello que existe un porcentaje óptimo de agua para la emulsión de los combustibles que determina el nivel óptimo de eficiencia y ahorro.

Los valores presentados en la Tabla 1, se refieren a los diámetros medios obtenidos para cada porcentaje de agua, empleando el emulsor estático de flujo laminar. Referencia [3]

TABLA 1
DIÁMETROS DE LAS GOTÍCULAS EN DEPENDENCIA
DEL VOLUMEN DE AGUA.FUENTE [2]

Volumen de Agua, %	Diámetro Medio, μm
5	2.89
8	3.69
10	5.00
15	7.00

1.4.2.2 Uniformidad de las Gotículas de Agua.

Este aspecto es importante, pues de este factor depende la estabilidad de la emulsión.

En la Figura 1.11 - a, muestra uniformidad en las gotículas de agua, las cuales toman la forma de una esfera. Al producirse la microexplosión, la pérdida por absorción de calor es la misma y el efecto será mayor; además, no permite que se agrupen las gotículas de agua.

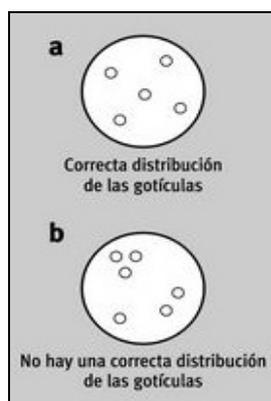
En la Figura 1.11 - b, se muestra que al no existir uniformidad en la gotícula de agua se forman unos poliedros de diferentes diámetros, los cuales permiten que se pierda la estabilidad de la emulsión por agrupación de los mismos, por lo que el efecto no será positivo, pues se absorbe más calor para que esos poliedros se evaporen y se produzca el fenómeno de la microexplosión, donde las gotas de combustible tienen diferentes diámetros, por lo que se corre el riesgo de que las gotículas grandes no se combustionen completamente.



FIGURA 1.11 UNIFORMIDAD (a), NO UNIFORMIDAD (b) DE LAS GOTICULAS DE AGUA FUENTE [2]

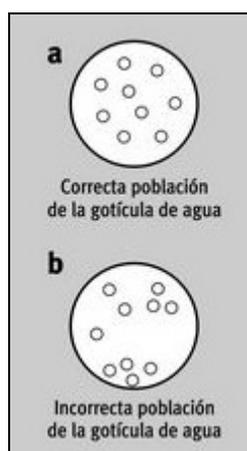
1.4.3 Distribución y Población de las Gotículas de Agua.

En la Figura 1.12 a, hay una correcta distribución de las gotículas de agua capaz de fraccionar la molécula de combustible en muchas más gotas pero con un diámetro semejante. En la Figura 1.12 b no tiene una correcta distribución, por lo que después del fenómeno de la microexplosión las moléculas de combustible serán de diferentes diámetros medios.



**FIGURA 1.12 – DISTRIBUCIÓN DE LA GOTÍCULA DE AGUA:
(a) CORRECTA (b) INCORRECTA FUENTE [2]**

En la Figura 1.13 se presenta una correcta población de la gotícula de agua que hace posible el fraccionamiento de la gota de combustible por la microexplosión, formando muchas más gotas de diámetro semejante y muy pequeño, lo que garantiza su combustión completa.



**FIGURA 1.13 – POBLACIÓN DE LA GOTÍCULA DE AGUA:
(a) CORRECTA; (b) INCORRECTA FUENTE [2]**

1.4.4 Proceso de Combustión Típica del Fuel Oil Emulsionado.

1.4.4.1. Determinación de la Temperatura de Preparación del Combustible Emulsionado.

La emulsión permite trabajar con menores temperaturas de precalentamiento del combustible aunque la viscosidad no sea baja, ya que la atomización secundaria logra efectos satisfactorios independientemente de que la atomización primaria no haya sido buena.

En la práctica se ha demostrado que en los combustibles emulsionados se ha podido disminuir la temperatura de preparación del combustible entre 40 y 50 °C sin afectar la combustión.

1.4.4.2. Características de las Emisiones de Gases de Combustión y Material Particulado (MP).

Entre las principales características de las emisiones de los gases basadas en la Referencia [4] se observa:

- **Monóxido de Carbono - (CO)**

La formación de CO depende de la realización o no de la combustión completa, en el caso del combustible no emulsionado no se alcanza; sin embargo, para combustibles emulsionados sí se logra la disminución de la formación de CO en porcentajes altamente notorios.

- **Óxidos de Nitrógeno - (NO_x)**

La disminución de este compuesto se debe a la disminución de la temperatura de la llama y esto es a causa de la absorción de calor de las gotículas de agua que se encuentran emulsionadas dentro del combustible.

- **Dióxido de Azufre - (SO_x)**

El azufre es una de las impurezas más peligrosas del combustible por su alto poder corrosivo y contaminante ambiental. El contenido de azufre debe estar por debajo de 2,5%, como se muestra en la Tabla 2.

TABLA 2
CLASIFICACIÓN DEL CONTENIDO DE AZUFRE EN LOS
COMBUSTIBLES. FUENTE [2]

De Bajo Contenido	Menor que 1%
Moderado	De 1 a 2%
De Alto Contenido	De 2 a 3%
De Muy Alto Contenido	Superior a 3%

El combustible emulsificado mejora la combustión del crudo, el azufre se transforma en SO_2 y en condiciones normales de trabajo este es expulsado en los gases de escape evacuados por la chimenea.

Sin embargo, hay una característica de los gases de salida que tiene gran importancia, la temperatura de condensación o punto de rocío, que en los gases de salida de la quema de combustible emulsionado, debe estar fijada entre 140 - 150°C.

Para calderas de paredes de tubos de agua y en calderas de tubos de fuego, la temperatura debe ser del orden de 200°C. Si las temperaturas son menores a estos valores, se produce la

condensación de los gases y con ello el azufre, al mismo tiempo que el SO_2 , se mezcla con el agua y se produce el anhídrido sulfúrico (SO_3), que tiene un alto poder de corrosión.

La utilización de emulsiones no afecta la corrosión de las calderas debido al pequeño incremento de agua en la combustión. No se ha comprobado de un efecto directo de la emulsión en la formación de anhídrido sulfúrico, SO_3 , pero indirectamente sí es posible indicar de un decrecimiento de éste, debido a que al facilitarse la combustión completa puede reducirse el exceso de aire, lo que lleva asociado un descenso en la formación de este compuesto, como se puede observar en la Figura 1.14 .

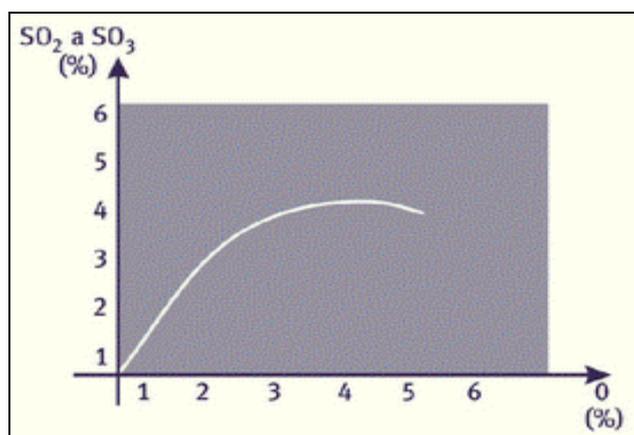


FIGURA 1.14 RELACIÓN ENTRE EL OXÍGENO Y LOS COMPUESTOS SO_2 Y SO_3 . FUENTE [2]

El ajuste de una caldera que consume combustible emulsionado permite que con la disminución de oxígeno para la combustión todo el contenido de azufre se transforme en SO_2 , por lo que el valor de SO_3 es mínimo.

Los factores que intervienen en el paso de SO_2 a SO_3 , son:

- i. Contenido de azufre en el petróleo.
- i. Nivel de exceso de aire de la combustión.
- ii. Contenido de vanadio del petróleo.
- iii. Suciedad y tiempo de operación de la caldera.
- iv. Diseño, carga e infiltración de aire en la caldera.

▪ **Material Particulado – (MP)**

Una de las causas más importantes de la contaminación de los efluentes gaseosos de origen industrial, se debe a la presencia en los mismos de partículas de tamaño muy pequeño difíciles de eliminar por los sistemas convencionales, tales como filtros, ciclones, captadores por vía húmeda, etc.

En efecto, estas partículas son las más difíciles de eliminar desde múltiples puntos de vista, ya que, al permanecer suspendidas por períodos más largos y poseer un mayor

poder de penetración en bronquios y alvéolos, constituye un riesgo más directo para la salud.

Además, estas micropartículas presentan, en general, un alto grado de toxicidad debido tanto a su formación como a su facilidad para actuar como vehículo de agentes nocivos.

Con el combustible emulsionado se consigue la disminución de emisiones de material particulado.

▪ **Oxígeno y velocidad de los gases de escape.**

Por medio del fuel oil emulsionado se logra una mejor combustión debido a la doble atomización, por ende, la caldera permite que sea ajustada, por lo que disminuye el exceso de aire.

Con combustible emulsionado, la disminución del exceso de aire para la combustión, provoca una disminución de la temperatura de la llama del orden de 150 - 230 °C.

▪ **Temperatura de los gases de escape.**

La temperatura de los gases de escape disminuye debido a que, como las superficies de contacto de la caldera se mantienen limpias, existe mayor transferencia de calor entre los gases calientes y el agua que pasa por dentro de los tubos.

CAPÍTULO 2

2. DESCRIPCIÓN DEL SITIO Y CONDICIONES EN DONDE SE IMPLEMENTÓ LA TECNOLOGÍA DE COMBUSTIBLE EMULSIONADO.

En este capítulo se definió el sitio de la implementación de la tecnología del combustible emulsionado (FOE), las condiciones del contrato de ambas empresas presentes en el convenio, la descripción del caldero para las pruebas de emulsificación y los procedimientos operativos basados en normas de seguridad industriales para obtener los resultados y beneficios deseados.

2.1. Descripción del Sitio para la Demostración del FOE.

La tecnología de combustible emulsionado fue implementada por una empresa dedicada a la importación, exportación, venta, distribución y comercialización de toda clase de combustibles y demás derivados del

petróleo (Empresa **A** – Implementador de la Tecnología FOE), en una industria productora de alcoholes (Empresa **B** - Cliente), ubicadas en la provincia del Guayas.

Mediante un convenio las empresas han acordado facilitar soluciones energéticas integrales y costo-efectivas, que permitan, minimizar la contaminación del medio ambiente y disminuir el uso de combustibles fósiles. Uno de los principales factores que inciden en la contaminación del medio ambiente son los combustibles, por lo que al utilizar esta tecnología garantizará el ahorro de combustible, la reducción de emisiones de gases bajo similares parámetros de operación de los equipos. La utilización de combustibles emulsionados beneficia al medio ambiente, ya que reduce significativamente las emisiones de Óxidos de Nitrógenos, NO_x , Óxidos Sulfuros, SO_x , Monóxido de Carbono, CO y Material Particulado, MP10, que se generan durante los procesos de combustión de los combustibles convencionales.

2.2. Alcance del Convenio Pactado.

Para definir el alcance, las condiciones y desarrollo de los procesos operativos para la realización controlada de la línea base FO y la

línea FOE en el equipo asignado, se acordó el siguiente objetivo general y los siguientes objetivos específicos:

2.2.1. Objetivo General.

Implementación en la industria ecuatoriana la tecnología de combustible emulsionado (FOE) usando Fuel Oil N°4 (FO), definido en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1983.2002 (Apéndice 1) sin agentes tensioactivos (aditivos), con la finalidad de un replanteo tecnológico y estratégico en el actual modelo de producción y consumo de los combustibles utilizados en las industrias; disminución del consumo de combustible fósiles, aumento de la eficiencia térmica - operativa del caldero, y reducción significativa de las emisiones de gases contaminantes en el aire.

2.2.2. Objetivos Específicos.

1. Las pruebas de generación de vapor con combustible emulsionado se realizaron paralelamente con la producción con combustible convencional (solo Fuel Oil N°4), evitando así, inconvenientes con la producción normal de la planta.

2. Determinar y comparar la eficiencia térmica del combustible convencional (FO), en relación al combustible emulsionado (FOE).
3. **Beneficio Económico:** Comparar el consumo del Fuel Oil N° 4 (FO) versus el consumo de Fuel Oil Emulsionado (FOE), bajo condiciones similares de operación.
4. **Beneficio Ecológico:** Reducir las emisiones de los gases contaminantes.

2.2.3. Identificación de los Equipos.

La empresa **A** identificó las características generales y operativas de la empresa **B**, donde se ha implementado la tecnología de combustible emulsionado. Además, ha revisado sus correspondientes registros de mantenimiento ya que es fundamental para determinar la actual condición del equipo térmico, además, ha identificado las modificaciones requeridas para asegurar un comportamiento adecuado del equipo durante las pruebas de línea base y con el FOE.

2.2.4. Adecuaciones e Instalaciones Requeridas.

En función de las características y disposiciones del caldero en la empresa **B**, se realizó la inspección visual de sus equipos auxiliares y la disposición de las instalaciones requeridas, para abastecer de Fuel Oil Emulsionado al caldero designado.

2.2.5. Logística de Abastecimiento del Combustible Emulsionado y Convencional.

La logística de abastecimiento para un suministro controlado de combustible al equipo sujeto a las pruebas de combustión, quedo establecida, por lo que la empresa **B** provee y garantiza la alimentación continua de combustible desde su tanque principal hasta la unidad de emulsificación ubicada en las instalaciones de la misma.

2.2.6. Recomendaciones de Seguridad Industrial.

Para evitar cualquier tipo de contingencia que no afecte gravemente la operación del sistema, se han tomado las siguientes acciones:

- Durante la línea base y la etapa del FOE, el responsable de la empresa A en el área de las pruebas estuvo atento ante cualquier eventualidad.
- Durante la pruebas de emulsificación se contó con material de contingencia para controlar cualquier goteo o fuga de FOE en las instalaciones.

2.2.7. Cronograma de Actividades.

La empresa A, realizó todas las acciones de ejecución durante la línea base FO y la etapa del FOE, de acuerdo al cronograma de actividades mostrado en los Apéndices 2 y 3.

2.2.8. Metodología de la Determinación de la Eficiencia Térmica.

Se aplicó la metodología por el método Directo de Pérdida de Calor que se encuentra en la Norma ASME PTC 4.1. En el documento mencionado, la Metodología “E” refiere la Norma ASME PTC 4.1 (Apéndice 4) como válida para la determinación de la eficiencia de un equipo de generación de energía térmica (caldero). También indica que las mediciones se realizarán después de un

mantenimiento completo y que las pruebas se desarrollarán en todo el rango de operación del equipo.

La Norma ASME Power Test Code 4.1 describe la eficiencia de un caldero como la relación entre la energía de entrada en comparación con la energía de salida.

En este método lo que se pretende es cuantificar la forma en que es utilizado el calor suministrado por el combustible, y el agua de alimentación, es decir, cuánto de este calor es usado para la producción del vapor, que es el objetivo del sistema de generación, y cuánto calor es perdido por la purga continua y las pérdidas térmicas del generador de vapor. Referencia [5]

De acuerdo al método directo, la eficiencia del caldero es calculada a través de la siguiente expresión:

$$\mathbf{Eficiencia} = \frac{Q_{\text{aprovechado}}}{Q_{\text{suministrado}}} \times 100\% \quad \mathbf{2.1}$$

2.3. Descripción del Caldero para Pruebas del FOE.

La empresa **B** cuenta con cuatro (4) calderos para su normal funcionamiento, de los cuales se seleccionó el caldero N° 3 para las pruebas de combustible emulsionado, tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Mayor generación de vapor para la producción.
- Mantenimiento preventivo completo realizado.
- Parámetros constantes y estables.
- Excelente estructura del sistema de tuberías, bombas y accesorios de agua, combustible y vapor.

En la Tabla 3 se presenta las principales características y parámetros técnicos del caldero N° 3.

TABLA 3
CARACTERÍSTICAS DEL CALDERO DE PRUEBA.

CALDERO HURST N° 3	
Potencia	580 BHP
Producción (kg/h)	14.300
Tipo de Caldero	Pirotubular (4 Pasos)
Tipo de Vapor	Saturado
Eficiencia de Combustión (%)	86.6
Utilización	SIEMPRE
Fuel Oil	N° 4
Poder Calorífico	18.000 BTU
Presión de Trabajo (psig)	240
Temperatura de Vapor (°C)	206.4
Presión Aire Atomizado (psi)	12 - 26
Presión Bunker Boquilla (psi)	30
Presión Bunker entrada Válvula Moduladora (psi)	90
Temperatura del Calentador Bunker (°C)	100
Temperatura Chimenea (°F)	370
Temperatura Bunker Boquilla (°F)	100
Observación Visual Tubo de Fuego	Ok
Perno Válvula Moduladora (60%) N°	6

En el Apéndice 5 se puede observar la ubicación del caldero de prueba N° 3 dentro de la instalación de la planta.

2.4. Procedimientos Operativos para la Obtención del Combustible Emulsionado.

Cada procedimiento operativo para la producción de combustibles emulsionados está basado y regulado en las normas de seguridad industriales vigentes de las industrias ecuatorianas.

2.4.1. Operación y Ejecución de una Planta de Emulsificación.

Para la operación de la planta de emulsificación se ha elaborado un procedimiento con la finalidad de estandarizar los pasos a seguir en la ejecución de la planta de FOE.

2.4.1.1. Propósito

El propósito de este procedimiento es asegurar la producción efectiva de Fuel Oil Emulsionado en base a las normas de seguridad industrial requeridas para la operación de la unidad de emulsificación.

2.4.1.2. Aplicación

Este plan aplica a todo el personal que participe en operaciones de emulsificación de combustible en las instalaciones del cliente.

2.4.1.3. Requerimientos Necesarios para la Operación de la Unidad de Emulsificación.

Los requerimientos necesarios para la operación de la unidad de emulsificación se presentan en la Tabla 4.

TABLA 4

REQUERIMIENTOS PARA LA UNIDAD DE EMULSIFICACIÓN

Materia Prima	Temperatura	Presión Bomba	Obs.
<u>Fuel Oil</u>	60 - 75 (°C)	15 (psig)	.- 160 – 300 cSt
<u>Agua Ablandada</u>	60 - 70 (°C)	15 (psig)	.- Libre de sólidos suspendidos. .- Contenido de cloro menos a 400 ppm. .- Contenido de Vanado menor a 50 ppm. .- Contenido de sodio y potasio menor a 20 ppm.

2.4.1.4. Manipulación del Combustible como Materia Prima.

Recepción del Combustible en el Tanque de Almacenamiento.

- a. Desde el terminal de abastecimiento el combustible es despachado por tanqueros a las instalaciones del cliente, el personal asignado por la empresa conecta las mangueras desde el vehículo hasta las bombas que alimentan a los tanques de almacenamiento de Fuel Oil en la empresa **B**.
- b. El operador de la unidad de emulsificación revisa a diario el nivel de combustible en el tanque de Fuel Oil de acuerdo a su tabla de calibración. Cuando el tanquero llega a la estación de bombeo, el operador indica al personal de la empresa **B** la cantidad de galones que necesita para llenar el tanque de almacenamiento de Fuel Oil.
- c. Previo al abastecimiento del tanque de almacenamiento de Fuel Oil para el proyecto, se realizan las maniobras de las válvulas para garantizar que al tanque solo ingrese el combustible seleccionado para el proyecto.
- d. Durante la operación de llenado del tanque de almacenamiento de Fuel Oil, se toma una muestra del combustible para ser sometido a pruebas de control de

calidad: viscosidad y contenido agua. La frecuencia de este control es indicada por el supervisor de operaciones.

- e. Al terminar el despacho de combustible, el operador realiza la maniobra en las válvulas para que la empresa **B** abastezca normalmente sus tanques de consumo diario.
- f. El operador realiza la medición del nivel en el tanque de Fuel Oil para verificar que la cantidad de combustible abastecida sea la correcta, y revisa con la medición de la tabla de calibración y los medidores de flujo en la empresa **B** si hubiere.
- g. Se registra la fecha, hora y cantidad de galones abastecidas en la bitácora.

Operación Diaria en el Tanque de Almacenamiento de Combustible.

- a. El operador de la unidad de emulsificación drena el combustible del fondo del tanque para evitar la acumulación de agua.
- b. Se revisa la temperatura del combustible al interior del tanque cada hora.
- c. La temperatura de almacenamiento de combustible está entre 60 - 75°C. En el interior del tanque se encuentra un

serpentín que utiliza vapor de las purgas para calentar el fluido. El flujo y presión del vapor están controladas por una válvula de compuerta y una válvula reguladora de presión (PLC y control). La válvula se cierra completamente si la temperatura del combustible está en el rango establecido. El tanque cuenta con la instrumentación adecuada para la medición de la temperatura del combustible así como la presión de vapor al ingreso del serpentín.

- d. El tanque de almacenamiento de Fuel Oil dispone de una bomba para la recirculación y calentamiento del combustible, cuyo funcionamiento (Sentido de giro, sonido, posición de válvulas, goteo de prensa estopa), es supervisado cada hora por un operador.
- e. El operador mantiene un kit de limpieza industrial en caso de que ocurra derrames de cualquier tipo en la zona del tanque de combustible.

2.4.1.5. Manipulación del Agua como Materia Prima.

Recepción del Agua en el Tanque de Almacenamiento.

- a. El tanque de almacenamiento de agua es alimentado por tuberías desde el sistema de bombas. El tanque de

almacenamiento de agua cuenta con sensores de nivel que controlan el proceso de llenado.

- b.** El operador de la unidad de emulsificación revisa el nivel de agua en el tanque después de la producción de cada batch de FOE (Fuel Oil Emulsionado).
- c.** Previo al abastecimiento del tanque de agua, se realiza el posicionamiento de las válvulas para garantizar que solo ingrese agua al tanque seleccionado para el proyecto.
- d.** Durante la operación de llenado, se toma una muestra de agua y se la somete a pruebas de control de calidad: sólidos totales suspendidos (TDS y pH). La frecuencia de este control es establecida por el supervisor de operaciones.
- e.** Al terminar el despacho de agua, el operador realiza la maniobra en las válvulas para retomar el abastecimiento normal a los tanques o líneas de distribución.
- f.** El operador verifica que la cantidad de agua abastecida sea la correcta, y realiza una doble verificación utilizando la tabla de calibración o los medidores de flujo.
- g.** Se registra la fecha, hora y cantidad de (*gal/m³*) abastecidos en la bitácora.

Operación Diaria en el Tanque de Almacenamiento de Agua.

- a. Se revisa cada hora la temperatura del agua en el interior del tanque. La temperatura de almacenamiento del agua en el tanque se mantiene entre 60 - 70°C.
- b. En el interior del tanque se encuentra un serpentín que utiliza vapor de purgas para calentar el fluido. El flujo y presión del vapor son controlados por una válvula de compuerta y una válvula reguladora de presión. La válvula se cierra completamente si la temperatura del agua está en el rango mencionado. El tanque cuenta con la instrumentación adecuada para la medición de la temperatura del agua y presión de vapor que ingresa al serpentín.
- c. El tanque de almacenamiento utiliza una bomba para la recirculación y calentamiento del agua, el operador revisa cada hora el correcto funcionamiento del equipo (sentido de giro, sonido, posición de válvulas, goteo de prensa estopa).

2.4.1.6. Operación de la Planta de Emulsificación.

La producción de Fuel Oil Emulsionado se realiza con la unidad de emulsificación encendida en Modo Automático y se realizan los siguientes pasos:

1. Revisar que la válvula de abastecimiento de Fuel Oil a la unidad de emulsificación permanezca siempre abierta. Sólo

el supervisor de operaciones puede coordinar actividades que requieran su cierre.

2. Revisar que permanezca abierta la válvula de abastecimiento del agua a la unidad emulsificadora. Sólo el supervisor de operaciones puede coordinar actividades que requieran su cierre.
3. Durante la producción de Fuel Oil Emulsionado, el operador revisa el status de la unidad de emulsificación y verifica que todos los parámetros de flujo, presión y temperatura estén de acuerdo a los valores establecidos en la pantalla (HMI) de la unidad emulsificadora.
4. Verificar que el contenido de agua “seteado” en la pantalla de la máquina permanezca constante. Sólo el supervisor de operaciones puede coordinar el cambio del valor establecido.
5. Verificar que sea correcta la posición de las válvulas de ingreso y retorno de combustible desde la unidad de emulsificación hacia el caldero de prueba.
6. Anotar la fecha y hora en que se produce cada batch de FOE en la bitácora.
7. El operador toma una muestra del Fuel Oil Emulsionado para ejecutar pruebas de control calidad según el procedimiento “EJECUCIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD EN

COMBUSTIBLES EMULSIONADOS” detallado en el apartado 2.4.2. Solo el supervisor de operaciones puede indicar la frecuencia diaria del control de calidad del FOE. Se registra la hora y fecha del batch por cada prueba realizada.

8. El operador de cada turno de trabajo registra diariamente la producción de Fuel Oil Emulsionado y del vapor del caldero de prueba.

2.4.2. Procedimiento para la Ejecución del Control de Calidad del FOE.

Para la operación de la planta de emulsificación se ha elaborado un procedimiento con la finalidad de estandarizar los pasos a seguir en la ejecución del control de calidad del FOE.

2.4.2.1. Propósito

El propósito de este procedimiento es establecer los pasos necesarios para la correcta ejecución del control de calidad al Fuel Oil Emulsionado basado en Normas ASTM, ejecutando la titulación de la muestra por el método Karl Fischer.

2.4.2.2. Aplicación

Este plan aplica a todo el personal que participe en el control de calidad de Fuel Oil Emulsionado.

2.4.2.3. Referencias Asociadas

- ASTM D1744-92. Método de prueba estándar para la determinación del porcentaje de agua en los productos de petróleo líquido.
- Manual de Operaciones - Titulador Karl Fischer, Mettler Toledo, 2007.

2.4.2.4. Equipos

- a. Balanza analítica de 0 a 101 gr.
- b. 100 micros jeringas de micro litro.
- c. Puntas de pipeta de 200 μ l y paquete a granel, 1000 unidades.

2.4.2.5. Reactivo y Materiales

- a. Agua destilada
- b. Solvente de aceite
- c. Métodos de ensayo de la muestra.

2.4.2.6. Determinación del Contenido de Agua en el Combustible por el Método Karl Fischer.

- a. Señalar la pipeta hasta la primera marca desde la punta.
- b. Presione hacia abajo el émbolo de la pipeta (no toda) y sumergir la punta de la pipeta en la muestra.
- c. Suelte el émbolo para aspirar la muestra en la punta de la pipeta.
- d. Limpie la muestra fuera de la punta de la pipeta.
- e. Coloque la pipeta con la muestra en balanza analítica. Asegúrese de que ninguna parte de la pipeta toque ningún objeto, el resultado sería un peso errado de la muestra.
- f. Tome el peso de la pipeta y con cuidado inserte la punta de la muestra a través del agujero en la tapa del frasco.
- g. Sostenga la punta de la pipeta de $\frac{1}{2}$ pulgada por encima de la superficie del disolvente y presione el émbolo hacia abajo para dispensar la muestra en el disolvente.
- h. La cantidad de muestra que se inserta depende del objetivo establecido para la determinación del porcentaje de agua; en este caso 50 mg a 120 mg de la muestra sería suficiente para la prueba.

- i. Colocar la pipeta con la punta en la balanza de nuevo y anotar el peso negativo que es el peso que se distribuye en el disolvente.
- j. Registre el peso de la muestra.
- k. Coloque en el equipo y la titulación empezará.
- l. Registre el volumen que aparece en la pantalla.
- m. Calcular el contenido de agua en la muestra de FOE de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Agua } \left(\frac{w}{w} \right) = \frac{WT \times F}{WE} \times 100 \quad \text{Ecuación: 2.2}$$

Donde:

WT: Volumen promedio para valorar el agua en la solución de FOE en ml.

F: Agua en unidad de mg.

WE: Tamaño de la muestra, en mg.

La muestra pasa el control de calidad si el porcentaje de agua medio es $\pm 1\%$ de lo deseado.

2.4.3. Procedimientos de Prevención y Respuestas a Derrames en los Procesos de Emulsificación del FOE.

Para la operación de la planta de emulsificación, se ha elaborado el siguiente procedimiento para estandarizar los pasos a seguir en el caso de existir derrames en los procesos de emulsificación.

2.4.3.1. Propósito

El propósito de este procedimiento es establecer las directrices requeridas para prevenir y dar respuestas a los potenciales derrames de hidrocarburo, que pueden ocurrir como resultado de las operaciones de recepción, mezcla y despacho de combustible, durante el proceso de emulsificación de los mismos en las instalaciones de los clientes.

2.4.3.2. Aplicación

Estas directrices aplican a todo el personal que participe en los diferentes procesos de emulsificación de combustible.

Las operaciones de emulsificación contempladas en el presente procedimiento son:

- **Recepción:** proceso de transferencia del combustible desde su tanque de almacenamiento principal a la unidad de emulsificación.
- **Mezcla:** proceso que se realiza en la unidad emulsificadora, donde se incorpora el agua al combustible.
- **Despacho:** proceso de transferencia del combustible emulsificado a los calderos, o para almacenamiento temporal.

2.4.3.3. Procedimiento

Es necesario establecer directrices básicas para que los procesos relacionados con la elaboración de combustibles emulsionados sean realizados dentro de condiciones controladas, preservando el medio ambiente y reduciendo los riesgos de seguridad.

Elementos Necesarios: Los elementos necesarios aquí relacionados se deben encontrar en buen estado de conservación durante la ejecución de los procesos de recepción, emulsificación y despacho de combustibles, ya sea puro o emulsionado.

1 tanque de polietileno de 1000 litros de capacidad con tapa, que sirve para almacenamiento temporal de combustible recuperado.

- 30 metros de cordón absorbente de hidrocarburos.

- 40 paños absorbentes de hidrocarburos.
- 2 trapeadores
- 3 pares de guantes de nitrilo
- 3 trajes protectores desechables
- 2 escobas de fibra
- 2 palas metálicas
- 2 gafas protectoras
- 2 botas de caucho
- 10 libras de trapo limpio
- 1 linterna de seguridad
- 10 fundas de polietileno resistentes, color amarillo.
- 20 libras de material absorbente (HTP).
- 2 baldes plásticos de 5 galones.

Prevención de Derrames en la Recepción de Combustibles para la Unidad de Emulsificación.

Las actividades que se realizan en el proceso de transferencia de combustible desde el tanque de almacenamiento asignado a la unidad de emulsificación, son las siguientes:

- a. Verificar los niveles en los tanques de combustibles de despacho y recepción.
- b. Asegurar que todas las válvulas, tuberías, bridas, filtros y demás componentes de la planta de emulsificación no

presenten goteos. En el caso de las válvulas, verificar que su posición sea de acuerdo a la señalética indicada. Solo el supervisor de operaciones podrá ordenar el cambio de posición de válvulas debido a maniobras especiales con la unidad de emulsificación.

- c. Comprobar que todos los sistemas de vapor instalados en la planta de emulsificación para el calentamiento de combustibles no presenten fugas y que la presión de vapor se mantenga inferior a **60 psig**.
- d. Verificar de forma conjunta con la empresa **B**, la tasa y presión de transferencia del combustible. Revisar que estos parámetros no excedan los límites establecidos durante la transferencia de combustible.
- e. Durante la transferencia de combustible, los operadores deberán chequear constantemente el nivel en los tanques y que no exista fugas o goteos en las tuberías de vapor o combustibles. Los operadores no pueden dejar la planta de emulsificación desatendida durante el proceso de transferencia.

Prevención de Derrames en el Proceso de la Mezcla.

- a. Durante el proceso de mezcla en la emulsificación, el operador deberá realizar rondas periódicas en la planta para revisar los parámetros generales del proceso. Los límites máximos y mínimos de cada parámetro serán determinados por el supervisor de operaciones.
- b. El operador deberá revisar constantemente el nivel de los tanques de combustibles y agua.
- c. Todas las válvulas deberán estar en la posición correcta para abastecer el tanque de producto terminado.
- d. Se conectará un tanque auxiliar a la unidad de emulsificación en caso de calibración de equipos, verificación de actualizaciones de software o maniobras especiales. Cuando se terminen las maniobras mencionadas, todas las válvulas deberán volver a su posición original y toda conexión auxiliar (manguera o tubería) deberá ser desconectada.

Prevención de Derrames en el Despacho de Combustibles desde la Unidad de Emulsificación al Caldero.

- a. Durante el proceso de despacho de combustible convencional o emulsionado al caldero, el operador deberá realizar rondas periódicas en la planta para revisar los

parámetros generales del proceso. Los límites máximos y mínimos de cada parámetro serán determinados por el supervisor de operaciones.

- b. Todas las válvulas deberán estar en la posición correcta para abastecer al caldero.

Respuesta a Derrames

Una vez que un derrame ocurre, las acciones inmediatas a tomar son las siguientes:

a. Protéjase usted mismo y a otros

- Evacue el área, si es necesario
- Apague toda fuente de ignición
- Ventile el área
- Determine la causa del derrame
- **Reporte del derrame inmediatamente**
- A su jefe inmediatamente en la Oficina Central
- Al supervisor de las instalaciones del cliente
- Si el derrame es grande, se activa el Comité de Emergencia en la Oficina Central, el cual toma conocimiento del derrame y dispone las medidas que considere convenientes.

b. Detenga el flujo si puede ser realizado con seguridad

Cierre válvulas, apague la unidad de emulsificación, reubique manguera, si es posible.

c. Contenga el derrame rápidamente

- Haga barreras con el cordón absorbente o con los paños, para evitar que el derrame se extienda.
- Desvíe el flujo para prevenir la entrada de hidrocarburo en drenajes o vías de agua, si no es posible la contención.

d. Limpieza de derrames

- Asegúrese de usar todos los equipos de protección personal especificados en la hoja de seguridad del combustible derramado.
- Si el derrame es en concreto o asfalto, use los paños para absorber el material libre derramado.
- Esparza material particulado absorbente. Deje actuar por uno minutos y luego limpie el área.
- Transfiera el material contaminado utilizando una pala a fundas resistentes de polietileno. Marque la funda identificado su contenido.
- Las fundas de polietileno son depositadas en el tanque de almacenamiento de 1000 litros.

- Si el derrame es grande o se ha producido en el piso de tierra, se debe comunicar inmediatamente a un contratista calificado para que asista en las labores de limpieza.
- El uso de dispersantes y/o tratamiento químico en las instalaciones de la empresa **B** debe ser conocido y aprobado.

e. Disposición de los desechos contaminados.

Los desechos contaminados, debidamente identificados, deben ser entregados a un gestor ambiental calificado por el Ministerio de Ambiente o Autoridad Local.

f. Revisión y Aprendizaje

- Después de que el derrame es recuperado, determine qué pasos deben ser tomado para prevenir la ocurrencia de un derrame similar.
- Cambie los procedimientos operativos y/o programe el entrenamiento apropiado para corregir deficiencias.
- Elabore un pedido para reponer el material y equipo utilizado, y realice un seguimiento al mismo.
- Envíe el reporte final del incidente al Gerente del departamento encargado.

CAPÍTULO 3

3. UNIDAD MICRO - EMULSIFICADORA

La emulsión de los combustibles líquidos es una solución que se utiliza en el mundo para ahorrar combustible y disminuir la contaminación ambiental.

El método más empleado es el de régimen de corriente turbulenta, pero el costo de las instalaciones es muy elevado, lo que no favorece el desarrollo de esta tecnología.

Un nuevo método, elaborado a partir de un trabajo de investigación y desarrollo, consiste en lograr la emulsión de los combustibles en régimen de corriente laminar, lo que permite mayor uniformidad de los diámetros de las gotículas, garantizando la estabilidad y calidad de la emulsión. Este método se logró a través del emulsor estático de flujo laminar y constituye una innovación tecnológica; es sencillo, compacto, pequeño y económico. El método y la tecnología de aplicación han sido desarrollados por el investigador cubano Dr. Jesús M. Guzmán China.

3.1. Componentes de la Unidad Micro – Emulsificadora.

La unidad Micro-Emulsificadora, produce automáticamente el vaporizado estable de la microemulsión entre el agua y el combustible de alta densidad y viscosidad, que es adecuado para alimentar las calderas, generadores de centrales térmicas de uso industrial y para abastecer de combustible a los motores marinos.

El equipo de emulsión para la realización de la mezcla estable, viene constituido de los siguientes accesorios principales:

- Un tanque de acumulación del combustible con serpentín de acero inoxidable para el recalentamiento con agua caliente.
- Un sistema de control continuo del nivel del combustible en el tanque con tres niveles de alarmas.
- Una bomba de presión entre 20 hasta 25 bar.
- Una bomba de dosificación de pistones.
- Un regulador de presión de 40 bar para la micro emulsión.
- Un regulador de presión de 3 bar para el circuito de precarga.
- Una bomba con by – pass.
- Un filtro de peines con grado de filtración de 400 micrones, de limpieza automática con motor y sistemas de recalentamiento por resistencia eléctrica.
- Un transductor de presión.

- Cables de recalentamiento por resistencia eléctrica de autorregulación.
- Tablero eléctrico de control.
- Tuberías de conexión y bastidor de acero para el ensamblaje del equipo.

En el Apéndice 6 se presentan los componentes de la Unidad Micro – Emulsificadora.

3.2. Regulaciones Técnicas Empleadas.

La unidad para la producción del combustible emulsionado ha sido fabricada acorde a las normas europeas referentes a la seguridad de las máquinas:

- UNI EN ISO 121000 – Machinery safety (Basic concepts, general design principles).
- UNI EN 349 - Machinery safety (Minimum distances to avoid crushing of body parts).
- UNI EN ISO 13850 - Machinery safety (Emergency stop equipment, operational aspects, design principles).
- CEI 44-5 - Machinery safety (Electrical equipment of machinery).

- UNI EN 983 - Machinery safety (Safety indications for hydraulic and pneumatic systems and their components).
- UNI EN 842 - Machinery safety (Visual danger signals).
- UNI EN 894 - Machinery safety (Ergonomic design principles).
- UNI EN 981 - Machinery safety (System of auditory and visual danger and information signals).

3.3. Especificaciones de la Unidad Micro – Emulsificadora.

El equipo es capaz de producir una microemulsión estable, basándose en las normativas italianas ya establecidas; *“Control de calidad de los productos derivados del petróleo, disponibles en el mercado con respecto a su influencia en la contaminación atmosférica, así como de las características técnicas de las plantas de combustión”*.

Una micro emulsión estable se obtiene cuando la temperatura de la mezcla alcanza alrededor de los $50^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y con una aceleración centrífuga mayor igual a $30.000 [m/s^2]$ durante 15 minutos como mínimo, no dando lugar a la separación del agua y el fuel oil empleado.

3.4. Características Técnicas de la Unidad de Emulsificación.

La Unidad Micro – Emulsificadora presenta las siguientes características técnicas:

- Capacidad de producción de Fuel Oil Emulsionado instantáneo de $1,394 [L/h]$.
- Máxima presión de trabajo de $25 [bar]$.
- Humedad relativa máxima: $85\% \pm 10\%$.
- Consumo de agua de $394 [L/h]$.
- Consumo máximo de fuel oil de $1,200 [L/h]$.
- Temperatura de agua en la tubería de ingreso de $60^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$.
- Temperatura del fuel oil en la tubería de ingreso de $70^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$.
- Densidad del fuel oil entre $0.92 - 0.97 [kg/L]$.
- Peso total del equipo de $885 [kg]$.

3.5. Dimensiones de la Unidad de Emulsificación.

Las dimensiones de la unidad Micro - Emulsificadora se presenta en la siguiente Tabla 5 y en el Apéndice 7.

TABLA 5
DIMENSIONES DE LA UNIDAD MICRO –
EMULSIFICADORA FUENTE [1]

Descripción	Abreviación	Dimensión [mm]
Largo	L	2250
Ancho	W	1000
Alto	H	1450

3.5.1. Consumo Diario de Fuel Oil Convencional.

El caldero N°3 tiene un consumo diario promedio de Fuel Oil N°4 de 190.58 gal/h, con un total de 4,574 gal durante una jornada de trabajo de 24 horas.

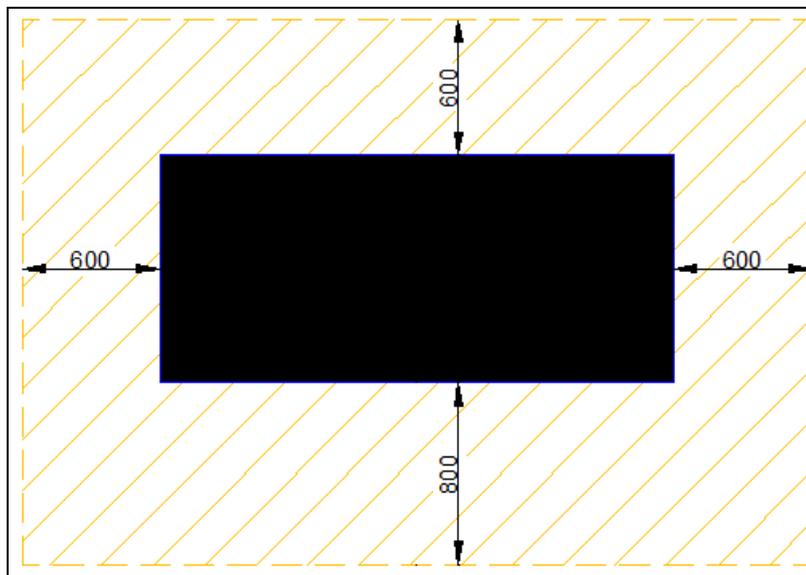
3.5.2. Consumo Diario de Vapor Saturado.

El caldero N°3 genera, para el proceso de producción, un promedio de 22,255 lb/h de vapor saturado con un total de 534.120 lb de vapor durante una jornada de trabajo de 24 horas.

3.6. Área de Instalación de la Unidad de Emulsificación.

El equipo se ha instalado y ubicado en un espacio libre con un perímetro de 0.6 [m], como se muestra en la Figura 3.1, para

facilitar el acceso para el mantenimiento, limpieza y trabajos conexos.



**FIGURA 3.1 - ÁREA DE INSTALACIÓN (ESPACIOS LIBRES)
DE LA UNIDAD MICRO – EMULSIFICADORA, UNIDADES EN
MILÍMETROS. FUENTE [1]**

La altura del techo del área en la que se ha instalado el equipo está de acuerdo con los reglamentos, esto es, manteniendo un espacio libre de **0.6 [m]** entre el punto más alto del equipo y el techo.

Las dimensiones donde se aloja el equipo de emulsión se presenta en la Tabla 6.

TABLA 6
DIMENSIONES PRINCIPALES DEL ÁREA DONDE SE UBICA
LA UNIDAD MICRO – EMULSIFICADORA FUENTE [1]

Descripción	Abreviación (Mínima)	Dimensión [mm]
Largo	L	3450
Ancho	W	2400
Alto	H	2200

3.7. Funcionamiento de la Unidad de Micro – Emulsificadora.

El funcionamiento de la unidad para preparar el combustible emulsionado, se ha dividido en cinco secciones presentadas en la Figura 3.2, en el siguiente orden:

- a)** Circuito de agua de alimentación presurizado.
- b)** Circuito de alimentación del Fuel Oil.
- c)** Circuito presurizado de combustible (circuito reforzador).
- d)** Emulsor estático.
- e)** Anillo Presurizado con Recalentamiento.

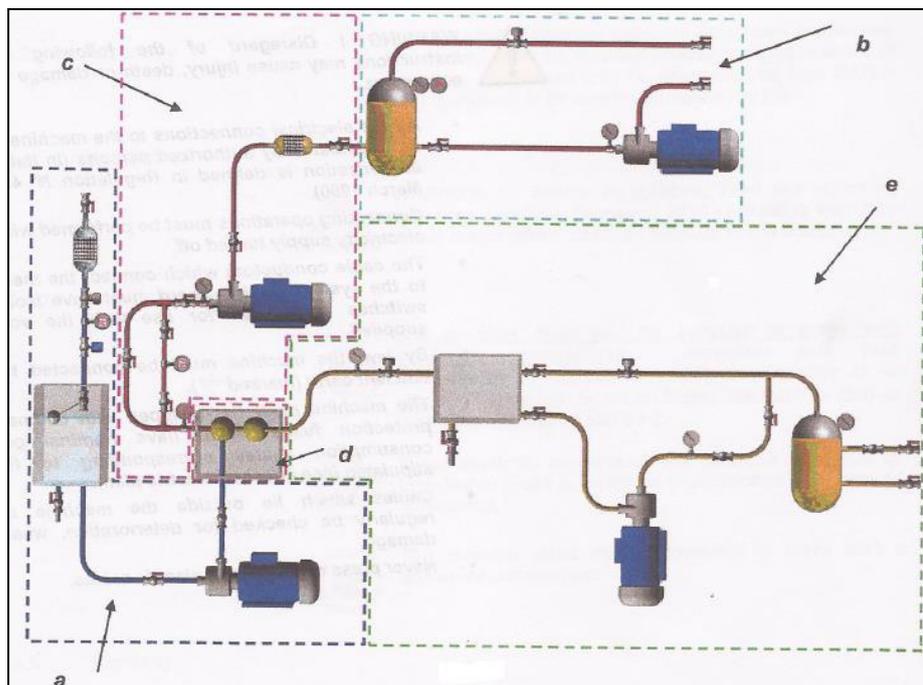


FIGURA 3.2 – CIRCUITO GENERAL DE PROCESO DE PRODUCCIÓN DE LA MICROEMULSIÓN. FUENTE [1]

En el Apéndice 8 se presenta las entradas y salidas de las tuberías de la unidad micro-emulsificadora.

3.7.1. Circuito de agua de alimentación presurizado.

En la Figura 3.2, sección (a), el circuito de agua de alimentación abastece a la unidad micro – emulsificadora con agua ablandada a presión a través de una tubería de 1/2" de diámetro. El detalle del circuito hidráulico se muestra en la Fig. 3.3, donde el agua fluye a través de la válvula de globo de entrada (*V12*), pasa por medio de

un filtro tipo *Y* (*F2*) de $400\mu m$, continua por el regulador de presión (*R3*), el cual disminuye la presión de las gotas de agua a una presión cercana a la atmosférica, luego pasa por el medidor de caudal (*FL H₂O*), que proporciona el caudal total consumido por la unidad al panel de control. El agua desciende al tanque por gravedad y este se empieza a llenar, siendo controlado el nivel del agua por una electroválvula (*V23*) y una válvula de globo (*V13*); el tanque tiene su propia válvula de drenaje (*V16*).

El agua para la micro-emulsión es enviada con la presión de una bomba dosificadora de pistones (*P3*), la cual ejerce la presión correcta y necesaria, alrededor de 23 bar, pasando por una válvula de retención (*V14*), para que el fluido no retorne de la sección del emulsor estático, manteniendo así la presión y evitando los golpes de ariete en la línea de descarga de esta sección.

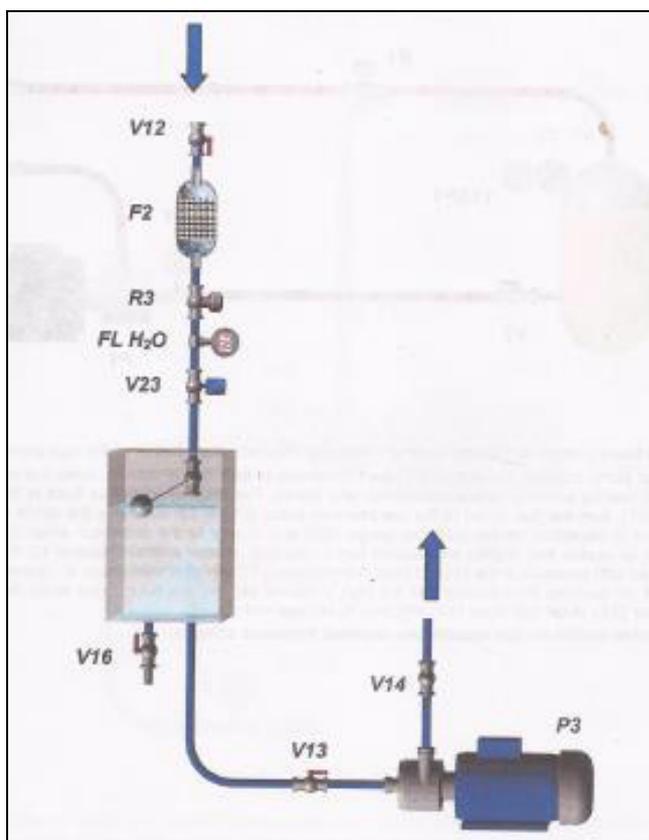


FIGURA 3.3 - CIRCUITO GENERAL DE AGUA DE ALIMENTACIÓN PRESURIZADO. FUENTE [1]

3.7.2. Circuito de alimentación del Fuel Oil.

En la Figura 3.2, sección (b), el circuito de alimentación del Fuel Oil que suministra Fuel Oil ligeramente presurizado a la bomba de alta presión a través de una tubería de **1" de diámetro**. El detalle del circuito hidráulico se muestra en la Fig. 3.4, donde una bomba externa proporciona una baja presión (**2 bar**) que hace circular el combustible en el tanque de almacenamiento principal para

mantener el combustible en movimiento y proveer un calentamiento uniforme y homogéneo, evitando la cristalización local y que se formen a manera de bloques de combustible.

La entrada de combustible se fija a una distancia de 1.25" de la válvula de globo de entrada (*V1*), donde el fluido es conducido a la bomba de baja presión (*P1*) que circula el combustible por todo el circuito y su presión se visualiza en el manómetro (*M1*). Luego se envía al desaerador que aporta una pequeña cantidad de calor al combustible y presuriza ligeramente al circuito de alta presión de la siguiente sección del circuito reforzador.

El desaerador en el flujo es útil para evitar que las partículas de aire fluyan dentro de la sección de alta presión, para lo cual se ha equipado con una sonda de presión (*11SP1*) y un termómetro (*T1*). La tubería de retorno se conduce a través del regulador de presión (*R1*), saliendo por la válvula de bola (*V3*) y retornando al tanque de almacenamiento principal.

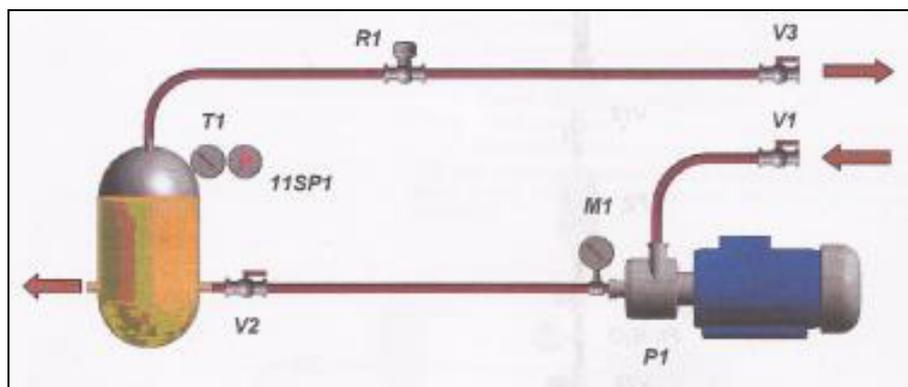


FIGURA 3.4 - CIRCUITO GENERAL DE ALIMENTACIÓN DEL FUEL OIL. FUENTE [1]

3.7.3. Circuito Presurizado de Combustible (circuito reforzador).

En la Figura 3.2, sección (c), el circuito reforzador proporciona combustible presurizado a la unidad micro – emulsificadora a través de una tubería de 1/2".

El detalle del circuito hidráulico se muestra en la Fig. 3.5, donde el combustible de baja presión fluye desde el desaerador a través de la válvula de entrada de bola (V4), que pasa por un filtro (F1). Allí se presuriza a 23 bar con la ayuda de la bomba de alta presión (P2) con manómetro acoplado (M2) y se envía a la sección de control de flujo realizado por el medidor de caudal (FL HFO) y el sistema de bypass (V7, V8 y V9).

La presión necesaria de la unidad micro – emulsificadora de la sección **(d)**, es controlada constantemente por la sonda de presión (**11SP2**) a la salida de la sección **(c)**.

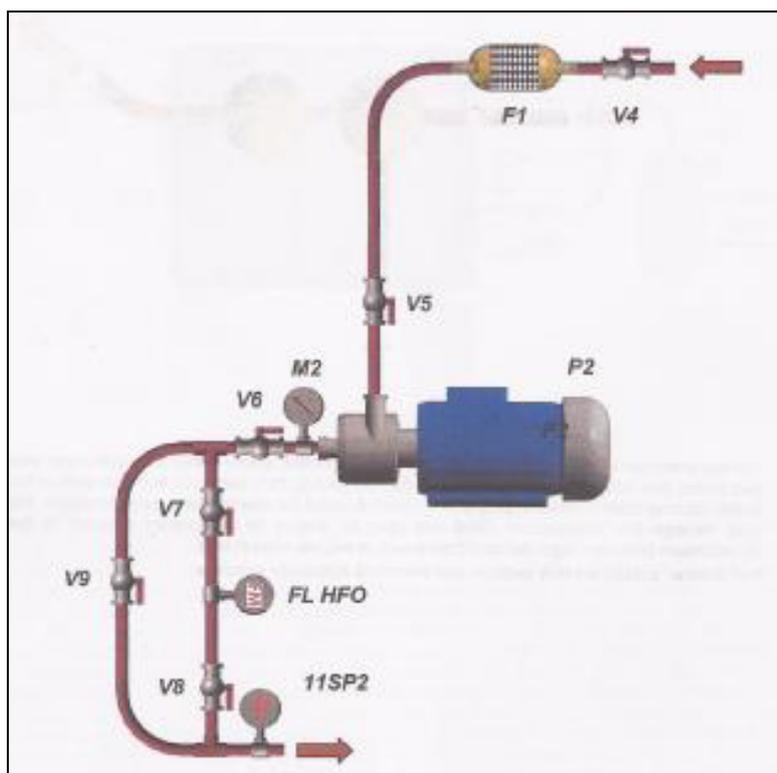


FIGURA 3.5 - CIRCUITO GENERAL PRESURIZADO DE COMBUSTIBLE (CIRCUITO REFORZADOR). FUENTE [1]

3.7.4. Emulsor Estático.

En la Figura 3.2, sección (d), el emulsor estático es el corazón de la unidad y el componente donde la micro emulsión se lleva a cabo (estado estable). Tiene dos entradas: una horizontal para la entrada del combustible a alta presión procedente de la sección **(c)**, una

vertical para la entrada de agua a alta presión procedente de la sección (a), y una de salida horizontal para la descarga de la micro emulsión.

La micro emulsión es conducida a través del tubo llamado "impedancia" al anillo presurizado con recalentamiento para luego almacenarlo en el tanque, finalizando la etapa de producción.

El diseño de este dispositivo permite la emulsión de cualquier fluido líquido con agua, u otra sustancia. El objetivo principal es suministrar agua a un emulsor de combustible líquido que no posee parte móvil, solo estático (molino coloidal estático), sin consumir energía eléctrica adicional. El logro de la emulsión se realiza bajo el principio novedoso de régimen de corriente de flujo laminar, lográndose obtener gotas de agua de tamaños muy pequeños y más uniformes.

Las ventajas de suministrar gotas de agua pequeñas y uniformes en cada glóbulo de combustible, es que se puede realizar una atomización secundaria en la combustión, la cual es responsable de que se reduzca grandemente la producción de hollín; se aproveche totalmente el combustible; aumente la transferencia de calor entre los gases de la combustión y el agua de alimentación, mejorando sensiblemente la eficiencia de la caldera y como consecuencia

dotando de una buena combustión; además, disminuye la contaminación de los gases a la atmósfera.

La emulsión no sólo ayuda al ahorro de energía, sino que también directa y visiblemente recompensa al sistema de calentamiento con una reducción sustancial de los costos anuales del combustible, también posibilita que se produzcan largos intervalos entre los períodos de limpieza. Como la producción de hollín se reduce, es posible utilizar un combustible más barato y seguir manteniendo las normas ambientales para las emisiones de partículas.

3.7.4.1. Criterio de Diseño del Emulsor Estático.

El método empleado para facilitar la emulsión es un aparato sencillo, sin partes móviles con los siguientes criterios:

- Para obtener una emulsión apropiada, se debe lograr en el flujo del fluido empleado, un régimen laminar en la zona de diámetro reducido de la cámara central, para lo que $Re < 600$.
- La presión del fluido empleado y la presión del agua a la entrada del emulsor deberán ser iguales, aunque se puede admitir una presión del agua ligeramente superior.

- El área total de todos los orificios por donde se inyecta el agua es de 0,11 – 0,16 veces el área total del cuello de la cámara del emulsor.
- El flujo del agua para la emulsión será el flujo del fluido multiplicado por 0,05; 0,08; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; etc. En caso del combustible fuel oil, el óptimo es 0,08; para las mezclas diesel - fuel oil, es 0,10; para la mezcla diesel – fuel para motores de transporte, es 0,25.
- La cámara central debe tener 8; 18 ó 36 orificios de inyección del agua para la emulsión, según consuma el tipo de combustible. En caso del combustible fuel oil, es 18; para las mezclas diesel - fuel oil, es 8; para la mezcla diesel – fuel para motores de transporte, es 36.
- La velocidad del combustible es mayor a la del agua inyectada.
- La viscosidad del fluido a utilizar, así como el consumo horario, definen el diámetro de la zona reducida de la cámara.

Una desventaja del tipo de flujo de combustible «turbulento» es que dicho flujo en algunas ocasiones, sólo por un instante, puede desarrollar una velocidad muy baja o llegar a cero en la pared por donde penetra el flujo de agua en el cuello de la cámara central; por

lo tanto, un pequeño porcentaje de gotas de agua serán mayores y no mantendrán el tamaño estándar requerido. Esto indica que es más útil tener gotas de agua con un tamaño más uniforme, obteniendo un resultado óptimo.

El término «flujo laminar» significa que sus velocidades están «libres de fluctuaciones microscópicas», es decir, que el flujo está sustancialmente libre de turbulencias caracterizado por el contraflujo, a excepción de la micro turbulencia que ocurre en los conductos de inyección de agua vecinos y de la turbulencia inducida del agua en las burbujas vecinas, o en los sedimentos o flujos de agua.

En el emulsor estático de flujo laminar el proceso de emulsión se realiza por succión o arrastre, y por el corte de las gotículas de agua que se han formado y organizado en el interior de los orificios o canales al pasar el flujo de combustible en la zona de diámetro reducido de la cámara central.

El flujo de combustible al chocar a su paso con el dispositivo direccional, se introduce por las ranuras que están próximas a la

pared del cono de la cámara central, organizándose en forma de película en la pared del cono y el cuello de dicha cámara.

Debido a que la presión del agua y del combustible es idéntica en la zona del cuello, permite la entrada de la gotícula en forma de elipsoide achatada con diámetro menor al diámetro del orificio. Al salir la gotícula de agua de sus canales es cortada por la película de combustible que viene por la pared del cono y del cuello (gotícula que se originó dentro de sus respectivos canales y que tiene diámetros menores a este). Al ser cortadas las gotículas de agua por la película de combustible, éstas se dividen en varias gotículas de diámetros más pequeños. Posteriormente estas gotículas son llevadas al centro del cuello de la cámara, donde existe una región de micro turbulencia, y son nuevamente cortadas por las moléculas de combustible que se mueven con mayor velocidad.

Por último, saliendo del emulsor al pasar el flujo de combustible emulsionado hacia la bomba y dentro de ella es que las gotículas de agua alcanzan los menores valores de diámetros.

Es importante reconocer que el mérito que tiene el régimen de corriente de flujo laminar es que al cortar las gotículas de agua, lo hace de forma tal que la fragmentación de estas permite que cada una de ellas tenga el diámetro lo más uniforme una con otra; esto ocurre en el primer corte de las gotículas de agua, lo que asegura que el diámetro mayor que puedan tener algunas gotículas esté cercano al valor medio entre ellas.

Cuando las gotas se aceleran, o se retardan, la resistencia al movimiento cambia aparentemente en una cantidad que se describe en términos de «masa transportada», variando desde una mitad hasta dos veces la masa del fluido desplazada.

La emulsión se realiza satisfactoriamente si está bien dividida, si es razonablemente uniforme y si más de 95% de sus gotas tienen un diámetro de 2 a 5 *um*.

3.7.4.2. Descripción del Emulsor Estático.

El emulsor estático de flujo laminar está compuesto por un cuerpo de forma cilíndrica con una hendidura longitudinal, su función es proteger el emulsor de los golpes y darle forma compacta.

La cámara central está instalada dentro del cuerpo y está formada por dos conos que presenta una zona de diámetro reducido o cuello en su centro. En este hay perforaciones que permiten la entrada del agua en forma de gota hacia el interior.

El dispositivo direccional (juego de dos engranes), es el que distribuye el fluido a la entrada del emulsor por las paredes del cono de la cámara central hacia la zona de diámetro reducido, para lograr la emulsión. Ver figura 3.6.

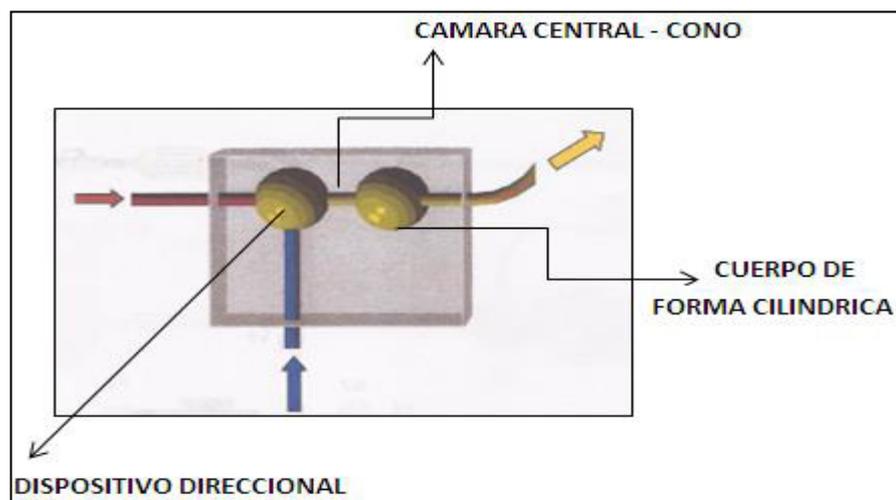


FIGURA 3.6 - CIRCUITO GENERAL EMULSOR ESTATICO O TURBOTRANSDUCTOR. FUENTE [1]

3.7.4.3. Principio de Funcionamiento del Emulsor Estático.

El flujo de combustible al chocar a su paso con el dispositivo direccional (juego de dos engranes), ver figura 3.7 y con el agua proveniente de la sección **(a)**, se introduce por las ranuras que están próximas a la pared del cono de la cámara central, organizándose en forma de película en el cuello de dicha cámara. En el centro del cono de la cámara central, posterior al dispositivo, se produce un vacío.

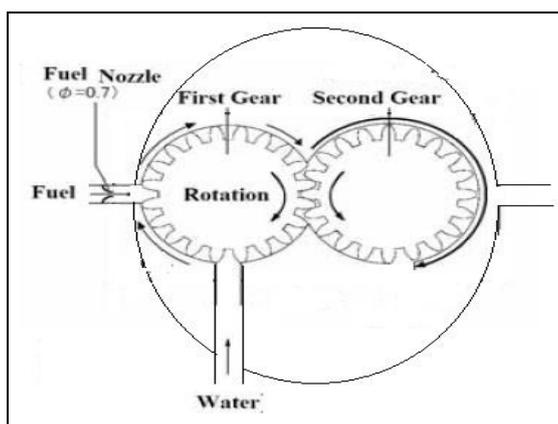


FIGURA 3.7 – DISPOSITIVO DIRECCION (JUEGO DOS ENGRANES) FUENTE [1]

La presión del agua es ligeramente superior a la del combustible en la zona del cuello, permitiendo la entrada de las gotículas en forma de elipsoides achatadas con diámetros menores al del orificio. El combustible en esta zona reducida aumenta su velocidad, creando

una succión o arrastre de las gotículas de agua, la que son cortadas por la película del combustible formada en la pared del cono.

Al ser cortadas las gotículas, se dividen en varias de tamaños más pequeñas. Posteriormente son llevadas al centro del cuello de la cámara central, Figura 3.8, donde existe una región de micro turbulencia y son nuevamente cortadas por las moléculas de combustible que se mueven con mayor velocidad, debido a que las moléculas se alejan de la pared.

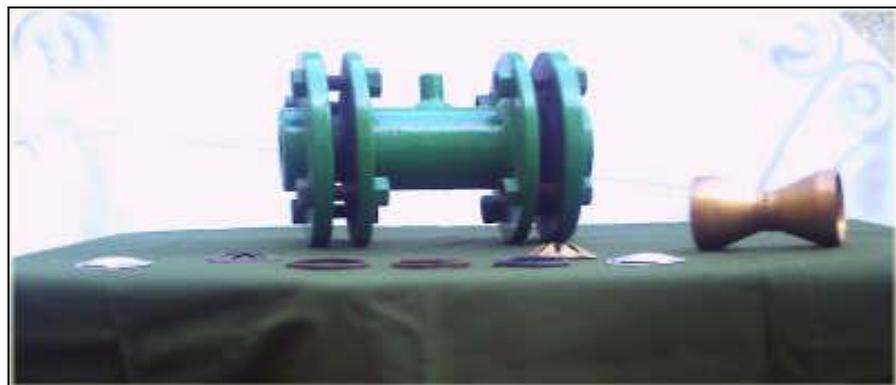


FIGURA 3.8 – CONO DE LA CAMARA CENTRAL DEL EMULSOR ESTATICO DE FLUJO LAMINAR. FUENTE [2]

3.7.5. Anillo Presurizado con Recalentamiento.

En la Figura 3.2, sección (e), el anillo presurizado con recalentamiento produce una micro emulsión de baja presión para

los quemadores. El esquema del circuito hidráulico se muestra en la Figura 3.9.

En este, el regulador de presión (*R2*) trae consigo pérdidas de carga de combustible a alta presión, con el fin de disminuir la presión a su valor inicial de 2 bar y evitar así el almacenamiento a altas presiones en el tanque de micro emulsión. A través del anillo presurizado de la micro emulsión, se abastece combustible a los diferentes quemadores, donde la presión es generada por la bomba rotativa de engranajes (*P4*) a los quemadores con su válvula de retención (*V23*) y el regulador de presión (*R4*). Debido a la configuración de la unidad existente, el desaireador se coloca en el interior de la estructura y está conectado al anillo presurizado por un tubo corto vertical situado entre la válvula de retención (*V23*) y el regulador de presión (*R4*).

Esta presión se puede controlar con la ayuda del manómetro (*M5*). Desde este dispositivo se inicia la emulsión que se conduce por una tubería de 1.5" de diámetro a la salida de esta sección hacia los quemadores a través de la válvula de bola (*V11*). Además, cuenta con una tubería de retorno compuesta por la válvula de bola de entrada (*V10*) y la válvula de retención (*V22*) que conducen de nuevo al desaireador con el fin de mantener la emulsión a altas

temperaturas y sólo en el circuito de tubería del quemador, evitando su retorno al depósito de emulsión.

Esta configuración permite que el quemador arranque más rápido, debido a la necesidad de que el calor sea disipado a través del circuito que conduce a un uso más eficiente de calor.

Este arreglo, además, permite un calentamiento de la emulsión segura porque el líquido caliente se mantiene siempre bajo la presión de la bomba ($P4$) y del anillo presurizado, entre 2 – 3 bar, por lo que la temperatura de ebullición para el agua en esta condición es lo suficientemente alta para evitar la formación de espuma en la emulsión, incluso para altas temperaturas de precalentamiento (*hasta 130 – 140 °C*).

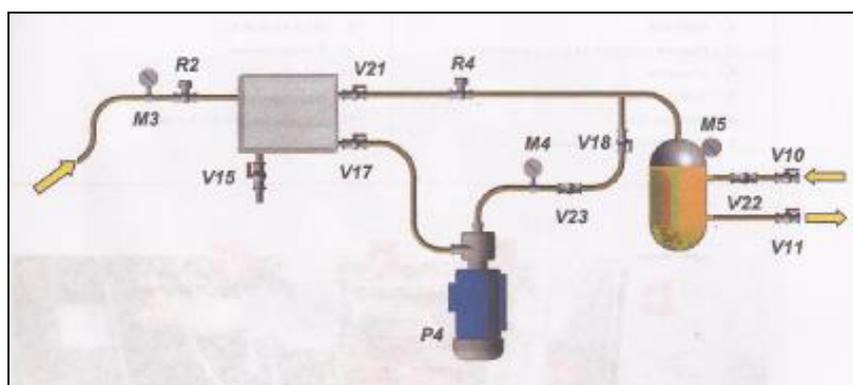


FIGURA 3.9 - CIRCUITO GENERAL DEL ANILLO QUEMADOR.

FUENTE [1]

En el Apéndice 9 se presenta la tabla periódica de mantenimiento de la unidad micro-emulsificadora que recomienda el fabricante, para llevar a cabo el mantenimiento preventivo y conservar la vida útil del equipo.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANALISIS

En este capítulo se presenta el análisis de la implementación de la tecnología de Fuel Oil Emulsionado, FOE, en comparación al Fuel Oil Convencional Puro, FO, con carga de operación constante del 70 % de su capacidad máxima y con diferentes porcentajes de agua para la emulsión, durante seis días de operación continua; un día con FO y los cinco días restantes con FOE.

Los resultados de las mediciones fueron tomados de forma conjunta entre los operadores del área de calderos y los operadores de la planta de emulsificación.

Los operadores registraron cada hora de forma manual los parámetros principales del caldero N° 3 durante los días de pruebas, con el propósito de evaluar el índice de producción, la eficiencia térmica operativa y las emisiones de los gases de combustión.

4.1. Línea Base – Fuel Oil Convencional Puro, FO.

Los datos iniciales de consumo de FO y generación de vapor fueron tomados desde las 00:00 horas hasta 24:00 horas. En este periodo de 24 horas de operación continua se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 7.

TABLA 7

DATOS DE LINEA BASE – FUEL OIL CONVENCIONAL

Carga: 70 %	Generación de Vapor	Consumo Fuel Oil N°4	Presión Vapor (psi)	Temperatura Vapor (°F)
Total	241,801.96 (kg)	4,574.00 (gal)	242.82	446.96
Promedio	10,075.08 (kg/h)	190.58 (gal/h)		
Índice de Producción		52.87 (kg/gal)		

Previo al paso del combustible existe una válvula de tres vías que permite que el combustible en exceso sea retornado al sistema de precalentamiento, manteniéndose dentro de este circuito hasta su combustión, por lo que en esta prueba no se registró retorno de fuel oil desde la línea de entrada de combustible al caldero.

4.2. Fuel Oil Emulsionado, FOE.

Para el desarrollo del proceso de Fuel Oil Emulsionado se resolvió experimentar utilizando cinco porcentajes diferentes de agua para la emulsión, calculados previamente, como se indica en el Apéndice 10. Estas pruebas se realizaron hasta alcanzar los objetivos planteados por medio de la teoría de cálculo de prueba y error, y la pericia del operador del equipo emulsificador.

En la Tabla 8 se indican los porcentajes de agua utilizados para las pruebas de la emulsión.

TABLA 8

PORCENTAJES DE AGUA UTILIZADOS EN LA EMULSIÓN

Pruebas	Porcentaje de Agua - FOE
Día 1	14.19 %
Día 2	13.7 %
Día 3	10.31 %
Día 4	10.06 %
Día 5	5.01 %

Las emulsiones fueron preparadas en un área específica de acuerdo a los lineamientos de la planta y al área de los calderos, considerando el análisis de riesgos, realizado previamente.

El abastecimiento de aire comprimido y de agua ablandada para el proceso productivo, fue establecido de acuerdo a las especificaciones requeridas.

4.2.1. Análisis Comparativo del Consumo de Combustible Fuel Oil FO vs. FOE.

De acuerdo con el objetivo específico planteado, “Ahorro de Combustible Fósil entre el 4 y 10 %, bajo condiciones similares de operación”, se obtuvieron resultados y beneficios en comparación al consumo del Fuel Oil Emulsionado, FOE.

Estos consumos fueron previamente cuantificados en términos de volumen utilizando un contador volumétrico análogo de 800 galones/hora de capacidad, instalado a la entrada del combustible al caldero.

El consumo registrado por el contador se corrigió multiplicando la lectura del contador por el índice 0.96. Este índice aplica el personal de la planta para realizar una corrección de temperatura del combustible al pasar por el contador volumétrico. Esta temperatura promedio es de 112 °F en los tanques de almacenamiento vs. 206 °F que es la temperatura a la que pasa el combustible

emulsionado calentado por el contador. Una vez corregidos los consumos, los resultados obtenidos de ahorro de combustible durante la combustión de las emulsiones se presentan en la Tabla 9.

TABLA 9

AHORRO DE COMBUSTIBLE CON DIFERENTES PORCENTAJES DE AGUA EN LA EMULSIÓN.

Fuel Oil N° 4

	Vapor (kg/h)	Combustible (gal/h)	Condiciones - Vapor	
			Presión (psi)	Temperatura (°F)
FO PURO	10.097	190,58	230,17	394,36

Fuel Oil Emulsionado

% Agua	Vapor (kg/h)	Combustible (gal/h)	Condiciones - Vapor		Ahorro FO (gal/h)	Porcentaje de Ahorro FO N°4
			Presión (psi)	Temperatura (°F)		
FOE 14,19%	10.101	187,56	245,26	398,60	3,03	1,59%
FOE 13,7%	10.125	186,99	246,21	398,11	3,59	1,91%
FOE 10,31%	10.080	181,41	249,46	398,62	9,17	4,90%
FOE 10,06%	10.122	182,18	248,83	398,41	8,40	4,63%
FOE 5,01%	10.079	189,68	250,58	398,41	0,90	0,50%

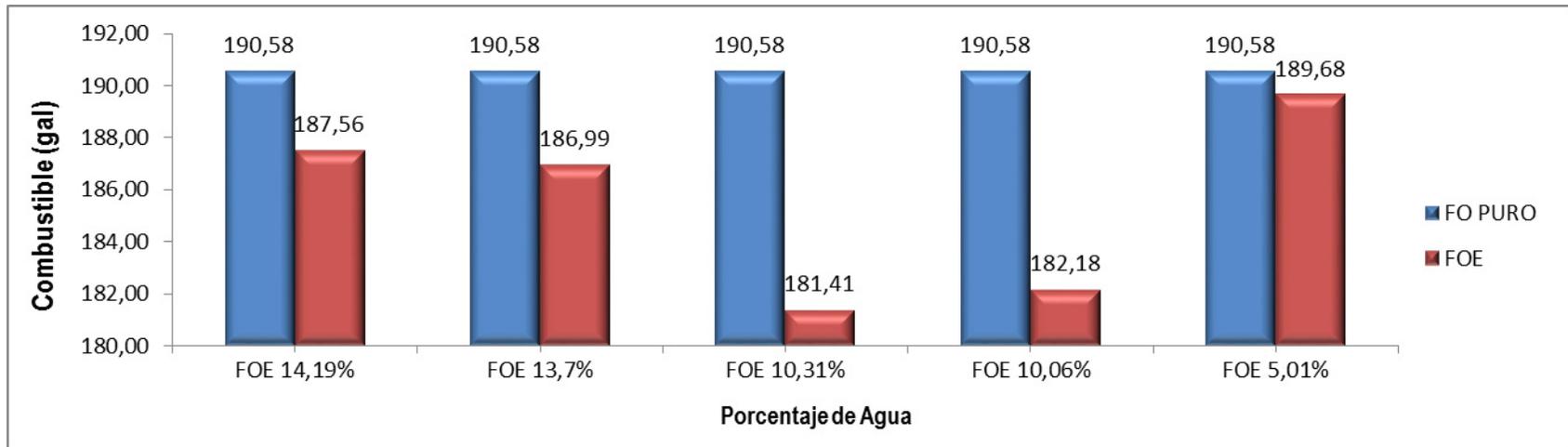
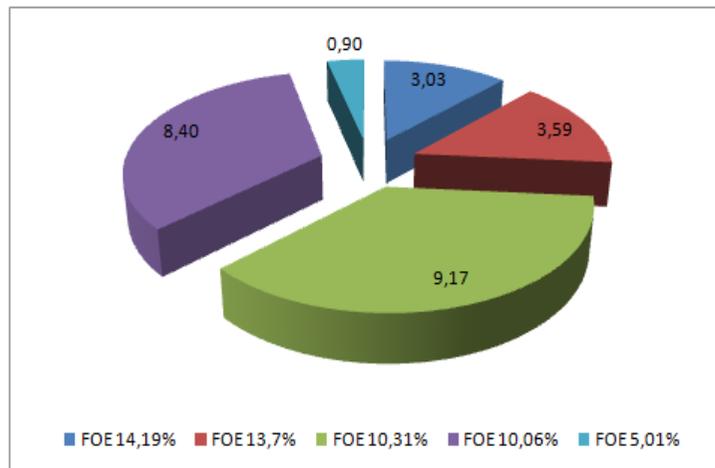


FIGURA 4.1 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DEL CONSUMO PROMEDIO DEL FO Y FOE CON DIFERENTES PORCENTAJES DE AGUA.

Ahorro de Fuel Oil N°4 en gal/h.



Ahorro de Fuel Oil N° 4 en Porcentajes.

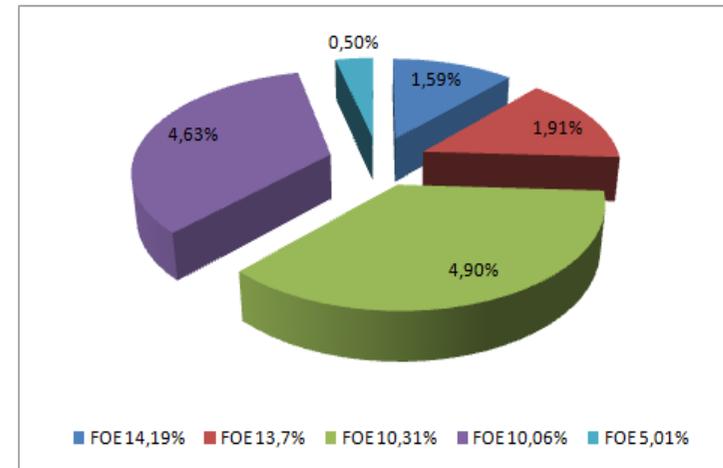


FIGURA 4.2 GRÁFICO DE AHORRO DE COMBUSTIBLE FUEL OIL N° 4 EN GALONES/HORA Y EN PORCENTAJES DE CONSUMO.

De la Tabla 10 se puede analizar que se han obtenido mejores resultados al quemar FOE en proporción de **10.31 %** de agua en la mezcla de la emulsión, este resultado se dio en el tercer día de prueba, debido a que se consumió menos combustible bajo similares condiciones de operación, presión y temperatura del vapor generado.

4.2.2. Análisis de la Eficiencia Térmica

De acuerdo con el objetivo planteado, “Comparación de la Eficiencia del Fuel Oil Convencional Puro “FO” en relación al Combustible Emulsionado “FOE”, fueron analizados los resultados mediante el uso de dos indicadores, a partir de los resultados obtenidos durante la implementación de la tecnología de Fuel Oil Emulsionado, FOE.

- **Índice de Producción - IP**

Evalúa la capacidad de la caldera para generar similares cantidades de vapor con dos combustibles diferentes.

Tal como se muestra en la Tabla 4.4, la caldera **Nº 3** produjo similar cantidad de vapor consumiendo menos FO por lo que la eficiencia aumentó, bajo las mismas condiciones de temperatura y presión de operación.

TABLA 10
ÍNDICE DE PRODUCCIÓN – PROMEDIO

Fuel Oil N° 4

	Vapor (kg/h)	Combustible (gal/h)	Condiciones - Vapor		Índice de Producción (kg/gal)
			Presión (psi)	Temperatura (°F)	
FO PURO	10.098	190,58	230,17	394,36	52,99

Fuel Oil Emulsionado

% Agua	Vapor (kg/h)	Combustible (gal/h)	Condiciones - Vapor		Índice de Producción (kg/gal)	Aumento del IP
			Presión (psi)	Temperatura (°F)		
FOE 14,19%	10.101	187,56	245,26	398,60	53,89	1,71%
FOE 13,7%	10.125	186,99	246,21	398,11	54,15	2,19%
FOE 10,31%	10.080	181,41	249,46	398,62	55,65	5,03%
FOE 10,06%	10.122	182,18	248,83	398,41	55,60	4,93%
FOE 5,01%	10.079	189,68	250,58	398,41	53,18	0,36%

De la información mostrada en la Tabla 10, al utilizar un porcentaje de agua en la mezcla de emulsión correspondiente al 10.31 %, se eleva su Índice de producción en el orden del 5.03%. En el Gráfico 4.3 se presenta la comparación del Índice de Producción usando Fuel Oil N°4 y FOE.

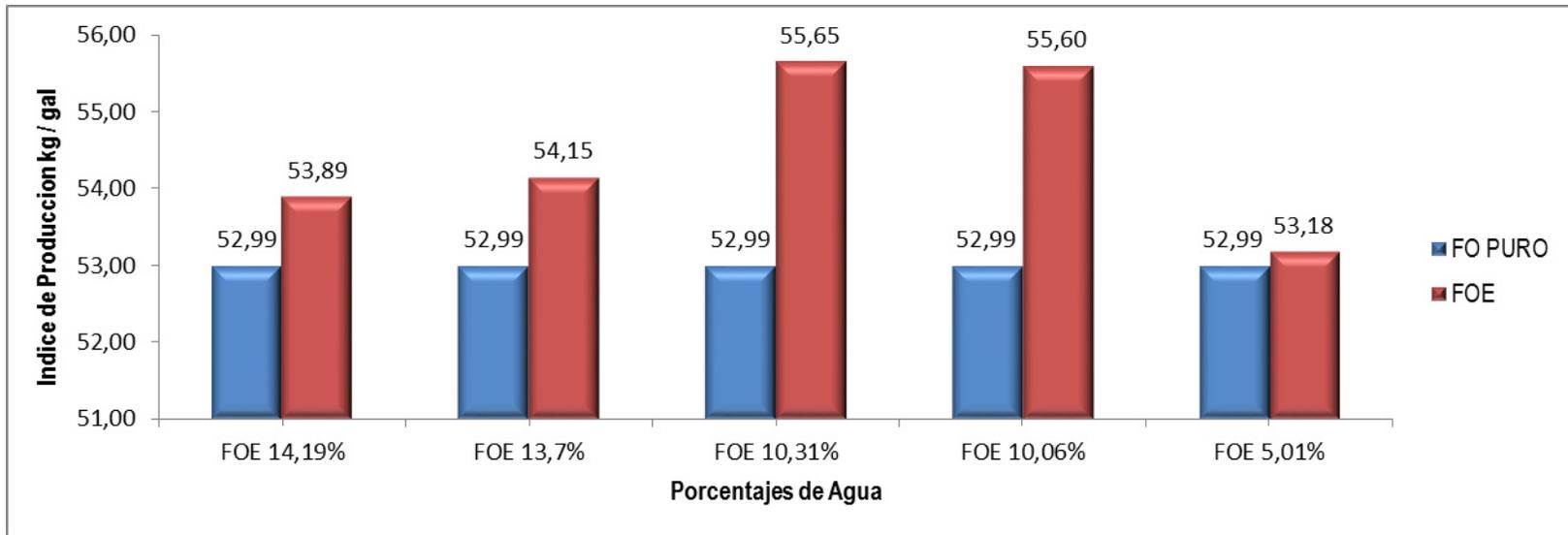


FIGURA 4.3 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DEL ÍNDICE DE PRODUCCIÓN DEL FO Y FOE CON DIFERENTES PORCENTAJES DE AGUA.

El aumento del promedio del índice de producción usando FOE a diferentes porcentajes de agua, se observa en la figura 4.4, a continuación:

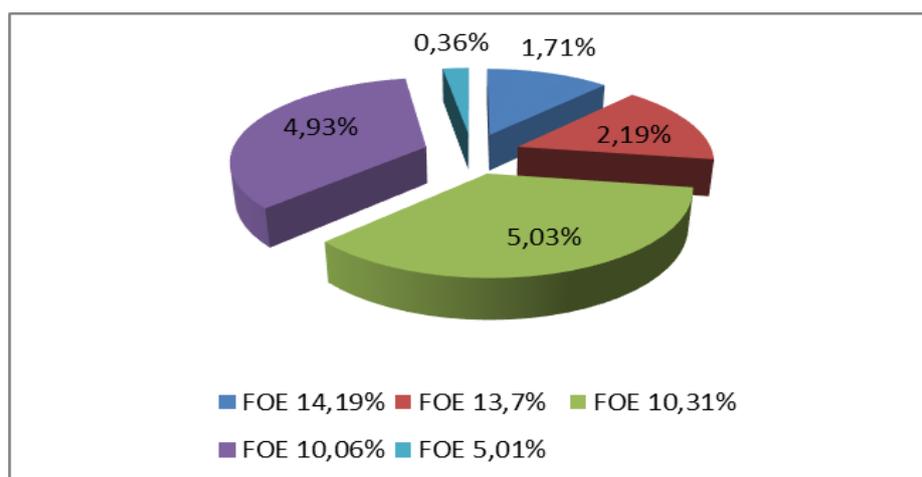


FIGURA 4.4 GRÁFICO DE PORCENTAJE DEL AUMENTO DEL ÍNDICE DE PRODUCCIÓN CON RESPECTO AL IP DEL FO.

FUENTE [3]

▪ **Eficiencia Térmica – Operativa.**

La eficiencia térmica es el valor ingenieril que presenta los efectos combinados de la combustión y la capacidad del caldero para transferir calor desde los gases de escape “calientes” hacia el agua para la generación de vapor.

La eficiencia térmica se calculó en base a la Norma ASME PTC 4.1 explicado en el Capítulo II, Sección 2.2.7.

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{\text{ENERGIA DE SALIDA}}{\text{ENERGIA DE ENTRADA}} \quad (4.1)$$

$$= \frac{\text{Masa de vapor (Entalpía de vapor – Entalpía de agua que ingresa al caldero)}}{\text{Masa de FUEL OIL (poder calorífico superior)}}$$

Para proceder a determinar la eficiencia térmica del caldero, se calculó cada término de la ecuación 4.1. Se realizó el análisis de la información basado en la producción de vapor total y la tasa de producción de vapor con respecto a la capacidad máxima del caldero. La medición de la eficiencia del caldero de prueba es el indicador para determinar las ventajas de la aplicación de la tecnología de combustibles emulsionados.

Poder Calorífico Superior - Fuel Oil N° 4

El poder calorífico superior fue tomado de la ficha técnica del proveedor, es decir, 18.500 BTU/lb. Este valor se ha tomado para los cálculos tanto para la combustión del FO como para la combustión del FOE, debido a la complejidad logística que implica hacer un análisis en un calorímetro o un análisis químico de sus componentes. Al momento de analizar el contenido energético del combustible para los cálculos de la eficiencia, se multiplica la

cantidad total de combustible por el poder calorífico superior en la línea base.

Poder Calorífico Superior - Fuel Oil Emulsionado

En el caso del Fuel Oil Emulsionado, se reduce el porcentaje másico de agua de la mezcla al total del volumen fijo y se lo transforma a una cantidad total de combustible en libras de emulsión. Es evidente que el poder calorífico superior de un combustible emulsionado es inferior al del combustible convencional ya que el agua no aporta contenido energético.

Referencia [6]

En la Tabla 11 se presenta los resultados de la eficiencia térmica del caldero N° 3 utilizando combustible emulsionado a diferentes porcentajes de agua.

TABLA 11

EFICIENCIA TÉRMICA – OPERATIVA

Fuel Oil N° 4

Densidad	0,9927	kg/l
Poder Calorífico	18.500	BTU/lb

	Vapor (lb)	Combustible (lb)	Vapor		Agua	Eficiencia
			Presión (psi)	T (°F)	T (°F)	
FO PURO	534.124	37.868,40	230,17	394,36	211,33	
Entalpia (BTU/lb)			1204,5	Entalpia Agua	178,05	78,26

Fuel Oil Emulsionado

% Agua	Vapor (lb)	Combustible (lb)	Vapor		Agua	Entalpia Vapor	Entalpia Agua	Eficiencia	Incremento
			Presión (psi)	T (°F)	T (°F)	(BTU/lb)	(BTU/lb)		
FOE 14,19%	534.323	37.266,97	245,26	398,60	218,00	1201,6	186,11	78,70	0,57%
FOE 13,7%	535.574	37.155,20	246,21	398,11	213,35	1201,2	180,07	79,56	1,67%
FOE 10,31%	533.185	36.046,40	249,46	398,62	216,20	1214,6	184,1	82,39	5,28%
FOE 10,06%	535.424	36.199,51	248,83	398,41	226,93	1214,4	194,18	81,57	4,23%
FOE 5,01%	533.148	39.676,98	250,58	398,41	220,93	1214,2	188,13	74,53	-4,77%

Es evidente que el coeficiente global de transferencia de calor en el caldero N°3 aumentó en todos los niveles de porcentajes de agua, a excepción del último día de prueba.

El aumento mayor de eficiencia se da al tercer día de la prueba con 10.31% de agua en la emulsión, ascendiendo de 78.26% con Fuel Oil Convencional al 82.39% con Fuel Oil Emulsionado.

Lo contrario se observa que con 5.01% de agua en la emulsión en el último día de la prueba, la eficiencia térmica se reduce al 74.53%, demostrando que a menores porcentajes de agua en el combustible emulsionado provoca una reducción de la eficiencia térmica, como se presenta en el Gráfico N° 4.5.

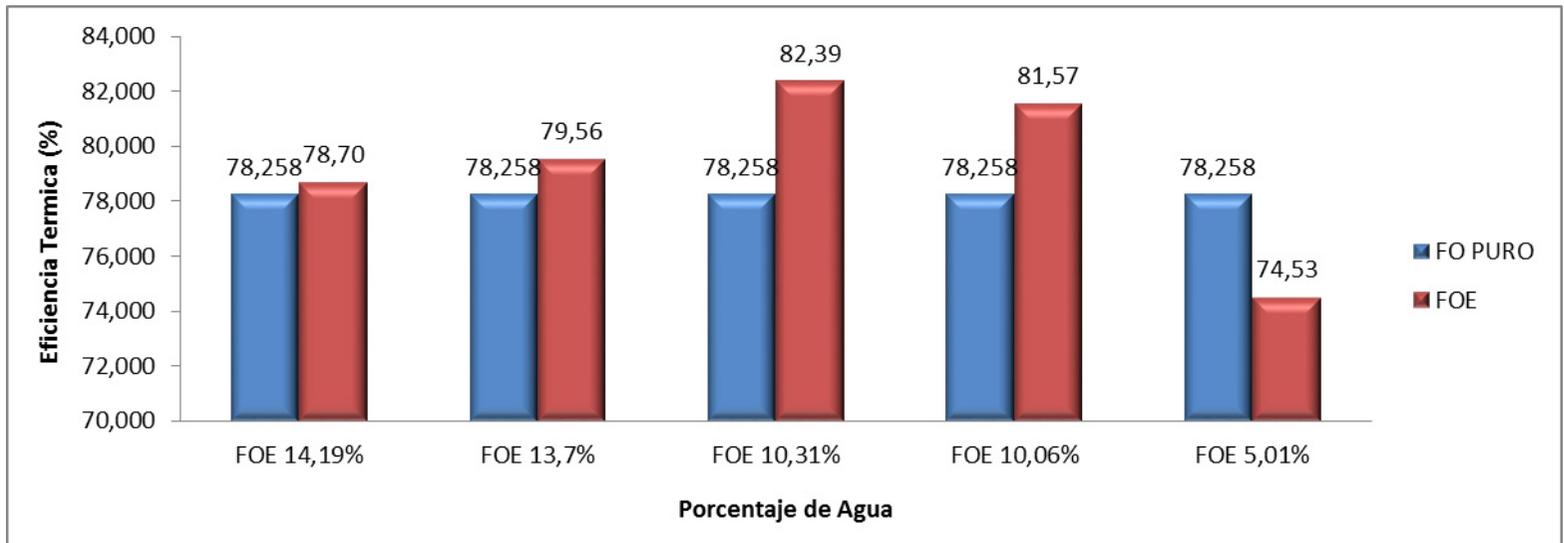
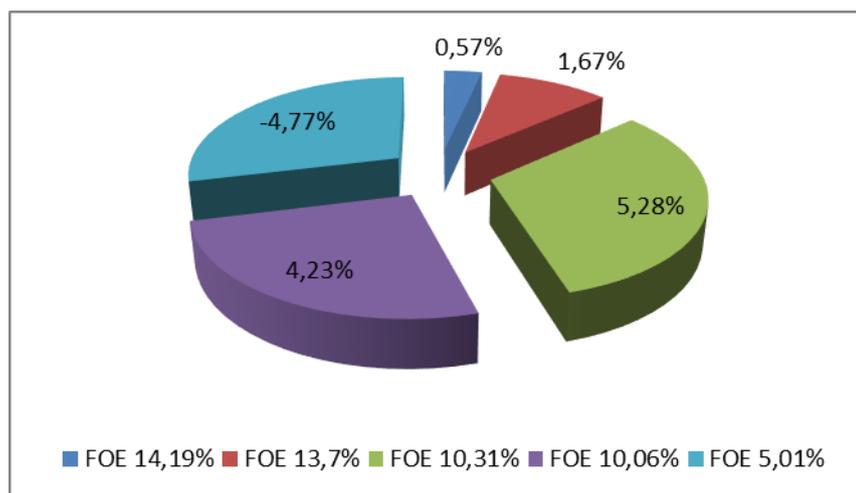


FIGURA 4.5 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA – OPERATIVA DEL FO Y FOE CON DIFERENTES PORCENTAJES DE AGUA.

En la Gráfica 4.6 se muestra el porcentaje promedio del incremento y decremento de la eficiencia térmica a diferentes porcentajes de agua en la mezcla combustible.



**FIGURA 4.6 GRAFICO PORCENTAJES DE LA EFICIENCIA
TÉRMICA USANDO FOE.**

Al emulsionar el 10.31% de agua en la mezcla con Fuel Oil N° 4, esta emulsión presenta una mayor aceptación al FOE, obteniendo un incremento promedio de la eficiencia térmica del orden del 5.28%.

4.2.3. Reducción de Emisiones Gaseosas.

Durante las pruebas con FOE, ejecutadas al 70 % de la carga máxima del caldero, se midieron los siguientes parámetros principales:

- Monóxido de Carbono
- Óxidos de Nitrógeno
- Dióxido de Azufre
- Material Particulado
- Temperatura de los gases de escape.
- Oxígeno y velocidad de los gases de escape.

Los análisis fueron realizados y certificados por un laboratorio independiente acreditado por la OAE, utilizando un “Analizador de Combustión de Gases”, IMR 1400C -B5301W15, ver Apéndice 11. La toma de muestras de gases de combustión y del material particulado se realizó al quemar Fuel Oil y Fuel Oil Emulsionado mientras el caldero operaba en llama alta. Los resultados obtenidos de las mediciones realizadas se presentan en la Tabla 12, y una comparación de las emisiones de gases y Material Particulado del FO y FOE con diferentes porcentajes de agua en el combustible, se muestran a través del Grafico 4.7.

TABLA 12

PROMEDIO DE EMISIONES DE GASES DE COMBUSTION Y MATERIAL PARTICULADO CON FUEL OIL N°4 Y FUEL OIL EMULSIONADO A DIFERENTES PORCENTAJES DE AGUA.

CALDERO HURST N° 3			Valor Encontrado *						
Parámetros	Unidad	Incertidumbre	FO PURO	FOE 14,19%	FOE 13,7%	FOE 10,31%	FOE 10,06%	FOE 5,01%	Normativa Máximo Permitido **
Monóxido de Carbono - CO	mg/Nm ³	± 0.9	47,23	9,16	6,87	2,29	3,43	6,87	<u>Parámetro No Regulado</u>
Óxidos de Nitrógenos - NO _x	mg/Nm ³	± 21.4	331,14	293,35	292,02	272,39	284,66	288,34	<u>700</u>
Dióxido de Azufre - SO ₂	mg/Nm ³	± 65.7	1.396,74	723,00	717,00	619,00	683,00	646,00	<u>1650</u>
Material Particulado	mg/Nm ³	± 1.3	61,47	48,4	46,1	41,28	53,9	63,7	<u>355</u>

(*) Unidades en mg/Nm³: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales, de mil trece milibares de presión (1013 mbar) y temperatura de 0 °C, en base seca y corregida a 7% de oxígeno.

(**) Máximos permitidos por la Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión existentes, Anexo 3, Pagina 8, Tabla 1.

Estos promedios se ven reflejados en el Grafico 4.7.

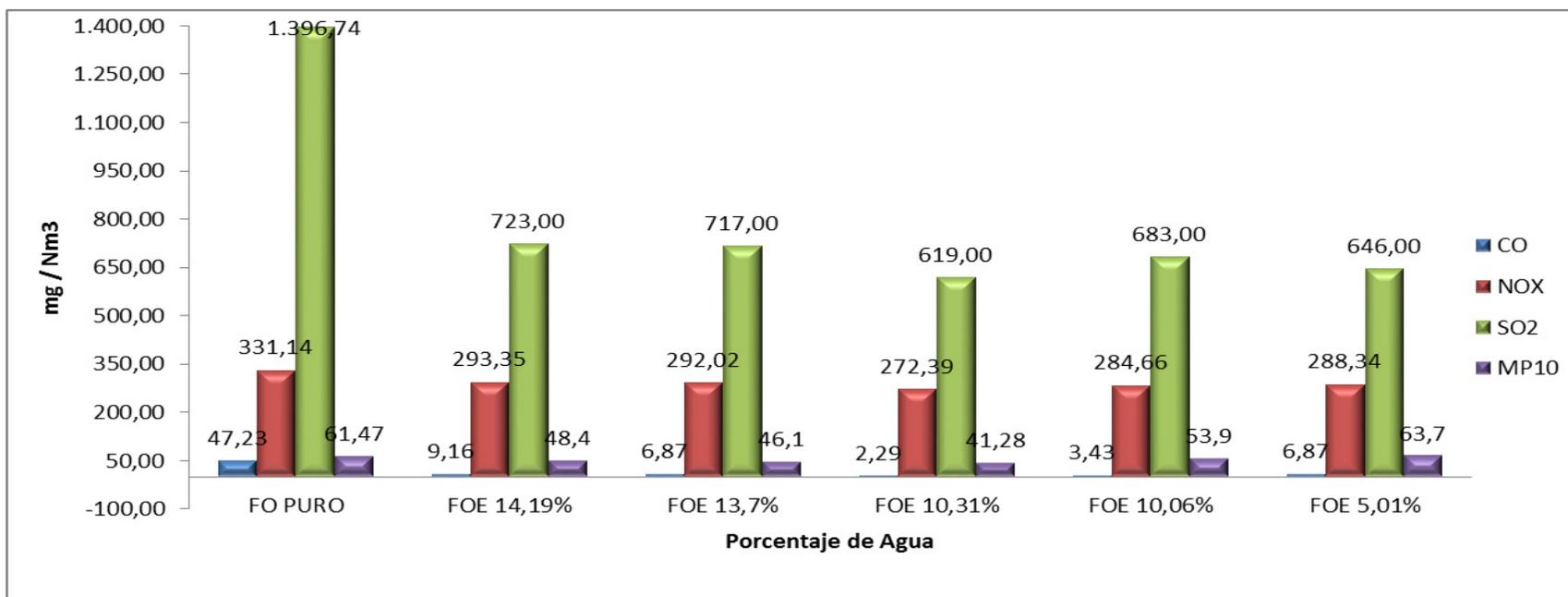


FIGURA 4.7 GRAFICO DE COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES Y MATERIAL PARTICULADO DEL FO Y FOE CON DIFERENTES PORCENTAJES DE AGUA.

Inicialmente se obtuvieron los parámetros de emisiones de gases de combustión y material particulado al combustionar FO, los cuales deben responder a la operación regular del caldero de prueba. Posteriormente, el personal técnico del laboratorio acreditado, procedió a realizar durante los días de pruebas, el análisis de las emisiones de gases y material particulado mientras el caldero consumía FOE a diferentes porcentajes de agua.

Se observó una reducción considerable de CO, NO_x, SO_x y MP₁₀ para todos los porcentajes de agua en mg/Nm³.

El CO, con FOE con 10.31% de agua obtiene la mayor reducción a 2.29 mg/Nm³ comparándolo al 47.23 mg/Nm³ utilizando FO.

En cambio el NO_x, con FOE con 10.31% de agua obtiene la mayor reducción a 272.39 mg/Nm³ comparándolo al 331.14 mg/Nm³ utilizando FO.

Por otro lado, el SO_x con FOE con 10.31% de agua obtiene la mayor reducción a 619.00 mg/Nm³ comparándolo al 1,396.74 mg/Nm³ utilizando FO.

Y finalmente el MP₁₀, con FOE con 10.31% de agua obtiene la mayor reducción a 41.28 mg/Nm³ comparándolo al 61.47 mg/Nm³ utilizando FO.

De los resultados se aprecia que al utilizar el 10.31% de agua para la emulsión del FO, se obtiene las mayores reducciones de las emisiones de los gases.

A continuación en la Tabla 13, se presenta la comparación de las reducciones de los diferentes parámetros de las emisiones de los gases en porcentajes

TABLA 13

PORCENTAJES DE REDUCCION PROMEDIO DE EMISIONES DE GASES DE COMBUSTION Y MATERIAL PARTICULADO CON FUEL OIL N°4 Y FUEL OIL EMULSIONADO A DIFERENTES PORCENTAJES DE AGUA.

Parámetros	Unidad	FOE 14,19%	FOE 13,7%	FOE 10,31%	FOE 10,06%	FOE 5,01%
Monóxido de Carbono - CO	mg/Nm ³	80,61%	85,45%	95,15%	92,74%	85,45%
Óxidos de Nitrógenos - NO _x	mg/Nm ³	11,41%	11,81%	<u>17,74%</u>	14,04%	12,93%
Dióxido de Azufre - SO ₂	mg/Nm ³	48,24%	48,67%	55,68%	51,10%	53,75%
Material Particulado	mg/Nm ³	21,26%	25,00%	<u>32,85%</u>	12,31%	-3,63%

<u>Objetivo de Reducción</u>	NO _x	4 - 16%
	MP10	20 - 40%

Con los resultados obtenidos, se procede a los análisis de cada uno de estos, basados en la Referencia [7 y 8].

- **Monóxido de Carbono - CO:** La disminución de la formación de CO depende de la realización o no de la combustión completa, en el caso del combustible no emulsionado no se alcanza nunca; sin embargo, para combustibles emulsionados sí se logra. Adicional a ello se debe tomar en cuenta que el nivel histórico del CO al quemar una emulsión en condiciones normales es menor a 10 mg/Nm^3 , demostrando una vez más que se cumple en todos los casos de las pruebas con FOE realizados.
- **Óxidos de Nitrógenos - NO_x:** La disminución de este compuesto se debe a la disminución de la temperatura de la llama y esto es a causa de la absorción de calor de las gotículas de agua que se encuentran emulsionadas dentro del combustible.

Se evidencio que en los cuatro primeros días de pruebas de la emulsión se muestra una clara reducción de los Óxidos de Nitrógenos, tomando como mayor disminución el 17.74% que corresponde a la prueba de 10.31% de agua en la emulsión.
- **Dióxido de Azufre - SO₂:**

El azufre es una de las impurezas más peligrosas del combustible por su alto poder corrosivo y contaminante ambiental.

El contenido de azufre debe estar por debajo del 2,5%. Al realizar la combustión del combustible emulsificado, el azufre se transforma en SO_2 , y en condiciones normales de trabajo es expulsado por la chimenea, junto con el resto de los gases de combustión. Sin embargo, hay una característica de los gases de salida que tiene gran importancia, la temperatura de condensación o punto de rocío, la cual en los gases de salida de combustible emulsionado debe estar en el rango de 140 a 150 °C.

Para calderas de paredes de tubos de agua y en calderas de tubos de fuego, ver Tabla 4.8, la temperatura de los gases debe ser de aproximadamente 200 °C. A temperaturas menores a 200 °C se produce la condensación de los gases y con ello el azufre, al mismo tiempo que el SO_2 , se mezcla con el agua y se produce el ácido sulfúrico, que tiene gran poder de corrosión.

En el caso del combustible emulsionado hay un decrecimiento de la formación de SO_3 , debido que al

facilitarse la combustión puede reducirse el exceso de aire.

El ajuste de la caldera que consume combustible emulsionado permite que con la disminución de oxígeno del aire para la combustión, todo el contenido de azufre se transforme en SO_2 , por lo que el valor de SO_3 es mínimo.

- **Material Particulado – MP_{10} :** Una de las causas más importantes de la contaminación de origen industrial se debe a la presencia de partículas de muy pequeño tamaño, difíciles de eliminar por los sistemas convencionales, tales como filtros, ciclones, captadores por vía húmeda, etcétera. En efecto, estas partículas son las más difíciles de eliminar desde múltiples puntos de vista, ya que, al permanecer suspendidas por períodos más largos y poseer un mayor poder de penetración en bronquios y alvéolos, constituye un riesgo más directo para la salud. Además, estas micropartículas presentan, en general, un alto grado de toxicidad debido tanto a su formación como a su facilidad para actuar como vehículo de agentes nocivos.

Estas concentraciones de partículas se vieron disminuidas con el uso del FOE en los tres primeros días de la pruebas, obteniendo la mayor reducción al utilizar 10.31% de agua en la emulsión dando como resultado halagador de alrededor de 32.85% de reducción de concentración de MP_{10} , en comparación con el FO convencional.

La concentración de MP_{10} se reduce a valores del orden de 12.31% cuando el porcentaje de agua disminuye en la emulsión, que aunque cumple con la disminución, no logra cumplir con los objetivos planteados.

4.2.4. Temperatura de Gases de Escape.

La temperatura de los gases de escape disminuye, como se observa en el Grafico 4.8, debido a que las superficies de contacto de la caldera se mantienen limpias, existiendo mayor transferencia de calor entre los gases calientes y el agua que pasa por el interior de los tubos del hogar del caldero.

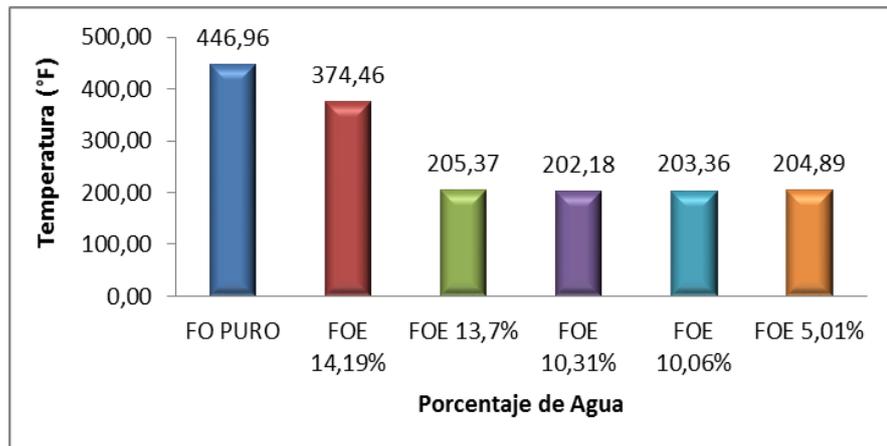


FIGURA 4.8 GRÁFICO COMPARACIÓN DE LAS TEMPERATURA DE GASES DE ESCAPE CON FO Y FOE.

En la siguiente Tabla 14, la temperatura de los gases, a la salida de la chimenea, se reduce en el orden del 54.77% durante las pruebas registradas con FOE emulsionado con 10.31% de agua, respecto a la temperatura obtenido en los gases durante la combustión de FO.

TABLA 14
TEMPERATURA DE GASES DE ESCAPE EN PRUEBAS DE FO Y
FOE CON DIFERENTES PORCENTAJES DE AGUA.

		Temperatura de los Gases de Escape (°F)					
		FO PURO	FOE 14,194.9	FOE 13,7%	FOE 10,31%	FOE 10,06%	FOE 5,01%
Promedio	446,96	374,46	205,37	202,18	203,36	204,89	
Reducción		16,22%	54,05%	54,77%	54,50%	54,16%	

4.2.5. Otras Evidencias – Presión de Inyección y Tipo de Llama.

La emulsión permite trabajar con el FOE a menores temperaturas de precalentamiento, aunque la viscosidad no sea baja, ya que la atomización secundaria logra efectos satisfactorios, independientemente de que la atomización primaria no haya sido óptima.

En la práctica se demostró que con el Fuel Oil Emulsionado se pudo disminuir la temperatura de preparación del combustible en el orden de 40°C a 50°C, sin afectar la combustión. No obstante el Fuel Oil debe ser calentado a la temperatura adecuada. Con temperaturas bajas no habrá una buena atomización, y a altas temperaturas se formará escoria. De acuerdo al tipo de combustible, se fijan las temperaturas para la combustión; de ahí la importancia de conocer

el tipo de combustible que utilice. Actualmente es muy común el tipo de combustible que se está usando, por lo que generalmente las temperaturas para quemadores de atomización mecánica oscilan entre 100 y 110°C, mientras que para los quemadores rotatorios, es de 60 a 70°C. Referencia [9]

Adicional a lo mencionado, se debe tener en consideración que la presión de inyección del vapor, al realizar la atomización, sea la adecuada para que no se produzca la ruptura parcial o total de la emulsión, afectando directamente a los resultados de las pruebas.

En la Tabla 15, se puede observar que se mantienen similares presiones y temperaturas de operación con respecto al uso del FOE en comparación del FO.

TABLA 15
PRESION DE INYECCION Y TEMPERATURA DEL
COMBUSTIBLE

Presión de la Boquilla (psi)						
	FO PURO	FOE 14,19%	FOE 13,7%	FOE 10,31%	FOE 10,06%	FOE 5,01%
Promedio	81,06	95,13	95,70	95,43	97,04	96,04
Temperatura del Combustible (°C)						
	FO PURO	FOE 14,19%	FOE 13,7%	FOE 10,31%	FOE 10,06%	FOE 5,01%
Promedio	106,96	94,31	93,31	93,58	97,22	96,67

Se debe de tener en consideración que la disminución del oxígeno para la combustión, provoca la disminución de la temperatura de la llama, obteniéndose un color de la llama opaco e intermitente. Estos indicadores dan a conocer de inmediato que la combustión está siendo atípica y que no se está alcanzando los niveles de eficiencia óptimos de combustión completa y estable.

Las pruebas de emisiones fueron realizadas en llama alta del quemador, y como dato adicional se logró obtener que en ocasiones la temperatura de la llama baja con combustible emulsionado fuera entre 150 – 230 °C, disminuyendo que exista condensaciones, muy perjudiciales cuando el combustible tiene trazas de azufre, puesto que éste, quemado, forma óxidos de azufre y sumado a vapor de agua condensado de la combustión puede formar ácido sulfúrico, corrosivo, perjudicial para la buena conservación de los dispositivos, lo que se evita con temperaturas que impidan la condensación.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO

Teniendo en cuenta que la lucha contra la contaminación atmosférica ha asumido en la actualidad gran importancia y urgencia, se ha sostenido que el desarrollo en el futuro dependerá en gran medida de la solución técnico-económica de este problema. De aquí la necesidad que se plantea de utilizar todos los medios posibles que contribuyan a resolverlo.

5.1. Costos de Implementación del Sistema.

La implementación de un equipo con tecnología de emulsión, trae consigo beneficios ecológicos con la eliminación de hollín y beneficios económicos con el ahorro de combustible.

El dato de entrada y de consumo es de 300 gal/h; debido a esto la unidad de emulsificación tiene una disponibilidad de fuel oil emulsionado de 1,400 l/h.

Para la implementación del equipo de emulsión para la caldera de prueba, fue necesario contar con un sistema denominado anillo de circulación de combustible presurizado con recalentamiento, cuyas características técnicas fueron dadas por el proveedor.

Para la puesta en marcha de los equipos, sus componentes han sido pre ensamblados, dando como ventaja que la instalación sea muy rápida y sencilla. Los técnicos realizaron la calibración del equipo emulsionador.

El costo total de la implementación del sistema de emulsificación fue de USD \$ 242.481,12, (Doscientos cuarenta y dos mil cuatrocientos ochenta y un con 12/100 dólares americanos), tal como se detalla en la Tabla 16.

TABLA 16
DESGLOSE DEL COSTO TOTAL DE LA IMPLMETACIÓN
DEL SISTEMA DE EMULSIFICACIÓN.

Costo de Implementación del Sistema	
Descripción	Moneda USD
Equipo de Emulsión	212.749,12
Cargos Aduanales y transporte hasta la planta.	6.540,00
Gastos de los técnicos (boleto de avión, hospedaje, comida y traslado) para los acoples y puesta en marcha los equipos y accesorios.	15.085,00
Gastos de arquitectura y de obras civiles.	3.630,00
Instalación de Cometida Eléctrica, líneas eléctricas desde el tablero principal de control, línea de tierra, etc.	1.680,00
Instalación hidráulica hasta los límites de abastecimientos de los equipos.	1.852,00
Instalación de líneas de agua ablandada desde la zona de tratamiento de aguas hasta la unidad de emulsificación.	945,00
Total	\$ 242.481,12

5.2. Ahorro del Combustible Fuel Oil Convencional.

Unos de los objetivos planteados en este trabajo fue que al comparar el consumo del Fuel Oil N° 4 (FO) versus el consumo de Fuel Oil Emulsionado (FOE), bajo condiciones similares de operación, se debió obtener un ahorro de consumo de combustible entre el 4 - 10 %. Para conocer si este objetivo se cumplió o no, se

debe partir del consumo mensual en galones tanto con FO y FOE; como se presenta en la Tabla 17.

TABLA 17
CONSUMO MENSUAL DE FO Y FOE EN GALONES.

CONSUMO MENSUAL			
Mes / Año	FO (gal)	Agua (gal)	FOE (gal)
Noviembre / 2012	129.952,80	14.407,20	144.360,00
Diciembre / 2012	128.390,40	13.788,00	142.178,40
Enero / 2013	129.340,80	13.852,80	143.193,60
Febrero / 2013	130.082,40	14.040,00	144.122,40
Marzo / 2013	129.182,40	14.647,29	143.829,69
Total	646.948,80	70.735,29	717.684,09

El costo mensual de operación en USD, para determinar el ahorro bruto y neto, se puede observar en la Tabla 18.

TABLA 18
COSTO MENSUAL BRUTO Y NETO EN USD.

Mes / Año	Costo Mensual de Operación (gal)		Ahorro Mensual (gal)	% Ahorro Mensual
	Sin FOE	Con FOE		
Noviembre / 2012	99.654,45	95.334,47	4.319,98	4,33%
Diciembre / 2012	99.854,83	94.183,42	5.671,41	5,68%
Enero / 2013	99.918,11	94.880,20	5.037,91	5,04%
Febrero / 2013	99.902,29	95.425,39	4.476,90	4,48%
Marzo / 2013	99.728,27	94.772,85	4.955,43	4,97%
		Ahorro Bruto	24.461,63 (gal)	4,90%
		Ahorro Neto	17.687,39 (gal)	

Se aprecia, en la Tabla 19, que el promedio de ahorro mensual en los meses de la etapa de la implantación del FOE es aproximadamente del 5%, cumpliendo con el objetivo planteado.

TABLA 19
DETALLE DEL AHORRO MENSUAL Y ANUAL.

		gal/Mes	\$/gal	\$/Mes
Situación Actual	Fuel Oil	99.811,59	0,7324	73.102,01
Demostración FOE	Fuel Oil	94.919,26	0,7324	69.518,87
	Emulsionado			
	Agua Ablandada	154,20	0,0109	1,68
Total				\$ 69.520,55
Datos Adicionales				
Galón de Fuel Oil		0,7324	\$/gal	
Agua ablanda		0,0109	\$/gal	
Energía Eléctrica		0,0624	\$/kwh	

Ahorro Mensual	\$ 2.862,61
Ahorro Anual	\$ 34.351,33

Siendo así, se tiene un ahorro neto por mes de \$ 2.862,61; un ahorro neto por año de \$ 34.351,33; este valor incluyen el gasto por consumo de energía eléctrica de la unidad de emulsificación.

Si se considera dos operadores adicionales en dos turnos que se ocuparán exclusivamente de la unidad emulsificadora con una remuneración unificado básico de \$318.00 mensual, se obtiene un

ahorro neto por mes de \$ 2.226,61 y un ahorro neto por año de \$ 26.719,33; como se presenta en la Tabla 20.

TABLA 20
AHORRO MENSUAL Y ANUAL INCLUYENDO DOS
OPERADORES.

2	Operadores	\$ 318,00	\$636,00
	Ahorro Mensual		\$ 2.226,61
	Ahorro Anual		\$ 26.719,33

5.3. Ahorro por Mantenimiento.

Para el cálculo del ahorro por mantenimiento, en este caso con una frecuencia semestral ya establecida y basada en la Referencia [10], se tomó en cuenta tanto el ahorro por mano de obra y el ahorro por los materiales / repuestos que se debió haber reemplazado en el mantenimiento.

En la Tabla 21 se muestra el detalle de los costos mencionados y en cómo fueron distribuidos.

TABLA 21
COSTOS DE MANO DE OBRA Y MATERIALES PARA EL
MANTENIMIENTO.

Descripción	Ahorro Neto
Ahorro en la mano de obra por mantenimiento semestral.	\$ 2.402,40
Materiales a reemplazar por mantenimiento semestral.	\$ 1.851,60
Total	\$ 4.254,00
\$ 4.254,00	El costo total se lo carga a los ahorros generados debido al menor consumo de Fuel Oil.
\$ 354,50	El costo total de mantenimiento se lo amortizo a 1 año para cargarlos a los ahorros mensuales.

Tomando como referencia la Tabla 18, el ahorro bruto de combustible emulsionado fue de 24.461,63 gal; con este valor más el ahorro del mantenimiento no realizado, da el ahorro total incluyendo los gastos de mantenimiento, tal como se aprecia en la Tabla 22.

TABLA 22
AHORRO INCLUYENDO LOS GASTOS DE
MANTENIMIENTO.

Ahorro bruto debido a la demostración del combustible emulsionado	\$ 24.461,63
Ahorros debido al mantenimiento no realizado, incluye mano de obra y materiales no utilizados.	\$ 4.254,00

Total	\$ 28.715,63
--------------	---------------------

Finalmente se presenta en la Tabla 23 los ahorros totales debido al combustible Fuel Oil y por mantenimiento.

TABLA 23

AHORROS TOTALES MENSUALES Y ANUALES

AHORROS MENSUALES DURANTE LA ETAPA COMERCIAL		
	<i>Sin Operadores</i>	<i>Con Operadores</i>
Ahorro debido al combustible Fuel Oil	\$ 3.581,46	\$ 2.226,61
Ahorro debido al mantenimiento amortizado.	\$ 354,50	\$ 354,50
Total	\$ 3.935,96	\$ 2.581,11
AHORROS ANUALES DURANTE LA ETAPA COMERCIAL		
	<i>Sin Operadores</i>	<i>Con Operadores</i>
Ahorro debido al combustible Fuel Oil	\$ 42.977,51	\$ 26.719,33
Ahorro debido al mantenimiento no realizado.	\$ 4.254,00	\$ 4.254,00
Total	\$ 47.231,51	\$ 30.973,33

5.4. Cálculo del Retorno Económico.

En la Tabla 24, se presenta el cálculo del retorno económico del proyecto, donde se puede notar que dependiendo del número de calderos que se decida sumar al proyecto de emulsificación, el equipo se pagara en menor tiempo.

TABLA 24
CÁLCULO DEL RETORNO ECONÓMICO.

	# Calderos	Ahorro Anual	Años
Costo del Equipo Emulsificador	1	\$ 47.231,51	4,50
\$ 212.749,12	2	\$ 94.463,01	2,25
<i>Depreciado para 5 años.</i>	3	\$ 141.694,52	1,50

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se obtuvo como resultado que el porcentaje óptimo de agua para la emulsión del Fuel Oil fuera de 10.31%, y con este porcentaje de agua se alcanzaran los objetivos iniciales planteados, manteniendo similares parámetros de operación cuando se consuma solo Fuel Oil Convencional.
- El caldero de prueba N° 3, luego de haberse realizado las pruebas de FOE, ha operado regularmente durante el periodo de 60 días de evaluación. La calidad y presión del vapor no sufrió ninguna alteración debido al uso de FOE con 10.31% de agua en emulsión.
- No se empleó agentes tensioactivos (aditivos) porque la producción de combustible emulsionado fue realizada en paralelo a la producción de Fuel Oil Convencional, debido que; al utilizar aditivos, éstos limitan la continua producción de combustible

emulsionado, por el tiempo que estos permiten que la emulsión permanezca estable y pueda ser utilizada dentro del proceso de generación de vapor.

- El análisis de la eficiencia térmica operativa del caldero indicó que el FOE a 10.31% de agua, produce un incremento promedio en la eficiencia térmica del 5,28%, con una carga de operación del 70% de su capacidad máxima.
- El consumo de FOE al 10.31% de agua, produjo un incremento promedio de 5.03% ($55.65 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{gal}_{\text{fuel oil}}$) en el índice de producción del caldero N° 3 en comparación con el FO convencional, bajo las mismas condiciones de temperatura y presión de operación.
- El incremento promedio en la eficiencia térmica operativa del caldero es directamente proporcional a los ahorros reales en combustible, por lo que durante los 60 días analizados del FOE al 10.31% de agua, se produjo un ahorro promedio de combustible de 4.90%, es decir de $90.17 \text{ gal}_{\text{Fuel Oil}}/\text{h}$. Con este porcentaje obtenido de combustible se obtiene un ahorro neto mensual de \$2,226.61 equivalente a 17.687.39 galones de Fuel Oil y un ahorro neto anual de \$26,719.33 equivalente a 212.248.68 galones de Fuel Oil, sin incluir los ahorros por mantenimiento no realizados durante el periodo de prueba del FOE.

- La empresa no realizó el mantenimiento trimestral planificado para el caldero de prueba N° 3 en el mes correspondiente para cumplir su frecuencia de mantenimiento, debido a que el equipo no presentó señales de taponamiento en los tubos. Por lo que, el ahorro neto mensual se incrementa a \$2,581.11 y el ahorro neto anual a \$30,973.33.
- Finalmente, los resultados de las pruebas del FOE, con respecto a la reducción de los gases de emisiones fueron de: el monóxido de carbono (CO), con un objetivo planteado de disminución mayor al 75%, se obtuvo como resultado un 95.15% de reducción, el dióxido de azufre (SO₂), con un objetivo planteado de disminución mayor al 35%, se obtuvo como resultado un 55.68% de reducción, óxidos nitrógenos (NO_x), con un objetivo planteado entre 4% y 16%, se obtuvo como resultado un 17.74% y material particulado (MP), con un objetivo planteado entre 20% y 40%, se obtuvo como resultado un 32.85%, alcanzando así, los objetivos de este proyecto de graduación en su totalidad.

Recomendaciones

- Se recomienda a las industrias ecuatorianas la implementación de la tecnología de combustible emulsionado (FOE) para facilitar soluciones energéticas integrales y costos - efectivas, que permitan

minimizar la contaminación del medio ambiente, aumentar su eficiencia, y disminuir el uso de combustibles fósiles.

- Calificar a los operadores y capacitarlos para que puedan familiarizarse con el empleo de esta tecnología para un mayor control de la combustión de los calderos.

- Se recomienda la continuación de ejecuciones de pruebas de emisiones para cuantificar de forma más precisa y controlar la reducción promedio de las emisiones de NO_x, SO_x, CO y Material Particulado mientras se consuma Fuel Oil Emulsionado.

APÉNDICE 1

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEM 1 983:2002

PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. FUEL OIL REQUISITOS

INEN

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA

NTE INEM 1 983:2002

Primera revisión

**PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. FUEL OIL.
REQUISITOS.**

Primera Edición

PETROLEUM DERIVATES. FUEL OIL. SPECIFICATIONS .

First Edition

DESCRIPTORES: Productos del petróleo, fuel oil, requisitos.

PE 02.02-430

CDU: 662.753

CIU: 3530

ICS: 75.160.20

Norma Técnica Ecuatoriana Obligatoria	PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETROLEO FUEL OIL. REQUISITOS	NTE INEN 1 983:2002 Primera revisión 2002-05
<p style="text-align: center;">1. OBJETO</p> <p>1.1 Esta norma establece los requisitos que debe cumplir el Fuel Oil que se produce y comercializa en el país.</p> <p style="text-align: center;">2. DEFINICIONES</p> <p>2.1 Fuel Oil. Es el combustible resultante de la mezcla de diversas fracciones pesadas de petróleo utilizada para la generación de calor o energía.</p> <p style="text-align: center;">3. CLASIFICACION</p> <p>3.1 De acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas el Fuel Oil se clasifica en liviano y pesado:</p> <p>3.1.1 Fuel Oil Liviano. Es el combustible que satisface las especificaciones que se indican en la tabla 1 de esta norma (ver nota 1).</p> <p>3.1.2 Fuel Oil Pesado. Es el combustible que satisface las especificaciones que se indican en la tabla 2 de esta norma (ver nota 2).</p> <p style="text-align: center;">4. DISPOSICIONES GENERALES</p> <p>4.1 El Fuel Oil liviano y el Fuel Oil pesado, deben ser aceites homogéneos, libres de ácidos inorgánicos y de cantidades excesivas de materiales extraños sólidos o fibrosos.</p> <p>4.2 Los componentes residuales presentes en cada uno de los Fuel Oil, deben permanecer uniformes durante el almacenamiento normal.</p> <p style="text-align: center;">5. DISPOSICIONES ESPECIFICAS</p> <p>5.1 Los resultados de los análisis de poder calórico, contenidos de vanadio, sodio, asfaltenos y la estabilidad, para los dos tipos de fuel oil, debe el productor poner a disposición del comprador, cuando este lo requiera.</p> <p style="text-align: center;">6. REQUISITOS</p> <p>6.1 Requisitos específicos</p> <p>6.1.1 El Fuel Oil Liviano debe cumplir con los requisitos que se establecen en la tabla 1.</p> <p>NOTA 1. El Fuel Oil Liviano, es el análogo a los comercializados como Fuel Oil Nos. 4A y 4B</p> <p>NOTA 2. El fuel Oil Pesado, es el análogo al comercializado como Fuel Oil No. 6</p> <p style="text-align: right;"><i>(Continúa)</i></p> <hr/> <p>DESCRIPTORES. Productos del petróleo, fuel oil, requisitos.</p>		

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN - Casilla 17-01-3999 - Baquerizo 454 y Ave. 6 de Diciembre - Quito-Ecuador - Prohibida la reproducción

TABLA 1. Requisitos del Fuel Oil Liviano

REQUISITOS	UNIDAD	TIPO				METODO DE ENSAYO
		4A		4B		
		Min	Máx	Min	Máx	
Densidad API	°API	Reportar		Reportar		NTE INEN 2 319
Densidad a 15,6 °C	kg/m ³	Reportar		Reportar		ASTM 1 298
Punto de inflamación	°C	60	-	60	-	NTE INEN 1 493
Punto de escurrimiento	°C	-	12	-	10	NTE INEN 1 982
Contenido de agua y sedimento	%V	-	0,5	-	1	NTE INEN 1 494
Viscosidad cinemática a 50°C	cSt	400	510	420	510	NTE INEN 810
Contenido de cenizas	% P	-	0,1	-	0,2	NTE INEN 1 492
Viscosidad Redwood No 1 a 37,78°C	RW1	3820	5030	4040	5030	NTE INEN 1 981
Viscosidad SSF a 50°C	SSF	188,8	241	198,2	241	NTE INEN 1 981
Contenido de azufre	%P	-	1,5	-	2,3	NTE INEN 1 049

6.1.2 El Fuel Oil Pesado debe cumplir con los requisitos que se establecen en la tabla 2.

TABLA 2. Requisitos del Fuel Oil Pesado

REQUISITOS	UNIDAD	TIPO		METODO DE ENSAYO
		No 6		
		Min	Máx	
Densidad API	°API	Reportar		NTE INEN 2 319
Densidad a 15,6°C	kg/m ³	Reportar		ASTM D 1 298
Punto de inflamación	°C	60	-	NTE INEN 1 493
Punto de escurrimiento	°C	-	15	NTE INEN 1 982
Contenido de cenizas	%P	-	0,2	NTE INEN 1 492
Viscosidad cinemática a 50°C	cSt	510	600	NTE INEN 810
Viscosidad Redwood No 1 a 37,78°C	RW1	5030	6020	NTE INEN 1 981
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C	SSF	241	283	NTE INEN 1 981
Contenido de azufre	% P	-	2,5	NTE INEN 1 049

6.2 Requisitos complementarios

6.2.1 El transporte, almacenamiento y manejo del fuel oil debe efectuarse en conformidad con lo establecido en la NTE INEN 2 266.

(Continúa)

7. INSPECCION

7.1 MUESTREO

7.1.1 El muestreo, inspección y recepción se realizarán de acuerdo a la Norma INEN 930.

7.2 Aceptación o rechazo

7.2.1 Si las muestras ensayadas no cumplieran con uno o más de los requisitos establecidos en los numerales 6.1.1 ó 6.1.2 de esta norma, se extraerá una nueva muestra y se repetirán los ensayos en cuestión.

7.2.2 Si alguno de los ensayos repetidos no cumplieran con los requisitos establecidos, se rechazará el lote correspondiente.

8. ENVASADO

8.1 El Fuel Oil se debe envasar y transportar en recipientes de material adecuado e inerte a la acción del producto y que permitan conservar su calidad y su manejo hasta el destino final.

9. ROTULADO

9.1 Cada autotank o buquetank deberá llevar impresos y en forma visible las siguientes indicaciones:

9.1.1 Líquido inflamable

9.1.2 No apagar con agua

9.1.3 El dibujo de una llama (fuego)

9.1.4 El tamaño de las letras de las indicaciones anteriores, no deberá ser inferior al tamaño de los números de la placa del vehículo o no menores a 15 cm, en el caso del buquetank.

9.2 Cada autotank o buquetank deberá llevar una guía de control, en la cual el fabricante o el distribuidor especificarán los datos siguientes:

9.2.1 Nombre del fabricante o distribuidor

9.2.2 Nombre del comprador

9.2.3 Tipo de combustible y el análisis fisicoquímico correspondiente

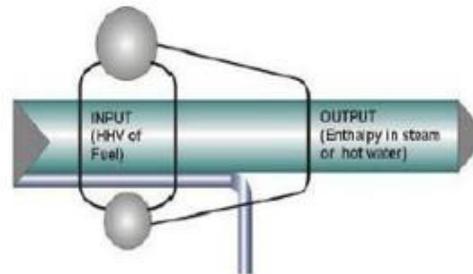
9.2.4 Identificación del lote de producción o el número de referencia

9.2.5 Contenido neto en unidades de volumen del SI

(Continúa)

APÉNDICE 4

NORMA ASME PTC 4.1 – MÉTODO DIRECTO



For a steam-generating unit, efficiency is defined as the heat absorbed by the boiler fluid, divided by the fuel fired. In equation form, this is:

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Heat absorbed by boiler fluid}}{\text{Fuel fired}} \times 100 = \%$$

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Steam flow rate} [\text{heat of steam} - \text{heat of feedwater}]}{(\text{Weight of fuel})(\text{HHV of fuel})} \times 100$$

The direct method for determining boiler efficiency involves the measurement of quantities from which the energy input and output from the boiler can be calculated. The measurements required to do this by the direct method (assuming no blowdown) are:

For feedwater entering boiler,

- i) flow rate = $\dot{m}_{fw} = \dot{m}_g$
- ii) temperature = T_{fw}
- iii) pressure = P_{fw}

For steam leaving boiler,

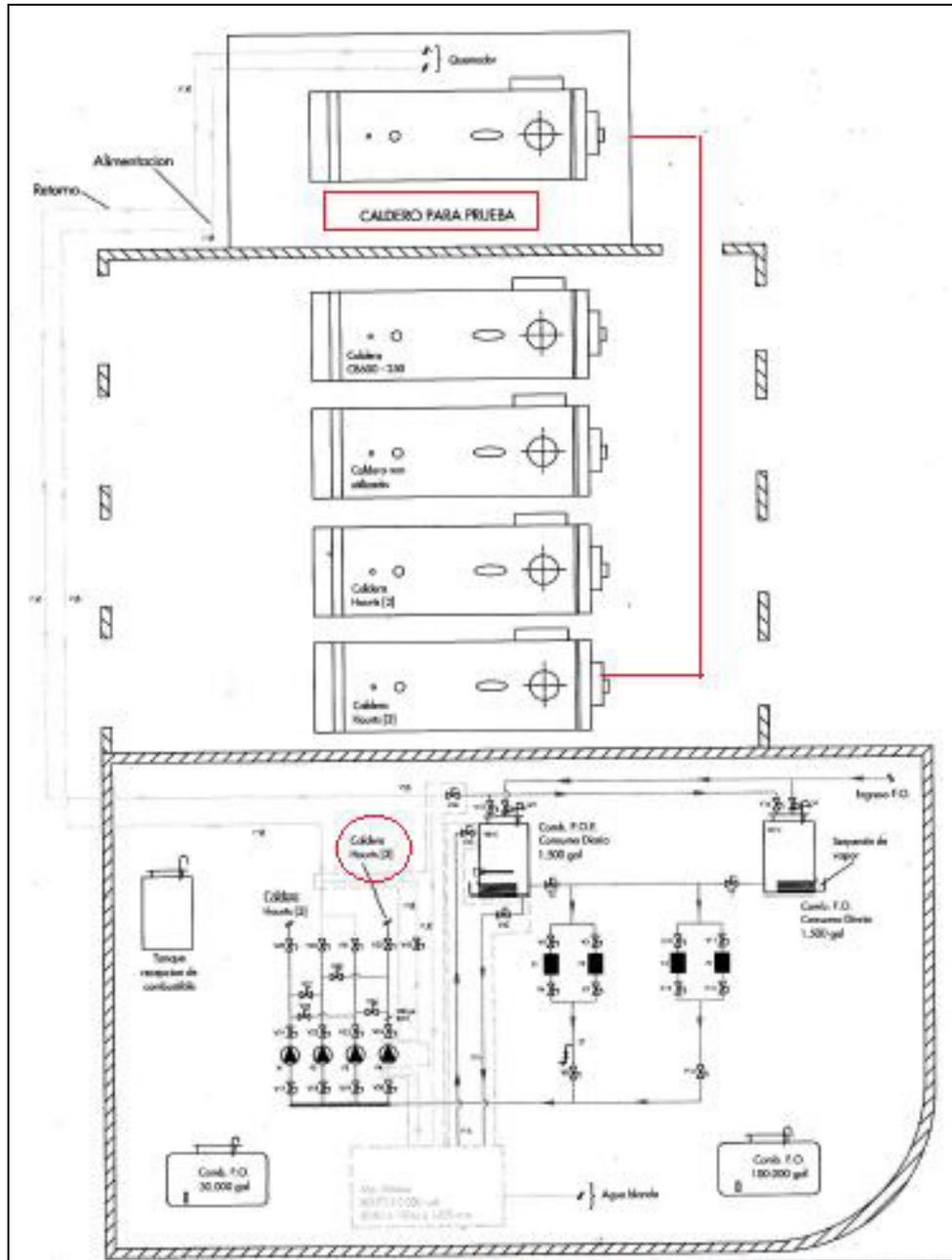
- i) temperature = T_s
- ii) pressure = P_s , or quality = X_s

For fuel entering boiler,

- i) flow rate = \dot{m}_f
- ii) temperature = T_f
- iii) pressure = P_f
- iv) higher heating value of fuel = HHV

APÉNDICE 5

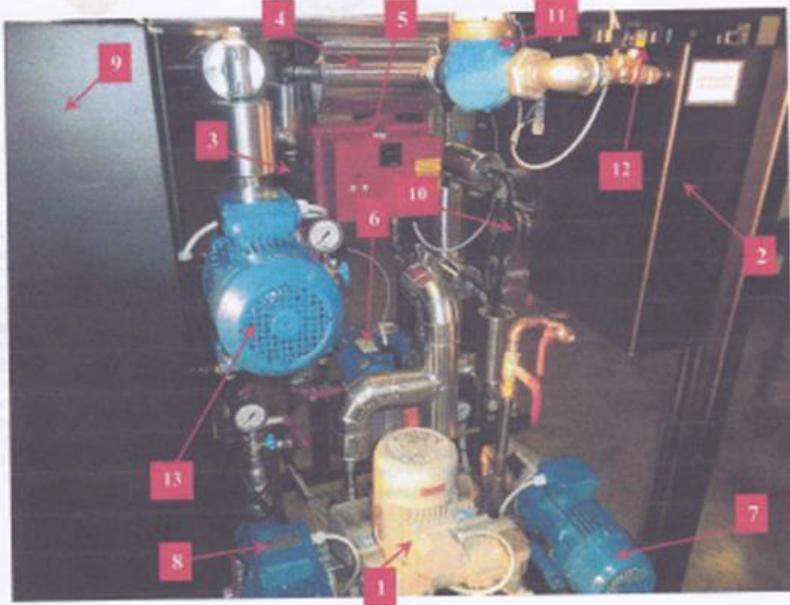
CALDERO DE PRUEBA N°3



APÉNDICE 6

COMPONENTES DE LA UNIDAD EMULSIFICADORA

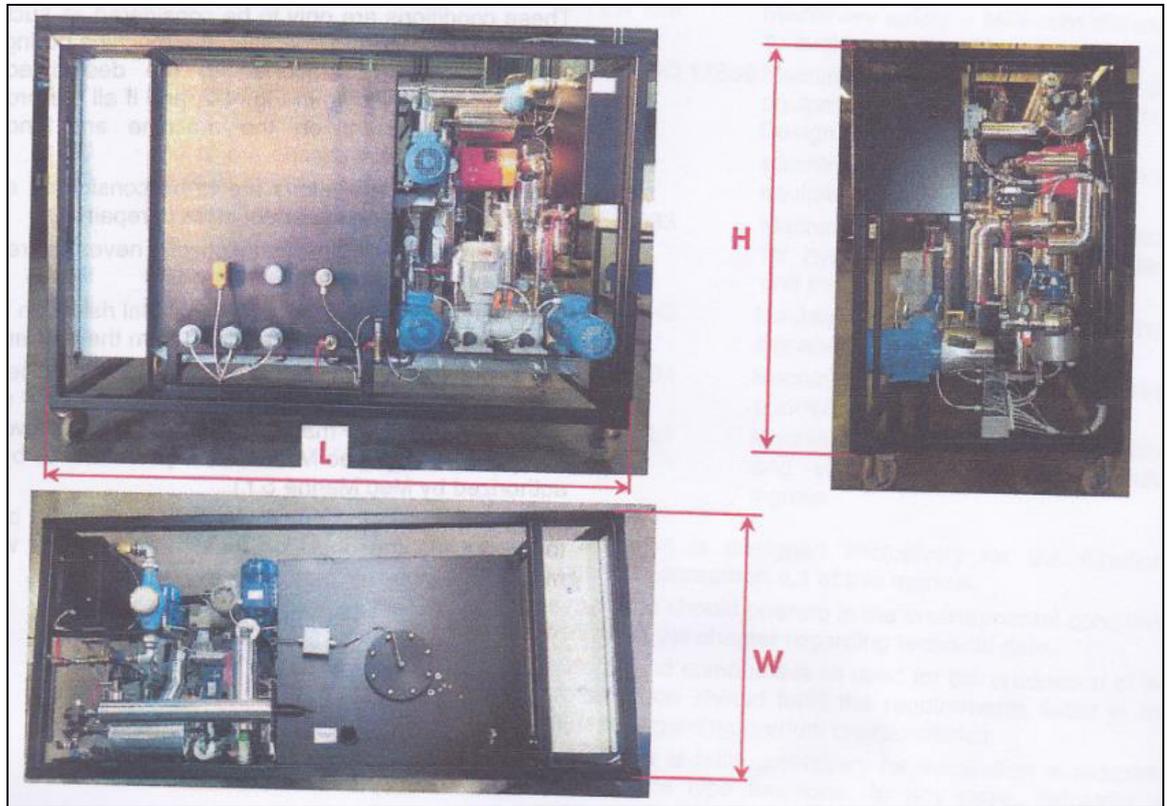
1. Water pump	8. Emulsion circuit pump
2. Water tank	9. Micro-emulsion tank
3. Pressure regulator 1-4 bar for pre-feeding fuel oil	10. Fuel oil flowmeter
4. Impedance	11. Water flowmeter
5. Turbo transducer	12. Water charge solenoid valve
6. Motorized Filter	13. Low pressure tank ring fuel oil pump
7. Micro-emulsion fuel oil pump	



1- Micro emulsion pump
2- Max overpressure regulation: this screw is preregulated by MEC MARINE S.r.l. in order to have safe pressure in the circuit about 35-40 bar
3- Manometer

APÉNDICE 7

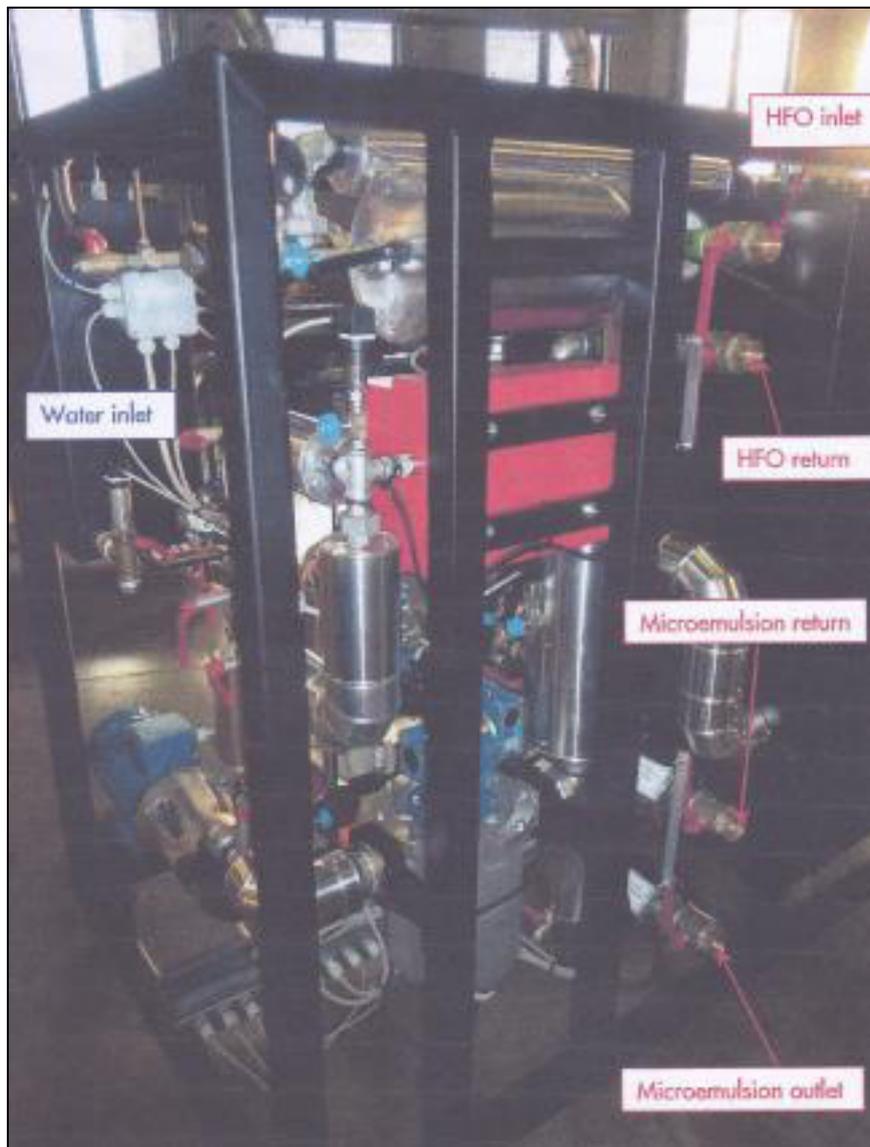
DIMENSIONES DE LA UNIDAD EMULSIFICADORA



Description	Abbreviation	Measurement
Length	L	2.250 mm
Width	W	1.000 mm
Height	H	1.450 mm

APÉNDICE 8

ENTRADAS Y SALIDAS DE LAS TUBERÍAS DE AGUA Y DE FUEL OIL DE LA UNIDAD MICRO-EMULSIFICADORA.



APÉNDICE 9

TABLA PERIODICA DE MANTENIMIENTO DE LA UNIDAD MICRO EMULSIFICADORA

FREQUENCY	Daily (8 hrs.)	Weekly (40 hrs.)	Fortnightly (80 hrs.)	Monthly (170 hrs.)	3-Monthly (510 hrs.)	6-Monthly (1020 hrs.)	Annual (2040 hrs.)	More
PARTS								
Turbo Transducer						2-Annual Internal cleaning with Diesel Oil		
Electric Motors							Clean all parts	Every 10000 functioning hours lubricate the bearing
Electrical junction boxes					Check clamping of terminals in the electric panel and shunt boxes.	Check clamping of cable connections in the electric panel and shunt boxes, to allow water sprinkle seal.		
Sensors and probes					Check position and condition of all sensors fixture.			
Keys and set screws						Machinery couplings must be checked for play every six.		
Safety Devices						Check that all safety devices function correctly		Overall check by a skilled operator.

2.130,00	13.292,00	15.422,00	4.074,07	13,81	876,00	6.171,40	14,19
2.240,00	14.014,20	16.254,20	4.293,92	13,78			
2.358,00	14.751,40	17.109,40	4.519,84	13,78			
2.469,00	15.457,60	17.926,60	4.735,72	13,77			
2.581,00	16.154,90	18.735,90	4.949,52	13,78			
2.695,00	16.894,30	19.589,30	5.174,96	13,76			
2.808,00	17.590,80	20.398,80	5.388,81	13,77			
2.921,00	18.305,90	21.226,90	5.607,57	13,76			
3.036,00	19.047,50	22.083,50	5.833,86	13,75			
3.149,00	19.760,00	22.909,00	6.051,94	13,75			
3.261,00	20.467,10	23.728,10	6.268,32	13,74			
3.380,00	21.204,00	24.584,00	6.494,43	13,75			
3.494,00	21.934,90	25.428,90	6.717,63	13,74			
3.611,00	22.657,60	26.268,60	6.939,45	13,75			
3.726,00	23.379,50	27.105,50	7.160,54	13,75			
3.843,00	24.090,80	27.933,80	7.379,35	13,76			
3.962,00	24.803,30	28.765,30	7.599,01	13,77			
4.076,00	25.496,90	29.572,90	7.812,36	13,78			
4.192,00	26.194,90	30.386,90	8.027,39	13,80			
4.303,00	26.886,60	31.189,60	8.239,45	13,80			
4.421,00	27.609,70	32.030,70	8.461,64	13,80			
4.538,00	28.334,30	32.872,30	8.683,97	13,80			
4.641,00	29.058,20	33.699,20	8.902,41	13,77			
4.741,00	29.751,90	34.492,90	9.112,09	13,74	Agua (l)	Total Mezcla (l)	% Agua
4.853,00	30.473,80	35.326,80	9.332,38	13,74	2.613,00	19.072,60	13,70
4.960,00	31.192,10	36.152,10	9.550,40	13,72			
5.070,00	31.894,90	36.964,90	9.765,12	13,72			
5.176,00	32.542,80	37.718,80	9.964,28	13,72			
5.267,00	33.311,10	38.578,10	10.191,29	13,65			
5.361,00	34.006,20	39.367,20	10.399,75	13,62			
5.453,00	34.695,40	40.148,40	10.606,12	13,58			
5.541,00	35.387,90	40.928,90	10.812,31	13,54			
5.632,00	36.088,70	41.720,70	11.021,48	13,50			
5.723,00	36.785,80	42.508,80	11.229,67	13,46			
5.816,00	37.478,00	43.294,00	11.437,10	13,43			
5.908,00	38.190,70	44.098,70	11.649,68	13,40			
5.995,00	38.922,90	44.917,90	11.866,09	13,35	Agua (l)	Total Mezcla (l)	% Agua
6.060,00	39.568,40	45.628,40	12.053,79	13,28	1.100,00	9.476,30	11,61
50,00	442,60	492,60	130,13	10,15			
120,00	1.067,40	1.187,40	313,68	10,11			
191,00	1.688,90	1.879,90	496,62	10,16			
264,00	2.327,20	2.591,20	684,52	10,19			

339,00	2.952,70	3.291,70	869,58	10,30			
416,00	3.626,20	4.042,20	1.067,84	10,29			
499,00	4.318,80	4.817,80	1.272,73	10,36			
579,00	5.028,60	5.607,60	1.481,38	10,33			
659,00	5.704,01	6.363,01	1.680,93	10,36			
740,00	6.397,50	7.137,50	1.885,53	10,37			
814,00	7.088,50	7.902,50	2.087,63	10,30	Agua (l)	Total Mezcla (l)	% Agua
889,00	7.778,90	8.667,90	2.289,82	10,26	764,00	7.409,90	10,31
965,00	8.470,50	9.435,50	2.492,60	10,23			
1.042,00	9.149,50	10.191,50	2.692,32	10,22			
1.117,00	9.856,50	10.973,50	2.898,90	10,18			
1.195,00	10.552,70	11.747,70	3.103,42	10,17			
1.273,00	11.242,50	12.515,50	3.306,26	10,17			
1.353,00	11.934,80	13.287,80	3.510,28	10,18			
1.431,00	12.608,90	14.039,90	3.708,96	10,19			
1.509,00	13.302,80	14.811,80	3.912,88	10,19			
1.587,00	13.992,80	15.579,80	4.115,76	10,19			
1.666,00	14.671,10	16.337,10	4.315,82	10,20			
1.743,00	15.357,60	17.100,60	4.517,51	10,19			
1.817,00	16.053,10	17.870,10	4.720,80	10,17			
1.895,00	16.761,20	18.656,20	4.928,46	10,16			
1.969,00	17.419,20	19.388,20	5.121,84	10,16			
2.044,00	18.112,10	20.156,10	5.324,69	10,14			
2.118,00	18.795,10	20.913,10	5.524,67	10,13			
2.191,00	19.464,20	21.655,20	5.720,72	10,12			
2.269,00	20.149,00	22.418,00	5.922,23	10,12			
2.344,00	20.814,50	23.158,50	6.117,85	10,12			
2.426,00	21.512,80	23.938,80	6.323,98	10,13			
2.503,00	22.175,50	24.678,50	6.519,39	10,14			
2.577,00	22.870,30	25.447,30	6.722,49	10,13	Agua (l)	Total Mezcla (l)	% Agua
2.653,00	23.552,70	26.205,70	6.922,84	10,12	1.764,00	17.537,80	10,06
2.728,00	24.231,90	26.959,90	7.122,07	10,12			
2.802,00	24.913,20	27.715,20	7.321,60	10,11			
2.877,00	25.613,50	28.490,50	7.526,42	10,10			
2.952,00	26.306,90	29.258,90	7.729,41	10,09			
3.025,00	26.996,90	30.021,90	7.930,97	10,08			
3.100,00	27.705,50	30.805,50	8.137,98	10,06			
3.177,00	28.415,10	31.592,10	8.345,78	10,06			
3.252,00	29.113,90	32.365,90	8.550,19	10,05			
3.331,00	29.813,70	33.144,70	8.755,93	10,05			
3.413,00	30.513,60	33.926,60	8.962,49	10,06			
3.490,00	31.197,30	34.687,30	9.163,44	10,06			

3.566,00	31.889,07	35.455,07	9.366,27	10,06			
3.646,00	32.265,00	35.911,00	9.486,71	10,15			
3.722,00	33.265,00	36.987,00	9.770,96	10,06	Agua (l)	Total Mezcla (l)	% Agua
3.801,00	33.964,00	37.765,00	9.976,49	10,06	1.073,00	10.805,10	9,93
37,00	467,00	504,00	133,14	7,34			
32,00	530,90	562,90	148,70	5,68			
67,00	1.212,80	1.279,80	338,09	5,24			
100,00	1.887,60	1.987,60	525,07	5,03	Agua (l)	Total Mezcla (l)	% Agua
135,00	2.550,90	2.685,90	709,54	5,03	35,00	698,30	5,01
168,00	3.219,10	3.387,10	894,78	4,96			
203,00	3.883,50	4.086,50	1.079,54	4,97			
236,00	4.569,70	4.805,70	1.269,54	4,91	Agua (l)	Total Mezcla (l)	% Agua
269,00	5.224,90	5.493,90	1.451,34	4,90	232,00	4.989,90	4,65
302,00	5.897,30	6.199,30	1.637,69	4,87			
335,00	6.577,80	6.912,80	1.826,17	4,85			
368,00	7.255,80	7.623,80	2.014,00	4,83			
401,00	7.917,70	8.318,70	2.197,57	4,82			
464,00	9.254,90	9.718,90	2.567,47	4,77			
497,00	9.920,10	10.417,10	2.751,92	4,77			
533,00	10.607,90	11.140,90	2.943,12	4,78			
566,00	11.282,10	11.848,10	3.129,95	4,78			
602,00	11.943,20	12.545,20	3.314,10	4,80			
638,00	12.629,70	13.267,70	3.504,97	4,81			
671,00	13.334,20	14.005,20	3.699,79	4,79			
707,00	14.024,70	14.731,70	3.891,72	4,80			
741,00	14.707,50	15.448,50	4.081,07	4,80			
776,00	15.407,20	16.183,20	4.275,16	4,80			
803,00	16.121,70	16.924,70	4.471,05	4,74			
850,00	16.843,20	17.693,20	4.674,06	4,80	Agua (l)	Total Mezcla (l)	% Agua
884,00	17.529,20	18.413,20	4.864,27	4,80	582,00	12.213,90	4,77

APÉNDICE 11

ANALIZADOR DE COMBUSTIÓN DE GASES”, IMR 1400C -B5301W15

IMR®
Environmental Equipment, Inc.

**ANALIZADOR DE GASES DE COMBUSTIÓN
IMR 1400 - compact**

IMR 1400 - compact
● se ha diseñado para:

- las aplicaciones de la caldera
- Aplicaciones de la hornilla
- Las aplicaciones del motor

● se han desarrollado para satisfacer la necesidad de clientes y para satisfacer aplicaciones especiales

● es una combustión de la alta calidad al usar el analizador del gas la última tecnología de sensor

● es fácil de utilizar y medirá todos los parámetros importantes a ajustar o optimice el proceso de la combustión

IMR 1400 - compact



CARACTERÍSTICAS DE ESTÁNDAR

- Analizador portátil y muy compacto del gas de combustión contenido en un caso de aluminio ligero
- Medida simultánea: temperatura gases (TG), monóxido de carbono (CO), oxígeno (O₂), NO (1400/1430)
- Cálculo de los parámetros siguientes:
Densidad de carbono (CO₂), exceso de aire, pérdidas, eficacia de la combustión
- Se preprograma 7 combustibles - 5 combustibles son programables
- Calibración cero automática
- Programa integrado de la auto-comprobación
- Visualización simultánea de ocho parámetros en la visualización iluminada
- Selección de unidad: PPM - mg - mg/m³(O₂) - mg/kWh
- Pista de prueba E del manómetro del gas - la longitud 0.6, riga 8
- Batería recargable
- Fuente de alimentación 110V o 230V

Fuente: IMR 1400 - compact



BIBLIOGRAFÍA

1. Guzmán Chinae Jesús M., Fuel Emulsion of Low Viscosity Mixture Method. Vol.3, Bordeaux, Francia. 1997.
2. Hiroki Ishida, A Mechanical Emulsification Technology Of Petroleum Fuels Without Surface Active Agent, 1988.
3. Guzmán Chinae, Comisión Provisional de Ahorro de Energía, La eficiencia de Combustión, Ciudad de la Habana, 1989.
4. LAW, LEE, SCRINIVASAN, Combustion characteristics of water in oil emulsion droplets, 1980.
5. ABMA, Determining and testing boiler efficiency for commercial and industrial packaged boilers, 2008.
6. INCROPERA, DE WITT, Fundamentos de transferencia de calor, Editorial Prentice Hall, Cuarta edición.
7. COOPER, DAVID AND F. ALLEY, Air Pollution Control: A Design Approach, Waveland Press, Prospect Heights, Second Edition, 1994.
8. WARK, WARNER AND DAVIS, Air Pollution, It's Origin and Control, Editorial Addison – Wesley, Third Edition, 1998.
9. WONG, LAW, Micro Explosions Of Fuel Droplets Under High Pressure, 1985.
10. WONG, LAW, Microexplosions of fuel droplets under high pressure, 1985.

11. FULTON BOILERS, Installation, operation and maintenance manual for FBS series, 2010.
12. MEC, Micro-Emulsifier Unit, Application: Bolier BP-EFU-1000, 2011 [Fuente 1].
13. Guzmán China Jesús M., Emulsión, ISBM Edición Completa Vol. 3, Bordeaux, Francia, 1997. [Fuente 2]