

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA- FACULTAD DE INGENIERIA
QUÍMICA Y MANUFACTURERA**

**INFORME DE INGENIERIA PARA OPTAR POR EL GRADO
ACADEMICO DE INGENIERO QUÍMICO**

TEMA:

**ESTUDIO TÉCNICO – ECONOMICO PARA
PRODUCIR COMBUSTIBLE ALTERNATIVO PARA
SU USO EN TURBINAS Y MOTORES DE
COMBUSTIÓN INTERNA**

NOMBRE: CLOTILDE MILAGROS IPARRAGUIRRE OLIVERA

PROMOCION: 1995-I

LIMA, AGOSTO DE 2002

INDICE

INTRODUCCION	
II ACTIVIDAD EMPRESARIAL	4
1. EL ORGANO EMPRESARIAL	4
2. RELACION PROFESIONAL EMPLEADOR	6
3. TRABAJO PROFESIONAL DESARROLLADO	6
III FUNCIONES DESEMPEÑADAS QUE NECESITARON CONOCIMIENTO DE TÉCNICAS PROFESIONALES	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2. OBJETIVO DEL PROYECTO	17
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	18
4. ALCANCE DEL PROYECTO	18
5. ESPECIFICACIÓN DEL COMBUSTIBLE OBJETIVO	20
6. MUESTRAS PURAS	35
7. MEZCLAS TEORICAS	44
8. ENSAYOS PARA ELIMINACIÓN DE METALES ALCALINO TERREOS	50
9. EFECTO DE LOS METALES	60
10. NUMERO DE CETANO Y ADITIVOS	65
11. VISCOSIDAD Y ACONDICIONAMIENTO	65
12. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	67
13. MODO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	79
IV CONCLUSIONES	82
V RECOMENDACIONES	88
VI SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES	90
VII BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXO I	93
ANEXO II	95

I INTRODUCCION

Gran parte de mi desempeño profesional como ingeniero de procesos, se desarrolla en la empresa consultora INSPECTRA S.A., en la División de Ingeniería.

Las funciones principales del puesto consisten en: el diseño básico y detallado, la simulación de procesos asistida por computadora, el diseño de equipos, la evaluación de eficiencia de procesos, la formulación y evaluación de proyectos de inversión, entre otros.

La empresa brinda servicios a industrias, tanto en el mercado nacional como en otros países de la región, principalmente del sector minero e hidrocarburos.

El sistema de trabajo es por proyectos, es decir, se desarrolla un tema específico (evaluación técnica-económica de un nuevo proyecto, diseño de un equipo, etc.) por solicitud del cliente.

Dentro de los proyectos realizados se ha elegido como sustento para optar al Título de Ingeniero Químico por la modalidad de Experiencia Profesional, al “Estudio Técnico – Económico para Producir Combustible Alternativo para su uso en Turbinas y Motores de Combustión Interna”, ejecutado entre enero y junio de 1999.

El proyecto tuvo como principal objetivo lograr la reducción de costos operativos mediante la sustitución parcial o total de Diesel 2 por Petróleo Crudo o Petróleo Industrial N° 6 (Residual N° 6) como combustible de turbinas y motores de combustión interna empleados como elemento motor de bombas y para la generación de energía eléctrica en estaciones de bombeo del Oleoducto Nor Peruano.

El desarrollo del proyecto se orientó a la formulación de un combustible mediante el tratamiento y aditivación de Petróleo Crudo, Petróleo Industrial N° 6 ó la mezcla de estos con Diesel y/o Kerosene, para obtener los límites de calidad solicitados por los fabricantes

Se analizaron las propiedades del Petróleo Crudo y Petróleo Industrial, las que no cumplieron con las especificaciones de calidad requeridas para el combustible. En vista de ello, se realizaron mezclas teóricas que intentaron predecir las propiedades de las mezclas de Petróleo Crudo o Petróleo Industrial N° 6 con Diesel ó Kerosene, sobre la base de la aditividad másica y otros índices que correlacionan los resultados de laboratorio de las propiedades de los combustibles sin mezcla.

Las muestras teóricas que cumplían los requisitos de calidad de los fabricantes de equipos fueron seleccionadas y formuladas en la práctica, enviándose a analizar en laboratorios especializados en análisis de hidrocarburos.

Las mezclas preseleccionadas fueron las siguientes:

- Mezcla de 90% de Petróleo Crudo + 10 % Diesel 2
- Mezcla de 80% de Petróleo Crudo + 20 % Diesel 2

Los resultados del análisis indicaron niveles de contaminantes metálicos superiores a los recomendados, por lo que las mezclas fueron sometidas a un proceso de lavado, mezclado, aditivado y centrifugado, a condiciones de velocidad de 2100 RPM y volumen de agua de lavado de 4% para la eliminación de metales alcalino térreos y aditivación con inhibidores de vanadio para disminuir el efecto corrosivo de éste.

El resultado fue conforme a lo esperado: se logró disminuir los niveles de sodio y potasio a menos de 1.0 ppm requeridos por la más exigente especificación para las

Turbinas de Gas. Por otro lado, la adición de detergentes evitaría la formación de depósitos de residuo de carbón sobre los equipos.

Al finalizar el estudio, el fabricante de los motores de combustión interna indicó que el uso del combustible formulado en base a Petróleo Crudo solo era aplicable al modelo CAT 3500 correspondiente a un único equipo. Para el caso de las turbinas, a pesar que el uso de un combustible más pesado reduciría la vida remanente de los equipos las recomendaciones de los suministradores de aditivos se inclinaban al empleo del combustible seleccionado.

Utilizando el combustible sólo para las turbinas y en un motor de combustión interna el potencial de ahorro del proyecto era del orden de los 2.3 MMUS\$ por año, un TIR de 316 % y un VAN al 15% de 7.25 MUS\$

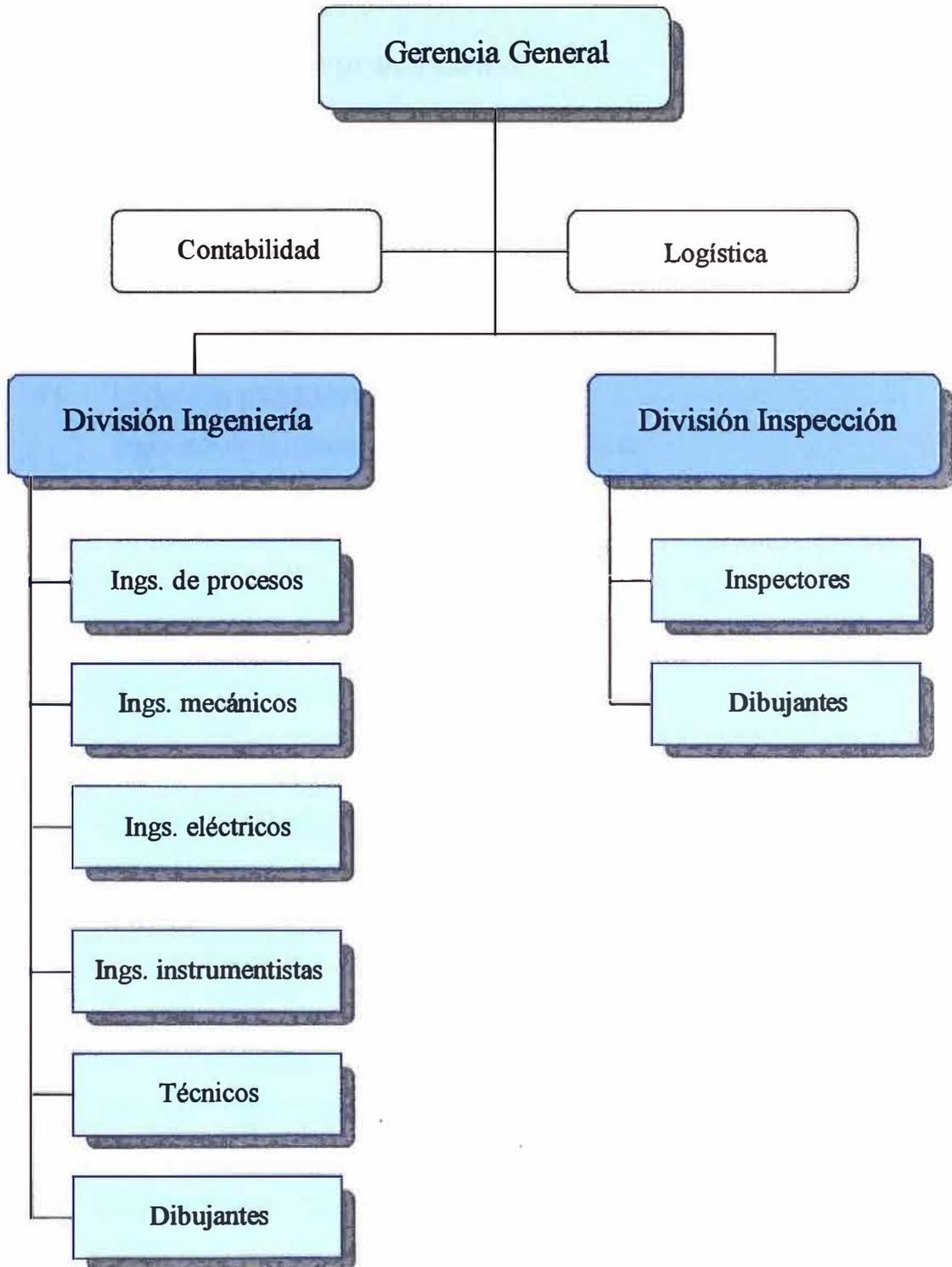
El límite para el Residuo de Carbón Conradson fue reducido durante el desarrollo del proyecto de 7.0 % a 0.2%. Dado que el Diesel sin mezcla contenía 0.05%, la obtención de una mezcla de Diesel y Petróleo Crudo con 0.2% de residuo de carbón correspondía a un porcentaje de Crudo de 3.5% que no justifican el desarrollo del proyecto. Por lo tanto, esta restricción debía ser comprobada mediante corridas de pruebas empleando el nuevo combustible en las turbinas de gas.

Para ello se recomendó la realización de una corrida de prueba la cual fue condicionada a la autorización de los fabricantes quienes no se pronunciaron, quedando el proyecto en espera.

II ACTIVIDAD EMPRESARIAL

1. EL ORGANO EMPRESARIAL

- Nombre y razón social de la empresa: INSPECTRA S.A.
- Dirección: Av Nicolás Arriola 290
Oficina 307 Lima 13
- Sector al cual pertenece: Servicios. Empresa consultora dedicada a servicios de ingeniería e inspección.
- Estructura Orgánica: La empresa cuenta con dos divisiones principales: Ingeniería e Inspección, e involucra la participación de ingenieros químicos, eléctricos, mecánicos, instrumentistas, inspectores, dibujantes y personal de logística y administrativo. El organigrama se presenta en la página siguiente
- Líneas de producción: Hay dos áreas principales:
 - ✓ División Ingeniería
 - ✓ División Inspección

ORGANIGRAMA DE INSPECTRA S.A.

2. RELACION PROFESIONAL EMPLEADOR

2.1 CONDICION

Contratado bajo el sistema del D.L. 19990 y D.S. 15TR

2.2 DOCUMENTOS PROBATORIOS

En el Anexo I se adjunta copia de Constancia de Trabajo

3. TRABAJO PROFESIONAL DESARROLLADO

3.1 CARGOS DESEMPEÑADOS

Ingeniero de Procesos de la División Ingeniería

3.2 FUNCIONES ASIGNADAS AL CARGO DESEMPEÑADO

Como Ingeniero de Procesos de la División Ingeniería he participado en proyectos de las áreas de procesos y medio ambiente, entre los que destacan los siguientes:

AREA DE PROCESOS

Estudio para la Elaboración de un Combustible Alternativo para Motores de Combustión Interna y Turbinas empleadas como elemento motor de bombas y en la generación de energía eléctrica

El estudio se orientó a la formulación de un combustible mediante el tratamiento de Petróleo Crudo, Petróleo Industrial N° 6 ó la mezcla de éstos con Diesel y/o Kerosene para motores de combustión interna y turbinas. Para esto se realizaron mezclas teóricas, que fueron comprobadas a través de pruebas a nivel laboratorio y planta piloto de procesos de separación obteniendo niveles de contaminantes menores a los

especificados por los fabricantes de los equipos. El mencionado proyecto generaba, con la mezcla obtenida, ahorros de 2.3 MMUS\$ por año.

Estudio de Procesos para Mejorar la Calidad de Fraccionamiento y Ampliar la Capacidad de la Unidad de Destilación Primaria de una Refinería de Petróleo

Se realizó un estudio para mejorar la capacidad de destilación de una columna de la Unidad de Destilación Primaria de una Refinería de Petróleo mediante la adición de cinco platos en el tope y el reemplazo de 3 platos de la zona de destilación, entre los cortes de Solvente 3 y Kerosene, por empaque estructurado. La operación de la columna fue simulada mediante software de procesos (Chemcad) obteniéndose un incremento de la capacidad de la columna de 12.0 MBPD a 16.0 MBPD. El proyecto se encuentra en concurso para su implementación

Evaluación del Tren de Pre calentamiento de Petróleo Crudo de una Unidad de Destilación Primaria de una Refinería de Petróleo

Se maximizó la capacidad de recuperación de calor de dos trenes de intercambio para pre calentamiento de Petróleo Crudo mediante la redistribución de los intercambiadores de calor y la instalación de dos nuevos intercambiadores, evaluando sus resultados mediante simulaciones en computadora. Se logró incrementar la temperatura de ingreso del Petróleo Crudo al horno utilizando la capacidad térmica excedente para elevar la carga de Petróleo Crudo al horno de 8.0 MBPD a 10.5 MBPD

Diseño Básico y Bases de Referencia del Sistema de Eyectores de Vacío para una Unidad de Destilación al Vacío de una Refinería de Petróleo

Evaluación de sistemas de producción de vacío (bomba de vacío, sistemas de eyectores con o sin condensadores Inter-etapas) de los cuales se seleccionó y diseño un sistema de producción de vacío empleando tres eyectores con condensadores entre cada etapa. El proyecto incluyó el

diseño conceptual, básico y detallado para la instalación así como la elaboración de las bases para el proceso de competencia. El proyecto prevee un incremento en la capacidad de destilación de la unidad de vacío de 4.0 MBPD a 8.0 MBPD y se encuentra actualmente en implementación.

Diseño Básico y Bases de Referencia para la Instalación de una Zona Convectiva para Horno de Crudo Reducido

Mediante un estudio de procesos se definió la factibilidad para instalar una zona convectiva para el precalentamiento de Petróleo Crudo en un Horno de Crudo Reducido. Se empleó la zona convectiva del Horno de Petróleo Crudo en forma paralela a la nueva zona convectiva incrementando la capacidad de procesamiento de Petróleo Crudo de la Unidad de 9.0 MBPD a 12 MBPD.

El proyecto permitió recuperar la energía de los gases de combustión antes de la salida por la chimenea, aumentando la eficiencia del horno de 69% a 80.5%. Se realizó el diseño básico para la nueva zona convectiva.

Diseño Básico para el Reemplazo de la Instrumentación de una Refinería de Petróleo Crudo

Diseño de la Lógica de Control (Lazos) y planos para el reemplazo de un sistema de instrumentación neumática por un Sistema de Control Distribuido. El proyecto constó de 120 lazos de control incluyendo el sistema de seguridad de hornos y calderos (interlock) y controles de la Columna de Destilación de la Unidad de Destilación Primaria de la Refinería de Petróleo Crudo

Evaluación de la Performance de Intercambiadores de Gas y Aceite en una empresa de Generación de Energía Eléctrica con Gas Natural

Evaluación de la Capacidad de Enfriamiento de Kerosene y gas para la extracción de gases condensables antes del ingreso en las torres de contacto utilizando subproductos de proceso.

Mediante un proceso de absorción con Kerosene, la planta extrae del gas natural que compra (gas rico) los componentes pesados (butanos, pentanos e hidrocarburos de mayor número de carbono) que pueden ser recuperados para su venta posterior y utiliza el gas despojado (gas pobre) para la generación de energía eléctrica con un turbogenerador.

Los intercambiadores enfrían las corrientes de entrada a la columna de absorción para mejorar su eficiencia

Para el proyecto, se realizaron simulaciones de la performance del sistema de enfriamiento para diferentes condiciones de ingreso de Kerosene y gas. Se logró reducir 5°F la temperatura de ingreso a la torre y 6°F la temperatura del aceite

Diseño de un Sistema de Distribución de Gas Domiciliario para la ciudad de Talara

Diseño de un sistema de redes de distribución de gas domiciliario para la ciudad de Talara, incluyendo la selección de diámetro de tuberías principales (troncales), sistemas de acometida a las casas y separadores gas líquido. El sistema ha terminado la fase de construcción y está a la espera de autorización para funcionamiento

Diseño del Sistema de Inyección de Pentano a Gas para Turbinas

Se buscó transportar pentano mediante una corriente de gases de hidrocarburos no condensables para su transporte entre dos ciudades distantes aproximadamente 20 Km. El pentano inyectado se vende con el gas a otra compañía para su recuperación y venta. El proyecto consistió en determinar la máxima capacidad de transporte del sistema evitando la formación de un hidrato así como el diseño de las facilidades requeridas.

Diseño Básico y Bases de Referencia del Sistema de Enfriamiento de Agua empleado como medio de enfriamiento de intercambiadores de calor de una Refinería de Petróleo

Se realizó el Diseño básico y costeo del proyecto de instalación de un sistema de agua de enfriamiento empleado en intercambiadores de calor. El sistema disminuirá el consumo de agua de la planta que actualmente utiliza un sistema abierto con agua de una laguna, mediante la instalación de una torre de enfriamiento de tiro forzado en circuito cerrado.

Reemplazo de Diesel 2 por Petróleo Industrial N° 6 como Combustible del Secador de Asfaltos de la Planta de Agregado Asfáltico

El proyecto consistió en la instalación de una planta tipo paquete de aceite térmico que comprendió: un horno helicoidal de aceite térmico, una bomba y un tanque de expansión. El aceite térmico se empleó como medio calefactor de un tanque de Petróleo Industrial N° 6 inyectándose en el quemador del horno de la planta de agregado asfálticos.

La sustitución de Diesel por Petróleo Industrial N° 6 permitió una disminución del 40% de los costos operativos de la planta de agregados asfálticos.

Evaluación del Sistema de Calentamiento de Petróleo Industrial N° 6 con Vapor para una Planta de Ventas de Hidrocarburos

Se realizó la evaluación de la operación de un sistema de calentamiento de Petróleo Industrial N° 6 con vapor, identificándose los puntos de pérdida de energía (tuberías y tanques sin aislamiento, errores en el sistema de recuperación de condensados y calentamiento de combustible para el caldero, entre otros). Igualmente se realizó la selección técnico-económica del espesor óptimo de material aislante de líneas y tanques, la evaluación de la eficiencia de operación del caldero de vapor y el diseño de serpentines de calentamiento. Con la implementación de las

recomendaciones presentadas se logró un ahorro de 30% de los costos en combustible.

Evaluación de Performance de un Secador de Tela de una Textil

El trabajo se realizó en una textil que elabora telas de algodón y mezclas en tejido de punto. La tela una vez teñida ingresa a un secador que emplea gas licuado de Petróleo para calentar aire caliente. Un ventilador retira el aire húmedo por la parte superior del equipo.

Mediante la implementación del estudio se logró disminuir el consumo de GLP del secador de tela en 28%. Para ello, se modificaron los parámetros de operación y los hábitos de ejecución de trabajo de los operadores.

Corridas de Prueba para mejorar las condiciones de bombeo en un poliducto de Petróleo Crudo y Petróleo Industrial

El poliducto en estudio, empleado para el transporte de Petróleo Crudo y Petróleos Industriales, fue diseñado con un diámetro menor al empleado en sistemas de bombeo similares produciendo la disminución del régimen de bombeo esperado en 50% (De 100BPH a 50 BPH). Se constató además, que los productos transportados sufren cambios de temperatura en su paso por el lecho de un río.

Se realizó un estudio hidráulico experimental, ante la inaplicabilidad de ecuaciones típicas de fluidos incompresibles, mediante la toma de datos de temperaturas, flujos y presiones en una corrida de prueba. Dicho estudio permitió recomendar la instalación de un horno intermedio para fluidizar los líquidos transportados.

Corridas de Prueba de Destilación Atmosférica en una Refinería de Petróleo para nuevas calidades de Petróleo Crudo de 24, 28, 30 y 32° API

Consistió en la supervisión de corridas de prueba de destilación de Petróleo Crudo Maquila (un tipo de Crudo obtenido del Bloque VIII en la selva), para determinar rendimientos de productos destilados maximizando

la producción de destilados medios (Turbo A-1 y Diesel). Las corridas involucraron la supervisión tanto en las mediciones de tanques como en los valores reportados por los instrumentos y el control de las operaciones de la planta.

AREA DE MEDIO AMBIENTE

Elaboración de Línea Base para Refinería de Petróleo Crudo

Este estudio consistió en la elaboración de una Línea Base de los Aspectos Físicos, Biológicos y Socioeconómicos de la zona de influencia de la Refinería. Igualmente se realizó un Diagnóstico Ambiental de la Operación de la Refinería e Inventario de Contaminantes. El proyecto servirá de base para evaluar los efectos de futuras modificaciones o ampliaciones de la operación

Diseño Detallado del Sistema de Tratamiento de Agua por Osmosis Inversa en una Refinería de Petróleo Crudo

Se diseñó un sistema de tratamiento de agua por ósmosis inversa para purificar 64 m³/hr de agua filtrada y eliminar cationes y trazas de metal en el agua. Se realizó el diseño detallado del sistema, incluyendo las facilidades para su funcionamiento. El sistema se encuentra actualmente en operación.

Diseño Básico y Detallado de Sistema de Disposición de Residuos Sólidos Finales de una Refinería de Petróleo– Relleno Sanitario

El proyecto consistió en el diseño de relleno industrial compuesto por un conjunto de celdas de capacidad para 50m³ de basura y una vida útil estimada de un año de operación por celda. Los residuos aceitosos producto de las operaciones de limpieza de tanques (borra aceitosa) y material orgánico, serían incinerados previo a su disposición final en el relleno. El relleno además de material arcilloso utilizaría una

geomembrana para impermeabilizar el suelo, un sistema de drenaje hacia poza séptica y protección contra lluvia.

Diseño Básico y Detallado de Sistema de Quema de Residuos Sólidos de Refinación de Petróleo Crudo

Producto de las operaciones de refinación de Petróleo Crudo y almacenamiento de hidrocarburos se generan residuos aceitosos de alta viscosidad llamados borra. Estos compuestos contienen además de hidrocarburos pesados, metales pesados y productos químicos, por lo que deben ser enterrados en rellenos industriales y/o tratados para evitar la contaminación del suelo y agua subterránea.

El proyecto buscó reducir el volumen y peligrosidad de estos residuos mediante el empleo de un incinerador de borra y residuos sólidos domésticos de 8 MMBTU/hr con doble cámara de combustión. La capacidad de diseño fue 50 Ton anuales de sólidos.

Diseño Básico de Sistema de Recuperación de Vapores para Planta de Ventas de Hidrocarburos

Se diseñaron sistemas de recolección de vapores de hidrocarburos para su absorción en un hidrocarburo liviano. El sistema permitirá disminuir las emisiones de contaminantes a la atmósfera en 80%.

Sistema de Tratamiento Microbiológico en Poza de Agua Contraincendio

Se realizó un estudio para resolver problemas de crecimiento de algas en una piscina de agua contraincendio. El crecimiento microbiológico se vio favorecidos por condiciones de estancamiento del agua de la poza, la acción de la luz solar y la acumulación de polvo. Se realizó un tratamiento químico para solucionar el problema inmediato y se propusieron alternativas de solución a largo plazo, las que incluyeron el uso de membranas para cubrir la superficie de la piscina y el uso de una barrera de arbustos que serviría de escudo para el paso de partículas suspendidas.

Diseño Básico de Sistema de Recuperación de Vapores de una Planta de Venta de Hidrocarburos

Los vapores de hidrocarburos que se forman por la evaporación de Petróleo Crudo y destilados livianos (gasolina y solvente 1) se acumulan en el área vacía existente entre el nivel de hidrocarburo líquido y el techo del tanque de almacenamiento. Como producto de las operaciones de llenado y vaciado de los tanques, estos vapores de hidrocarburos son emitidos a la atmósfera. Adicionalmente, se emiten vapores de hidrocarburos de las cisternas durante las operaciones de despacho de productos en los puntos de venta.

El sistema de recuperación de vapores diseñado recogía los vapores generados en cada punto de emisión y los transportaba por medio de una red de tuberías hasta un lecho de carbón, donde los vapores orgánicos son adsorbidos. Posteriormente el carbón saturado se incineraba.

Tratamiento de Efluentes de las Tinas de Fermentación de Malta en una Planta de Producción de Cerveza

Se realizó un monitoreo de los efluentes industriales de tinas de fermentación de malta, los que contenían un gran porcentaje de granos de este cereal. Se determinaron los flujos de operación durante el día, en diferentes etapas del proceso productivo tipo batch. Se identificaron las etapas de máxima generación de efluentes y se diseñó un sistema de drenaje. Se realizó un programa de remediación y reducción de sólidos.

Monitoreos de Parámetros Medioambientales y Contaminantes

Consistente en el monitoreo de partículas sólidas en fuentes estacionarias, parámetros climáticos, contaminantes en el aire y efluentes en plantas de DeterPerú, Coats Cadena y Solgas.

3.3 TIEMPO DE PRESTACION DE SERVICIOS

Como personal estable desde Julio de 1998

III FUNCIONES DESEMPEÑADAS QUE NECESITARON CONOCIMIENTO DE TECNICAS PROFESIONALES

La empresa trabaja bajo la modalidad de desarrollo de proyectos y asistencia en labores de ingeniería para terceros.

En este contexto, el ingeniero de procesos es pieza fundamental ya que tiene entre sus funciones el desarrollo conceptual del problema, la definición del diseño básico del proyecto y la elección de los parámetros para su óptimo funcionamiento, entre otros.

Dentro de los proyectos realizados, algunos de los cuales se citan en el punto 3.2 del capítulo II, se desarrollará en las líneas siguientes el “Estudio Técnico – Económico para Producir Combustible Alternativo para su uso en Turbinas y Motores de Combustión Interna”, realizado en 1999. El proyecto conjuga la labor de ingeniería conceptual, investigación científica y aplicación de operaciones unitarias realizados en gabinete, con labores de muestreo y pruebas piloto que son parte de la labor en campo. Asimismo se realiza la evaluación técnica económica de proyectos que forma parte de la labor diaria del puesto.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El servicio se realizó para un cliente cuyas unidades operativas se distribuyen horizontalmente en el Norte del Perú desde el margen del río Marañón a la costa del Pacífico.

Las instalaciones no cuentan con energía eléctrica. En su lugar utiliza equipos de generación eléctrica accionados por motores de combustión interna.

Los equipos de generación (motores de combustión interna) y turbinas (equipos motrices para bombeo) emplean como combustible Diesel 2 y Kerosene, cuyo

consumo y el número de equipos de cada unidad de negocio se detalla en el cuadro siguiente:

TABLA N° 1
DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR
UNIDADES DE NEGOCIO

Unidad de Negocio	Consumo BI/día	Turbinas	Motores de Combust. Interna
Unidad 1	22.30	2	1
Unidad 5	93.30	3	1
Unidad 6	64.50	3	1
Unidad 7	73.50	3	1
Unidad 8	67.10	3	1
Unidad 9	188.80	6	1
Unidad 10	9.00	1	1
Total	518.50	21	6

Como se ve en la Tabla 2 , el costo de Diesel es relativamente alto comparados con el uso de Petróleo Crudo o Residual

TABLA N° 2
COSTO DE COMBUSTIBLE EN REFINERIA EL MILAGRO

Producto	Costo (US\$/BI)
Diesel	36.70
Kerosene	28.75
Petróleo Crudo	12.70
Residual	10.73

El abastecimiento de combustible se realiza en tres unidades de negocio:

- En la Unidad de Negocio N°1 se recepciona Diesel de Refinería Iquitos en cantidad suficiente para abastecer a la Unidad de Negocio N°5; en cada una de ellas existen tanques de almacenamiento de combustible para su propio consumo.
- Las Unidades de Negocio N° 6, 7 y 8 son abastecidas por el Diesel de la Refinería El Milagro y cada una de ellas tiene tanques de almacenamiento de combustible.
- La Unidad de Negocio de N°9, es abastecida por el Diesel-Kerosene de Refinería Talara que es transportado por vía Marítima hasta el puerto de Eten y transportado con cisternas hasta las Unidades de Negocio N°9 y 10

La alternativa del empleo de un combustible con sustitución total o parcial de Diesel o Kerosene por Petróleo Crudo o Petróleo Industrial N° 6 ofrecía la ventaja adicional de que las unidades de negocio se encuentran cerca de los puntos de producción, lo que reducía grandemente los costos de transporte de combustible.

2. OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo del Proyecto fue determinar la factibilidad técnica y económica para la producción de un combustible alternativo al Diesel 2 para su empleo como combustible de turbinas y motores de combustión interna.

El nuevo combustible debía cumplir las especificaciones recomendadas por los fabricantes de los equipos y/o incorporar aditivos que corrijan o compensen por desviaciones.

La solución elegida debía además representar una alternativa económica más atractiva que el uso de Diesel 2 y ser accesible a las disponibilidades del cliente.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La utilización del nuevo combustible permitiría la disminución de los costos operativos. Como se verá en la evaluación económica, el proyecto se traducía en ahorros de 2.3 MMUS\$/año.

Por otra parte, las unidades de negocio tienen acceso local de Petróleo Crudo y Petróleo Industrial N° 6 disminuyendo los costos de transporte.

4. ALCANCE DEL PROYECTO

El trabajo se realizó según el alcance indicado en las bases del concurso, mediante la investigación de cuatro alternativas de tratamiento ó mezcla de un solo tipo de Petróleo Crudo liviano segregado de 34.7°API, disponible en la zona y sus productos derivados, Diesel, Kerosene y Petróleo Industrial N° 6 .

Las alternativas analizadas son:

1. Producción de combustible alternativo utilizando el Petróleo Industrial N° 6 como base en mezcla con productos livianos como Kerosene y/o Diesel 2, para disminuir la presencia de contaminantes.
2. Producción de combustible alternativo utilizando directamente el Petróleo Industrial N° 6 mediante procesos de lavado, separación centrífuga y/o aditivación.
3. Producción de combustible alternativo utilizando como base Petróleo Crudo liviano virgen de 32,7 °API, mezclado con Kerosene y/o Diesel 2, para disminuir la presencia de contaminantes.
4. Producción de combustible alternativo utilizando como base Petróleo Crudo Liviano virgen de 32,7 °API, mediante procesos de lavado, separación y/o aditivación.

Se incorporaron además dos alternativas adicionales al estudio que permitieron evaluar diferencias en el tratamiento y resultados:

5. Producción de combustible alternativo utilizando como base Petróleo Crudo liviano virgen de 32,7 °API, mezclado con Kerosene y/o Diesel 2 y sometiendo la mezcla a procesos de lavado, separación y/o aditivación.
6. Producción de combustible alternativo utilizando como base Petróleo Industrial N° 6 , mezclado con Kerosene y/o Diesel 2 y sometiendo la mezcla a procesos de lavado, separación y/o aditivación.

Se coordinó con un laboratorio de prestigio y especializado en hidrocarburos la realización de los análisis de laboratorio, quedando a cargo de la empresa la logística de preparación y envío de muestras.

Se coordinó con los fabricantes de las Turbinas y motores Diesel, tanto a nivel local como internacional, la identificación de las modificaciones requeridas en los equipos y la adquisición de materiales para su adecuación al nuevo combustible. Análisis completos de las propiedades de las mezclas elegidas fueron proporcionados a los fabricantes para su aceptación.

5. ESPECIFICACION DEL COMBUSTIBLE OBJETIVO

5.1. REQUISITOS PARA LOS COMBUSTIBLES EN LOS MOTORES DE COMPRESIÓN-IGNICIÓN

Los combustibles para motores de compresión-ignición deben cumplir satisfactoriamente los requisitos de calidad que garanticen la correcta realización del ciclo de funcionamiento del motor, especialmente en tres funciones principales: inyección, ignición y combustión.

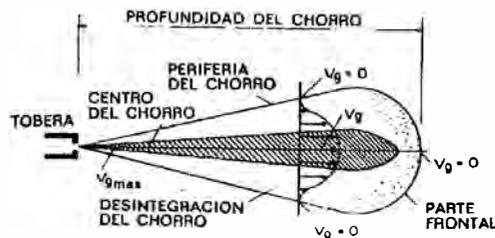
5.1.1. Inyección:

La primera consideración que hay que hacer es que el combustible debe permanecer al estado líquido a las temperaturas más bajas a que se supone poner en marcha en frío. En ciertos casos existen calentadores auxiliares, pero se considera necesario especificar que el punto de congelación del combustible no ha de ser inferior a ciertas temperaturas previstas por las condiciones de operación más severas. No solamente debe ser fluido el combustible para la puesta en marcha, sino que su viscosidad también ha de ser lo suficientemente baja para facilitar la adecuada alimentación a través de las tuberías y filtros bajo la presión existente, de modo que no falle la aspiración de las bombas

La función de la bomba de combustible y del sistema inyector en un motor de compresión ignición consiste en tomar del tanque una cantidad de combustible medida en cada ciclo, y en el momento indicado inyectarlo en el cilindro en forma de un chorro muy fino y bien distribuido por toda la cámara de combustión. La distribución y el grado de pulverización, junto con el grado de movimiento o turbulencia del aire en el espacio de combustión, son los que determinan el porcentaje del aire admitido en el cilindro que puede emplearse para la combustión. Por lo tanto, estos factores son los que han de afectar la potencia útil máxima e

indirectamente la velocidad de consumo de combustible y el color de los gases de escape.

Una viscosidad demasiado elevada a la temperatura de operación afectará desfavorablemente la pulverización de la válvula inyectora, sobre todo en los motores de altas revoluciones. Este efecto se explica por el aumento de tamaño de las partículas y la distancia de penetración en el cilindro, fenómenos ambos que pueden disminuir el rendimiento de la combustión.



En las grandes instalaciones de motores es posible emplear combustibles muy viscosos, ya que se pueden montar calentadores que reduzcan la viscosidad al valor deseado, aparte de que las válvulas de inyección de los motores grandes no son tan sensibles a los cambios de viscosidad

La experiencia ha demostrado que el desgaste de las partes del sistema de inyección no son producto de una viscosidad muy baja sino de la presencia de suciedad en el combustible. La obstrucción rápida de los filtros puede ser debida a suciedad, a agua o a depósitos de parafinas. Esta dificultad se reduce empleando combustibles con bajo contenido de cenizas y agua y con combustibles parafinosos, manteniendo la temperatura de inyección por encima del punto de fusión de la parafina.

El combustible ha de estar libre de acidez para evitar la corrosión de los pistones de la bomba, válvulas de inyección y otras partes del sistema. Se ha demostrado que incluso la acidez orgánica ha originado la corrosión y la adhesión de los pistones de la bomba cuando los motores han estado mucho tiempo fuera de uso.

5.1.2. Ignición

Los motores de compresión ignición son casi sin excepción de tipo de inyección sólida, en la que la atomización del combustible se obtiene sin la ayuda de aire comprimido aplicándose para ellos las siguientes consideraciones:

La inyección del combustible empieza justo antes del final del recorrido de compresión, cuando el aire del cilindro se ha elevado por la compresión a una temperatura y presión relativamente altas. Sin embargo, como las partículas del combustible pulverizado están relativamente frías, no se verifica la ignición hasta que no haya tomado cierta cantidad de calor del aire que las rodea y alcancen una determinada temperatura crítica que depende del mismo combustible. Existe, por lo tanto, un retardo o dilatación entre la inyección y la ignición.

A medida que se reduce la temperatura de arranque, aumenta el tiempo de retraso y, con tiempos largos, la temperatura del aire en el cilindro empieza a descender debido a la reexpansión producida al retroceder el pistón antes de que la combustión pueda comenzar. De esta forma, la temperatura de puesta en marcha no se puede disminuir infinitamente, debido a que, por debajo de un valor crítico, el tiempo de retraso comienza a ser tan largo que no se puede verificar la ignición en el tiempo disponible. Los combustibles de alta calidad de ignición, es decir, con tiempos de retraso cortos, permiten el arranque a temperaturas inferiores, por lo que son más convenientes desde este punto de vista.

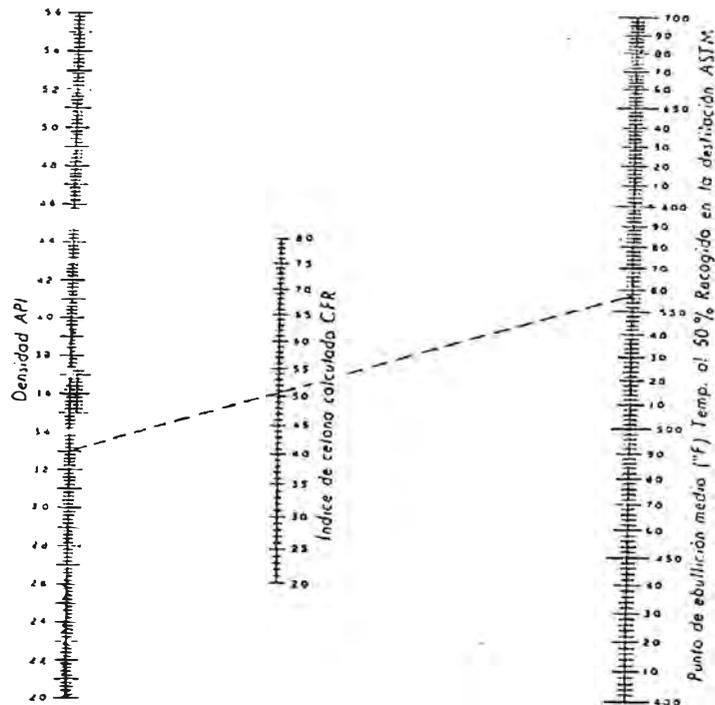
Las primeras partículas de combustible en arder serán, por supuesto, las primeras inyectadas, existiendo, por lo tanto, una acumulación de combustible en el cilindro, ya que la inyección ha de continuar durante la totalidad del tiempo de retraso. El resultado será que las primeras

partículas que arden propagan la combustión a la totalidad del combustible ya introducido en el cilindro, lo cual origina un aumento rápido de la presión y un golpeteo brusco producido por la combustión. Cuanto más largo sea el período de retraso más combustible habrá en el cilindro al final de dicho período incrementando la intensidad del martilleo originado por la combustión. Se ha demostrado también que junto con el martilleo se incrementan las tensiones y vibraciones de las partes que trabajan. Por este motivo, además del arranque en frío, los combustibles de alta calidad de ignición tienen la ventaja de reducir el martilleo de la combustión a la vez disminuyen dichas tensiones y vibraciones

Para determinar la calidad de los combustibles se han adoptado combustibles patrones de alta y baja calidad de ignición: el cetano y el α -metil nafteno, respectivamente. La calidad de ignición en un combustible se expresa por su número de cetano, que es el porcentaje en volumen de cetano de una mezcla de cetano y α -metil nafteno que posee la misma calidad de ignición que la muestra de combustible ensayada en el mismo motor y las mismas condiciones.

Con números de cetano iguales, los combustibles de mayor volatilidad tienden a arrancar más fácilmente. El número de cetano es mayor en los combustibles parafínicos e inferior en los aromáticos

El CRC (Coordinating Research Council) desarrolló un nomograma para estimar el índice de cetano (para hidrocarburos no aditivados) si se conoce la densidad API y el punto de ebullición medio, el cual se reproduce a continuación.



5.1.3. Combustión:

Las últimas partículas de combustibles inyectadas durante la combustión llegan a la cámara de combustión cuando gran parte del oxígeno ha sido consumido y, a menos que sea suficiente la turbulencia del aire en el cilindro y la distribución del chorro pulverizado satisfactoria, cierta cantidad de combustible no encontrará suficiente oxígeno para completar su combustión, con el resultado de la aparición de productos totalmente oxidados de fuerte olor, humos de escape y depósitos de carbón. Asociado con la combustión incompleta está el aumento en el consumo de combustible.

La calidad del combustible no influye grandemente en la eficacia de la combustión, salvo el efecto de la acumulación de depósitos de carbón. La viscosidad excesiva también puede originar una mala pulverización con combustión indebidamente lenta y también una mayor penetración del chorro, de modo que cierta cantidad de combustible pueda llegar sin quemarse a las paredes del cilindro. Si el número de cetano es demasiado bajo puede originarse también combustiones sobre retrasadas, aunque este

efecto es de segundo orden respecto a la eficacia de la combustión. El factor de mayor importancia que hay que tener en cuenta en el combustible es la formación de depósitos de carbón, especialmente alrededor de los orificios del inyector, ya que ello afecta marcadamente el rendimiento.

Aunque la potencia calórica no afecta la eficacia de la combustión, ésta influye sobre el consumo específico de combustible, incorporándose por lo tanto, en las especificaciones un valor mínimo para las mismas. Los combustibles de peso específico menor suelen dar mejores consumos por peso, inversamente a los que ocurre si se considera el consumo en volumen.

5.1.4. Depósitos de carbón

Una de las mayores dificultades asociadas a la operación de los motores de compresión-ignición es la formación de depósitos de carbón alrededor de los orificios de las boquillas. Tales depósitos incrementan el consumo de combustible, reducen la potencia máxima y suelen ser la causa de los humos en el escape. A veces ocurre la obstrucción parcial de uno o más orificios, lo cual altera la distribución del chorro pulverizado; sin embargo, el inconveniente más común es la formación de depósitos en forma de trompeta alrededor de la salida de los orificios. Una vez que la trompeta empieza a formarse suele continuar el crecimiento hasta que llega a ser mecánicamente inestable y se rompe. La razón del crecimiento progresivo de la trompeta es que el borde exterior del chorro queda atrapado por el cono de carbón existente y arde lenta e incompletamente con la consiguiente formación de carbón.

La formación de trompetas de carbón se debe en gran parte a fugas en la válvula de inyección o la insuficiente refrigeración del inyector, aunque la calidad del combustible puede afectar la velocidad a la cual se desarrolla este inconveniente. Los combustibles con alto porcentaje de destilación,

antes de los 350°C y con bajo residuo de carbón son los que menos dificultades presentan a este respecto.

La presencia de asfaltos duros es indeseable ya que tiende a unir y endurecer los depósitos de carbón por lo cual los combustibles para motores Diesel de altas revoluciones suelen tener menos del 0.05% de asfaltos duros. La suciedad en los combustibles agrava los depósitos en las boquillas

5.2. ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DE LOS FABRICANTES DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA Y TURBINAS DE GAS

5.3.1. Motores De Combustión Interna

En la fabricación de aceites combustibles para motores de combustión interna se puede utilizar una amplia escala de fracciones de Petróleo. Conocidas las funciones que deben cumplir los combustibles se especifican requerimientos mínimos de calidad para asegurar una buena operación de los motores.

Los motores de combustión interna, materia del estudio, han sido diseñados para operar con cuatro alternativas de calidad de Diesel 1 y 2 según norma ASTM-D975-92 y con dos alternativas de Fuel Oil según norma ASTM-D396-89 y una tercera opción de trabajar con Petróleo Crudo liviano.

La tabla siguiente muestra las especificaciones de calidad establecidas por los fabricantes para la aceptación de un combustible formulado en base a Petróleo Crudo (aplicables a Petróleo Crudo, Petróleo Industrial N° 6 o mezclas de estos con destilados medios) y a Diesel 2.

TABLA N° 3
ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DE COMBUSTIBLES PARA MOTORES
DE COMBUSTIÓN INTERNA

Propiedad	Método ASTM	ASTM D396-89 (Fuel Oil)		ASTM D975-92 (Diesel Fuel Oil)				Especif. Crudo
		N°1	N°2	N°1	N°2	N°1 Bajo Azufre	N°2 Bajo Azufre	
Gravedad API °C, mín.	D-287	35	30					30 a 45
Pto de Inflam. °C, mín.	D-93	38	38	38	52	38	52	Límite legal
Pto de Fluidez °C, mín.	D-97	-18	-6	T _{amb} -6°C	T _{amb} -6°C	T _{amb} -6°C	T _{amb} -6°C	T _{amb} -6°C
Destilación °C	D-286							
10% máx.		215						282
90% mín.- máx.		288	282-338	--- 288	282 338	288	282 338	380 máx.
% pirogenación, mín.								60%
Residuo % máx.								10%
Fracción destilada a < 200°C, máx.								35%
Fracción destilada 200° < T < T piro °C,								30% mín.
Azufre % peso, máx.	D-1552	0.5	0.5	0.5	0.5	0.05	0.05	0,5
Visc 38°C, cSt mín.	D-445	1.4	2.0	1.3	1.9	1.3	1.9	1.4
máx.		2.2	3.6	2.4	4.1	2.4	4.1	20.0
Contenido de Metales								
Vanadio ppm	D-2788							4
Sodio ppm	D-2788							10
Aluminio ppm	D-2788							1
Silicio ppm	D-2788							1
Níquel ppm	D-2788							1
Otros								
Sal Lb/MBIs	D-3230							100
Gomas y resinas mg/100ml	D-381							10
Cenizas % peso, máx.	D-482			0.01	0.01	0.01	0.01	0,1
Índice de Cetano, mín.	D-613			40	40	40	40	35
Aromáticos % vol máx.	D-1319							35
Agua y Sedim. % vol	D-1796	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0,5
Carbón Conradson al 10% de fondos, máx.	D-524	0.15	0.35	0.15	0.35	0.15	0.35	4,58*
Corrosión, lámina de Cu	D-130	N°3	N°3	N°3	N°3	N°3	N°3	N°3

(* Equivalente al Residuo Carbón Ramsbotom de 3.5%

5.3.2. Turbinas De Gas

Los fabricantes de turbinas son menos exigentes en las especificaciones del combustible para turbinas salvo en el contenido de metales y azufre debido a que la presencia de estos elementos (especialmente Vanadio, Sodio, Potasio y Níquel) favorece la ocurrencia de fenómenos de corrosión a alta temperatura en los álabes de las turbinas.

La viscosidad es determinante en el combustible para asegurar el nivel de atomización requerido para facilitar su encendido y su combustión. Igualmente, la temperatura de inicio de la destilación está relacionada con la volatilidad del combustible.

El contenido de cenizas, residuos de carbón y agua y sedimentos se relacionan con la capacidad de los gases de combustión de ensuciar los álabes y demás partes mecánicas de las turbinas de gas.

Las especificaciones de calidad recomendadas por los fabricantes así como las establecidas en la norma de calidad de combustibles de la ASTM se detallan en la tabla N° 4:

TABLA N° 4

ESPECIFICACIONES RECOMENDADAS POR FABRICANTES DE TURBINAS

Propiedad	Método ASTM	Fabricante	ASTM D2880-98
Azufre % peso	D-1552	1	
Viscosidad 38°C (100°F), cSt	D-445	2 a 7,5	
Punto inicial, mín.*		90	
Contenido de Metales			
Vanadio ppm	D-2788	1	1
Sodio ppm	D-2788	1	1
Potasio ppm			
Calcio ppm	D-2788	1	2
Plomo ppm	D-2788		1
Otras trazas ppm	D-2788		5

Propiedad	Método ASTM	Fabricante	ASTM D2880-98
Cenizas ppm	D-482	100	
Residuo de Carbón, máx. *		0.2	
Agua y Sedimentos % vol	D-1796	0,05	0,00001

* Valores obtenidos mediante fax del fabricante. No se indica las normas ni unidades. Se asumió Destilación ASTM D86 fondo de residuo y 90°C para el Punto inicial, mientras que para el límite de concentración de Residuo de Carbón se asumió según norma ASTM D 1319 en % en peso.

En una última comunicación el límite máximo de contenido de residuo de carbón es 0.2

5.3. EFECTO DE LAS PROPIEDADES Y PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN COMBUSTIBLES PARA MOTORES DE COMBUSTION INTERNA Y TURBINAS DE GAS

Gravedad API: La densidad y el peso específico de los hidrocarburos se determinan por medio de una escala arbitraria conocida como escala API relacionada con el peso específico con la siguiente ecuación:

$$\text{Grados API} = \frac{141.5}{\text{Peso específico a } 60^{\circ}/60^{\circ}\text{F}} - 131.5$$

El peso específico se incluye en muchas funciones arbitrarias como el “Índice de Diesel”, “Factor de Caracterización”, etc. Aunque sólo posee un valor limitado como indicación de la calidad del producto, tiene importancia en la determinación de propiedades tales como el calor de combustión. Combustibles de bajo API tienen altos ratings de calor de combustión/libra de combustible.

La gravedad API comparada con la viscosidad indica el origen del combustible o el método de refino puesto que, por ejemplo, una relación

de peso específico a viscosidad baja corresponde un alto grado de parafinidad.

Punto de Inflamación: También llamado punto flash, es importante para determinar los riesgos de incendio en el transporte, manejo y almacenaje del combustible. Los equipos que manejen combustibles de bajo punto de inflamación deberán ser especificados a prueba de explosión. También puede ser usado para ayudar a predecir la contaminación del combustible con compuestos volátiles como gasolina

Punto de Fluidéz y Turbidez: Este ensayo indica la temperatura inferior a la que el combustible puede fluir cuando se le enfría sin perturbaciones y en condiciones determinadas. El punto de fluidéz (congelación) es más importante que la viscosidad si se considera la facilidad de bombeo en climas fríos.

El punto de turbidez es la temperatura a la que los cristales de cera se separan del combustible. El punto de turbidez no debe ser mayor de 5.5°C (10°F) por arriba del punto de fluidéz, de tal forma que los cristales de parafina en suspensión no sedimenten en el combustible y obstruyan el sistema de filtración. El punto de turbidez también debe estar por lo menos 5.5°C (10°F) por debajo de la temperatura ambiente para que el combustible fluya a través de las líneas.

Destilación: Es la temperatura a la que ciertas porciones de combustible se evaporan. El punto de destilación varía de acuerdo al combustible empleado. El desarrollo de la destilación puede ser empleado para predecir:

- a) Encendido: Pobre (mayor retraso) si la temperatura al 10% de la destilación es muy alta. Es una medida de la volatilidad del

combustible y por lo tanto del tiempo de retraso para el inicio de la combustión.

- b) Tiempo de Calentamiento: Es más largo cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas entre el 10% de la combustión y el 50% de destilado, pues más combustible se habrá inyectado en el cilindro hasta la propagación de la combustión y, por lo tanto, mayor será el martilleo originado por la combustión.
- c) Humos: Una de las causas que originan los humos de escape se debe al combustible que se queda sin quemar en el sistema de escape durante los períodos de marcha a poca carga y que se evapora tan pronto como ésta aumenta, recondensándose en la atmósfera para dar un humo azul. Cuanto más volátil es el combustible (temperatura de 50% de destilado baja) y mayor el número de cetano, menor es la intensidad y duración de este tipo de humos.
- d) Punto de rocío: El punto de rocío, es decir la temperatura a la cual todo el combustible está totalmente vaporizado, en una mezcla con una cantidad dada de aire viene dada por:

$$\text{Punto de rocío} (^{\circ}\text{F}) = 5 \text{ a } 7 \times (\text{Temp } 90\% \text{ destilado ASTM186 } (^{\circ}\text{F}) - 1$$

Si la temperatura del 90% de destilado es muy baja puede ocurrir la vaporización total formándose una mezcla seca con las consiguientes pérdidas de potencia durante el ingreso de aire a la cámara. Tampoco puede ser demasiado alta para evitar la entrada de demasiado combustible en el cilindro.

Azufre: La cantidad de azufre depende del origen del Petróleo Crudo. El Petróleo Crudo contiene azufre libre y compuestos orgánicos sulfurados como mercaptanos, sulfuros, disulfuros, etc. Debido al azufre se pueden presentar problemas de corrosión, al combinarse éste tanto con la humedad en el combustible como con el vapor de agua que se forma durante la combustión produciendo ácido sulfúrico. Este ácido puede corroer en poco tiempo las piezas del equipo.

Viscosidad: Influye en el tamaño de las gotas atomizadas durante la inyección. Altas viscosidades pueden ocasionar detonaciones, pérdidas de potencia, humos excesivos y desgaste del sistema de inyección. Viscosidades bajas resultan en una atomización suave y poco penetrante, fugas de combustible después del émbolo de inyección y posible desgaste de los componentes del sistema de combustible.

Metales: Los metales forman compuestos que destruyen la capa natural de óxido que recubre la superficie de los álabes de las turbinas e impiden su reformación haciéndolos vulnerables a la corrosión. Un análisis más detallado de los efectos corrosivos de los metales se presentan en el punto 9.

Gomas y Resinas: Una de las alteraciones más importantes que pueden ocurrir durante el almacenaje es la formación de sustancias resinosas o gomosas, que al separarse del combustible por evaporación se depositan como un producto parecido a la laca. Este producto se conoce como goma y su formación se atribuye a la combinación de ciertos compuestos orgánicos con el oxígeno.

Cenizas: Son la parte inorgánica del aceite combustible. Estas cenizas generalmente contienen elementos metálicos, sustancias órgano metálicas solubles en el aceite, trazas de sílice y silicatos y sales derivadas de los

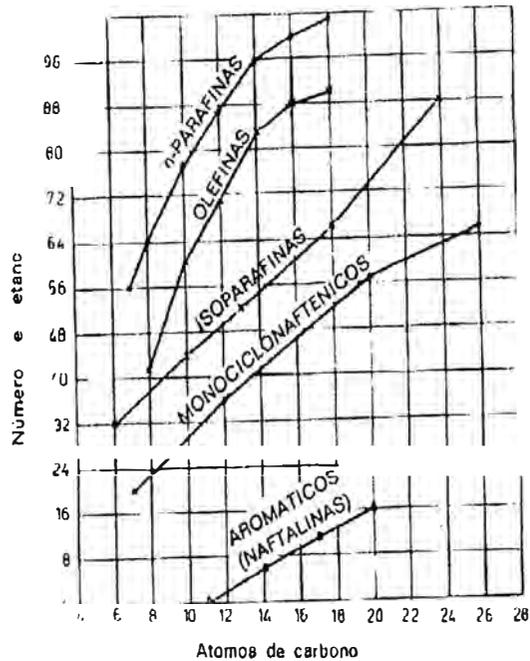
estratos petrolíferos y del agua frecuentemente asociados con el Crudo. Las cenizas naturales suelen ser inferiores al 0.01% en destilados y 0.2% en Crudos, pudiendo incrementarse por la introducción de impurezas durante el refinado y/o transporte.

Índice o Número de Cetano: Es una medida de la calidad de ignición en un combustible, y es el porcentaje en volumen de cetano de una mezcla de cetano y α -metil nafteno que posee la misma calidad de ignición que la muestra de combustible ensayada en el mismo motor y las mismas condiciones.

Mientras más bajo sea el número de cetano más difícil será de arrancar y operar el motor. Los combustibles con poco cetano tardan más en inflamarse y se queman con más lentitud.

Los olores en el escape se deben a productos de combustión incompleta y se producen principalmente por la presencia de combustible sin quemar y de productos de combustión incompleta tales como aldehídos. La cantidad de estos productos es menor cuanto mayor es el número de cetano.

Aromáticos: Los compuestos aromáticos tienen menor número de cetano que los compuestos parafínicos y producen durante su combustión residuos de carbón.



Agua y Sedimentos: Este ensayo es de particular significación en la combustión. La suciedad en el combustible puede obstruir las boquillas de los inyectores y arruinar las partes de precisión de las turbinas.

El agua presente en el combustible acelera la corrosión al mezclarse con los compuestos sulfurados. En adición, la presencia de agua favorece la existencia de microbios que degradan selectivamente algunos componentes de los hidrocarburos creando problemas de corrosión.

Residuos de Carbón: Este ensayo da una indicación relativa del grado de formación de depósitos carbonosos sobre las superficies calientes o “manchas calientes”, sobre las cuales se acumulan esfuerzos capaces de originar stress, distorsiones y craquing a los componentes del sistema. Específicamente la presencia de depósitos de carbón se minimiza con combustibles que hierven a 350°C y con bajo residuo carbonoso.

6. MUESTRAS PURAS

6.1. MUESTREO

6.1.1. Bases del Muestreo

Se definió el Petróleo Crudo ligero de 34°API destilado por la Refinería El Milagro como base para la formulación del combustible alternativo debido a que esta refinería constituye el proveedor principal de combustible. Se programó una corrida para efectos de muestreo. El Muestreo de Crudo Liviano y sus productos se realizó en Refinería El Milagro, entre el 11 y 14 de Enero.

Se tomaron muestras de Kerosene, Diesel 2, Fondos de Primaria y Petróleo Crudo.

El volumen muestreado fue calculado para los análisis (muestra y contramuestra), ensayos de mezclas y tratamientos a nivel laboratorio.

El volumen muestreado para cada producto fue el siguiente:

- Crudo Ligero: 1 Cilindro de 55 gal, 4 latas de 5 gal y 1 lata de 1 gal.
- Petróleo Industrial N° 6 : 1 Cilindro de 55 gal, 4 latas de 5 gal y 1 lata de 1 gal.
- Diesel 2: 1 Cilindro de 55 gal, 4 latas de 5 gal y 1 lata de 1 gal.
- Kerosene: 1 Cilindro de 55 gal, 3 latas de 5 gal y 1 lata de 1 gal.

El traslado de las muestras fue realizado por personal especializado, con amplia experiencia en este servicio, cumpliendo las condiciones de seguridad exigidas para el caso.

6.1.2. Envases utilizados para el muestreo

Los envases utilizados (cilindros de 55 galones, envases de 5 galones y envase de un galón), fueron envases metálicos de doble tapa: una tapa a presión y otra roscada.

6.1.3. Acondicionamiento para el Transporte

Los cilindros y galoneras fueron especialmente acondicionadas en jabas de madera con la finalidad de protegerlos de cualquier avería durante su transporte. Se prestó especial cuidado en la confección de las jabas utilizando clavos que fueran clavadas de adentro para afuera a fin de evitarse daño durante su transporte y producir derrame y/o contaminación.

6.1.4. Volumen de llenado.

El volumen de llenado fue de máximo 80% de la capacidad a fin de prevenir que se incremente la presión interna por efecto de evaporación de compuestos ligeros y pueda producir destape de los envases.

6.2. ANÁLISIS DE MUESTRAS PURAS

6.2.1. Resultados de Laboratorio

Se realizaron análisis de las muestras colectadas en Refinería El Milagro para determinar las propiedades de los productos y su diferencia contra las especificaciones para el combustible objetivo. Los resultados servirían de base para definir los tratamientos.

Los resultados se muestran en la tabla 4 de la página siguiente:

TABLA N° 4
RESULTADO DE ANÁLISIS A MUESTRAS PURAS

Propiedad	Método ASTM	Diesel 2	Kerosene	R-6	Crudo Lab 1	Crudo Lab 2
Gravedad API	D-287	36.4	46.1	17.9	34.7	34.4
Pto de Fluides °C	D-97	No aplica	No aplica	10	-24	
Destilación °C		D-86	D-86	D-86 ¹	D-86	
Pto Inicial		172	142		78	98
5%					110	111
10%		251	167	306	133	138
30%				379	240	233
50%		300	204	404	320	312.5
70%				416	311	361
90%		347	256	427		370 ²
Pto Final		374	281	430		
Azufre % peso	D-1552	0,12	0,02	0,37	0,19	
Viscosidad 38°C, cSt	D-445	4,75	1,52	194	7,83	
Viscosidad 50°C, cSt	D-445	3,71	1,27	111	6,03	
Contenido de Metales						
Vanadio ppm	ICP	0,00	0.00	8,31	4,38	
Sodio ⁴ ppm	ICP	0,01	0.00	5.60	4.30	
Potasio ppm	ICP	0,00	0.00	0,56	0,70	
Calcio ⁴ ppm	ICP	0,02	0.01	0,79	0,34	
Plomo ⁴ ppm	ICP	0,00	0,01	0,53	0,00	
Aluminio ppm	ICP			0.00	0.00	
Litio ppm	ICP	0,10	0,18			
Sal Lb/Mba	D-3230	0.0	0.0	2,5	1.0	
Gomas y resinas mg/100ml	D-381	No aplica ³	6,3	No aplica ³	No aplica ³	
Cenizas % peso	D-482	0.0016	0.0014	0,02	0,01	
Índice de Cetano	D-976	55,6	47.5	No aplica	No aplica	53.3
Punto de Anilina, °C	D-613	82	7	87		
Aromáticos % vol	D-1319	17.2	8,5	No aplica ³	No aplica ³	
Agua y Sedimentos % vol	D-1796	0.00	0.00	0,05	0,05	
Residuo de Carbón (Conradson)	D-189	0.052	Sin report.	8.21	4,39	
Corrosión, lámina de cobre	D-130	1 A	1 A	No aplica ³	No aplica ³	

¹ Los valores consignados como destilación ASTM D-86 son producto de una destilación simulada con software especial. Se basan en la destilación D-1160 realizada en el laboratorio cuyos resultados son: 10%vol 166°C, 20%vol 213°C, 30% vol 236°C, 40% 242°C, 50% 260°C, 60% 268°C, 70% 271

² En la destilación ASTM D-86 el Petróleo Crudo se craqueó a 370°C

³ En productos que tienen punto final de destilación máximo de 246°C que es el caso del Diesel 2 y Petróleo Industrial N° 6 no se puede aplicar el método ASTM D381 (gomas y resinas). Por esta misma razón no pueden aplicarse al Petróleo Industrial N° 6 los métodos ASTM D381, D1319 y D130

⁴ Para el análisis de metales se ha seguido la técnica de preparación de muestras indicada en el Método ASTM D-5708

6.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.3.1. Motores de Combustión Interna

Uso de Petróleo Industrial N° 6 (Alternativa N°2)

Dentro de las alternativas planteadas el uso de Residual N°6 como combustible se supeditaba a que este presentara propiedades similares a las especificadas para crudo (en ausencia de una especificación de calidad propia para este producto) .

El Petróleo Industrial N° 6 presenta diferencias más acentuadas con las especificaciones recomendadas. La gravedad API, viscosidad, niveles de Vanadio y Residuos de Carbón son superiores a los valores límite, como se muestra en la tabla siguiente:

TABLA N° 5
COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DEL PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 6
(RESIDUAL 6) CON LAS ESPECIFICACIONES PARA MOTORES DE
COMBUSTION

Propiedad	Método ASTM	Especificación para Crudo	Residual N° 6
Gravedad API 15,6 °C	D-287	30 a 45	17,9
Pto de Inflamación °C	D-93	Legal	77
Pto de Fluidez °C	D-97	< T _{amb}	10
Destilación °C			D-1160
Pto Inicial			
10%		Máx. 282	306
30%			379
50%			404
70%			416
90%		Máx. 380	427
Azufre % peso	D-1552	0.5	0,37
Viscosidad 38°C, cSt	D-445	1.4 a 20	194
Viscosidad 50°C, cSt	D-445		111
Contenido de Metales			
Vanadio ppm	ICP	4	8,3
Sodio ppm	ICP	10	5.6
Potasio ppm	ICP		0,56
Calcio ppm	ICP		0,79

Propiedad	Método ASTM	Especificación para Crudo	Residual N° 6
Aluminio ppm	ICP	1	0.00
Silicio ppm	ICP	1	0,9
Níquel ppm	ICP	1	12,56
Sal Lb/Mba	D-3230	100	2,5
Gomas y resinas mg/100ml	D-381	10	No aplica
Cenizas % peso	D-482	0.1	0,02
Índice de Cetano	D-976	35	No aplica
Punto de Anilina, °C	D-613		87
Aromáticos % vol	D-1319	35	No aplica
Agua y Sedimentos % vol	D-1796	0.5	0,05
Residuo de Carbón (Conradson)	D-189	4.58	8.21
Corrosión, lámina de cobre	D-130	N3	No aplica

Para lograr una base uniforme de comparación, se calculó la destilación ASTM D-86 del Petróleo Industrial N° 6, utilizando un programa de simulación. El programa utiliza los métodos del API Data Book para corregir los efectos de la presión, reflujo y equipos de destilación para convertir la destilación D-1160 en una destilación ASTM D-86, obteniéndose los datos siguientes¹.

Volumen ASTM D-86

<u>%</u>	<u>°C</u>
10	305,88
30	379,39
50	404,08
70	416,10
90	426,72
95	429,29
98	430,83

¹ La destilación ASTM D-86 es una prueba de destilación en laboratorio que se limita a fracciones livianas, con punto final de destilación máximo de 550°F. El Residual o Crudo Reducido requiere un método de destilación al vacío D-1160

Para uniformizar los datos se utilizó un software de procesos (Chemcad) que crea pseudocomponentes es decir un conjunto de subproductos cuya destilación se encuentra dentro del rango de la curva de destilación del producto original y con estos subproductos se simula una destilación atmosférica (ASTM D-86)

De la tabla precedente se observa, que las temperaturas a 10% y 90% de la destilación son mayores a los máximos recomendados en la tabla N°5 (280°C y 380°C respectivamente).

Son aceptables los valores de azufre, metales alcalinos (sodio, potasio y calcio), otros metales, sal, punto de fluidez y punto de inflamación del Petróleo Industrial N° 6, respecto a las recomendaciones del fabricante.

Se descarta, por lo tanto, la posibilidad del uso de Petróleo Industrial N° 6 como producto puro o con tratamiento químico, así es necesaria la mezcla con un producto ligero para disminuir la gravedad específica del producto y las temperaturas para 10% y 90% de destilación.

Su uso ocasionaría serios problemas por tener un encendido pobre, mayor calentamiento, humos, mayor cantidad de cenizas formadas internamente.

Uso de Crudo Liviano (Alternativa N°4)

Los resultados de los análisis demostraron que muchas de las propiedades del Crudo Ligero cumplen los requerimientos del fabricante para Petróleo Crudo.

Según se observa en la tabla N° 6, las propiedades como la gravedad específica, punto de fluidez, 10% de destilación, 90% de destilación, fracción de gasolina y nafta, fracción de Kerosene y destilados, azufre, viscosidad 38°C, sodio, aluminio, silicio, sal, cenizas, índice de cetano (calculado), agua y sedimentos y residuos de carbón se encuentran dentro de los límites sugeridos. Las concentraciones de vanadio y níquel a pesar de exceder las recomendaciones están muy cercanas al valor recomendado.

TABLA N° 6
COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DEL CRUDO
CON LAS ESPECIFICACIONES PARA MOTORES

Propiedad	Método ASTM	Crudo	Crudo Lab 1	Crudo Lab 2
Gravedad API 15,6 °C	D-287	30 a 45	34,7	34.4
Pto de Inflamación °C	D-93	T _{amb} -6°C	No aplica	<-5
Pto de Fluidéz °C	D-97	< T _{amb}	-24	
Destilación °C			D-86	
Pto Inicial			78	98
5%			110	111
10%		Máx. 282	133	138
30%			240	233
50%			320	312.5
70%			311	361
90%		Máx. 380		370
Pto Final				
Azufre % peso	D-1552	0.5	0,19	
Viscosidad 38°C, cSt	D-445	1.4 a 20	7,83	
Viscosidad 50°C, cSt	D-445		6,03	
Contenido de Metales				
Vanadio ppm	ICP	4	4,38	
Sodio ppm	ICP	10	4.30	
Potasio ppm	ICP		0,70	
Calcio ppm	ICP		0,34	
Plomo ppm	ICP		0,00	
Aluminio ppm	ICP	1	0.00	
Silicio ppm	ICP	1	0,03	
Níquel ppm	ICP	1	6,72	
Sal Lb/Mba	D-3230	100	1.0	
Gomas y resinas mg/100ml	D-381	10	No aplica	
Cenizas % peso	D-482	0.1	0,01	
Índice de Cetano	D-976	35	No aplica	53.3
Punto de Anilina, °C	D-613			
Aromáticos % vol	D-1319	35	No aplica	
Agua y Sedimentos % vol	D-1796	0.5	0,05	
Residuo de Carbón (Conradson)	D-189	4.58	4,39	
Corrosión, lámina de cobre	D-130	N3	No aplica	

Existen dos maneras de disminuir los efectos del vanadio sobre el material de los motores: a) por mezcla y b) por aditivación.

La mezcla con un producto ligero (Diesel 2 ó Kerosene) reducirá la concentración de Vanadio en la mezcla hasta los valores máximos

permisibles, de manera que se minimice los volúmenes requeridos de destilados medios.

La aditivación inhibe la acción del vanadio en la cámara de combustión. Al respecto, se efectuaron consultas a los fabricantes nacionales e internacionales, los cuales coincidieron en el uso de inhibidores de corrosión a base de magnesio como se explica en el punto 9.2.1

6.3.2. Turbinas

Uso de Crudo Liviano (Alternativa N°4)

Las recomendaciones de calidad para de los fabricantes de turbinas se ciñen a limitar la presencia de contaminantes (metales, cenizas, agua, azufre) y viscosidad del combustible. En la Tabla 7 se muestran los resultados de análisis

TABLA N° 7
COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DEL CRUDO
CON LAS ESPECIFICACIONES PARA TURBINAS

Propiedad	Método ASTM	Especif de Fabricante	Crudo Lab 1	Crudo Lab 2
Gravedad API 15,6 °C	D-287		34,7	34.4
Pto de Inflamación °C	D-93		No aplica	<-5
Pto de Fluidez °C	D-97		-24	
Destilación °C			D-86	
Pto Inicial		Mín. 90	78	98
5%			110	111
10%			133	138
30%			240	233
50%			320	312.5
70%			311	361
90%				370
Pto Final				
Azufre % peso	D-1552	1.0	0,19	
Viscosidad 38°C, cSt	D-445	2-7.5	7,83	
Contenido de Metales				
Vanadio ppm	ICP	1	4,38	
Sodio ppm	ICP	1	4.30	
Potasio ppm	ICP		0,70	
Calcio ppm	ICP	1	0,34	
Otros				
Sal Lb/Mba	D-3230		1.0	

Propiedad	Método ASTM	Especif de Fabricante	Crudo Lab 1	Crudo Lab 2
Gomas y resinas mg/100ml	D-381		No aplica	
Cenizas % peso	D-482	0.001	0,01	
Indice de Cetano	D-976		No aplica	53.3
Punto de Anilina, °C	D-613			
Aromáticos % vol	D-1319	35	No aplica	
Agua y Sedimentos % vol	D-1796	0.5	0,05	
Residuo de Carbón (Conradson)	D-189	0.2	4,39	
Corrosión, lámina de cobre	D-130	N3	No aplica	

Del análisis no es recomendable el uso del Crudo liviano por no cumplir con la restricción de metales y residuo al carbón.

Uso de Petróleo Industrial N° 6 (Alternativa N°2)

El Petróleo Industrial N° 6 , excede el rango de viscosidades sugerido por los fabricantes y los valores máximos de Vanadio, Residuo de Carbón y Punto Inicial de destilación, por lo que al igual que para los motores de combustión interna, deberá considerarse su mezcla con destilados medios. No se recomienda su uso como combustible.

TABLA N° 8

COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DEL PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 6 CON LAS ESPECIFICACIONES PARA TURBINAS

Propiedad	Método ASTM	Especificación de Fabricante	ASTM	Petróleo Industrial N° 6
Azufre % peso	D-1552	1		0.37
Viscosidad 38°C, cSt	D-445	2 a 7,5		194
Punto inicial, mín.		90		166
Vanadio ppm	D-2788	1	1	8.31
Sodio ppm	D-2788	1	1	5.6
Calcio ppm	D-2788	1	2	0.79
Plomo ppm	D-2788		1	0.53
Otras trazas ppm	D-2788		5	
Cenizas ppm	D-482	100		200
Residuo de Carbón, máx.		0.2		8.21
Agua y Sedimentos % vol	D-1796	0,05	0,00001	0.05

7. MEZCLAS TEÓRICAS

7.1. BASES PARA EL MODELO DE SIMULACIÓN

Para el estudio de las alternativas 1, 3, 5 y 6 con mezclas de Petróleo Crudo y/o Petróleo Industrial N° 6 con destilados (Kerosene y Diesel) se desarrolló un modelo matemático para encontrar las mezclas teóricas que, previa verificación con ensayos a nivel laboratorio, puedan ser usadas como combustible alternativo.

Las propiedades de mezclas pueden ser estimadas con mucha aproximación utilizando correlaciones sobre la base de los productos puros. Muchas de las propiedades de mezclas obedecen a una relación directa con el porcentaje en volumen o masa y otras utilizan índices de mezclas. Los índices de mezclas son factores que corrigen la relación entre las propiedades de la mezcla y la de los compuestos puros, en forma proporcional al porcentaje en volumen.

Las relaciones utilizadas para el cálculo teórico de mezclas se presenta en la tabla 9:

TABLA N° 9
RELACIONES DE MEZCLAS

Propiedad	Relaciones de Mezclas	Base de Mezcla
Gravedad API 15,6 °C		
Gravedad específica	Propiedad	Peso
Pto de Inflamación, °C	Índice de Mezcla	Volumen
Pto de Fluidez, °C(°F)	Índice de Mezcla	Volumen
Destilación, °C(°F)		
Azufre, % peso	Propiedad	Peso
Viscosidad 38°C, cSt	Índice de Mezcla	Volumen
Contenido de Metales		
Vanadio, ppm	Propiedad	Peso
Sodio, ppm	Propiedad	Peso
Potasio, ppm	Propiedad	Peso
Calcio, ppm	Propiedad	Peso
Plomo, ppm	Propiedad	Peso
Aluminio, ppm	Propiedad	Peso
Silicio, ppm	Propiedad	Peso

Propiedad	Relaciones de Mezclas	Base de Mezcla
Níquel, ppm	Propiedad	Peso
Fierro, ppm	Propiedad	Peso
Otras trazas, ppm	Propiedad	Peso
Otros		
Sal, Lbs/Mba	Propiedad	Peso
Gomas y resinas, mg/100ml	Propiedad	Peso
Cenizas, % peso	Propiedad	Peso
Índice de Cetano	Índice de Mezcla	Volumen
Aromáticos, % vol.	Propiedad	Volumen
Agua y Sedimentos, % vol.	Propiedad	Volumen
Residuo de Carbón (Con.), % peso	Propiedad	Peso
Corrosión, lámina de cobre		

Sin embargo, algunos de los métodos ASTM para determinación de las propiedades no eran aplicables al Petróleo Crudo y/o sus productos. Para estos casos se utilizaron correlaciones o simuladores lo que permitió obtener los siguientes datos adicionales:

Punto de Inflamación: El punto de inflamación reportado por Laboratorio 2 fue -5°C

Punto de Fluidéz: Para los cortes livianos la temperatura de fluidéz es menor que para su Petróleo Crudo de origen. Por lo tanto, todas sus mezclas cumplirán con holgura las especificaciones de los fabricantes.

Destilación: Se repitió la curva de destilación D86 en Laboratorio 2

- Petróleo Crudo:

Volumen %	ASTM D-86 C
P. Inicial	98
5	111
10	138
50	312.5
70	361
80	370

Se completó la curva de destilación con los resultados del simulador.

- Petróleo Industrial N° 6 :

Volumen	ASTM D-86
<u>%</u>	<u>°C</u>
10	305,88
20	355,68
50	404,08
70	416,10
90	426,72
95	429,29
98	430,83

Gomas y Resinas: No es posible estimarlo en forma teórica, debe ser obtenido por análisis. No se aplica al Petróleo Crudo, porque junto con las gomas y resinas precipitan otros compuestos como asfaltenos que deben ser separados del material residual.

Índice de Cetano: Se determina para todos los cortes excepto Petróleo Industrial N° 6 con FVT > 900°F y cortes con FVT < 200°F, conociendo el API y ASTM-50%.

- Petróleo Crudo: 54.4
- Residual: 20.5

Posteriormente, se realizaron los análisis para el Petróleo Crudo, siendo el índice de Cetano 53.3 muy similar al cálculo teórico.

FVT (Final Volume Temperature)= Punto Final de Destilación .

Aromáticos: Se analizó el contenido de aromáticos según norma ASTM D 1319 para el Diesel, hallándose 17.2 en % en volumen.

Residuo de Carbón Condronson en 10% fondos (ASTM D189): Fue determinado mediante análisis, tanto para el Diesel como para el Kerosene. Los resultados fueron los siguientes:

- Diesel: 0.52% masa
- Kerosene: 0.028% masa

Corrosión: Será determinada en forma experimental en las mezclas elegidas.

La proporción de destilados medios que deberían contener las mezclas, para reducir el nivel de sodio y potasio a los límites especificados por los fabricantes, harían al combustible elegido una solución poco rentable. Por lo tanto, se consideró someter las mezclas a un proceso de aditivación, lavado y centrifugado, considerándose una eficiencia conservadora del 80% del proceso (los suministradores de aditivos y tecnología indicaron en su literatura niveles de eficiencia superiores al 90%), pero en la práctica solo se encontró un máximo de 62%.

7.2. FORMULACIONES DE MEZCLAS TEÓRICAS

Se realizaron mezclas teóricas de las mezclas Petróleo Crudo/Diesel, Petróleo Crudo/Kerosene, Residual/Diesel y Residual/Kerosene en proporciones crecientes en 10% en volumen del producto ligero, calculando las propiedades en función a las propiedades de mezclas de la tabla 9 de las cuales se eligieron las mezclas que mejor cumplían las especificaciones de los fabricantes.

Se identificaron mezclas cuyas propiedades estimadas cumplían la totalidad de los requerimientos de los fabricantes. Las mezclas se seleccionaron tratando de minimizar el uso de destilados medios por razones de costo.

La simulación de las propiedades de las mezclas se dividió en dos grupos:

- Mezclas sin tratamiento
- Mezclas con tratamiento químico

7.2.1. Mezclas sin Tratamiento.

Motores de Combustión Interna

Para las mezclas de Petróleo Crudo, el factor limitante en la formulación de combustible para los motores de combustión interna fue el contenido de vanadio.

En el caso de las mezclas de Residual, la proporción de mezcla dependía de la temperatura de 90% destilado. Sin embargo, dado que no es aplicable la destilación ASTM D-86 para mezclas de Petróleo Industrial, estos valores fueron calculados con la ayuda de un simulador.

Turbinas de Gas

En las mezclas de Petróleo Industrial N° 6 y Diesel o Kerosene sin tratamiento, el contenido de Vanadio determina la proporción de los componentes en la mezcla.

7.2.2. Mezclas con Tratamiento.

Motores de Combustión Interna

Considerando la acción del inhibidor de Vanadio, el Petróleo Crudo podría ser utilizado puro sin más tratamiento que la inyección de este aditivo.

Las mezclas de Petróleo Industrial N° 6 considerándose la adición de un inhibidor de Vanadio, están supeditadas al punto de 90% de destilación calculadas por simulación.

Turbinas de Gas

El factor restrictivo tanto para las mezclas de Petróleo Crudo como para las de Petróleo Industrial N° 6 fue la viscosidad.

Todos los cálculos no consideraron la restricción del contenido de sodio y potasio, al considerarse que este sería reducido por medio del lavado.

Inicialmente, se consideró una eficiencia de extracción de 80% para el tratamiento de reducción de sodio y potasio en los productos puros y mezclas.

Posteriormente, debido a las rectificaciones de Laboratorio I respecto a las concentraciones de sodio y potasio en las muestras puras y los resultados de las pruebas experimentales con el aditivo demulsificante, se modificaron las composiciones de las soluciones teóricas óptimas para tratamiento, considerando una eficiencia real de lavado de 30% para el Petróleo Crudo y de 62.5% para Petróleo Industrial N° 6.

Para ambos grupos las mezclas seleccionadas se presentan en el capítulo mezclas seleccionadas.

8. ENSAYOS PARA ELIMINACIÓN DE METALES ALCALINO TÉRREOS

Como se precisó anteriormente, se descarta el uso de Petróleo Industrial N° 6 puro tratado como combustible alternativo tanto para las turbinas como para los motores de combustión interna.

El Petróleo Crudo y las mezclas de este y de Petróleo Industrial N° 6 con Diesel y Kerosene tratadas para la eliminación de metales alcalino térreos, requieren un menor porcentaje de destilados medios para cumplir todas las especificaciones requeridas por los fabricantes, por lo que, se analizaron los beneficios adicionales del tratamiento de las mezclas y su costo frente a las mezclas sin tratamiento.

Los tratamientos para eliminación de los metales alcalino térreos comúnmente usados para el Petróleo Crudo y las mezclas se restringen a dos procesos comerciales:

- a.- Separación electrostática
- b.- Centrifugación precedida de lavado usando aditivos químicos.

8.1. SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA

Es un proceso muy usado en la industria petrolera para el desalado de Petróleo, se basa en la migración de partículas cargadas ante la presencia de un campo eléctrico. El Petróleo Crudo se mezcla con agua para aumentar el medio electrolítico y se calienta a una temperatura para aumentar la movilidad iónica. En un recipiente horizontal, mediante proceso batch o continuo, se aplica un campo eléctrico para la separación del sodio que se adhiere a los polos electronegativos.

8.2. LAVADO Y CENTRIFUGACIÓN

Es el proceso más usado para la reducción de pequeñas cantidades de metales alcalino térreos. Se adiciona agua pura y un agente demulsificante a temperaturas moderadas de 90°C para Petróleo Industrial N° 6, y de

70°C para Petróleo Crudo, y después de lograr un contacto íntimo con el agua presente en la solución, la fase acuosa se separa mediante centrifugación.

Debido a que no se cuenta con equipos de separación electrostática a nivel laboratorio y siendo el tratamiento mediante lavado el proceso comercial recomendado para los niveles de sodio presentes en las muestras, se utilizó esta última técnica como base de los ensayos de tratamiento.

8.2.1. Lavado de Muestras

La técnica de lavado implica el contacto del combustible con agua caliente y un agente demulsificante para su posterior separación mediante centrifugado. Se especifican procesos de una o dos etapas de acuerdo a los niveles de contaminación del combustible.

La adición de agua permite aumentar la fase de separación y disminuir la concentración de sodio. Los requerimientos de calidad del agua para lograr los niveles de extracción requeridos para este servicio obligan a utilizar un agua destilada.

8.2.2. Uso de Demulsificante

La fuerza creada en los separadores centrífugos mejora la coalescencia de las gotas de agua, resultando en una buena separación de esta del Petróleo Crudo. Sin embargo, debido a la estricta exigencia en la calidad del producto (menos de 1 ppm de sodio más potasio), es necesaria la adición de químicos que mejoren la coalescencia y por lo tanto la extracción de estos metales.

El agente demulsificante es, por lo general, una mezcla de líquidos orgánicos de superficie activa, adicionados para contrarrestar las fuerzas

que forman la emulsión combustible-agua y promover la coalescencia del agua original con el agua adicionada.

Los demulsificantes tradicionales consisten en resinas fenólicas epoxiladas ó alcohoxiladas disueltas en un solvente aromático. También pueden usarse sales de amonio cuaternario. Estos productos son tóxicos y peligrosos para el medio ambiente.

El aditivo seleccionado utiliza polímeros que permiten la separación de un contaminante específico de una solución, encapsulándolo con una parte de su estructura, a manera de formar pequeñas gotas que se unen entre sí hasta alcanzar diámetros más grandes que caen por gravedad ó por separación centrífuga.

La estructura del aditivo está constituida por un conjunto de polímeros con diferentes funciones, todas ellas importantes en el proceso de demulsificación, y éstos son:

Floculantes: Tienen la habilidad de atraer las gotas de agua menores a un micrón. Estos polímeros tienen alto peso molecular y propiedades catiónicas, por lo que atraen las gotas de agua que contienen altas concentraciones de las trazas metálicas

Polímeros Coalescentes: Mejoran la unión de las gotas atraídas por el floculante.

Polímeros Híbridos: Tienen propiedades intermedias a las arriba descritas.

Agentes Humectantes: Mejoran el efecto de los otros polímeros actuando como dispersantes

Polímeros Formadores de Fases: Son polímeros solubles en agua que tienen la capacidad de formar, a elevadas temperaturas, una fase que contiene el agua y los sedimentos del Petróleo, que para otros casos termina en el agua residual, creando una fase limpia de agua.

El demulsificante utilizado para los ensayos es específico para Petróleo Crudos y Residuales. Las principales propiedades del producto se resumen a continuación:

Presentación:	Líquido Transparente
Densidad a 20°C:	0.995 ± 0.005
Ph a 20°C:	9.0 ± 0.5
Viscosidad a 25°C:	67 ± 6
Punto de Enturbiamiento durante Calentamiento:	50°C
Solubilidad:	Soluble en agua

8.2.3. Efecto de la Temperatura

La temperatura cumple varias funciones durante la operación de lavado:

- Mejora la operación del Demulsificante.
- Modifica la densidad del combustible y el agua, aumentando la diferencia entre estos y por lo tanto la separación de fases.
- Disminuye la viscosidad haciendo más fácil la agitación.
- Disminuye la potencia requerida para el agitador.

8.2.4. Agitación

Dado que la efectividad de todo el proceso de lavado se basa en la dilución del agua original del combustible en el agua adicionada, es esencial que los mezcladores provean buenas condiciones para los siguientes procesos:

- Difusión de las moléculas del demulsificante en la superficie de las gotas de agua.

- Reacción entre el demulsificante y el coloide de protección para romper la capa protectora (piel).
- Contacto y coalescencia entre las gotas del agua contenida originalmente en el combustible y las gotas del agua adicionada.

Se recomienda el uso de un agitador de baja velocidad, de múltiples etapas, con agitador tipo paletas y largos tiempos de residencia, para asegurar un buen contacto entre las gotas de agua y evitar la formación de emulsiones en el combustible.

8.2.5. Separación por Centrifugado y sus Parámetros

La separación de sólidos de medios líquidos puede ser alcanzada mediante varios procesos. En la sedimentación, la fuerza de gravedad empuja a las partículas sólidas de gran masa a dirigirse hacia el fondo del recipiente. Pero, cuando el diámetro de la partícula es muy pequeño, son necesarias para la centrifugación, una diferencia pequeña entre las densidades de los fluidos, una tensión superficial elevada y fuerzas electrostáticas.

La aceleración radial provocada por una rotación rápida destruye el equilibrio de fuerzas que permiten mantener las partículas en equilibrio. Estas partículas tienen velocidades en función a su masa y necesitan un tiempo para llegar a la zona inferior de captación.

La velocidad de las partículas se rige mediante la ley de stokes:

$$V = \frac{d^2 (S-SI) \cdot Cg}{18\mu}$$

Donde: V = velocidad de las partículas
d = diámetro de las partículas
(S-SI) = diferencia de densidades
C = fuerza centrífuga
g = aceleración gravitacional

Mediante la temperatura es posible lograr aumentar la diferencia de densidades mejorando la performance de la separación. De igual modo, al disminuir la viscosidad se reduce la fuerza centrífuga requerida para lograr la separación.

En la Tabla N°10 se observan las densidades del Petróleo Crudo, el agua, los asfaltenos y las parafinas a diferentes temperaturas, dentro del rango de operación de la centrífuga utilizada para los ensayos. Se ha calculado también la diferencia de densidades de los hidrocarburos con el agua presente.

Se advierte que, a medida que la temperatura aumenta, la diferencia entre las densidades del agua con el Petróleo Crudo y las parafinas aumenta. Siendo éste el líquido más pesado, se debería observar en el fondo del tubo de ensayo después de una centrifugación. Los asfaltenos se presentan como la fase pesada hasta los 35°C cuando comienzan a ser más ligeros que el agua, aunque su diferencia no es significativa.

En la práctica, el agente demulsificante se adhiere a las partículas de sodio y las aglomera formando una fase pesada en la que están presentes el agua, las parafinas y asfaltenos, al fondo una pasta de color marrón negruzco y el Petróleo Crudo se separa en la parte superior. Durante los ensayos se notó la presencia de dichas fases.

8.2.6. Centrífugas

Se utilizó una la centrífuga de laboratorio, que además de la centrífuga de acero inoxidable propiamente dicha cuenta con un sistema de control que permite fijar la temperatura del aparato con una variación de $\pm 1^\circ\text{C}$, mediante un calentador de resistencia tipo plato en la tapa del recipiente. Se utilizó una termocupla como elemento sensor. El sistema de control

permitía además controlar las revoluciones (rpm) y el tiempo de centrifugación.

La centrífuga estaba equipada con tubos de ensayos de 5, 10 y 80 ml especiales para cada tipo de centrifugación.

8.3. REALIZACIÓN DEL TRATAMIENTO

Después de elegir las formulaciones de mezclas que, bajo tratamiento y considerando una eficiencia de extracción de 80% cumplirían las especificaciones de contenido de sodio más exigentes (contenido de sodio + potasio < 1 ppm – turbinas), se prepararon dichas muestras a nivel laboratorio en cantidad suficiente para obtener 1 galón de muestras tratadas.

Se trataron, con 1 y 2 lavados, 8 muestras con las siguientes formulaciones:

- Petróleo Crudo con 1 lavado
- Petróleo Crudo con 2 lavados
- Mezcla de 90% Petróleo Crudo + 10% Diesel 2 con 2 lavados
- Mezcla de 80% Petróleo Crudo + 20% Diesel 2 con 2 lavados
- Mezcla de 55% Kerosene + 45% Petróleo Industrial N° 6 con 2 lavados
- Mezcla de 70% Diesel 2 + 30% Petróleo Industrial N° 6 con 2 lavados
- Petróleo Industrial N° 6 con 1 lavado
- Petróleo Industrial N° 6 con 2 lavados

Siendo los niveles requeridos de sodio y potasio en las muestras tratadas muy bajas, la calidad del agua para el tratamiento resultó un elemento crucial, por lo que se consiguió agua destilada de nivel reactivo con concentración de sólidos totales de 11 ppm.

Para el control de temperatura se utilizó un sistema de control que permitía mantener la temperatura constante con un rango de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. El sistema constaba de una resistencia, una sonda de contacto para líquidos (termocupla tipo J) y un controlador digital con panel indicador.

Para lograr una agitación continua y vigorosa se utilizó un mezclador tipo turbina de mango largo.

Todos los materiales utilizados fueron de vidrio resistente al fuego y los envases para el transporte en lata o plástico.

De acuerdo al procedimiento recomendado por el fabricante del demulsificante, se realizó el lavado de las muestras mediante los siguientes pasos:

Se calentó 1 litro de Petróleo Industrial, Petróleo Crudo o mezcla a tratar en un vaso de 2000ml agitando para homogenizar la solución. La temperatura de calentamiento se mantuvo entre 60 y 75°C para Petróleo Crudo y mezclas y entre 80 y 100 °C para Petróleo Industrial N° 6 puro.

Después de retirar del fuego, se adicionó, sin dejar de agitar, 200-250 ppm de demulsificante equivalentes a:

250 ppm:

<u>R-6</u>	<u>Crudo</u>
0.24 ml	0.21 ml

200 ppm:

<u>R-6</u>	<u>Crudo</u>
0.19 ml	0.17 ml

Luego de una agitación vigorosa, se vertieron 100 ml de agua a 98°C, equivalentes a un 10% del volumen del combustible, continuando la agitación de la solución por un lapso adicional.

Se llenaron los tubos de ensayo de 80 ml con el combustible caliente, procediéndose al centrifugado de acuerdo a los siguientes parámetros:

	<u>Temperatura</u>	<u>Rpm</u>	<u>Velocidad</u>	<u>Tiempo</u>
Crudo	60-75 °C	3000	60%	20 min
R-6	80-100°C	3000	60%	20 min

Después de retirar los tubos de ensayo de la centrifuga, se pipeteó el combustible hasta 1 cm del límite de la emulsión a la lata rotulada "Petróleo Crudo/ Petróleo Industrial N° 6 Lavado".

La emulsión resultante se almacenó separadamente para su caracterización.

Se repitió el procedimiento hasta obtener la cantidad deseada.

TABLA N°10
COMPARACION DE DENSIDADES DE AGUA E HIDROCARBUROS

Temperatura			Densidad de agua		Densidad Crudo REM			Densidad Asfaltenos			Densidad Parafinas pesadas		
°F	°C	°K	g/cm ³	Grav. API	g/cm ³	Grav. API	Diferencia con agua g/cm ³	g/cm ³	Grav. API	Diferencia con agua g/cm ³	g/cm ³	Grav. API	Diferencia con agua g/cm ³
59	15	288,2	0,9976	10,337	0,8519	34,602	0,1457	-0,0137	8,417	1,0113	0,9105	23,908	0,0871
68	20	293,2	0,9963	10,519	0,8479	35,374	0,1484	-0,0103	9,068	1,0066	0,9063	24,631	0,0901
77	25	298,2	0,9951	10,704	0,8440	36,158	0,1511	-0,0069	9,728	1,0019	0,9021	25,364	0,0930
86	30	303,2	0,9937	10,892	0,8399	36,954	0,1537	-0,0035	10,398	0,9972	0,8978	26,108	0,0959
104	40	313,2	0,9911	11,275	0,8320	38,578	0,1591	-0,0034	11,767	0,9877	0,8892	27,629	0,1019
122	50	323,2	0,9883	11,671	0,8239	40,249	0,1645	-0,0103	13,174	0,9781	0,8806	29,192	0,1078
140	60	333,2	0,9855	12,078	0,8157	41,966	0,1698	-0,0171	14,620	0,9684	0,8719	30,798	0,1137
158	70	343,2	0,9826	12,500	0,8075	43,728	0,1751	-0,0240	16,105	0,9586	0,8631	32,447	0,1196
176	80	353,2	0,9797	12,935	0,7993	45,536	0,1804	-0,0308	17,628	0,9489	0,8543	34,138	0,1254
194	90	363,2	0,9766	13,386	0,7910	47,390	0,1856	-0,0376	19,189	0,9390	0,8454	35,873	0,1312
212	100	373,2	0,9735	13,852	0,7827	49,289	0,1908	-0,0443	20,789	0,9292	0,8365	37,650	0,1370

9. EFECTO DE LOS METALES

La corrosión y la formación de depósitos son los principales problemas que acarrea el uso de combustibles pesados en turbinas y motores de combustión interna. Los combustibles pesados contienen cantidades relativamente grandes de elementos además del oxígeno, carbono e hidrógeno.

Parte de estos elementos son emitidos en forma de gases, como NO_x y SO_x , o en forma de partículas o humos. El resto permanecen en las turbinas o motores Diesel en forma de depósitos que pueden ser o no corrosivos y pueden o no impedir la transferencia de calor.

Los depósitos pueden ser divididos en dos categorías: aquellos que son húmedos, de bajo punto de fusión y difíciles de despegar, y aquellos que son secos y friables y fáciles de ser removidos.

El azufre, vanadio, níquel sodio y potasio son los elementos presentes en las cenizas de la combustión de los combustibles fósiles pesados y son los principales responsables de la corrosión y formación de depósitos. La composición de estas cenizas varía ampliamente, pero se han encontrado compuestos complejos de estos elementos de bajo punto de fusión. Estos depósitos pegajosos capturan, como ya se dijo, las cenizas, hollín y coque. La presencia de estos depósitos impiden la transferencia de calor y originan problemas de corrosión.

Los compuestos de vanadio, sodio y potasio (en ausencia de óxidos de azufre) forman compuestos de bajo punto de fusión, entre 950 y 1600°F, y se asocian directamente a la corrosión por alta temperatura, presente a temperaturas superiores a 540°C (1000°F). Los gases de las turbinas y motores de combustión interna, fácilmente superan los 1200°F.

Los puntos de fusión de estos compuestos son los siguientes:



$5\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_4 \cdot 11\text{V}_2\text{O}_5$	995 °F
$10 \text{Na}_2\text{O} \cdot 7\text{V}_2\text{O}_5$	1067 °F
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{V}_2\text{O}_5$	1157 °F
V_2O_5	1247 °F
$3\text{MgO} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$	2174 °F

Como se aprecia, el punto de fusión de los compuestos de vanadato (V_2O_5) con presencia de sodio son menores al punto de fusión del vanadato puro, por lo que la presencia del sodio (o su reemplazo el potasio) hacen más propenso al equipo a este tipo de corrosión.

El mecanismo de corrosión no es del todo conocido, pero la hipótesis más aceptada indica que los vanadatos aceleran la corrosión por que las cenizas conteniendo vanadio inician la corrosión destruyendo la capa protectora por acción de las sales fundidas y esta continua por la reacción de la superficie activa del metal con el oxígeno que es absorbido del material fundido.

La presencia de una fase líquida en la superficie del metal es necesaria para que la corrosión suceda a velocidades considerables. La presencia de sales fundidas iónicas conductoras transfieren los electrones del ánodo al cátodo. Las áreas del metal cubiertas con las sales fundidas son más aniónicas que aquellas áreas bajo depósitos sólidos. Los puntos donde se desarrolla la corrosión se ubican más a los lados que en línea recta de la dirección de salida de los gases.

El calcio no es peligroso como iniciador de la corrosión, en realidad, éste sirve para inhibir la acción corrosiva del vanadio. Sin embargo, el calcio puede producir depósitos duros y de difícil remoción en períodos de mantenimiento de las turbinas.

El plomo produce corrosión y en adición éste puede estropear los efectos benéficos de inhibición de los aditivos de magnesio en la inhibición de vanadio.

9.1. COMBUSTIBLE ALTERNO

El combustible alterno seleccionado en el presente estudio, ha sido tratado mediante lavado reduciendo el contenido de metales alcalino térreos. Los resultados de laboratorio indicaron que el valor encontrado para las mezclas enviadas contenían niveles de estos elementos ligeramente superiores a los especificados por los fabricantes de las turbinas.

Se consultó la opinión de los suministradores de aditivos para tratamiento de combustibles, quienes consideraron que las alternativas propuestas son buenas y los niveles de sodio y potasio son bajos, debiéndose utilizar un tratamiento para el vanadio.

9.2. MÉTODOS DE CONTROL DEL EFECTO DE VANADIO

Literatura publicada² da cuenta de varias investigaciones que buscan resolver el problema. Estos intentos incluyen:

- El tratamiento del combustible para reducir o eliminar la concentración de estos elementos. La centrifugación reduce el contenido de cenizas, pero debido a que el vanadio está presente en el combustible como un compuesto orgánico soluble éste no puede ser removido por dicho procedimiento.
- Evaluación de aleaciones conocidas y desarrollo de aleaciones más resistentes. Dado que los equipos se encuentran en operación esta alternativa no es aplicable para esta investigación.
- Evaluación de recubrimientos protectores. Estos métodos incluyen el rociado de metal, profundización, electro platinado, deposición en fase

² Hidroquímica Industrial. CORROSION. Papeles técnicos de la empresa Baker sin editar. Pág. 18

vapor, recubrimiento con cerámica y cladding³. Se han realizado varias experiencias siendo las de mejores resultados: la impregnación de silicona en aceros al carbono (la adherencia falla en aleaciones resistentes a mayores temperaturas), cromización del acero al carbono AISI 430 y los recubrimientos cerámicos. Sin embargo, los procesos de aplicación son excesivamente caros considerando que se trata de técnicas especializadas.

- Los cambios en las condiciones de diseño y operación. Se realizaron estudios en laboratorio que comprobaron que la reducción del exceso de aire durante la combustión a 0.5% producía reducciones dramáticas en la extensión de la corrosión por vanadio en acero de baja aleación.
- El uso de aditivos que combinan el pentóxido de vanadio para formar compuestos inertes (de mayor punto de fusión). Las pruebas indican que el mejor tipo de aditivo son los óxidos de magnesio seguido por el cromo, aluminio y hierro.
- Intentos para establecer el mecanismo de corrosión

9.2.1. Inhibidores de corrosión

Los Inhibidores de corrosión sirven para desarrollar una acción antidepósito en la cámara de combustión. El aditivo debe reaccionar con las cenizas del combustible, dando lugar a compuestos de elevada temperatura de fusión, de esta manera evita la aglomeración de partículas de hollín y la formación de cenizas, manteniendo las superficies limpias,

³ El cladding se fabrica rolando en caliente una lámina de acero al carbono o de acero de baja aleación con una lámina de una aleación con alta resistencia a la corrosión, las que han sido previamente unidas con soldadura en los bordes. En el rolado a alta temperatura, la presión crea una fase sólida entre la capa posterior (de acero al carbono) y el metal de cladding. Los materiales usados para el cladding son aceros con cromo, aceros de cromo-níquel, níquel y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, entre otros.

minimizando de esta manera los problemas de corrosión y por lo tanto permiten prolongar la vida del equipo.

Inhibidor de corrosión de Vanadio

Se ha efectuado consultas a los fabricantes de estos productos, los cuales han recomendado para la calidad del combustible alternativo seleccionado, el uso de un Inhibidor de vanadio.

La literatura técnica alcanzada de los fabricantes⁴, indica que son productos organometálicos a base de Magnesio, con un contenido de magnesio activo entre 10 - 20 %.

Los inhibidores de corrosión a base de Magnesio, por lo general se utilizan en una proporción de 3 a 1 (3 de Magnesio por una parte de vanadio en peso), con esto se consigue la formación de Vanadatos de Magnesio de punto de fusión de 1000°C y, de esta manera, las cenizas pasan por la máquina sin depositarse.

Aplicación en Turbinas de Gas

Es usado directamente junto con el combustible, es añadido junto con el agua de lavado en el proceso de purificación por centrifugado y circulación en caliente, estos factores aseguran un eficiente mezclado.

La dosificación es de 15 ppm de producto en peso por cada ppm de vanadio presente en el combustible. Esto permite tener una relación de 3 partes de magnesio por 1 parte de vanadio

Para el caso en estudio, teniendo una concentración de vanadio de 4.38 ppm de vanadio en el Petróleo Crudo se requerirá 65.7 ppm de aditivo

⁴ SFA INTERNATIONAL. Fax 8 de marzo de 1999.

Aplicación en Motores de Diesel

Se puede usar directamente junto con el combustible. Si éste es purificado por técnicas de lavado, se recomienda usar en algunos casos después de la purificación.

La dosificación es de 5 ppm de producto en peso por cada ppm de vanadio presente en el combustible. Esto permite tener una relación de 1 parte de magnesio por 1 parte de vanadio

10. NÚMERO DE CETANO Y ADITIVOS

Los compuestos más comúnmente utilizados para mejorar el número de cetano es el 2-etil-hexil nitrato y el iso-octil nitrato. El dibutil peróxido, ciertos glicoles y otras nitroparafinas son también efectivas para mejorar el índice de cetano, pero no son tan efectivos como el iso-octil nitrato.

Estos compuestos levantan el número de cetano al ayudar la ignición del combustible y controlando el tiempo de ignición.

El tratamiento produce notables efectos en los primeros 1000 ppm de aditivo adicionado, siendo más efectivo para destilados con un alto número de cetano inicial.

Para el presente estudio, no se requieren aditivos para mejorar el número de cetano al ser este superior al mínimo especificado (38°C).

11. VISCOSIDAD Y ACONDICIONAMIENTO

La viscosidad del combustible deberá ser la óptima para lograr la atomización requerida para la combustión. Dependiendo del tipo de combustible se determina la temperatura a la cual este debe ser calentado. La figura siguiente muestra la variación de la viscosidad con la temperatura para diferentes hidrocarburos.

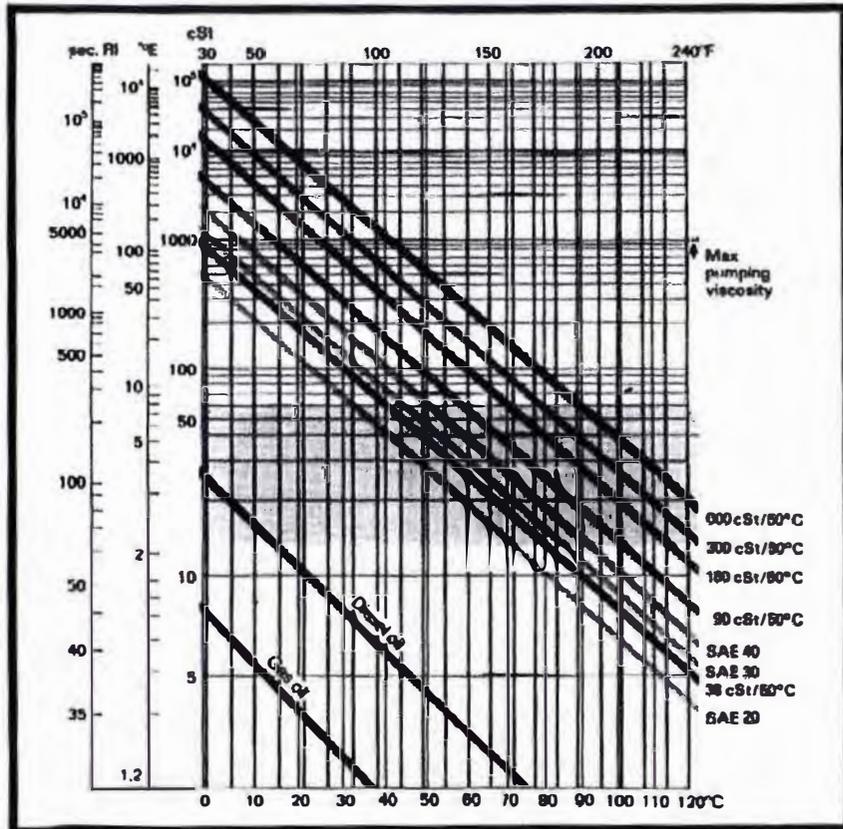


Fig. 17 Viscosity temperature relationships for typical fuel oils.

12. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

12.1. SELECCIÓN TÉCNICA EN FUNCIÓN DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

12.1.1. Resultado de Análisis de Laboratorio 1

TABLA N° 11

REPORTES ENTREGADOS POR LABORATORIO :

Propiedad	Especif para Crudo de fabric de motores	Especif de fabric de Turbinas	Crudo	Crudo	90% Cr.+10 % D2	80% Cr.+20% Diesel2	45% R6+55% Kero	30% R6 +70% D2	Petróleo Industrial N°6	Petróleo Industria I N°6
			Muestra 81-01	Muestra 81-02	Muestra 81-03	Muestra 81-04	Muestra 81-05	Muestra 81-06	Muestra 81-07	Muestra 81-08
			1 ^{er} Lav	2 ^{do} Lav	2 ^{do} Lav	2 ^{do} Lav	2 ^{do} Lav	2 ^{do} Lav	1 ^{er} Lav	2 ^{do} Lav
Gravedad API 15,6 °C	30 a 45		34.7 ¹	34.7 ¹	32.3	32.2	33.9	31.4	20.6 ¹	21.9 ¹
Pto de Inflamación °C			<-5 ³	<-5 ³	38	42	60	92	77 ¹	77 ¹
Pto de Fluidez °C(°F)	< T _{amb}		-24 ²		-13	-15	-18	-6	+10 ¹	+10 ¹
Destilación °C(°F)			D86	D86	D86	D86	D86	D86	D1160	D1160
Punto Inicial		Mín.90	98 ³	98 ³	117	103	-----	-----	-----	-----
10%	282 máx.		138 ³	138 ³	190	193	-----	-----	166 ¹	166 ¹
90%	380 máx.		370 ³	370 ³	401	400	-----	-----	-----	-----
Azufre % peso	0,5	1	0.19 ¹	0.19 ¹	0.18	0.17	0.13	0.14	0.37 ¹	0.37 ¹
Viscosidad 38°C, cSt	1,4 a 20	2 a 7,5	7.88 ¹	7.88 ¹	10.64 ⁵	10.20 ⁵	7.98 ⁵	11.70 ⁵	194 ¹	194 ¹
Contenido de Metales										
Vanadio ppm	4	1	4.51	4.12	4.00	3.38	4.73	2.71	7.62	9.18
Sodio ppm	10	1	3.60 ⁷	3.00 ⁷	4.0 ⁷ /2.0 ⁶	3.4 ⁷ /2.0 ⁶	3.4 ⁷	3.5 ⁷	2.2 ⁷	2.1 ⁷
Potasio ppm	1		S/R	1.07	0.93/0.5 ⁶	1.96/1.0 ⁶	0.24	S/R	0.00	0.0
Calcio ppm	1	1	0.06 ⁷	0.06 ⁷	0.06 ⁷ /5.0 ⁶	0.29 ⁷ /7.0 ⁶	0.15 ⁷	0.07 ⁷	0.2 ⁷	0.1 ⁷
Plomo ppm	1		0.77 ⁷	0.98 ⁷	1.28 ⁷ /0.3 ⁶	0.26 ⁷ /1.0 ⁶	1.11 ⁷	0.98 ⁷	1.55 ⁷	0.66 ⁷
Aluminio ppm			0.00 ¹	0.00 ¹	-----	-----	-----	-----	0.0 ¹	0.0 ¹
Silicio ppm			0.03 ¹	0.03 ¹	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90 ¹	0.90 ¹
Níquel ppm			6.72 ¹	6.72 ¹	2.78	2.59	2.99	1.97	12.56 ¹	12.56 ¹

Propiedad	Especif para Crudo de fabric de motores	Especif de fabric de Turbinas	Crudo	Crudo	90% Cr.+10 % D2	80% Cr.+20% Diesel2	45% R6+55% Kero	30% R6 +70% D2	Petróleo Industrial N°6	Petróleo Industria 1 N°6
			Muestra 81-01	Muestra 81-02	Muestra 81-03	Muestra 81-04	Muestra 81-05	Muestra 81-06	Muestra 81-07	Muestra 81-08
			1 ^{er} Lav	2 ^{do} Lav	1 ^{er} Lav	2 ^{do} Lav				
Fierro ppm			5.39 ¹	5.39 ¹	0.72	0.42	1.73	1.17	11.73 ¹	11.73 ¹
Otros										
Sal Lbs/Mba	100		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Gomas y Resinas	10		----	----	----	----	----	----	----	----
Cenizas % peso	0,1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.002
Indice de Cetano	35		53.3 ³	53.3 ³	52.30	51.90	----	----	----	----
Aromáticos % vol.	35		----	----	----	----	----	----	----	----
Agua y Sedimentos % vol.	0,5	0.05	0.05	0.10	0.05	0.30	0.05	0.05	10	10
Residuo de Carbón (Con.)	4,58	0.2	4.43 ⁷	4.49 ⁷	4.01 ⁷	4.1 ⁷	4.45 ⁷	2.92 ⁷	7.58 ⁷	8.22 ⁷
Corrosión, lamina de cobre	N3		----	----	1 A	1 A	1	1	----	----

¹ Certificado de Análisis Lab 1 N° 0348-99

² Certificado de Análisis Lab 1 N° 014-199

³ Certificado de Análisis Lab 2 N° 0484-1999

⁴ Certificado de Análisis Lab 1 N° 1062

⁵ Certificado de Análisis Lab 1 N° 0811-99

⁶ Laboratorio Independiente 3, Todos los demás Certificado de Análisis Lab 1 N° 676-99

⁷ Certificado de Análisis Lab 1 N° 1334

Laboratorio 1 reportó los niveles de sodio, plomo, calcio C.C.R. de las muestras antes y después del lavado.

TABLA N° 12
CONCENTRACIÓN DE SODIO, PLOMO, CALCIO Y C.C.R. ANTES Y
DESPUES DE TRATAMIENTO

Solución	Muestra N°	Etapas	Sodio (ppm)	Plomo (ppm)	Calcio (ppm)	C.C.R %
Crudo	S/N	Inicial	4.3	0.00	0.34	4.39
	81-01	1era lavado:	3.6	0.77	0.06	4.43
	81-02	2do lavado	3.0	0.93	0.06	4.49
Residual	S/N	Inicial	5.6	0.53	0.79	8.21
	81-08	1er lavado:	2.1	0.66	0.2	8.22
	81-07	2do lavado	2.2	1.55	0.1	7.58
90% Crudo +10% Diesel	81-20	Inicial	3.8	1.38	0.32	4.09
	81-21	2do lavado	4.1	1.44	0.31	4.22
	81-03	2do lavado	4.0	1.28	0.06	4.01
	88-99	2do lavado ⁵	0.5		0.06	
80% Crudo + 20% Diesel	81-22	Inicial	3.3			
	81-04	2do lavado	3.4			
	81-23	2do lavado	3.6	1.32	0.29	
45%R-6 +55Kero	81-05	2do lavada	3.4	1.11	0.15	4.45
30% Residual + 70% D-2	81-06	2do lavado	3.5	0.98	0.07	2.92

Como se aprecia en el cuadro anterior, la eficiencia del proceso dista mucho de los niveles esperados (80%), lo que nos hace suponer que el producto es específico para residuales más no para Petróleo Crudo y sus mezclas.

Según la literatura⁶, los posibles problemas para alcanzar la performance esperada en el procedimiento de extracción se deberían a: 1) que los niveles de sodio y potasio se encuentren muy cerca de los límites de formación de compuestos organometálicos, ó 2) se presente el sodio en estructura cristalina.

Para el primer caso, la literatura⁷ recomienda la acidificación del agua usada para el lavado con ácido clorhídrico 0.1M. Para el segundo caso, se

⁵ ALFA LAVAL. Fax 88-01. Resultados de Laboratorio Matriz para lavado de metal

⁶ ALFA LAVAL. Test Procedure for Water Extraction of Heavy Fuel Oils SB 9706-04. Octubre 1994

⁷ Idem nota 4

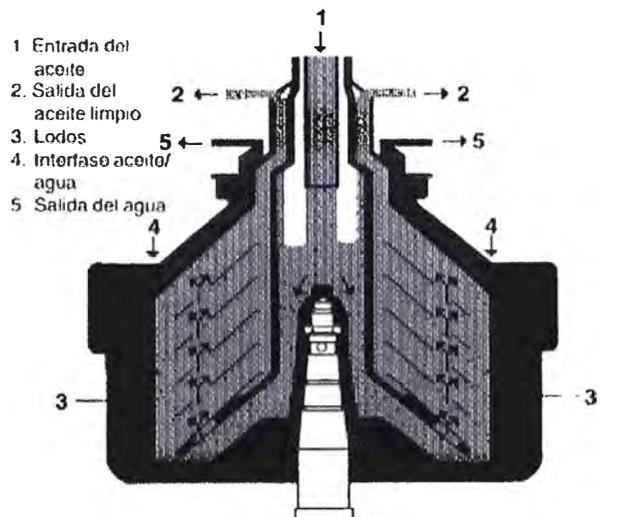
recomienda incorporar un surfactante no iónico en el agua de lavado y prolongados tiempos de mezcla.

Estos resultados modificaron la selección de las mezclas óptimas pues, al ser mayor la cantidad de sodio en las muestras originales se incrementa en la proporción de Diesel necesaria para la mezcla, y los niveles de eficiencia para los procesos de extracción se toman de la práctica como 30% para Petróleo Crudo y 62.5% para residual.

Es de esperarse que la eficiencia de separación mejore durante la operación de las centrífugas industriales. La fuerza centrífuga es proporcional al cuadrado de la velocidad angular por el radio, es decir $F \propto (r \times \omega^2)$

La centrífuga de laboratorio puede desarrollar velocidades angulares de 3000 rpm siendo su radio aproximado 20 cm. Las centrífugas industriales usadas para los volúmenes de combustible a tratar (600 BPD) giran a 5000 rpm y tienen un radio aproximado de 60 cm. Calculando el cociente de las fuerzas de separación producidas por las centrífugas, se observa que la centrífuga industrial aplicaría una fuerza de separación de 8 veces mayor que los equipos de laboratorio.

Por otro lado, la distancia que debe recorrer la partícula en el tubo de ensayo es de unos 100 mm. Las centrífugas industriales, como se muestra en el dibujo, consisten en platos paralelos dispuestos a 1 mm de distancia entre ellos. El combustible cae por el centro del recipiente y sube por los orificios ubicados en los platos. Por acción de la fuerza centrífuga el Petróleo Crudo liviano sube hacia el centro del cilindro. Las gotas de líquido que deben ser acarreadas por el hidrocarburo, chocan en su camino contra las paredes de los platos y caen lográndose una mejor separación.



Una experiencia de lavado y centrifugación, variando las condiciones de operación, produjo eficiencias de 86% en la extracción de sodio y 81% en la separación de calcio para la mezcla 90% Crudo y 10% Diesel con 4% de agua y rpm.

12.2. SELECCION ECONOMICA DE COMBUSTIBLE

12.2.1. Bases Para El Cálculo

Mezcla Seleccionada

De acuerdo al análisis realizado para la selección técnica del combustible objetivo, la mezcla que ofrecía mejores expectativas de cumplimiento de las especificaciones suministradas por los fabricantes de equipos fue la mezcla 90% Petróleo Crudo y 10% Diesel.

Consumo Teórico del Nuevo Combustible

El consumo se restringió a un motor de combustión interna modelo CAT 3500 y la totalidad de las turbinas a gas. El volumen de combustible a ser reemplazado por el combustible seleccionado para cada unidad de negocio se presenta en la tabla 13.

TABLA N°13

CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN UNIDADES DE NEGOCIO

Unidad de Negocio	Consumo bombeo (BL/Año)	Consumo bombeo (BL/D)	Consumo generación (BL/Año)	Consumo generación (BL/D)	Consumo Total (BL/D)
1	2168	5,9			5,9
5	27192	74,5	6852	18,8	93,3
6	21935	60,1			60,1
7	20429	56,0			56,0
8	22266	61,0			61,0
9	66392	181,9			181,9
10		0,0			0,0
Total	158214	439,4			458,2
Consumo, %		91%		4%	100%

El consumo de combustible puede ser estimado considerando que la energía proporcionada por el combustible alternativo deberá ser igual a la que actualmente genera el Diesel.

Para realizar este cálculo es necesario conocer las propiedades de ambos combustibles, las mismas que se detallan a continuación:

TABLA N°14
PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES

<u>Propiedad</u>	<u>Diesel</u>	<u>Combustible Alternativo</u>
Gravedad API		
Densidad (lb/gal)		7,20
Poder calorífico neto (BTU/gal)	131,466	133125

El consumo teórico de combustible es:

Consumo diesel * Poder calorífico (diesel)= Consumo teórico del nuevo combustible * Poder calorífico (nuevo combustible)

Reemplazando los valores dados en la tabla 14, para un consumo a ser reemplazado de 458.2 BPD de Diesel (ver tabla 13), el consumo teórico del combustible alternativo se estima en 452.4 BL/D

Merms

Las merms del proceso de lavado y centrifugado corresponden al 10% de la mezcla. Adicionalmente se consideran pérdidas de 2% en el transporte, almacenaje y acondicionamiento.

El volumen de combustible alternativo que debe ser preparado en Refinería El Milagro es 1.12% el consumo teórico, es decir, $452.4 * (1 + 0.12) = 506.7$ BL/D

Costo de Diesel vs Combustible

Las tablas 15 y 16 muestran los costos de Diesel y el Combustible alternativo, respectivamente. En ambos casos, los costos son la suma del costo de producción más el flete hasta cada unidad de negocio. La última columna corresponde al costo anual por combustible en ambas alternativas. Para el cálculo de rentabilidad se utilizarán la columna de costo anual de ambas tablas para estimar los ahorros potenciales del proyecto.

TABLA N°15

COSTO ACTUAL DE COMBUSTIBLE (DIESEL 2)

Unidad de Negocio	Consumo Total (BL/D)	Precio de Diesel* (\$/BL)	Costo Diario (\$/D)	Costo Anual (M\$/año)
1	5,9	28,06	165,6	59,6
5	93,3	27,56	2571,4	925,7
6	60,1	39,46	2371,6	853,8
7	56,0	36,74	2057,4	740,7
8	61,0	37,53	2289,3	824,2
9	181,9	24,20	4402,0	1584,7
Total	452,5		13857,3	4988,7

* Incluye flete

TABLA N°16

COSTO DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO

Unidad de Negocio	Consumo Total (BL/D)	Precio de Combustible * (\$/BL)	Costo Diario (\$/D)	Costo Anual (M\$/año)
1	5,8	16,72	97,0	34,9
5	92,1	16,22	1493,9	537,8
6	59,4	17,82	1058,5	381,1
7	55,3	15,10	835,0	300,6
8	60,2	15,89	956,6	344,4
9	179,6	16,21	2911,3	1048,1
Total	452,4		7352,3	2646,9

* Incluye flete

12.2.2. Ingresos del Proyecto

Los ingresos del proyecto se definen como el ahorro potencial resultante del cambio a un combustible más barato. Este valor se calcula como la diferencia entre el costo anual en combustible utilizando Diesel 2 (caso actual) y el costo anual en combustible con la mezcla seleccionada. El valor se obtiene de restar la quinta columna de las tablas 15 y 16 para el caso de Diesel 2 y el combustible alternativo, respectivamente.

$$\text{Ingresos} = 4988.7 - 2646.9 = 2341,8 \text{ MUS\$/año}$$

12.2.3. Inversión

Para la selección de equipos, se ha solicitado cotización a una prestigiosa Compañía que suministra equipos para tratamiento de aceite combustible mediante un proceso de lavado, aditivación y centrifugación.

Se ha seleccionado para efectos de esta evaluación económica, una Planta Paquete con dos centrífugas y equipadas totalmente con tuberías, válvulas, bombas, sistema de dosificación del inhibidor de vanadio y medidor de B&W.

El costo de esta Planta paquete puesto en Perú incluyendo IGV sería de 363.0MUS\$

Asimismo, se incluyó en el estimado de costos la inversión en tres tanques (1 de mezcla y 2 de producción) y losa para las instalaciones, con un valor total de 124.0 MUS\$.

El total de la inversión es de 487.0 MUS\$.

12.2.4. Determinación de los costos Fijos y Variables

Los costos de aditivos y utilities fueron calculados en base a los consumos dados por los fabricantes. Los costos fijos se estiman como porcentajes de la inversión inicial. La tabla 17 muestra los valores estimados para estos rubros

TABLA N°17
COSTO FIJOS Y VARIABLES

COSTOS VARIABLES	MUS\$
Aditivo Demulsificante	15,1
Inhibidor Vanadio y metales	6,2
Costo del Agua	7,5
Costo de Electricidad	62,3
COSTOS FIJOS	
Gastos de Mano de Obra	17,6
Mantenimiento 3% de inversión	15
Seguros 0.5% inversión al año	24
Gastos adm y generales (5% de C.fijos)	13
Depreciación (10% de inversión al año)	49
	209,1

12.2.5. Rentabilidad del Proyecto

En la tabla N° 18 se muestra la rentabilidad calculada en base a los ahorros, inversión y costos. Los resultados indican que el proyecto es altamente rentable por tener un TIR de 316.4 % y un VAN de 7.25 MUS\$ a una tasa del 15%.

		AÑOS										
	Unidad	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Utilidad bruta	MUS\$	0	2131	2131	2131	2131	2131	2131	2131	2131	2131	2131
Impuesto (30%)	MUS\$	0	639	639	639	639	639	639	639	639	639	639
Utilidad neta	MUS\$	0	1492	1492	1492	1492	1492	1492	1492	1492	1492	1492
Flujo de fondos	MUS\$	-487	1541	1541	1541	1541	1541	1541	1541	1541	1541	1541
Amortización de Préstamo	MUS\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de fondos neto Operativo	MUS\$	-487	1541	1541	1541	1541	1541	1541	1541	1541	1541	1541
VAN al 10%	MUS\$	8.98										
VAN al 15%	MUS\$	7.25										
VAN al 20%	MUS\$	5.97										
VAN al 25%	MUS\$	5.02										
VAN al 30%	MUS\$	4.28										

TIR =316,4%

13. MODO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

El sistema propuesto consistió en un módulo de tipo paquete compuesto de dos centrífugas, una en operación y la otra en stand by, para el lavado del Petróleo Crudo mediante la adición de 4% de agua y un aditivo demulsificante. El acondicionamiento de la viscosidad se realizó con intercambiadores tipo plato de alta eficiencia en la transferencia de calor y calentadores eléctricos. Completaban el skid el sistema de dosificación de aditivo inhibidor de vanadio y bombas de Petróleo Crudo. El diagrama de flujo del proceso se adjunta en el anexo II.

El sistema cotizado se suministraba premontado, interconectado por tuberías y accesorios, sobre un patín, listo para el anclaje.

En forma opcional, se cotizó un sistema de tratamiento de agua y un sistema de tratamiento de lodos, los cuales serán descritos en los puntos siguientes.

13.1. MODO DE OPERACION

El Petróleo Crudo sin tratar sería bombeado a la planta de tratamiento con ayuda de bombas centrífugas atravesando un filtro en línea que removería los sólidos producto de contaminación durante el transporte o producción. Una válvula de control de presión regularía el flujo de combustible enviando el exceso al tanque de suministro.

Con propósito de evitar contingencias se preveía la inyección continua de pequeñas dosis de demulsificador y entre 0.5 a 2% de agua. El demulsificador se inyectaba para contrarrestar las especies naturalmente emulsificadas en el Petróleo Crudo. El agua inyectada ayudaría a coalescer las pequeñas gotas de agua contenidas en el Petróleo Crudo y convertir las pequeñas partículas separadas de agua en gotas grandes que favorezcan la separación del agua originaria en el Petróleo Crudo.

La inyección de demulsificante se realizaría aguas arriba del intercambiador de platos mediante bombas dosificadoras de aditivo (tipo diafragma). La temperatura del Petróleo Crudo después del intercambiador de platos y calentadores eléctricos se previó alrededor de 65°C.

El combustible sería alimentado continuamente a través de una válvula de corte al recipiente de la centrífuga donde serían reducidos los sólidos del agua hasta un nivel aceptable y el contenido de sodio y potasio a menos de 0.4 ppm, debido a que el Petróleo Crudo de entrada contenía menos de 4 ppm de sodio y potasio en el agua soluble en estado no emulsionado.

El Petróleo Crudo purificado y el agua separada se descargarían de manera continua a través de las boquillas respectivas mientras los sólidos se acumularían en la periferia del recipiente. Los sólidos serían descargados periódicamente antes de llegar al nivel de interfase con el Petróleo Crudo. El ciclo de descarga de lodos sería iniciado mediante la presión de un botón de arranque o automáticamente, al término del tiempo prefijado de operación continua.

Tanto el agua como los lodos provenientes de la centrífuga serían colectados a un tanque de lodos y de allí bombeados a una planta de tratamiento de lodos controlada por un switch de nivel

Las centrífugas están equipadas con bombas de disco de corte para la descarga presurizada del Petróleo Crudo directamente a su almacenamiento

Un monitor de agua y Petróleo Crudo instalado en la línea descarga de la centrífuga chequearía la calidad del combustible purificado. El sistema consistía en un sensor y una unidad de monitoreo diseñada especialmente para la determinación precisa de la cantidad de agua presente en el

sistema. El detector mide la constante dieléctrica del Petróleo Crudo fluyendo en la línea. El circuito sensor se basaba en la medición del cambio en la capacitancia reactiva. El sensor convertía la capacitancia en corriente eléctrica y transmitía la señal al monitor localizado en una consola local. La comparación de este valor con el valor seteado resultaría en la lectura mostrada en el panel y la activación de una alarma de contacto si el sistema excedía el valor seteado. Durante los periodos de alarma el combustible alimentado se redireccionaría con una válvula divergente hacia el tanque de alimentación.

Los efectos corrosivos del vanadio serían minimizados mediante la aditivación con un inhibidor de vanadio. El plomo y otros metales solubles deben ser controlados por el suministrador de Petróleo Crudo de acuerdo a los requerimientos de los fabricantes.

La planta de tratamiento sería controlada, monitoreada y supervisada desde una consola centralizada a través de un PLC que incluía las siguientes funciones de control:

- Programa de Arranque.
- Sistema de Control Automático.
- Monitoreo de Set Points.
- Alarmas y Sistemas de Detención por fallas y redireccionamiento del combustible adicionado.

IV CONCLUSIONES

1. USO DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

La especificación de calidad para un combustible en base a Crudo o mezclas de este con fracciones livianas de su destilación, fueron proporcionadas por los fabricantes de los motores de combustión interna. Esta especificaciones se resumen en la columna Crudo de la tabla 3.

El proyecto buscó conseguir un combustible cuyas propiedades reprodujeran, lo más cercanamente posible, la calidad solicitada por los fabricantes de los equipos.

Se analizaron las siguientes alternativas:

- a) Empleo de Crudo.
- b) Empleo de Residual N°6.
- c) Empleo de Mezclas de Crudo y Diesel.
- d) Empleo de Mezclas de Residual N° 6 y Diesel.

De los análisis realizados al Crudo y Residual N° 6 sin tratamiento se verificó que las temperaturas del 10% y 90% de destilación son mayores a los máximos recomendados para el combustible ideal. El único modo de reducir estas temperaturas es mediante la adición de fracciones livianas.

Se realizaron mezclas teóricas eligiéndose algunas para reproducirlas y analizarlas. Previo a su análisis y debido a la importancia de los metales alcalino térreos en la formación de compuestos corrosivos junto al vanadio, se realizó un tratamiento de extracción de estos compuestos mediante lavado con demulsificantes. Este tratamiento reduciría la proporción de fracciones livianas en el combustible seleccionado, resultando en ahorro para la empresa.

Se seleccionó como combustible alternativo una mezcla de 90% Crudo y 10% Diesel 2. La mezcla tratada cumplía con la mayor parte de las especificaciones de calidad recomendadas por el fabricante. Para facilitar la comparación se reproduce la columna correspondiente al combustible elegido de la tabla 11

TABLA N° 19
COMPARACIÓN DE COMBUSTIBLE OBJETIVO
Y COMBUSTIBLE SELECCIONADO
PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Propiedad	Especificación para Crudo de fabricantes de motores	Mezcla Seleccionada 90% Crudo +10% Diesel 2
Gravedad API 15.6, °C	30 a 45	32.3
Pto de Fluidez, °C(°F)	< T _{amb}	-13
Destilación D86, °C(°F)		
10%	282 máx.	190
90%	380 máx.	401
Azufre, % peso	0,5	0.18
Viscosidad 38°C, cSt	1,4 a 20	10.64
Contenido de Metales*		
Vanadio, ppm	4	4
Sodio, ppm	10	0.5
Potasio, ppm	1	0.1
Calcio, ppm	1	0.06
Plomo, ppm	1	1.28
Otros		
Sal, Lbs/Mba	100	1
Gomas y Resinas	10	---
Cenizas, % peso	0,1	0.001
Índice de Cetano	35	52.3
Aromáticos, % vol.	35	----
Agua y Sedimentos, % vol.	0,5	0.05
Residuo de Carbón (Con.), % peso	4,58	3.62
Corrosión, lamina de cobre	N3	1 ^a

* Resultados de pruebas realizadas por suministradores de aditivos

Observando los valores de ambas columnas para el combustible objetivo y el combustible resultante de la investigación, se concluye que este combustible puede ser aplicado a los motores de combustión interna.

Como seguridad se propuso un tratamiento de aditivación con inhibidores de vanadio a base de magnesio que reduciría la acción corrosiva del vanadio sobre las partes internas de los motores de combustión interna.

Mediante conversaciones con los fabricantes de los motores de combustión interna se determinó que la especificación de un combustible a base de Crudo sólo era aplicable al modelo CAT-3600 aunque pueden ser aplicados al modelo CAT-3500. Los equipos de propiedad del cliente corresponden a los modelos CAT-3400 (04 unidades) y CAT-3500 (01 unidad).

Por otro lado, la operación con mezclas más pesadas que el Diesel reduce considerablemente los tiempos de vida de las partes internas de los motores así como la performance operativa del equipo. Los costos de mantenimiento y reposición de las partes deterioradas hacen que la operación sea en algunos casos más costosa que con el propio equipo Diesel. Los fabricantes de los equipos recomiendan trabajar con un equipo en espera dado que es muy difícil predecir el momento exacto de falla de un equipo que trabaja con combustibles pesados.

Determinar los tiempos probables de falla debe realizarse a través de pruebas

Una limitación adicional es que no existen plantas de acondicionamiento para el volumen consumido por la única unidad a la que puede aplicarse el combustible alternativo. La planta más pequeña es para 407BPD siendo el consumo de combustible alternativo 20.8BPD para 01 motor de combustión interna modelo CAT-3500.

2. USO DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN TURBINAS

La especificación de calidad para el combustible objetivo a utilizarse en turbinas se basa en la norma ASTM D2880 y en recomendaciones del fabricante. Aunque el número de parámetros a monitorear es menor, los límites son más exigentes que para los motores de combustión interna.

De forma similar a la procedida en el caso anterior, las alternativas estudiadas fueron el empleo de Crudo o Residual sin mezclas con fracciones livianas y sus mezclas con Diesel (o Kerosene).

Los análisis confirmaron que la mejor alternativa es el uso de la mezcla de 90% Crudo y 10% Diesel con un tratamiento de lavado y centrifugación para la reducción del nivel de metales alcalino térreos, aditivación para inhibir el efecto corrosivo del vanadio y calentamiento para el acondicionamiento de la viscosidad a niveles adecuados para su atomización.

Las propiedades de la mezcla seleccionada se muestran en la tabla siguiente comparados con las especificaciones del combustible objetivo. Debe notarse que el único valor que supera las especificaciones del combustible objetivo es el Residuo de Carbón.

TABLA N° 20
COMPARACIÓN DE COMBUSTIBLE OBJETIVO
Y COMBUSTIBLE SELECCIONADO
PARA TURBINAS DE GAS

Propiedad	Método ASTM	Fabricante	ASTM D2880-98	Mezcla Seleccionada 90% Crudo +10% Diesel 2
Azufre % peso	D-1552	1		0.18
Viscosidad 38°C (100°F), cSt	D-445	2 a 7,5		10.64
Punto inicial °C, mín.*		90		117

Propiedad	Método ASTM	Fabricante	ASTM D2880-98	Mezcla Seleccionada 90% Crudo +10% Diesel 2
Contenido de Metales				
Vanadio ppm	D-2788	1	1	4
Sodio ppm	D-2788	1	1	0.5
Calcio ppm	D-2788	1	2	0.06
Plomo ppm	D-2788		1	1.28
Otras trazas ppm	D-2788		5	
Cenizas ppm	D-482	100		10
Residuo de Carbón, % masa		0.2	0.35	3.62
Agua y Sedimentos, % vol	D-1796	0,05	0,00001	0.05

El mayor contenido de carbón conduce, según los fabricantes, a una carbonización de los quemadores más rápida que la normal prevista. Sin embargo, en opinión de los fabricantes de aditivos, la calidad de mezclas seleccionadas cumplen con los requerimientos para las turbinas, pues lo consideran de buena calidad por el bajo contenido de contaminantes que ellos suelen tratar.

El límite para el Residuo de Carbón Conradson fue reducido durante el desarrollo del proyecto de 7.0 % a 0.2%. Dado que el Diesel sin mezcla contenía 0.05%, la obtención de una mezcla de Diesel y Petróleo Crudo con 0.2% de residuo de carbón correspondía a un porcentaje de Crudo de 3.5% que no justifican el desarrollo del proyecto. Por lo tanto, esta restricción debía ser comprobada mediante corridas de pruebas empleando el nuevo combustible en las turbinas de gas.

3. PLANTA DE TRATAMIENTO DE COMBUSTIBLE

El combustible debe ser tratado antes de su utilización en los equipos de generación y bombeo.

El proceso de tratamiento consiste en el lavado en dos etapas del combustible, el cual se mezcla con 4% de agua destilada caliente y

200ppm de un aditivo demulsificante y después de un período de contacto se centrifuga.

Posteriormente el combustible es calentado para conseguir la temperatura apropiada para su atomización y antes del ingreso al equipo es aditivado con inhibidor de vanadio.

A nivel industrial, se instalaría una planta de tratamiento en una de las unidades de negocio en la cual se formularían los combustibles, tratarían y envasarían para su transporte a las otras plantas del cliente.

La planta de tratamiento consistiría en un módulo de tipo paquete compuesto de dos centrífugas, intercambiadores tipo plato y calentadores eléctricos. Completaban el paquete, el sistema de dosificación de aditivo inhibidor de vanadio y las bombas de carga de Petróleo Crudo. Todo el sistema incluía las tuberías de interconexión, instrumentos y cableado

4. RESULTADOS ECONOMICOS

De la evaluación económica del proyecto considerando el reemplazo de combustible para las turbinas y un motor de combustión interna (tabla N° 19) se puede concluir que el empleo del combustible alternativo resulta siendo una alternativa económica rentable que produciría ahorros anuales de 2340 MUS\$. Los indicadores de rentabilidad son altos, siendo la TIR de 316.4 % y el VAN a una tasa del 15% de 7.25 MUS\$

V RECOMENDACIONES

No es recomendable el uso de un combustible distinto al Diesel 2 en motores de combustión interna a excepción del modelo CAT-3500. Las especificaciones utilizadas para el desarrollo del proyecto corresponden al modelo CAT-3600 pero son aplicables también al modelo CAT-3500.

A pesar que el combustible obtenido cumple con todas las especificaciones de calidad de los fabricantes a excepción de la temperatura del 90% de destilado, no se recomienda utilizar este combustible para los modelos CAT 3400 dado que éstos no han sido fabricados para Crudo.

En el caso de las turbinas de gas, existió una clara oposición de los fabricantes al reemplazo del Diesel 2 por otro combustible, basándose principalmente en el incremento de la velocidad de carbonización de los quemadores. Sin embargo, suministradores de aditivos como SFA y Alfa Laval señalaron experiencias previas de uso de Crudo en turbinas.

Nuestra recomendación se dirigió a la realización de corridas de prueba de 1000 y 5000 horas de operación de los equipos, después de lo cual se debería programar una revisión integral del equipo para determinar los efectos en sus partes internas.

Esta recomendación no pudo llevarse a cabo porque se requería la autorización de los fabricantes los que se negaron a avalar la prueba dejando los resultados bajo responsabilidad del cliente. Siendo los equipos necesarios para la operación de la planta, la falla de uno de ellos, que operarían en estos períodos sin garantía, no era una opción para el cliente.

Una alternativa recomendada también fue el reemplazo de los equipos por otros contruidos para Petróleo Crudo, al cual se le sometería a un tratamiento similar al especificado para el combustible seleccionado. El empleo de Petróleo Crudo sin mezcla con Diesel cancelaría los costos de transporte de combustible, siendo una opción sumamente rentable debido a que el precio del Petróleo Crudo es inferior al del diesel.

VI SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

Bl/día	Barriles por día
BPH	Barriles por hora
D.L.	Decreto Legislativo
D.S.	Decreto Supremo
GLP	Gas Licuado de Petróleo
MBDP	Miles de barriles por día.
MMBTU/hr	Millones de British Thermal Unit (unidad calórica británica) por hora
MMUS\$	Millones de dólares americanos
MUS\$	Miles de dólares americanos
Ppm	partes por millón
RPM	Revoluciones por minuto
TIR	Tasa Interna de Retorno
Ton	Tonelada métrica
US\$/Bl	Dólares americanos por barril
VAN	Valor Actual Neto
° API	Unidad de medida de la gravedad específica para hidrocarburos. Su equivalencia con la gravedad específica es la siguiente: $\text{gravedad específica} = (131.5 + \text{° API}) / 141.5$
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit

VII BIBLIOGRAFIA

1. DR A. VON PHILIPOVICH, Motores de Combustión Interna: Los Materiales para el Funcionamiento de los Motores de Combustión Interna compilado por el Dr Hans List. Editorial Labor. Barcelona. 1944. 124 Págs.
2. DR ING. ANTON PISHINGER, La Formación de la Mezcla en el Motor Diesel. Fascículo VII. Editorial Labor. Barcelona. 1950. 50 Págs.
3. FARMAIN L. Accelerated Oxidation By Vanadium Pentoxide. The Chemistry and Industry. Noviembre 1959. 1436 Págs.
4. GARY JAMES H, Refino de Petróleo. Editorial Reverte. Barcelona. 1980. 391 Págs.
5. INSTITUTO DEL PETROLEO, Moderna Tecnología del Petróleo. Editorial Reverte. Barcelona. 1954. 732 Págs.
6. SALVI GIULIANO. La Combustión Teoría y Aplicaciones. Editorial Dossat, S.A. España. 1975. 650 Págs.
7. SFA INTERNATIONAL INC. Artículo 101 High Temperature Corrosion in Gas Turbine and Steam Boilers by Fuel Impurities. WWW. SFA INTERNATIONAL.COM
8. SFA INTERNATIONAL INC. Artículo 106 Properties of Oil Soluble Magnesium Compounds Used in Gas Turbine Fuel Additives. WWW. SFA INTERNATIONAL.COM
9. SWISHER J H y SHANKARARNAYAN S. Inhibiting Vanadium-Induced Corrosion. Material Performance NACE. Vol 33 N° 9. Septiembre 1994. 49 Págs.
10. ULICK R EVANS. The Corrosion and Oxidation of Metals. Editorial Edward Arnold LTD. Londres. 1981. 1094 Págs.
11. ALFA LAVAL. Test Procedure for Water Extraction of Heavy Fuel Oils SB 9706-04. Octubre 1994
12. SECRETARIA ANSI. ISO/DP 4261 Gas Turbine Fuel Oils – Specifications. Enero 1971. 9 Págs.
13. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2880-98 Standard Specification for Gas Fuel Oils. USA. 1998. 5 Págs.

14. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 975-98a Standard Specification for Diesel Fuel Oils. USA. 1998. 3 Págs.