

Diseño de una planta de emulsificación de Fuel Oil con capacidad de 18000 TM/año e interface de un caldero con la planta para aplicar el Método de Pérdidas de Calor ASME PTC 4.1y determinar la eficiencia del caldero

Ricardo Astudillo ⁽¹⁾, Alfredo Barriga ⁽²⁾
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
raastudi@espol.edu.ec ⁽¹⁾
Ph.D. Profesor FIMCP-ESPOL, abarriga@espol.edu.ec ⁽²⁾

Resumen

Actualmente, las industrias buscan tecnologías que puedan disminuir la concentración de elementos contaminantes en el ambiente y generar un ahorro en el consumo de combustibles fósiles, esto prepara el escenario propicio para la presentación de las emulsiones para combustibles oleosos derivados de petróleo. Este trabajo presenta los tanques, equipos e instrumentación requerida para evaluar la eficiencia térmica-operativa de un caldero piro-tubular de 500 BHP por medio de la norma ASME PTC 4.1., y comparar el desempeño del equipo con Fuel Oil convencional (FO) y Fuel Oil emulsionado (FOE). Los resultados obtenidos después de un periodo de evaluación de 60 días demostraron que con la aplicación del FOE 10 la eficiencia incrementó un promedio de 7.93%, la producción de óxidos de Nitrógeno disminuyó en 14%, el monóxido de Carbono en 50% y se redujo el material particulado en un 18%. La operación del caldero fue analizada bajo distintos niveles de carga en la producción de vapor, con diferentes contenidos de agua en las emulsiones y las pruebas de emisiones fueron realizadas en “llama alta” del quemador.

Palabras Claves: *emulsiones de combustible oleosos derivados de petróleo, eficiencia térmica-operativa, ASME PTC 4.1, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, material particulado.*

Abstract

Actually, the industry is looking for technologies that can reduce the pollutant emissions and generate fossil fuel savings, this fact highlights the opportunity to present the emulsified fuels application. This report presents the tanks, equipments and instrumentation required in order to assess the thermal and operative efficiency of a fire tube boiler of 500 BHP of capacity by using the standard ASME PTC 4.1, and comparing the performance of the boiler by using regular Fuel Oil (FO) and Fuel Oil emulsions (FOE). After an evaluation period of 60 days, the following results were obtained: the combustion of FOE 10 produced an average increase of efficiency about 7.93%, NOX reductions of 14%, CO emissions decreased 50% and the generation of particulate matter went down by 18%. The boiler operation was analyzed under different steam loads and water contents on the emulsions, the emissions tests were performed at “hi flame” of the burner.

Keywords: *emulsified fuels, thermal and operative efficiency, ASME PTC 4.1., nitrogen oxides, carbon monoxide, particulate matter.*

1. Introducción

La tecnología de combustibles emulsionados ha sido investigada por más de 30 años y es aplicada en diferentes industrias desde 1995. Existen diferentes métodos para producir emulsiones, sin embargo, las empresas que están a la vanguardia de esta tecnología utilizan procedimientos mecánicos asistidos por un aditivo surfactante. Estos equipos poseen requerimientos técnicos para recibir la materia prima que se usa en el proceso de emulsificación.

La aplicación de combustibles emulsionados tiene dos objetivos principales, el ahorro en el consumo de combustibles fósiles y la reducción de emisiones contaminantes. Al calcular la eficiencia de un caldero, se cuantifican los dos objetivos mencionados.

La presente tesis tiene por objetivo el diseño de la planta de emulsificación y la interface con el sistema actual de combustible de un caldero; así como la selección de los equipos requeridos para aplicar la norma ASME PTC 4.1 y determinar la eficiencia de un caldero.

2. Descripción del sitio donde se instalará la planta de emulsificación.

La unidad de mezcla que produce Fuel Oil emulsionado será instalada en una industria cafetera ubicada en la ciudad de Guayaquil. Este proyecto fue aprobado por los directivos de la empresa y constará de dos fases:

2.1 Fase piloto

- Se instalará la unidad de mezcla y se la proveerá de la materia prima requerida según las especificaciones técnicas de la misma.
- Se realizará la interconexión de este equipo con el sistema de combustible actual de la sala de calderos. Esta interconexión incluirá el sistema de válvulas y tuberías para que la unidad de mezcla pueda alimentar el caldero seleccionado para esta fase.
- Para verificar los objetivos de la aplicación de las emulsiones, se seleccionarán los equipos e instrumentación requeridos por la Norma ASME PTC 4.1 para medir la eficiencia de un caldero y se harán pruebas de emisiones para determinar la reducción en las mismas.

2.2 Fase comercial

Basados en los resultados obtenidos en la Fase Piloto, los directivos decidirán si la tecnología de combustibles emulsionados es satisfactoria, y dependiendo de esta decisión, se procederá a realizar la alimentación de los otros cuatro calderos de la planta con Fuel Oil emulsionado.

2.3 Descripción del caldero asignado para la demostración en la fase piloto.

Tabla 1. Caldero de prueba

Codificación de la empresa	No. 5
Marca	Fulton
Modelo	FBS-500
Capacidad máxima	17,250 lb/hr
Presión de diseño	150 psig
Consumo máximo de Fuel Oil	136 GPH

3. Generalidades del Fuel Oil convencional y Fuel Oil emulsionado.

Se realizaron pruebas de control de calidad del combustible utilizado en la empresa para determinar el tipo de Fuel Oil que se estaba utilizando previo a la demostración tecnológica con FOE. La empresa utiliza un aditivo para mejorar la combustión en su caldero. Los resultados fueron comparados con la norma ecuatoriana de Fuel Oil para poder identificar al combustible.

Tabla 2. Certificado de calidad Fuel Oil 4

Análisis	Resultado	Unidades	Standard ASTM
Viscosidad Cinemática (50°C)	475.00	cSt	D445
Densidad (15°C)	966	Kg /m3	D1298
Gravedad API	14.90	Grados	D1298
Punto de inflamación	90	% v/v	D93
Agua por destilación	0.05		D95

Tabla 3. Composición química del Fuel Oil 4 (con y sin aditivo)

Muestra	Carbono %Masa	Hidrógeno %Masa	Nitrógeno %Masa	Azufre PPM
Fuel Oil con aditivo	86.75	10.36	0.28	19,767
Fuel Oil sin aditivo	86.88	10.64	0.24	18,778
Método	ASTM D5291	ASTM D5291	ASTM D5291	ASTM D4294

A través de la fórmula de Dulong se estimó el poder calorífico superior del combustible sin aditivo, se utilizó esta composición ya que la emulsión se la producirá con Fuel Oil “puro”. Debido a que la composición química no varió en forma significativa entre muestras, se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{HCV} = 33,800 * (\text{C}) + 144,000 * (\text{H}_2) + 9,270 * (\text{S})$$

KJ/Kg

C : Porcentaje en masa del elemento Carbono [%]
H₂: Porcentaje en masa del elemento Hidrógeno [%]
S : Porcentaje en masa del elemento Azufre [%]

$$\text{HCV} = 44,867 \text{ KJ/Kg}$$

3.1 Mecanismo de combustión del Fuel Oil.

La combustión de Fuel Oil es del tipo heterogéneo por lo que necesita un mayor tiempo de ignición y requiere una atomización previa a la combustión, que es un fenómeno superficial, y el tamaño de las gotas de combustible después de la atomización influye en la eficiencia de este proceso, usualmente la combustión es incompleta y se generan depósitos de hollín y emisiones de material particulado.

El Fuel Oil 4 contiene ciertas cantidades de material mineral, en particular Azufre y metales como Vanadio, Níquel, Sodio, entre otros. Al atravesar la zona de alta temperatura de la llama se combinan con el oxígeno y otros elementos presentes para generar óxidos y sales metálicas que generan incrustaciones y aumentan la resistencia térmica en el caldero.

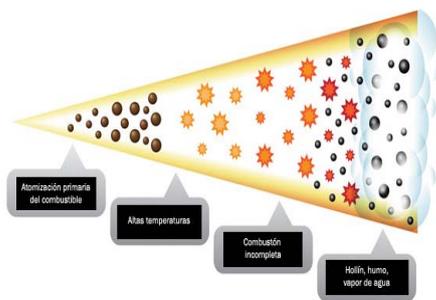


Figura 1. Combustión de Fuel Oil

Fuente: [4]

3.2 Caracterización del Fuel Oil emulsionado.

Una emulsión es una mezcla de sustancias no miscibles. En una emulsión de Fuel Oil con agua existen dos fases, la dispersa (agua) y la continua (Fuel Oil); la fase dispersa está distribuida uniformemente en la continua. Las emulsiones toman las características de la fase continua, por lo que el Fuel Oil emulsionado mantiene las características del combustible. Las emulsiones son fluidos inestables y

tienden a separarse con el tiempo, por lo que se necesita un aditivo surfactante (operación química) que rodee las partículas de agua dentro de las moléculas de Fuel Oil de tal forma que evite la unión de éstas y formen “gotas” (operación mecánica) de mayor tamaño que produzcan un volumen significativo de agua separada dentro de las emulsiones.

3.2 Mecanismo de combustión del Fuel Oil emulsionado.

La combustión de FOE permite la introducción de agua y combustible en la zona de combustión de las máquinas térmicas. Cuando el agua que está encerrada dentro de la molécula de combustible entra en la cámara de combustión y se vaporiza debido a las altas temperaturas y presiones, produce una atomización secundaria, fenómeno conocido en la comunidad científica como micro-explosiones.

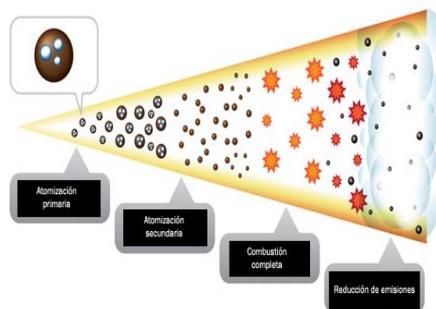


Figura 2. Combustión de Fuel Oil emulsionado

Fuente: [4]

3.2.1 Beneficios de la aplicación de Fuel Oil emulsionado.

- **Atomización secundaria:** La vaporización del agua en las moléculas de combustible provoca una explosión que reduce el tamaño de las gotas de Fuel Oil y como el fenómeno de combustión es superficial, la eficiencia aumenta.
- **Limpieza debido al vapor:** El vapor generado en las micro-explosiones evita que se formen incrustaciones de hollín y actúa como agente limpiador de la zona de combustión.
- **Reducción de emisiones contaminantes:** La atomización secundaria mejora la combustión del FOE y se reduce la producción de material particulado y NOX.

3.3 Requerimientos técnicos de la unidad de mezcla que produce Fuel Oil emulsionado.

El producto final que produce la máquina FOE ECOMIX 10 es una emulsión de agua en Fuel Oil. El contenido de agua que tendrá las emulsiones estará en un rango de 10%± 4% en base volumétrica. El Fuel Oil 4 y una mezcla de agua-aditivo pasan por un molino coloidal de altas revoluciones y luego se transporta a un tanque de producto terminado. El diseño de la máquina y el aditivo utilizado para estabilizar la emulsión es propiedad de Alternative Petroleum Technologies.



Figura 3. Unidad de mezcla ECOMIX 10

3.3.1 Requerimientos para el Fuel Oil, agua y aditivo.

Tabla 4. Requerimientos de la ECOMIX 10

Fluido	Temperatura	Presión	Viscosidad
Fuel Oil	60-75 C	15 psia	300-160 Cst
Agua	60-70 C	15 psia	N.A.
Aditivo	60-70 C	15 psia	N.A.

4. Metodología para determinar la eficiencia del caldero basado en el estándar ASME PTC 4.1.

La herramienta metodológica presentada por la UNFCCC, refiere la norma ASME PTC 4.1 como válida para la determinación de la eficiencia de un equipo de generación de energía térmica (caldero). Esta norma presenta dos métodos, el Directo e Indirecto.

Para el desarrollo de esta tesis se escogió el método directo simplificado. Se evaluará la pérdida de calor directa entre la energía que egresa del sistema como vapor y la energía que ingresa debido al combustible.

Eficiencia Global

$$= \frac{\text{Masa Vapor (Entalpia Vapor - Entalpia Agua ing.)}}{\text{Masa Fuel (Poder Calorífico Superior)}}$$

Se realizarán análisis de la eficiencia del caldero en 3 etapas:

Línea Base (10 días)

El caldero consumirá Fuel Oil convencional con el aditivo original de la empresa-cliente y se registrará la información relacionada al desempeño y eficiencia del equipo. Se efectuarán pruebas de emisiones a distintos niveles de llama (alta, media y baja) y se elaborará un informe preliminar de las condiciones previas al consumo de FOE.

FOE con distintos contenidos de agua (10 días)

El caldero operará en ciclos cortos (2 días) con FOE a distintos contenidos de agua. Se evaluará la eficiencia y las emisiones de gases contaminantes para determinar el contenido óptimo de agua para el caldero asignado a la demostración. Se elaborará un reporte técnico en el que se mostrarán los resultados obtenidos.

FOE con contenido constante de agua (60 días)

El ECOMIX 10 será programado para producir FOE con el contenido de agua óptimo. El caldero operará de forma continua y al final del periodo de evaluación se elaborará un reporte de la eficiencia del caldero y la emisión de NOX y Material Particulado.

5. Instalaciones requeridas para la planta de emulsificación.

Tabla 5. Características del tanque de Fuel Oil

Capacidad	3600 galones
Presión Interna	14.7 psia (Presión Atmosférica)
Temperatura de Almacenamiento	50-80 C
Condición de Operación	Sistema de Recirculación Continua
Características de Estructura	Pared simple
	Tanque cerrado vertical
	Material A36
	Fondo: Planchas de 6 mm de espesor Cilindro y cubierta: Planchas de 4 mm de espesor
Dimensiones	Diámetro: 2.3 metros
	Altura: 3.20 metros

Tabla 6. Características del tanque de agua

Marca:	INDELTRO
Capacidad nominal:	300 galones
Material:	Plástico reforzado
Dimensiones	
Diámetro:	0.5 metros
Largo:	1.5 metros

Tabla 7. Tuberías de Fuel Oil entre el tanque y la unidad de mezcla

NPSHR de la bomba de FO en la UM.	3.52 [m]
Diámetro Nominal seleccionado	2 plg \approx 50 [mm]
Material	A36
Cédula	40
NPSHA del sistema diseñado	6.28 [m]
Longitud total de tubería	15.49 [m]

Tabla 8. Tuberías de agua-aditivo entre el tanque y la unidad de mezcla

NPSHR de la bomba de agua en la UM.	0.70 [m]
Diámetro Nominal seleccionado	1/2plg \approx 13 [mm]
Material	A316
Cédula	40
NPSHA del sistema diseñado	5.15 [m]
Longitud total de tubería	4.00 [m]

Tabla 9. Intercambiador de calor para Fuel Oil en el tanque de almacenamiento

Tipo de Intercambiador	Serpentín sumergido con agitación
Área de transferencia de calor	3.06 [m ²]
Diámetro Nominal seleccionado	1.5 [plg] \approx 40 [mm]
Longitud total del serpentín calculada	20.29 [m]
Longitud total del serpentín real	22.00 [m]
Material	A36
Cédula	40

Tabla 10. Aislamiento para tubería de FO

Material	Lana de Vidrio
Espesor	1 [plg] \approx 25 [mm]

Tabla 11. Intercambiador para la mezcla agua-aditivo en el tanque de almacenamiento

Tipo de Intercambiador	Serpentín sumergido con agitación
Área de transferencia de calor	0.28 [m ²]
Diámetro Nominal seleccionado	0.5 [plg] \approx 13 [mm]
Longitud total del serpentín calculada	4.18 [m]
Longitud total del serpentín real	4.50 [m]
Material	A316
Cédula	40

Tabla 12. Sistema térmico para el calentamiento del aditivo

Tipo de Intercambiador	Cinturón de calentamiento eléctrico
Potencia	1000 [W]

6. Instrumentación requerida para la medición de la eficiencia del caldero.

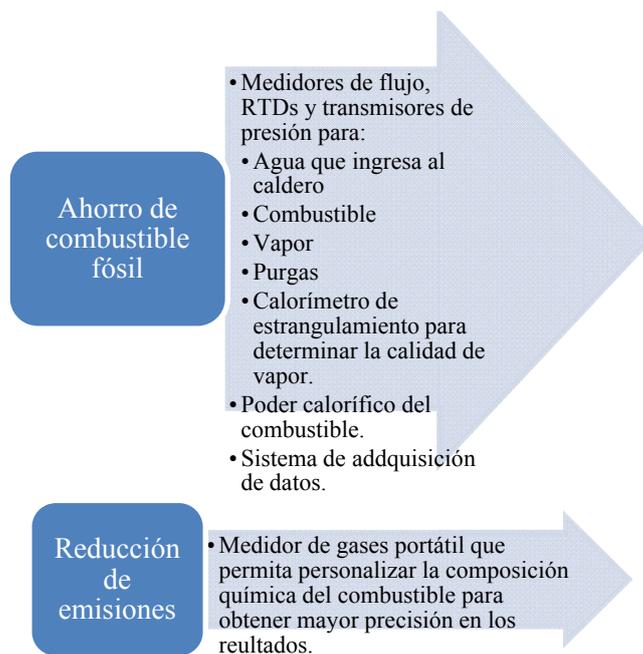


Figura 4. Esquema de instrumentación requerida

7. Análisis de costo.

El costo directo para la implementación de la demostración en el caldero asignado tiene un costo de \$ 93,507.57 y será cubierto por la empresa oferente de la tecnología Navipac. El análisis fue realizado en base a un ahorro de combustible alrededor del 7.93 %

que fue el resultado obtenido durante la demostración tecnológica y un costo por galón emulsionado de 0.04 \$. En la etapa comercial, la empresa ahorrará \$ 4,600.00 por mes, lo que representa ahorros anuales aproximados de \$ 55,207. Al inicio de la etapa comercial, la empresa-piloto deberá hacer una inversión para adaptar los 4 calderos al sistema de combustibles emulsionados:

- Alimentación directa de los calderos por parte de la unidad de mezcla (\$14,500)
- Almacenamiento de Fuel Oil emulsionado (\$27,600)

La inversión de las 2 alternativas sería recuperada en menos de un año debido a los ahorros en combustible fósil que el proyecto generaría. La decisión final la tomará la empresa-cliente.

8. Conclusiones y resultados.

La inversión de las 2 alternativas sería recuperada en menos de un año debido a los ahorros en combustible fósil que el proyecto generaría. La decisión final la tomará la empresa-cliente.

En la etapa comercial, se evaluará la posibilidad de almacenar Fuel Oil Emulsionado o alimentar los tanques diarios directamente desde la unidad de mezcla. También se reemplazará el tanque de almacenamiento de la mezcla agua-aditivo por uno de la misma capacidad en acero inoxidable

Se cumplieron las expectativas de operación de los sistemas térmicos diseñados. Debido a que el tiempo de calentamiento no es un factor determinante en el proceso, el uso de valores promedio para el coeficiente global de transferencia de calor es una buena aproximación de diseño.

El análisis de costo indica que el proyecto es viable ya que la inversión inicial se la recupera en menos de un año. Es importante recalcar que la reducción de emisiones contaminantes genera un valor agregado importante a la empresa que consume combustibles emulsionados.

Debido a la confidencialidad del proyecto no es posible publicar los resultados en esta tesis, sin embargo, se obtuvieron las siguientes conclusiones en base al reporte "Technical Report about the 30-D Trial at EL CAFÉ, JV Navipac&APT, 2010":

- El análisis preliminar con Fuel Oil emulsionado a distintos contenidos de agua indicó que 10% producía los mejores beneficios económicos y ambientales.
- Se ejecutó una demostración con FOE 10 durante 60 días y se determinó que la eficiencia térmica-operativa tuvo un incremento promedio del 7.93% basado en un análisis de frecuencia de operación. El FOE 10 genera mayores beneficios cuando el caldero asignado a la demostración opera en cargas inferiores al 60%.

- El caldero operó por debajo del 60% de su carga máxima alrededor del 88.60% del tiempo total analizado y en cargas superiores tan sólo el 11.40%. Esto indica que el caldero trabaja la mayor parte del tiempo en los rangos en los que el FOE 10 brinda su mayor potencial como un combustible alternativo.
- Se evidenció la reducción de Óxidos de Nitrógeno en 14%, Monóxido de Carbono en 50% y Material Particulado en 18%. Las pruebas de emisiones fueron realizadas con el caldero en llama alta, se siguieron procedimientos descritos en el Tulas y se aplicaron metodologías de la EPA.

9. Agradecimientos.

A Dios, por las bendiciones recibidas y permitirme disfrutar de los milagros cotidianos. A mis padres, abuelas y novia, por ser fuente inagotable de amor, sabiduría y esfuerzo. A los Doctores Alfredo Barriga, Thomas Houlihan y Richard Ellis por su colaboración en la realización de este proyecto.

10. Referencias.

- [1] FULTON BOILERS, Installation, operation and maintenance manual for FBS series, 2010.
- [2] AREPEL, Optimización de combustión en calderos y hornos – Guía Ambiental 29, 2000.
- [3] MASON, GHANDI, Formulas for calculating heating values of fuels, 1985.
- [4] HOULIHAN, GRIMES, The triple crown: Less NOX, Less PM and Fuel Efficiency, 2008.
- [5] MOLERO DE BLAS, Pollutant formation and interaction in the combustion of heavy liquid fuels, 2000.
- [6] LAW, LEE, SCRINIVASAN, Combustion characteristics of water in oil emulsion droplets, 1980.
- [7] WONG, LAW, Micro explosions of fuel droplets under high pressure, 1985.
- [8] DRYER, Water addition to practical combustion systems, 1976.
- [9] HOULIHAN, GRIMES, Optimal control of particulate emissions, 2007.
- [10] ELLIS, MUJAHID, Evaporation of water hydrocarbon emulsions, 2009.
- [11] UPME, COLCIENCIA, Eficiencia energética en la generación y distribución de vapor, 2007.
- [12] ABMA, Determining and testing boiler efficiency for commercial and industrial packaged boilers, 2008.
- [13] KERN DONALD, Procesos de transferencia de calor, Editorial Continental, Décimo quinta edición.
- [14] INCROPERA, DE WITT, Fundamentos de transferencia de calor, Editorial Prentice Hall, Cuarta edición.