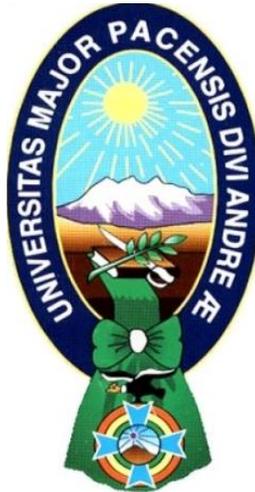


# **UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**

## **FACULTAD DE INGENIERIA**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS**



## **PROYECTO DE GRADO**

**“TRANSFORMACION DE LUBRICANTES USADOS PARA GENERACION DE  
ENERGIA COMBUSTIBLE DIESEL # 2° ESCALA LABORATORIO”**

PARA OPTAR AL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

POSTULANTE: Univ. Hernán Rodrigo Salinas Chávez

TUTOR: Ing. Jesús Góngora Beltrán

LA PAZ – BOLIVIA

2019



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## Contenido

<b>1</b>	<b>OBJETIVOS DEL PROYECTO .....</b>	<b>1</b>
1.1	JUSTIFICACION GENERAL .....	1
1.2	OBJETIVOS GENERALES .....	1
1.3	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	1
1.4	ACEITES LUBRICANTES GENERALIDADES .....	2
1.4.1	Elaboración de los aceites lubricantes .....	2
1.5	PROPIEDADES DE LOS ACEITES LUBRICANTES .....	5
1.5.1	Densidad o peso específico .....	5
1.5.2	Viscosidad.....	6
1.5.3	Índice de Viscosidad .....	7
1.5.4	Punto de inflamación .....	7
1.5.5	Punto de congelación.....	8
1.5.6	Color de los aceites .....	8
1.5.7	Número total ácido (TAN) .....	9
1.6	CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES LUBRICANTES.....	9
1.6.1	Clasificación de los aceites según SAE.....	9
1.7	Clasificación de los aceites para motor.....	10
1.7.1	Lubricantes por su grado de viscosidad .....	10
1.7.2	Aceite multigrado.....	10
1.7.3	Lubricante por tipo de servicio (API).....	11
1.8	CLASIFICACION DE LA NORMATIVA EUROPEA Y AMERICANA PARA EL USO DIESEL N°2 .	12
1.8.1	Tipos de contaminantes presentes en los gases de emisión .....	12
1.9	ACEITES USADOS .....	14
1.10	Características de los aceites usados .....	16
1.10.1	Posibles contaminantes en los aceites lubricantes usados.....	17
1.10.2	Oxidación.....	17
1.10.3	Emulsiones .....	18
1.11	NORMATIVA SOBRE LA DISPOSICIÓN Y MANEJO DE ACEITES USADOS.....	18
1.11.1	Almacenamiento .....	18
1.11.2	Reciclaje.....	18

1.11.3	La disposición de los aceites usados según ISO 14001 .....	19
1.11.4	Destino y reutilización de los aceites usados .....	19
1.11.5	Uso como combustible en calderas .....	19
1.11.6	Adulteración .....	19
1.11.7	Tratamiento de caminos (matapolvo).....	19
1.11.8	Otros.....	19
1.12	Reciclamiento del aceite usado.....	20
1.13	Métodos de reacondicionamiento.....	20
1.13.1	Filtración.....	20
1.13.2	Ferografía.....	22
1.13.3	Separación centrífuga .....	22
1.13.4	Re-refinación .....	23
1.13.5	Proceso convencional ácido – arcilla.....	23
1.13.6	Proceso de destilación e hidrotatamiento.....	24
1.14	UTILIZACIÓN COMO COMBUSTIBLE .....	25
1.14.1	El combustible más utilizado por el parque automotor en Bolivia es la gasolina.....	25
	Fuente: registro único para la administración tributaria municipal (ruat) instituto nacional de estadística .....	26
1.15	PROCESO DE REGENERACION DEL LUBRICANTE USADO DE MOTOR A DIÉSEL .....	26
1.15.1	Tecnología PROP .....	27
<b>2</b>	<b>PROCEDIMIENTO PARA REGENERAR ACEITES USADOS PARA OBTENER DIESEL N° 2 POR LOS METODOS DE DESMETALIZACION Y DESTILACION .....</b>	<b>30</b>
2.1	Resumen.....	30
2.2	PROCEDIMIENTO PARA LA DESMETALIZACIÓN DE ACEITES USADOS PARA SU EMPLEO COMO COMBUSTIBLE.....	30
2.2.1	Descripción detallada de todo el proceso.....	30
2.2.2	Resumen desmetalización:.....	31
2.3	DESCRIPCION.....	31
2.4	CÁLCULOS DEL PROCESO DE DESMETALIZACIÓN .....	32
2.4.1	A través de la siguiente formula se obtendrá la densidad del aceite usado ( $\rho_1$ ) proceso de cálculo en el Anexo C.....	32
2.4.2	Determinación de la masa del aceite usado para un volumen de 400 ml.....	33

2.4.3	Determinación del porcentaje en peso de fosfato diamónico al 4% proceso de cálculo en el Anexo C.....	33
2.5	CALCULOS PARA LA 1°DESTILACIÓN SIMPLE AL VACÍO .....	35
2.5.1	A través de la siguiente formula se obtendrá la densidad del aceite usado ( $\rho_1$ ) después de la desmetalización proceso de cálculo en el Anexo C.....	35
2.5.2	Determinación de la masa del aceite usado para un volumen de 389 ml .....	35
2.5.3	Determinación del porcentaje en peso de Hidróxido de Sodio NaOH al 3% en peso proceso de cálculo en el Anexo C.....	35
2.5.4	Se arma el Equipo y se empieza con la 1° destilación al vacío .....	36
2.5.5	Cálculos obtenidos en la 1° Destilación al Vacío .....	37
2.6	GRAFICOS OBTENIDOS .....	38
2.7	SE REALIZA UNA FILTRACIÓN AL VACÍO PARA SEGUIR CON LA 2° DESTILACIÓN.....	39
2.8	CALCULOS PARA LA 2° DESTILACIÓN SIMPLE AL VACÍO.....	40
2.8.1	A través de la siguiente formula se obtendrá la densidad del aceite usado ( $\rho_1$ ) después de la desmetalización proceso de cálculo en el Anexo C.....	40
2.8.2	Determinación de la masa del aceite usado para un volumen de 284 ml proceso de cálculo en el Anexo C.....	41
2.8.3	Determinación del porcentaje en peso de Hidróxido de Sodio NaOH al 3% en peso proceso de cálculo en el Anexo C.....	41
2.9	SE ARMA EL EQUIPO Y SE EMPIEZA CON LA 2° DESTILACIÓN.....	41
2.9.1	Cálculos obtenidos en la 2° Destilación al Vacío .....	42
2.10	GRAFICOS OBTENIDOS .....	43
2.11	VARIACION DE LA PRESION EN LA DESTILACION AL VACIO .....	45
<b>3</b>	<b>PROCEDIMIENTO PARA PURIFICACION DE DIESEL N°1 a DIESEL N° 2 .....</b>	<b>47</b>
3.1	LIMPIEZA PARA EL DIÉSEL N°2 ELIMINACIÓN DE AZUFRE, AGUA, HOLLÍN .....	47
3.1.1	La importancia.....	47
3.1.2	La mecánica.....	47
3.1.3	Cambio de nuevas prácticas en la limpieza del diésel .....	48
3.1.4	Cuán serio es el problema de contaminación .....	48
3.1.5	La realidad del Diésel en Bolivia.....	50
3.2	FILTROS PARA COMBUSTIBLE.....	54
3.2.1	Oxigenación de las partículas de hollín .....	55
3.2.2	Medidas para la reducción de las emisiones de partículas.....	56

3.2.3	Medidas endomotrices .....	56
3.2.4	Medidas ectomotrices.....	57
3.2.5	Resumen.....	57
3.2.6	Rango Beta .....	58
3.3	NIVELES DE LIMPIEZA COMPROMETIDOS POR DONALDSON .....	59
3.4	ELEMENTOS.....	60
<b>4</b>	<b>SIMULACIÓN DEL REACTOR DE HDS CON VAPORIZACIÓN. ....</b>	<b>62</b>
4.1	Simulación de Procesos.....	62
4.2	BALANCE DE MATERIALES.....	62
4.2.1	REACCIONES DE HIDRODESULFURACIÓN.....	62
4.3	CÁLCULOS.....	65
4.4	Datos para el combustible diésel: .....	66
4.5	Balance de material alrededor del reactor .....	67
4.5.1	Total, compuestos Azufre en la alimentación= Alimentación * (% Azufre) .....	67
4.5.2	Mercaptanos en el azufre de alimentación* % mercaptanos.....	67
4.5.3	Hidrógeno para la remoción de nitrógeno.....	68
4.5.4	Hidrógeno para saturación de olefinas .....	70
4.5.5	Hidrógeno para Saturación de aromáticos .....	71
4.5.6	Hidrógeno para la remoción de Haluros .....	71
4.5.7	Usando el 100 % del exceso de hidrógeno, se tiene: .....	71
4.6	Balance total alrededor del reactor .....	71
4.6.1	Amonio producido.....	72
4.6.2	Sulfuro de hidrógeno producido .....	73
4.7	Cloruro de amonio producido .....	74
4.8	Balance de material alrededor del separador.....	74
4.8.1	Caudal de agua de lavado, <b>F4</b> .....	75
4.8.2	Flujo del agua ácida, <b>F7</b> .....	75
4.8.3	Aplicación de balance total alrededor del separador, <b>F3 + F4 = F5 + F6 + F7</b> ..	76
4.9	Balance de Material alrededor del absorbedor .....	76
4.10	Balance de material alrededor del stripper .....	77
4.10.1	<b>C2</b> producido .....	78
4.10.2	<b>C3</b> producido .....	78

4.10.3	C4 producido .....	78
4.10.4	C5 producido .....	79
4.11	SIMULACION DE LA UNIDAD HIDRODESULFURACION (HDS) .....	80
4.11.1	CARACTERIZACIÓN DEL DIÉSEL A SIMULAR .....	80
4.12	SIMULACION DE EQUIPOS .....	83
4.12.1	Diseño del Absorbedor .....	83
4.12.2	Especificaciones del Despojador .....	83
4.12.3	Separador de Diésel .....	84
4.12.4	Diseño del separador V-001 .....	84
4.12.5	Diseño de la bomba P-002 .....	85
4.12.6	Enfriador E-002 .....	85
4.12.7	Horno H-001 .....	86
4.12.8	Reactor .....	86
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>87</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	87
5.2	Recomendaciones .....	89
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>90</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>91</b>
7.1	ANEXO A .....	91
7.2	ANEXO B .....	92
7.3	ANEXO C .....	94
7.4	ANEXO D .....	99

## RESUMEN

Un aceite lubricante es un líquido usado para disminuir la fricción entre dos superficies, éstos son usados en el interior de los motores donde las condiciones de operación hacen que después de cierto periodo de uso se degraden en compuestos cuyas características no permiten su utilización como lubricantes.

La mayoría de los aceites usados contienen compuestos tóxicos los cuales al quemarse son liberados a la atmósfera, esto hace necesario la implementación de políticas dirigidas a su disposición final y a los métodos usados para la combustión de los mismos.

Se generan mundialmente grandes cantidades de aceites lubricantes usados con potencial de reciclado y uso como combustibles, el manejo inadecuado de estos aceites puede causar deterioro ambiental.

La regeneración es uno de los métodos para reutilizar los aceites usados con menor impacto ambiental, éste método dispone los aceites usados de forma tal que se puedan volver a usar como lubricantes o combustibles. Entre estos métodos se encuentra la biodegradación de los compuestos contaminantes en el interior del aceite, al degradar los compuestos contaminantes se recupera la base lubricante, ésta es la que otorga las propiedades lubricantes a los aceites, y éste producto es la materia prima para la producción de nuevos aceites.

En el presente proyecto de investigación tiene como objetivo mostrar la factibilidad de utilizar aceites lubricantes usados de motor a diésel de viscosidad SAE 15W40 en la producción de combustibles líquidos. El proyecto constara de las siguientes partes importantes: Caracterización del aceite lubricante usado, resultados experimentales en la conversión del aceite en combustible y caracterización del producto final utilizando el programa ASPEN HYSYS V8.8, para el proceso de Hidrodesulfuración, el cual consiste en reducir la cantidad de azufre (una impureza contaminante) que se encuentra en el petróleo desde su formación en el subsuelo. Este Azufre se encuentra combinado con otros compuestos químicos que, si no se eliminan, al estar presentes en la combustión de los automóviles o artefactos que utilicen diésel, causarían una corrosión en los motores o envenenamiento del mismo y al mismo tiempo contaminaría al medio ambiente. El combustible obtenido debe cumplir las propiedades del Diésel # 2°.

## SUMMARY

Lubricating oil is a liquid used to reduce the friction between two surfaces, these are used inside the motors where the operating conditions mean that after a certain period of use they are degraded into compounds whose characteristics do not allow their use as lubricants.

Most of the used oils contain toxic compounds which when burned are released into the atmosphere, this makes necessary the implementation of policies aimed at their final disposal and the methods used for combustion.

Large quantities of used lubricating oils are generated worldwide with potential for recycling and use as fuels, the inadequate handling of these oils can cause environmental deterioration.

Regeneration is one of the methods to reuse used oils with less environmental impact; this method disposes used oils in such a way that they can be reused as lubricants or fuels. Among these methods is the biodegradation of the polluting compounds inside the oil, by degrading the polluting compounds the lubricant base is recovered, this is what gives the lubricating properties to the oils, and this product is the raw material to produce new oils.

In this research project aims to show the feasibility of using lubricating oils used diesel engine viscosity SAE 15W40 in the production of liquid fuels. The project will consist of the following important parts: Characterization of the lubricating oil used, experimental results in the conversion of the oil into fuel and characterization of the final product using the ASPEN HYSYS V8.8 program, for the Hydrodesulphurization process, which consists in reducing the amount of sulfur (a contaminating impurity) found in oil from its formation in the subsoil. This Sulfur is combined with other chemical compounds that, if not eliminated, being present in the combustion of automobiles or devices that use diesel, would cause corrosion in the engines or poisoning of the same and at the same time contaminate the environment. The fuel obtained must comply with the properties of Diesel # 2°.

## INTRODUCCION

La búsqueda de nuevas fuentes de energía es uno de los principales retos en la actualidad. La explotación continua y especializada de los recursos energéticos ha permitido el desarrollo de sociedades altamente tecnológicas alrededor del mundo. Sin embargo, surge el dilema de cómo proveer a la humanidad con las ventajas derivadas de la energía sin destruir de manera irreparable el medio ambiente.

Es aquí donde surge la necesidad de incentivar el desarrollo de nuevas fuentes de energía alternativas.

Sin embargo, las energías renovables no son la única fuente energética disponible, y nuevas perspectivas deben ser exploradas a profundidad. Actualmente muchos procesos industriales generan grandes cantidades de desechos, que encierran todavía potenciales usos desde el punto de vista energético. Mediante procesos físicos o químicos estos desechos pueden ser utilizados para la producción de energía, ahorrando así no solo recursos primarios, sino también minimizando la problemática del manejo de estos residuos.

Este tipo de desechos son conocidos como *materia prima de segunda generación*. Por ejemplo, en el caso de la industria alimenticia, la celulosa es eliminada en grandes cantidades a pesar de su valor energético, la conversión de este desecho en biocombustible es un reto latente. En varios países se estudia la conversión de celulosa a etanol y biomasa a combustible líquido (BTL: biomass to liquid fuel). Sin embargo, se debe seguir investigando hasta obtener resultados con alta rentabilidad y bajo impacto ambiental.

Dentro de las actividades potencialmente más contaminantes en Bolivia, tenemos la industria energética las cuales están ligadas a la explotación, transporte, refinación de petróleo y gas natural, el aceite lubricante usado, también conocido como aceite quemado, es un residuo altamente contaminante, pero con un alto potencial energético. Al ser desechado, el aceite derramado forma películas en la superficie del agua interfiriendo con la fotosíntesis. Además, los residuos se depositan en el fondo de ríos y lagos en forma de brea, destruyendo los mecanismos de respiración de los seres vivos.

Por tal motivo analizando el desperdicio de aceite usado y en busca de nuevas fuentes de energía, se vio la posibilidad de poder transformar este aceite usado de motor en un combustible Diésel N°2, este combustible busca también cumplir con las normas EURO III y EURO IV, para maquinarias y equipos que funcionan a diésel que requieren una disminución del contenido de azufre de 500 ppm a 10 ppm.

# CAPITULO I

## 1 OBJETIVOS DEL PROYECTO

### 1.1 JUSTIFICACION GENERAL

La búsqueda de nuevas fuentes de energía es uno de los principales retos en la actualidad. La explotación continua y especializada de los recursos energéticos ha permitido el desarrollo de sociedades altamente tecnológicas alrededor del mundo. Sin embargo, surge el dilema de cómo proveer a la humanidad con las ventajas derivadas de la energía sin destruir de manera irreparable el medio ambiente. Es aquí donde surge la necesidad de incentivar el desarrollo de nuevas fuentes de energía alternativas.

Gran parte de la investigación mundial se enfoca en el desarrollo y optimización de nuevas fuentes energéticas. Las energías renovables, al ser virtualmente inagotables y capaces de regenerarse por medios naturales, son uno de los principales ejemplos de nuevas opciones que buscan resolver este problema.

### 1.2 OBJETIVOS GENERALES

- La transformación y reutilización de lubricantes usados de motor a diésel, sistemas hidráulicos, corona y transmisión como una nueva fuente de energía para la elaboración de DIESEL # 2°.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Plantear un modelo que justifique la reutilización de lubricantes usados de Maquinaria Pesada, Industria y Transporte en Diésel # 2°.
- Filtración y acondicionamiento térmico de la materia prima.
- Desmetalización de la materia prima
- Adecuación del equipo de destilación al vacío.
- Desarrollar un método para obtener Diésel # 2° a partir de aceite usado de motor por el método de Destilación al vacío.
- Caracterizar el producto obtenido y compararlo con el Diésel # 2 comercial
- Elaboración de un Programa de Simulación en Aspen HYSYS V8.8 que permitirá en este proyecto simular la unidad de hidrosulfuración de Diésel # 2°, donde nos pueda mostrar, un diagrama del proceso de Hidrosulfuración, un desglose de los equipos a utilizar, y verificar si cumple con el porcentaje de azufre que solicita el Diésel # 2°.

<b>Análisis de Laboratorio para Diésel # 2°</b>		
<b>Ítem</b>	<b>Análisis</b>	<b>Método</b>
1	Punto de Inflación	ASTM D 56
2	Contenido de Azufre	ASTM D 5453
3	Viscosidad cinemática	ASTM D 445

**Tabla N°1.1**

Ítems para análisis de Aceite FINNING Fuente: Propia

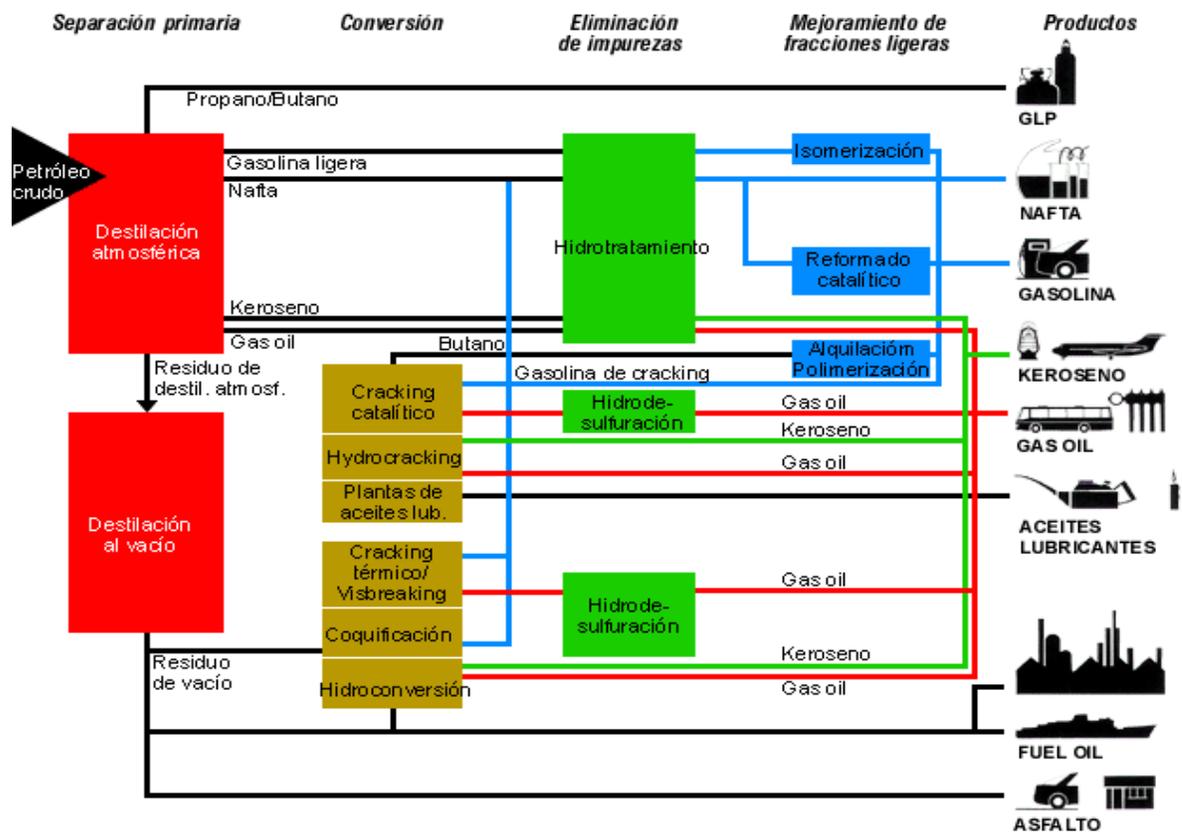
## **1.4 ACEITES LUBRICANTES GENERALIDADES**

### **1.4.1 Elaboración de los aceites lubricantes**

Los aceites lubricantes se componen de aceites básicos provenientes principalmente de la refinación del petróleo, a los cuales se le agrega un paquete de aditivos para darle ciertas propiedades deseadas.

Lubricante = Aceite básico (80 a 95%) + aditivos (2 0 a 5%)

El petróleo crudo es generalmente liberado de sus mayores impurezas en el lugar de su extracción. La destilación de las fracciones livianas, nafta, kerosén y gas-oíl, se realiza en torres que trabajan a presión atmosférica, pasando luego el petróleo crudo que contiene los aceites lubricantes a otra torre, donde se destilan estos últimos bajo un vacío (destilación primaria).



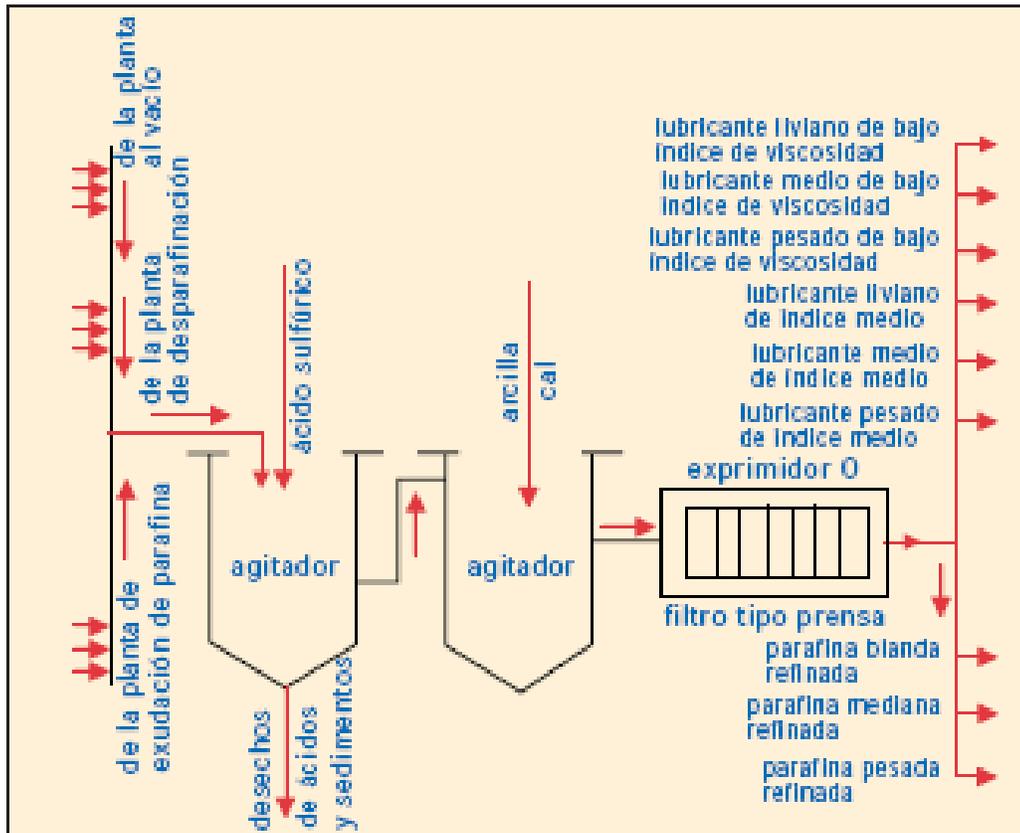
**Figura 1.1**  
Proceso de refinación del petróleo Fuente: usmpetrolero wordpress.

Ya sea un petróleo crudo asfáltico o de un crudo naftenico prácticamente libre de parafina, el proceso de destilación y refinación corresponde al esquema de la Figura N°1.1 el destilado contenido en los aceites lubricantes, es destilado nuevamente y siempre bajo alto vacío, en cuya operación (re destilación), se lo divide en varias fracciones de viscosidades diferentes. Esta nueva destilación permite al mismo tiempo eliminar alguna fracción de la primera destilación.

Los aceites lubricantes así obtenidos no son sin embargo todavía suficientemente purificados ni poseen la necesaria estabilidad química para servicios determinados. Los productos de destilación son por esto sometidos a la purificación química, obteniéndose de este modo los aceites refinados.

A medida que ha progresado la ciencia y la tecnología de la refinación, ha cobrado importancia el uso de sustancias químicas (ácidos) para contribuir al tratamiento de los crudos y derivados. Entre los ácidos son varios los que se utilizan en los procesos: ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, ácido fosfórico. La utilización de ácidos trae el aspecto de corrosión de los equipos y para que éstos sean más durables y funcionen mejor hay que recurrir al uso de metales y aleaciones apropiadas para su fabricación, y durante las operaciones la implantación de un programa muy estricto de mantenimiento.

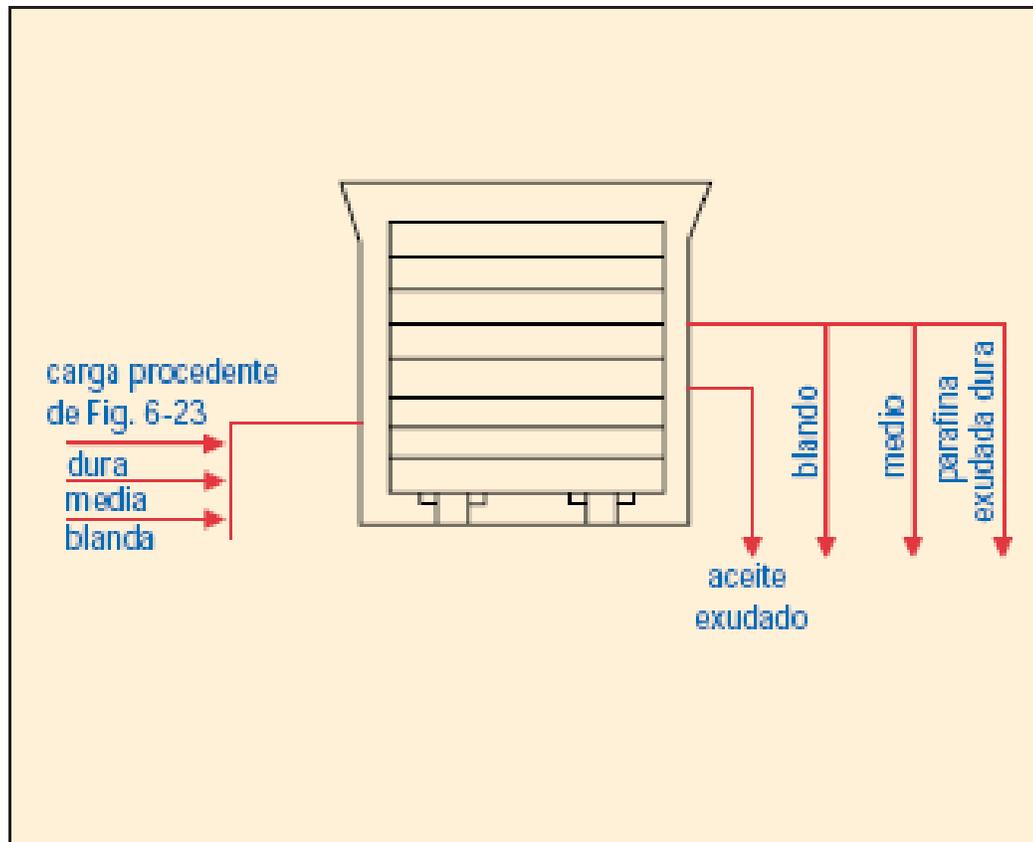
En el tratamiento ácido-arcilla, el ácido sulfúrico actúa como un removedor de material asfáltico y resinoso, y la arcilla sirve para absorber esos materiales. La purificación y tratamiento final de la carga se efectúa en un agitador que contiene más arcilla y cal, y en el exprimidor, tipo prensa. La carga que alimenta a esta etapa de la refinación proviene de las plantas de destilación al vacío, desparafinación con disolvente y de exudación de parafinas.



**Figura 1.2**

Proceso de tratamiento con ácido-arcilla Fuente: monografías/refinacion-petroleo

En la secuencia de procesos que se viene explicando, aquellos residuos; blando, medio y parafina cruda dura que salen del filtro rotatorio de des ceración, se pueden purificar más utilizando una planta de exudación. Los productos que salen de esta planta (aceite exudado, exudaciones blanda, media y parafina exudada dura) son tratados más adelante con ácido y arcilla y pasados por filtros y exprimidoras (prensa).



**Figura 1.3**

Flujograma de la planta de exudación. Fuente: monografías/refinacion-petroleo

## 1.5 PROPIEDADES DE LOS ACEITES LUBRICANTES

Debido a que las bases lubricantes derivadas del petróleo no tenían las características y propiedades adecuadas para proteger correctamente las piezas móviles de los motores, se vio la necesidad de agregarle a estas bases, otros componentes que permiten mejorar y darle propiedades adicionales, denominados aditivos.

Algunas de las propiedades necesarias más importantes para un desempeño satisfactorio de un lubricante son:

### 1.5.1 Densidad o peso específico

La densidad o peso específico de un aceite, está dada por el peso de un volumen determinado de aceite en comparación con el de igual volumen de agua. El peso específico de un aceite lubricante depende del petróleo crudo con el cual ha sido elaborado, y también del procedimiento de la elaboración.

En la industria petrolera se usa la gravedad API (American Petroleum Institute) y la gravedad específica o peso específico a 60°F.

Densidad API (Grados API) =  $141,5 / \text{Gravedad específica a } 60^{\circ}\text{F} - 131,5$

En la práctica en términos comerciales gran parte de los derivados del petróleo se comercializa en base volumétrica (galón, barril, estanque, etc.)

### 1.5.2 Viscosidad

La viscosidad es uno de los parámetros más importantes en la selección de un aceite lubricante para una determinada aplicación.

La viscosidad se define como la fuerza que opone un líquido al movimiento relativo entre sus partes. Por lo tanto, la magnitud de esta fuerza está directamente relacionada con la fricción interna molecular del líquido. La utilización de un aceite demasiado viscoso, puede dar como resultado un mayor consumo de energía, así como un aumento en la temperatura de trabajo en los cojinetes, por otro lado, un aceite lubricante demasiado fluido favorece el escurrimiento del aceite, con el consiguiente peligro de la formación de una película lubricante insuficiente. Por lo tanto, la selección del aceite en términos de la viscosidad adecuada para una determinada aplicación es, para la seguridad de la máquina a lubricar, de gran importancia.

Hay varias maneras y unidades para expresar la viscosidad de los fluidos, según el método que se utilice para determinarla:

Viscosidad absoluta \_\_\_\_\_ Poises

Viscosidad cinemática \_\_\_\_\_ centistokes (cSt)

Viscosidad Saybolt \_\_\_\_\_ Segundos Saybolt Universales (SUS)

En la actualidad, la Organización Internacional de Estandarización ISO (International Standardization Organization), ha determinado que la viscosidad de los aceites industriales, se exprese en centistokes a una temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, algunos fabricantes de aceites aún utilizan las unidades en SUS. En la tabla 1.1 se muestra una comparación de los valores de las viscosidades en centistokes y en SUS.

ACTUAL		OBSOLETA
VISCOSIDAD ISO EN cSt		VISCOSIDAD EN SUS A
40°C	100°C	40°C
32	5.6	150
46	7.5	200
68	9.4	300
100	11.3	500

**Tabla N° 1.2**

Relación de las viscosidades entre centistokes y SUS Fuente: typrefrigeracion

### 1.5.3 Índice de Viscosidad

El índice de viscosidad es un número que mide la variación de la viscosidad con la temperatura. A mayor índice de viscosidad, menor es la variación de la viscosidad con la temperatura.

El parámetro que describe la tasa de cambio se llama el índice de viscosidad, y es una medida arbitraria representada por un número sin unidades. El Índice de Viscosidad (IV) es un parámetro ampliamente usado que mide el cambio de viscosidad debido a la temperatura de un lubricante entre 40°C y 100°C. Cuando Menor se la caída de la viscosidad con la temperatura, mayor será el IV y más plana se la curva en el gráfico.



**Figura 1.4**

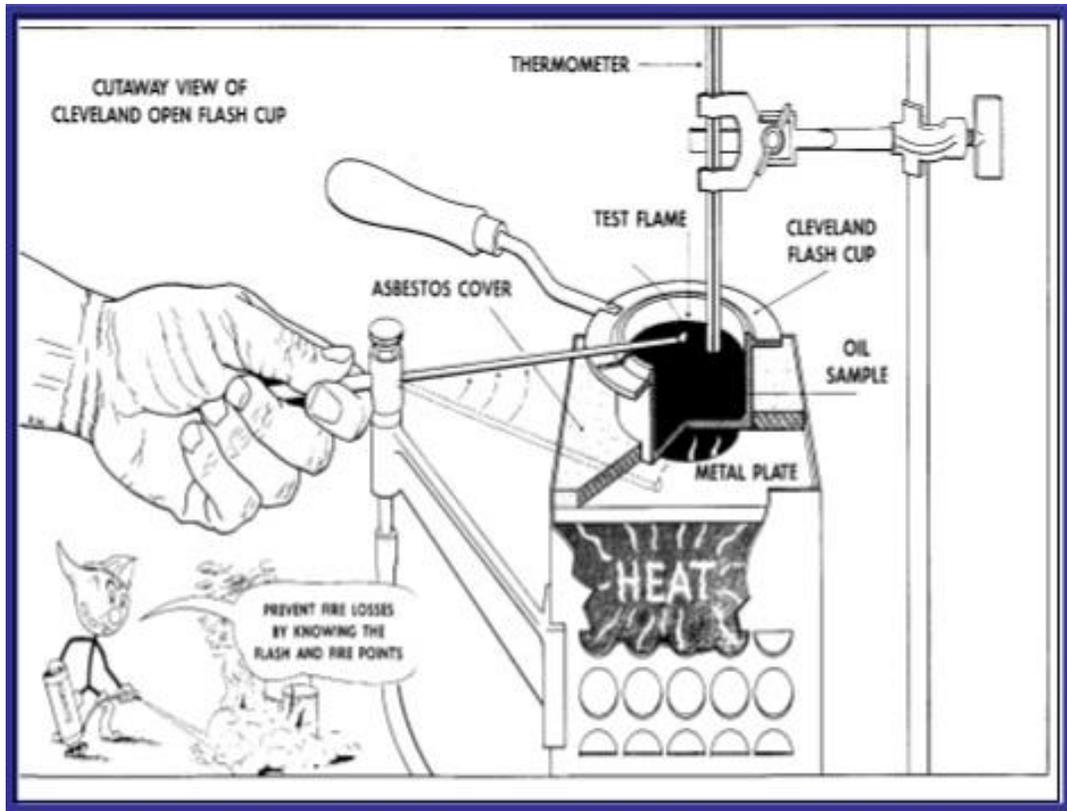
Determinación del Índice de Viscosidad Fuente: SHELL fundamentos

Vale la pena remarcar que el IV no tiene que ver con mayor y menos viscosidad del aceite, sino únicamente con la variación de viscosidad entre las temperaturas de referencia de 40°C y 100°C

### 1.5.4 Punto de inflamación

El punto de inflamación de un aceite es la temperatura mínima en la cual los vapores que se desprenden forman con el aire que se encuentra sobre el aceite, una mezcla que se inflama ante la presencia de una llama.

El punto de ignición es determinado calentando el aceite hasta que se forman vapores; después se pasa una flama por encima del aceite. El punto de ignición es la temperatura a la cual el lubricante enciende sin sostener la flama. El punto de inflamación de un lubricante es típicamente de 200°C o más.



**Figura 1.5**

Determinación del punto de Inflamación Fuente: SHELL Fundamentos

### **1.5.5 Punto de congelación**

A temperaturas normales los aceites lubricantes son líquidos; a elevadas temperaturas aumenta su fluidez considerablemente. El enfriamiento a temperaturas más bajas de lo normal, trae consigo un aumento en la viscosidad, cuando la temperatura es tan baja que el aceite alcanza un estado denominado “sólido”, a esa temperatura se le denomina punto de congelación. En este punto el aceite no es homogéneo, ya que está constituido por fracciones de este que están sólidas y fracciones no solidificadas.

### **1.5.6 Color de los aceites**

En años anteriores el color del aceite era de gran importancia ya que este era un índice de la calidad de la refinación. Actualmente las compañías petroleras colorean sus aceites lubricantes con diversas sustancias, constituyendo el color del aceite algo así como una marca de identificación para el consumidor. Por lo tanto el color del aceite no es una característica indicadora de la cualidad de un aceite, siendo la estabilidad del color una propiedad importante en tomar en cuenta.

### 1.5.7 Número total ácido (TAN)

El número total ácido es un parámetro que permite cuantificar el agotamiento del aditivo antioxidante del aceite y el deterioro de la reserva alcalina de la base lubricante a través del tiempo. El TAN se mide en mgr. KOH/gr y se evalúa según el método ASTM D664.

## 1.6 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES LUBRICANTES

### 1.6.1 Clasificación de los aceites según SAE

GRADOS SAE	TEMPERATURA MÍNIMA DE USO	VISCOSIDAD CINEMÁTICA	VISCOSIDAD A 100 °C
0W	-30 °C	3,8	
5W	-25 °C	3,8	
10W	-20 °C	4,1	
15W	-15 °C	5,6	
20W	-10 °C	5,6	
25W	-5 °C	9,3	
20		5,6-9,3	Fluido
30		9,3-12,5	Semifluido
40		12,5-16,3	Semifluido
50		16,3-21,9	Espeso

**Tabla N°1.3**

Clasificación por viscosidad SAE Fuente: Compras Lubricantes

Así como existen diferentes tipos de motores, los fabricantes de aceites también se esfuerzan por ofrecer compuestos que sean apropiados para cada tipo de motor y para cada uso en específico. No es lo mismo un motor gasolina de nueva generación que está construido con menor tolerancia de montaje entre las piezas, a un motor diésel o uno más antiguo que lleve a sus espaldas muchos kilómetros.

Por ello, vamos a comentar qué tipo de aceites existen y cómo se clasifican de acuerdo al uso para el que están destinados. Las clasificaciones o normas que delimitan el uso y la aplicación de cada una de las alternativas en aceites responden a los adelantos en ingeniería y diseño que se aplican constantemente a los motores.

Se ha visto que en los envases de aceite aparecen letras, grados de viscosidad, tipo de compuesto o las palabras “monogrado” y “multigrado”. Todas estas letras y números sirven simplemente para clasificar el tipo de aceite, según el sistema **SAE** (Sociedad de Ingenieros Automotores) y **API** (Instituto Americano del Petróleo).

## 1.7 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES PARA MOTOR

### 1.7.1 Lubricantes por su grado de viscosidad

El valor SAE define el **grado de viscosidad del aceite**, que depende y mucho de la temperatura. La viscosidad se refiere a un valor que indica la mayor o menor estabilidad de un aceite lubricante con los cambios de temperatura. En las tiendas se encuentran los envases de lubricantes que son **monogrados** o **multigrados**. Los primeros se caracterizan por tener un solo grado de viscosidad, mientras que los segundos poseen un alto índice de viscosidad.

La clasificación SAE está basada en temperaturas en grados Fahrenheit (0°F – 210°F, equivalentes a -18°C y 99°C Celsius) y establece ocho grados para los monogrado y seis para el multigrado. En esta clasificación, los números bajos indican baja viscosidad de aceite o bien aceites “delgados” como comúnmente se les conoce. Los altos indican lo opuesto.

Aceite monogrado diseñados para trabajar a una temperatura específica o en un rango muy cerrado de temperatura. En el mercado se pueden encontrar aceites monogrados SAE 10, SAE 20, SAE 30 y SAE 40, entre otros.

- SAE 10: empleado en climas con temperaturas menores a 0°C.
- SAE 20: empleado en climas templados o en lugares con temperaturas inferiores a 0°C. Antiguamente se utilizaba para el rodaje de motores nuevos. Actualmente no se recomienda su uso.
- SAE 30: sirve para motores de automóviles en climas cálidos.
- SAE 40: se usa para motores de trabajo pesado y en tiempo de mucho calor (verano).

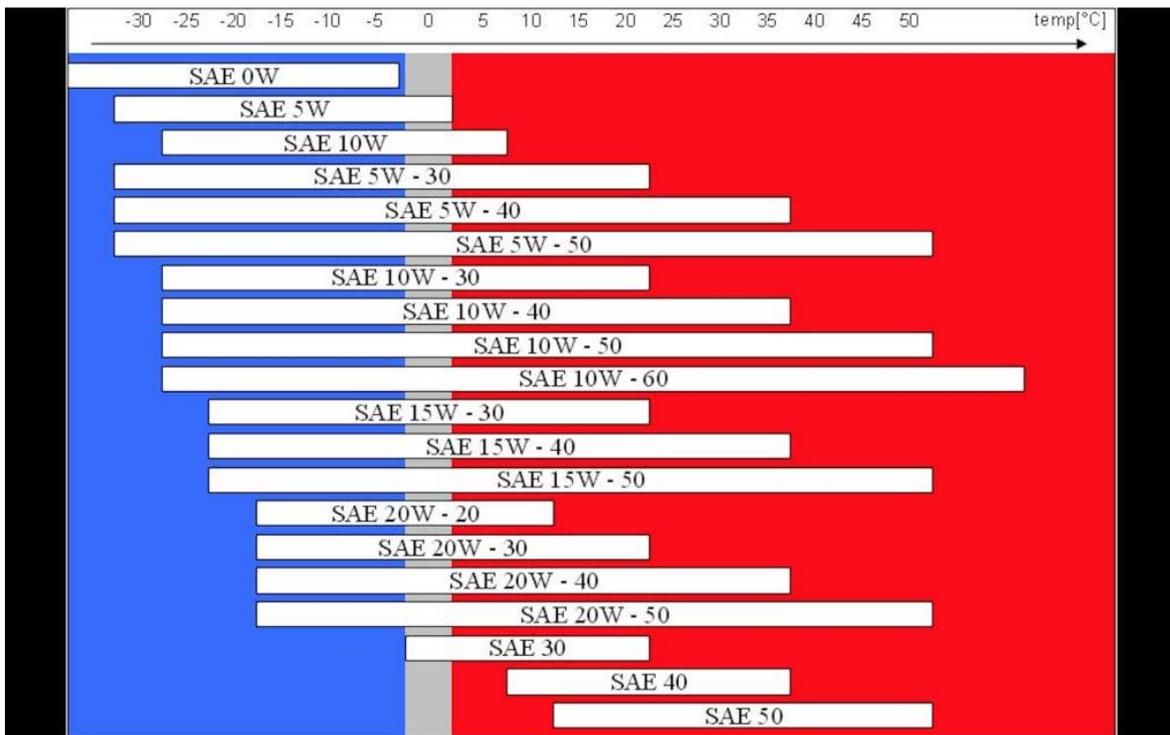
Los aceites monogrados no son solicitados actualmente por ningún fabricante de vehículos, dada su limitación a diferentes temperaturas. De hecho, son apropiados para su uso en zonas sometidas a pocos cambios de temperatura ambiente a lo largo del año. Si existen cambios importantes de invierno a verano, es necesario utilizar aceites de un grado SAE bajo para el invierno (SAE 10W) y otro aceite de grado SAE alto (SAE 40) para utilizar en verano.

### 1.7.2 Aceite multigrado

Al otro lado encontramos los aceites multigrados, que sí que están diseñados para trabajar en un rango más amplio de temperaturas porque están formados por un aceite base de baja viscosidad así como de aditivos que evitan que el lubricante pierda viscosidad al calentarse. SAE 5W-30, SAE 10W-40 o SAE 15W-40 son, entre otros, algunos de los aceites multigrado que podemos encontrar en el mercado. La letra W, que indica invierno (*Winter*, en inglés), designa aquellos aceites de motor que cumplen con los requerimientos de viscosidad a bajas temperaturas.

Veamos un ejemplo. SAE 10W – 40. Esto indica que este aceite se comporta como un SAE 10W cuando el motor se encuentra en bajas temperaturas, manteniendo la fluidez adecuada y favoreciendo el arranque en frío y como un SAE 40, más espeso, durante el funcionamiento del motor, cuando el aceite se encuentra a 60°C – 85°C.

Así, para una mayor protección en frío, se deberá recurrir a un aceite que tenga el primer número lo más bajo posible y para obtener mayor grado de protección en caliente, un aceite que posea un número elevado para el segundo.



**Tabla N°1.4**

Clasificación de viscosidades monogrados y multigrados Fuente: MOBIL

### 1.7.3 Lubricante por tipo de servicio (API)

Esta clasificación aparece en el envase de todos los aceites y consta de 2 letras. La primera letra determina el tipo de combustible del motor para el que fue diseñado, utilizando una “S” para motores a gasolina y una “C” para motores diésel. La segunda letra especifica la calidad del aceite según el orden alfabético. Cuando mayor sea la letra, mayor calidad. Actualmente, API-SN es el nivel de calidad más reciente y más alto en cuanto a motores de gasolina.



**Figura 1.6**

Cambio de Aceite Fuente: PDVSA

Ahora veamos un par de letras que podremos encontrar en los envases de aceite; **el valor API**. La primera letra determina el tipo de combustible del motor para el que fue diseñado el aceite, utilizándose **una “S” para motores a gasolina y una “C” para motores diésel**. La segunda letra determina la calidad del aceite y **cuanto mayor es la letra (en el alfabeto) mejor es la calidad del aceite**. Actualmente en motores a gasolina se ha llegado a la **clasificación SN**, lo que equivaldría al aceite para motores a gasolina de mayor calidad que existe hasta el momento, mientras que la clasificación actual más alta para motores diésel es la **CI-4**.

## **1.8 CLASIFICACION DE LA NORMATIVA EUROPEA Y AMERICANA PARA EL USO DIESEL N°2**

### **1.8.1 Tipos de contaminantes presentes en los gases de emisión**

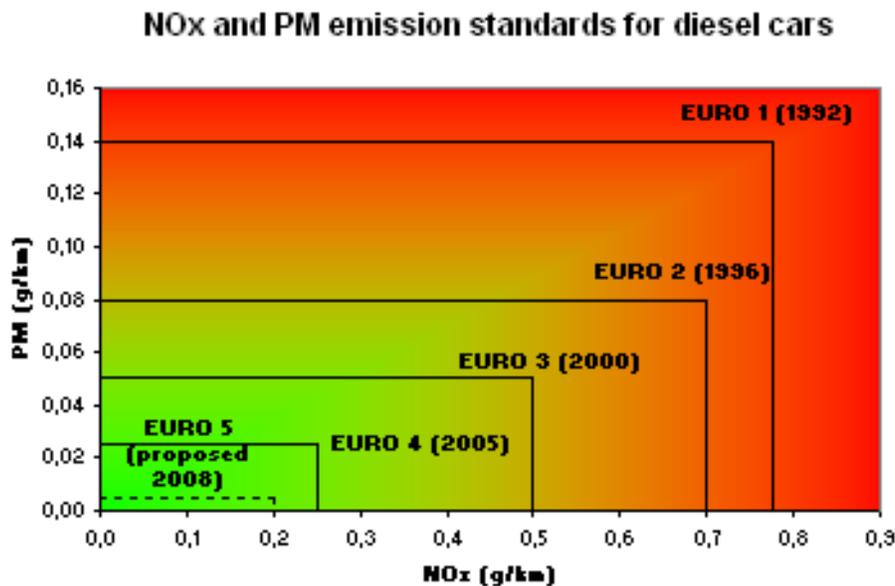
Para la evaluación de emisiones, aparte del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), de entre todas las sustancias presentes en el escape de un motor actualmente se tiene en cuenta la concentración de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), de materia particulada (PM), de hidrocarburos (HC) y de monóxido de carbono (CO).

1. Los NO<sub>x</sub> provienen del nitrógeno (N<sub>2</sub>) atmosférico que, en las condiciones extremas de presión y temperatura que se producen en la combustión, se oxida en presencia de oxígeno.

2. La materia particulada comprende un amplio espectro de contaminante en forma de aerosol y entre los que se encuentran distintas formas orgánicas y minerales de carbono procedentes del combustible que no han sido totalmente oxidadas durante la combustión.
3. Los HC y el CO provienen en su mayoría de un quemado incompleto del combustible.

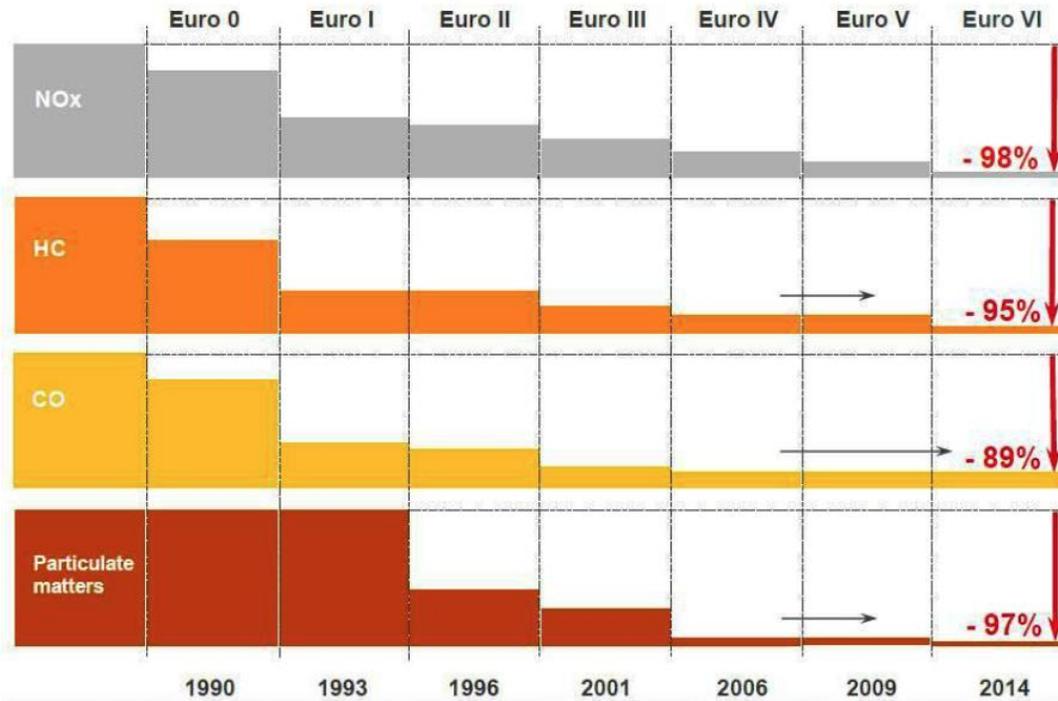
Una **norma europea sobre emisiones contaminantes** es un conjunto de requisitos que regulan los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión interna de los vehículos nuevos vendidos en los Estados Miembros de la Unión Europea. Las normas de emisión se definen en una serie de directivas de la Unión Europea con implantación progresiva que son cada vez más restrictivas.

Actualmente, las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), Hidrocarburos (HC), Monóxido de carbono (CO) y partículas están reguladas para la mayoría de los tipos de vehículos, incluyendo automóviles, camiones, trenes, tractores y máquinas similares, barcas, pero excluyendo los barcos de navegación marítima y los aviones. Para cada tipo de vehículo se aplican normas diferentes. El cumplimiento se determina controlando el funcionamiento del motor en un ciclo de ensayos normalizado. Los vehículos nuevos no conformes tienen prohibida su venta en la Unión Europea, pero las normas nuevas no son aplicables a los vehículos que ya están en circulación. En estas normas no se obliga el uso de una tecnología en concreto para limitar las emisiones de contaminantes, aunque se consideran las técnicas disponibles a la hora de establecer las normas.



**Tabla N° 1.5**

Gráfico simplificado que muestra la evolución de las normas europeas de emisiones para vehículos diésel. Fuente: Wikipedia



**Tabla N°1.6**

Evolución de las normativas para motores diésel en cuanto a NOx, hidrocarburos, CO y partículas. Fuente: redinnovacion-EOI

## 1.9 ACEITES USADOS

Aceites de origen mineral que durante su uso perdieron sus principales características, volviéndose inapropiados para continuar su utilización con el mismo propósito.

Comprenden a los aceites lubricantes de los motores, de fluidos hidráulicos y de transmisión, aceites de corte, de transferencia de calor y los aceites dieléctricos provenientes de transformadores y condensadores.

Quedan excluidos los aceites dieléctricos que contienen más de 50 ppm de PCB (bifenolespoli-clorados), que deben gestionarse de forma separada

Un aceite lubricante está constituido por una base lubricante y una serie de aditivos:

La base lubricante está compuesta por hidrocarburos (75 – 85 %), estos, a su vez se dividen en: Alcanos (45-76 %), ciclo alcanos (13-45 %) y aromáticos (10-30 %), el resto lo componen aditivos (15-25 %), entre los cuales están: Antioxidantes (ditiofosfatos, fenoles, aminas), detergentes (sulfonatos, fosfonatos, fenolatos), anticorrosivos (ditiofosfatos de zinc y bario, sulfonatos), antiespumantes (siliconas, polímeros sintéticos) y antisépticos (alcoholes, fenoles, compuestos clorados).

Los aceites lubricantes usados adquieren concentraciones elevadas de metales pesados como plomo, cadmio, cromo, arsénico y zinc. El origen de estos metales es

principalmente el desgaste del motor o maquinaria que lubricó, otra fuente de metales es debida al contacto con el combustible, como es el caso de la presencia de plomo proveniente de la degradación del tetraetilo de plomo de las naftas, las cuales son el resultado de la agregación de aditivos para mejora el del índice octano

Otros contaminantes presentes son el azufre y hollín generados en la combustión.

La descomposición de los aceites de motor se debe especialmente a una reacción de oxidación. En todos los casos, como consecuencia de su utilización se degrada, perdiendo las propiedades que los hacen operativos y haciendo necesaria su sustitución, generándose un residuo variable en cantidad y composición.

En la **tabla 1.7** podemos ver los límites condenatorios de Caterpillar, Cummins y Detroit. Con la excepción del límite de **Silicio** (tierra), estos límites son sumamente altos. Un aceite que permite tanto desgaste con este nivel de contaminación no es bueno y no debería ser usado en una empresa que quiere controlar sus costos. No puede formar parte de un plan de mantenimiento proactivo, ni debería ser certificado como parte de un plan de mantenimiento en una inspección para la certificación ISO 9000. Esta tabla no considera kilómetros u horas de uso. Simplemente indica que, al llegar a ese nivel de contaminación o desgaste, hay que cambiar el aceite.

<b>Tabla 1</b>	<b>Caterpillar</b>	<b>Cummins</b>	<b>Detroit</b>
Hierro	100 ppm	84 ppm	150 ppm
Cobre	45 ppm	20 ppm	90 ppm
Plomo	100 ppm	100 ppm	No especifica
Aluminio	15 ppm	15 ppm	No especifica
Cromo	15 ppm	15 ppm	No especifica
Estaño	20 ppm	20 ppm	No especifica
Sodio	40 ppm	20 ppm	50 ppm
Boro	20 ppm	25 ppm	20 ppm
Silicio	10 ppm	15 ppm	No especifica
Viscosidad	+20% a -10%	± 1 grado SAE o 4 cSt del nuevo a 100° C	+40% a -15%
Agua	0.25% max.	0.20% max.	0.30% max.
TBN	1.0 KOH/g min.	2.0 KOH/g min. 50% del original o igual al TAN	1.0 KOH/g min.
Combustible	5% max.	5% max.	2.5% max.
Glicol	0.1% max.	0.1% max.	0.1% max.

**Tabla N° 1.7**  
límites condenatorios de Caterpillar, Cummins y Detroit.  
Fuente: WIDMAN INTERNATIONAL SRL

En la **tabla 1.8** podemos ver límites que son normalmente aceptados en la industria para motores a diésel, independiente de la marca. Estos límites también son muy altos para ser considerados como parte de un plan de mantenimiento proactivo.

Hay grandes diferencias entre estas dos tablas, parcialmente por la variación en materiales entre motores. Por ser más representativa de lo que se ve como “normal” en muchos análisis, esta tabla acepta mayor contaminación por tierra.

Esta tabla tampoco considera los kilómetros recorridos o las horas de uso y no considera el tamaño del motor.

<b>Tabla 2</b>	<b>Normal</b>	<b>Anormal</b>	<b>Critico</b>
Fe Hierro (Iron)	<100 ppm	100 a 200 ppm	>200 ppm
Pb Plomo (Lead)	<30 ppm	30 a 75 ppm	>75 ppm
Cu Cobre (Copper)	<30 ppm	30 a 75 ppm	>75 ppm
CR Cromo (Chromium)	<10 ppm	10 a 25 ppm	>25 ppm
Al Aluminio (Aluminum)	<20 ppm	20 a 30 ppm	>30 ppm
Ni Níquel (Nickel)	<10 ppm	10 a 20 ppm	>20 ppm
Ag Plata (Silver)	<3 ppm	3 a 15 ppm	>15 ppm
Sn Estaño (Tin)	<20 ppm	20 a 30 ppm	>30 ppm
Na Sodio (Sodium)	<50 ppm	50 a 200 ppm	>200 ppm
Si Silicio (Silicon)	<20 ppm	20 a 50 ppm	>50 ppm
Dilución por combustible (Fuel)	<2%	2 a 6%	>6%
Hollín (Soot)	<2%	2 a 6%	>6%

**Tabla N° 1.8**

Límites Normales de aceptación en la industria de motores diésel. Fuente: WIDMAN INTERNATIONAL SRL

En la tabla 1.8 se observa que hay una gran diferencia en el plomo aceptado. Mientras CATERPILLAR y Cummins aceptan 100 ppm antes de condenar el aceite, la tabla común, o “normal” indica “aceptable” o “normal” 30 ppm de plomo. Esto se desvía mucho de la práctica del *mantenimiento proactivo*, ya que sabemos por numerosos resultados que es muy posible mantener el desgaste de plomo (de cojinetes) debajo de 10 ppm.

### **1.10 CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEITES USADOS**

El aceite lubricante base es prácticamente indestructible. La degradación de este, es producto de su contaminación con diferentes sustancias y al proceso de oxidación del aceite base o base lubricante. La contaminación es debido al uso del lubricante y la manipulación de este, el proceso de oxidación se origina por el agotamiento en el lubricante de la reserva alcalina proveniente de los aditivos antioxidantes o de los detergentes-dispersantes.

### **1.10.1 Posibles contaminantes en los aceites lubricantes usados**

Los principales contaminantes de los aceites lubricantes pueden ser sólidos o líquidos y provienen del aire circundante a la máquina o de la misma máquina en la cual opera el lubricante.

Los contaminantes provenientes del aire corresponden principalmente a polvo y humedad, estos ingresan al lubricante por medio de respiraderos, sellos y empaquetaduras defectuosas y en general por el contacto del lubricante con el medio circundante.

Los contaminantes originados por la operación de la máquina son principalmente partículas de carbón proveniente en el caso de los motores de combustión interna de la mala combustión del combustible o aditivo de este y partículas metálicas provenientes del desgaste normal o anormal de piezas metálicas.

### **1.10.2 Oxidación**

Es un proceso químico que se empieza a generar con el agotamiento de la reserva alcalina proveniente de los aditivos antioxidantes o de los detergentes dispersantes. El proceso de oxidación con lleva finalmente a la formación de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).

Los factores que inciden en el proceso de oxidación del aceite lubricante son:

- Azufre, es un componente del proceso de oxidación; proviene del aceite base cuando este es de origen mineral y del combustible cuando el lubricante proviene de motores de combustión interna.
- Oxígeno, es un componente del proceso de oxidación; su presencia es inevitable ya que este proviene del aire y este se ve incrementado cuando el equipo en el cual es utilizado el aceite lubricante está en operación.
- Temperatura de operación del lubricante, actúa como catalizador del proceso de oxidación; este influye mayormente en la medida que la temperatura de operación está por encima de los  $50^{\circ}C$ . Se tiene que por cada  $10^{\circ}C$  de incremento en la temperatura de operación por sobre el  $50^{\circ}C$ , la razón de oxidación se duplica.
  - Dióxido de azufre, es el resultado de la oxidación parcial del aceite lubricante y se origina con el agotamiento de la reserva alcalina del aceite lubricante.
  - Agua, es un componente del proceso de oxidación.
  - Partículas de cobre y hierro, estas actúan como catalizadoras del proceso de oxidación.

### **1.10.3 Emulsiones**

Las emulsiones son una mezcla íntima de aceite y agua, generalmente de una apariencia lechosa o nebulosa. Las emulsiones pueden ser de dos tipos: aceite en agua (donde el agua es la fase continua) y agua en aceite (donde el agua es la fase discontinua). Este último caso corresponde a las emulsiones en los aceites usados.

## **1.11 NORMATIVA SOBRE LA DISPOSICIÓN Y MANEJO DE ACEITES USADOS**

Los aceites usados son considerados en el Artículo 129 de la Ley N° 3058, de 17 de mayo de 2005, de Hidrocarburos, señala que las actividades hidrocarburíferas se sujetarán en lo relativo a los temas ambientales y a los Recursos Naturales a lo dispuesto sobre esta temática en la Constitución Política del Estado, Ley del Medio Ambiente y sus Reglamentos, Ley Forestal, Régimen Legal Especial de Áreas Protegidas y a los Convenios Internacionales Ambientales ratificados por el Estado en el marco del Desarrollo Nacional Sustentable.

### **1.11.1 Almacenamiento**

Dado a que son sustancias consideradas peligrosas por su inflamabilidad y por contener sustancias tóxicas, deben ser almacenados de acuerdo a lo indicado en la Ley N° 3058, deben ser recolectados y almacenados en contenedores resistentes y debidamente rotulados.

### **1.11.2 Reciclaje**

Existen empresas autorizadas por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) que reciclan aceite usado. Las fuentes generadoras deben entregar el aceite usado a estas empresas para ser reciclado de acuerdo al procedimiento establecido por la ANH. La implementación de un manejo adecuado de los aceites usados por parte de las fuentes emisoras, debe incorporar el reciclaje completo de los aceites usados, con un sistema programado de retiro de los contenedores, los cuales deben estar debidamente rotulados.

Podemos citar las siguientes empresas que se encaran de recolectar estos aceites usado; en Santa Cruz tenemos:

- RECICLOIL Oil Company
- JAKE OIL LUBRIC SRL

En La Paz podemos citar a:

- INDELUB

### **1.11.3 La disposición de los aceites usados según ISO 14001**

La serie de normas ISO 14000, no hace referencia al respecto, ya que no es su naturaleza. Pero los aceites usados están sujetos a normativas que rigen para todas las fuentes de emisión, por lo tanto, aquellas empresas que están certificadas por ISO 14001, deben contemplar la disposición final de sus residuos, en su modelo de gestión ambiental.

### **1.11.4 Destino y reutilización de los aceites usados**

Si bien la “Reglamento Ambiental para el Sector Hidrocarburos, 19 de julio de 1996 en los artículos 85° y 86° es claro respecto a la disposición de los aceites usados, en la practica la normativa no es cumplida por parte de todas las fuentes de emisión, y los aceites usados toman como destino vertederos, alcantarillados o son reutilizados sin un debido tratamiento trayendo consigo todas estas alternativas un alto costo en términos medioambientales.

### **1.11.5 Uso como combustible en calderas**

El poder calorífico de los aceites usados es similar a los combustibles Fuel Oil 5 y 6 para calderas tradicionales, y para utilizarlo no es necesario efectuar modificaciones relevantes en los quemadores de estas.

### **1.11.6 Adulteración**

Esta práctica es desarrollada principalmente por comerciantes minoristas de reventa y recolección que solo someten al aceite usado a un filtrado rudimentario, para posteriormente mezclarlo con aceites lubricantes baratos y comercializarlo en envases de alguna marca conocida. Los principales consumidores de estos aceites son los vehículos de la locomoción colectiva minibuses y taxis.

### **1.11.7 Tratamiento de caminos (matapolvo)**

Comúnmente se utiliza aceite usado en el tratamiento de caminos para evitar que se levante excesivo polvo, esta práctica es muy frecuente en áreas mineras, agrícolas y forestales. Generando un grave daño ambiental en la tierra y las napas subterráneas.

### **1.11.8 Otros**

Volúmenes significativos de aceites usados son empleados inapropiadamente en la impregnación de postes y estacas usadas en los predios agrícolas y forestales, en la lubricación de cadenas de motosierras, en la quema para proteger los predios frutales de las heladas, como desmoldador de concreto en la construcción, etc.

## **1.12 RECICLAMIENTO DEL ACEITE USADO**

El reciclaje del aceite usado es una opción a la disposición del aceite no solo por el compromiso que se debe tener por la protección del medio ambiente, sino también por un motivo económico, en la actualidad el petróleo y sus derivados han alcanzado un alto precio y el aceite reciclado es una opción para la lubricación de variadas aplicaciones.

El reciclaje del aceite usado está basado en el hecho de que el aceite base es prácticamente indestructible. Y este cuando está usado se encuentra solo contaminado. Por lo tanto, el proceso de reciclaje básicamente consiste en la extracción de dichos contaminantes. Diversos métodos se han desarrollado para la recuperación, estos métodos se pueden dividir en dos amplios grupos.

- Reacondicionamiento.
- Re-refinación.

## **1.13 MÉTODOS DE REACONDICIONAMIENTO**

Los métodos de reacondicionamiento del aceite usado, consisten en la extracción de impurezas, partículas en suspensión y agua desde el aceite. Estos métodos son útiles en aceites no oxidados y son ampliamente utilizados en instalaciones y equipos que cuentan con un sistema de lubricación centralizado, donde el aceite es reacondicionado para alargarle la vida útil a este.

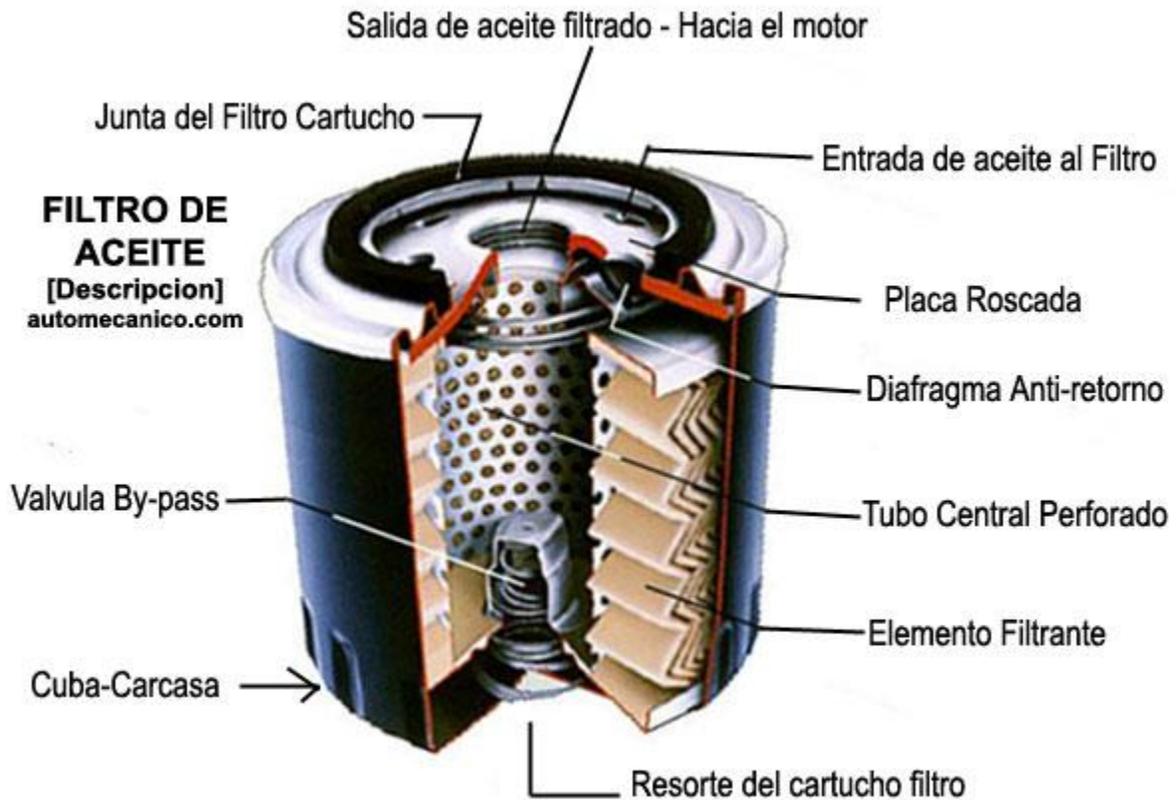
### **1.13.1 Filtración**

La filtración se define como la separación de sólidos de un líquido y se efectúa haciendo pasar el líquido a través de un medio poroso. Los sólidos quedan detenidos en la superficie del medio filtrante.

La finalidad del filtrado en la industria es la separación del líquido de los sólidos suspendidos en él.

La elección del medio filtrante es la consideración más importante para asegurar el funcionamiento eficiente o el buen rendimiento del filtro. Paradójicamente en la mayoría de los casos el medio filtrante no actúa como tal, sino que simplemente actúa como soporte de la torta de sólidos que se deposita y sobre la cual tiene lugar el proceso de separación.

El medio filtrante debería seleccionarse en primer término por su capacidad para retener los sólidos sin obstrucción y derrame de partículas al iniciarse el proceso de filtración, no obstante, deberán además considerarse las siguientes cualidades.



**Figura 1.7**

Filtro de aceite

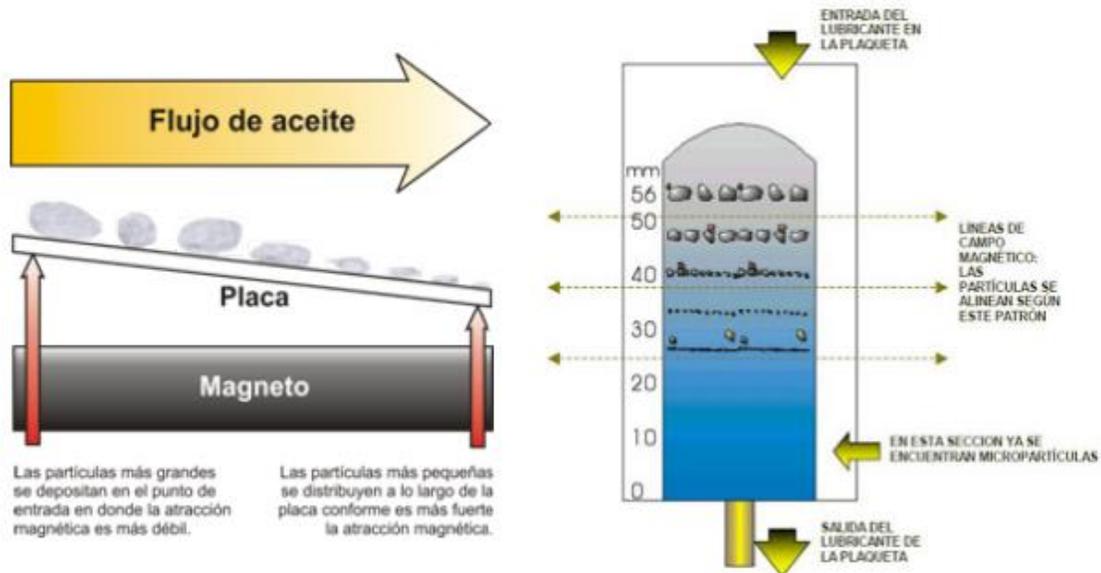
Fuente <http://automecanico.com/auto2038/filtair001.html>

- Capacidad para que los sólidos se traben en sus poros dentro de un tiempo razonable después de comenzar la alimentación.
- resistencia mínima a la circulación del filtrado.
- Impedimento para que las partículas densas penetren en sus poros, lo que aumentaría mucho la resistencia a la circulación.
- resistencia al ataque químico
- Superficie lisa para la fácil descarga de la torta.

El proceso de filtración se ve afectado de manera positiva con el incremento de la temperatura. Al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad del líquido a filtrar, lo cual facilita considerablemente la circulación del fluido a través del medio filtrante lo cual se traduce en mayor capacidad del filtro y menor gasto energético. La economía resultante de calentar un material dado para filtrarlo puede determinarse realizando algunos ensayos previos.

### 1.13.2 Ferrografía

Es una técnica analítica que separa las partículas magnéticas del aceite, aplicándole un campo magnético. Las partículas grandes se depositan primero y las pequeñas recorren una mayor distancia en el porta-objeto.



**Figura 1.8**  
Ferrografía Fuente: AUTOTALLER S.A.

Se utilizan tres técnicas de análisis:

- Ferrografía cualitativa, basada en un análisis de opacidad en un punto específico antes del final del ferrograma.
- Ferrografía de lectura directa, que valora la concentración de partículas de desgaste mediante la toma de dos medidas de opacidad en puntos diferentes al comienzo del Ferrograma.
- Análisis de los ferrogramas al microscopio para diagnosticar modos de fallo basado en el tamaño y forma de las partículas. La eficacia de la Ferrografía depende obviamente de la facilidad de separación magnética de las partículas del aceite.

### 1.13.3 Separación centrífuga

En la separación centrífuga, el aceite usado es sometido a la acción de la fuerza centrífuga acelerando el proceso de precipitación de los sólidos al generar aceleraciones considerablemente mayores que la aceleración de gravedad.

Las centrífugas son ampliamente utilizadas en la industria y existen variados tipos de estas, dependiendo de la aplicación.

Para el re-acondicionamiento de aceite usado, por lo general las centrífugas más utilizadas son los separadores centrífugos de discos de estancos, auto limpiante (*disk stackcentrifuges, selfcleaningbowl*). Este tipo de centrífugas pueden procesar un gran volumen de lubricante y en un régimen continuo de operación.

En el proceso de separación centrífuga la temperatura, al igual que en la filtración ayuda en el proceso ya que una viscosidad menor facilita la precipitación de los sólidos, lo cual se traduce en un ahorro energético.

#### **1.13.4 Re-refinación**

Cuando el aceite usado está altamente contaminado y además se encuentra oxidado, los procesos de re-acondicionamiento no son viables y la re-refinación es una alternativa para la recuperación de estos aceites. El proceso de re-refinación es un proceso drástico en el cual además de removerse los contaminantes se remueven productos solubles, ácidos, asfaltos, gases, etc. El proceso de re-refinación es similar al proceso de refinación al cual es sometido el crudo para la obtención de los aceites bases, y el aceite re-refinado es prácticamente igual al aceite base.

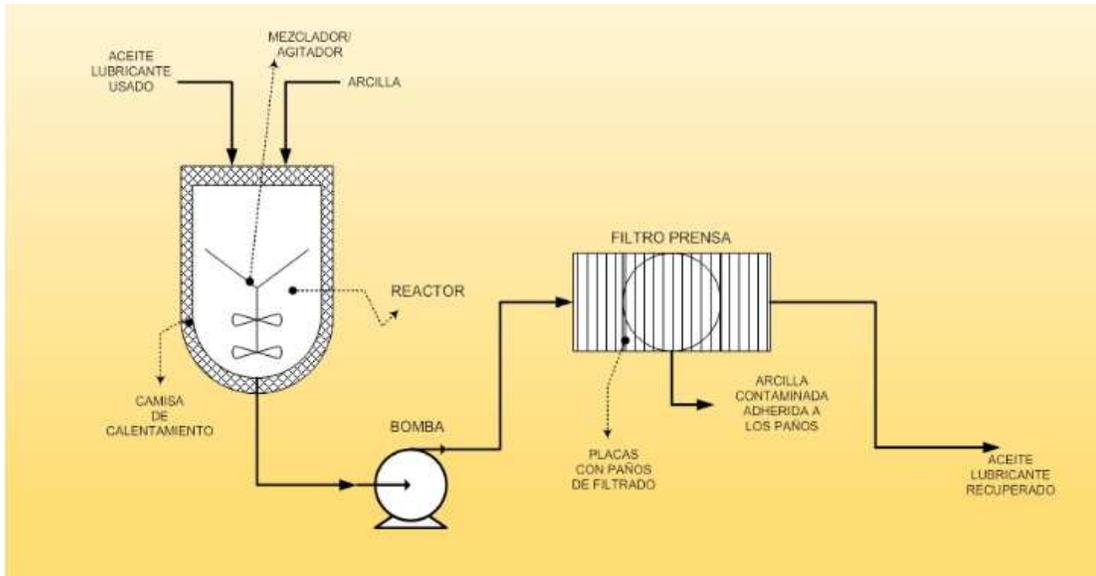
Los procesos de re-refinación no son tan ampliamente usados, ya que por lo general con un proceso de re-acondicionamiento es suficiente. La re-refinación involucra altos costos de inversión y un costo operativo alto, por lo cual es solo viable para el reciclaje de grandes volúmenes de aceite usado.

Los métodos utilizados para la re-refinación de aceites usado son:

- Tratamiento químico.
- Extracción por solvente.
- Tratamiento absorbente.
- Destilación o fraccionación.
- Hidro-tratamiento

#### **1.13.5 Proceso convencional ácido – arcilla**

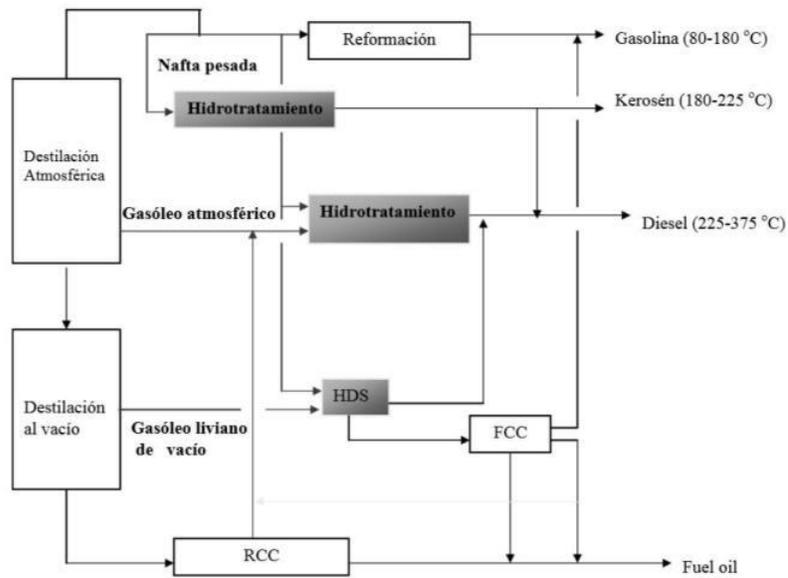
El aceite usado se somete a un tratamiento con ácido sulfúrico concentrado, el cual reacciona con polímeros, asfaltos, aditivos degradados y otras sustancias propias de la degradación del aceite, formándose un lodo el cual es filtrado o decantado. El aceite es neutralizado con arcilla activada a elevada temperatura. La arcilla además blanquea el aceite y absorbe ciertas impurezas que no son removidas con el tratamiento ácido. Finalmente, el aceite es filtrado para extraerle los sólidos y la arcilla. Si los aceites usados que se procesan son de distinta viscosidad, es necesario un proceso de destilación, en el cual el aceite se separa según su viscosidad.



**Figura 1.9**  
 PROCESO ACIDO – ARCILLA Fuente: Monografias.com

**1.13.6 Proceso de destilación e hidrotratamiento**

En este proceso el aceite usado es destilado en columnas de alto vacío, en la parte de abajo de la columna quedan las impurezas, las cuales luego son extraídas desde la columna. El aceite se mezcla con hidrógeno y se calienta en un horno y se pasa por un catalizador en el reactor. Luego el aceite es fraccionado para obtener distintas bases de lubricante.



**Figura 1.10**  
 Destilación e Hidrotratamiento Fuente: elpetroleoyusenvases

## **1.14 UTILIZACIÓN COMO COMBUSTIBLE**

Por su elevada capacidad calorífica, el aceite usado se constituye en uno de los residuos con mayor potencial para ser empleado como combustible por nuestra industria, independientemente de los resultados alcanzados en la primera fase, así como su uso generalizado en buena parte de los distintos segmentos industriales, aun cuando se oculta su empleo por temor a sanciones.

Es factible estimar, que no solo por las propiedades y características de los aceites usados, sino por la necesidad de contar con alternativas energéticas y suministro seguro de energéticos, algunos países como Australia, Argentina, Estados Unidos, México, etc., cuentan con normas que permiten la utilización de los aceites usados tratados, como combustible, o como componente en mezclas de combustibles.

Sin perjuicio de la disposición final de los aceites usados en otros menesteres, se está aprovechando sus potencialidades, siendo requisito indispensable que el aceite usado haya sido previamente tratado con el fin de liberarlo de los componentes que lo hacen un residuo peligroso.

En el caso particular boliviano, en preciso entender la problemática energética, económica y ambiental, dado que, es la industria pequeña, la de escasa dotación de personal capacitado, la que utiliza los aceites usados como energéticos en sus distintos procesos industriales, debido particularmente a su costo, ubicación geográfica cerca de los grandes centros generadores y fundamentalmente a un distanciamiento a la hora de establecer políticas y desarrollar marcos normativos.

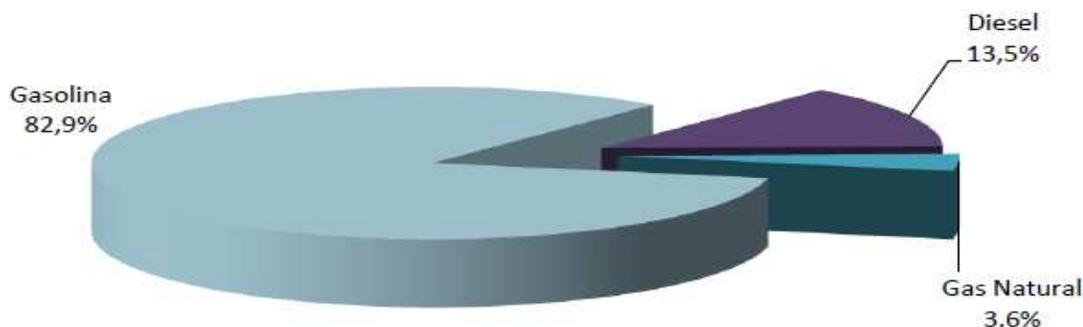
### ***1.14.1 El combustible más utilizado por el parque automotor en Bolivia es la gasolina***

La gasolina fue el combustible más utilizado por el parque automotor en Bolivia, debido a que 82,9% de los vehículos que circulan en el país utilizaron este combustible; le sigue el diésel cuya participación fue de 13,5% y finalmente el gas natural vehicular con 3,6%

(En número de vehículo y porcentaje) <b>COMBUSTIBLE</b>	2015		2016		<b>VARIACIÓN PORCENTUAL</b>
<b>Número de Vehículos</b>	<b>Participación porcentual</b>		<b>Número de Vehículos</b>	<b>Participación porcentual</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>1.574.552</b>	<b>100,0</b>	<b>1.711.005</b>	<b>100,0</b>	<b>8,7</b>
Alcohol	48	0,0	48	0,0	0,0
Diésel	221.450	14,1	230.668	13,5	4,2
Gas Natural	61.407	3,9	61.373	3,6	(0,1)
Gasolina	1.291.591	82,0	1.418.859	82,9	9,9
Eléctrico	38	0,0	38	0,0	0,0
Sin especificar (1)	18	0,0	19	0,0	5,6

**Tabla N°1.9**

Bolivia: parque automotor, según uso de combustible, 2015 – 2016 Fuente: INE  
(1): Incluye el uso de combustible de alcohol, eléctrico y aquellos vehículos que no declararon el tipo del uso de combustible.



**Figura 1.11**

**FUENTE: REGISTRO ÚNICO PARA LA ADMINISTRACIÓN TRIBUTARIA MUNICIPAL (RUAT) INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA**

### 1.15 PROCESO DE REGENERACION DEL LUBRICANTE USADO DE MOTOR A DIÉSEL

Nos basamos en la tecnología PROP donde nos adecuamos al proceso para obtener Diésel N°2, acomodándonos al cumplimiento del proceso, hasta la etapa de destilación al vacío.

### **1.15.1 Tecnología PROP**

Desarrollada por la compañía Phillips petroleum, incorpora una fase de Desmetalización química para eliminar los elementos contaminantes de los aceites usados.

Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

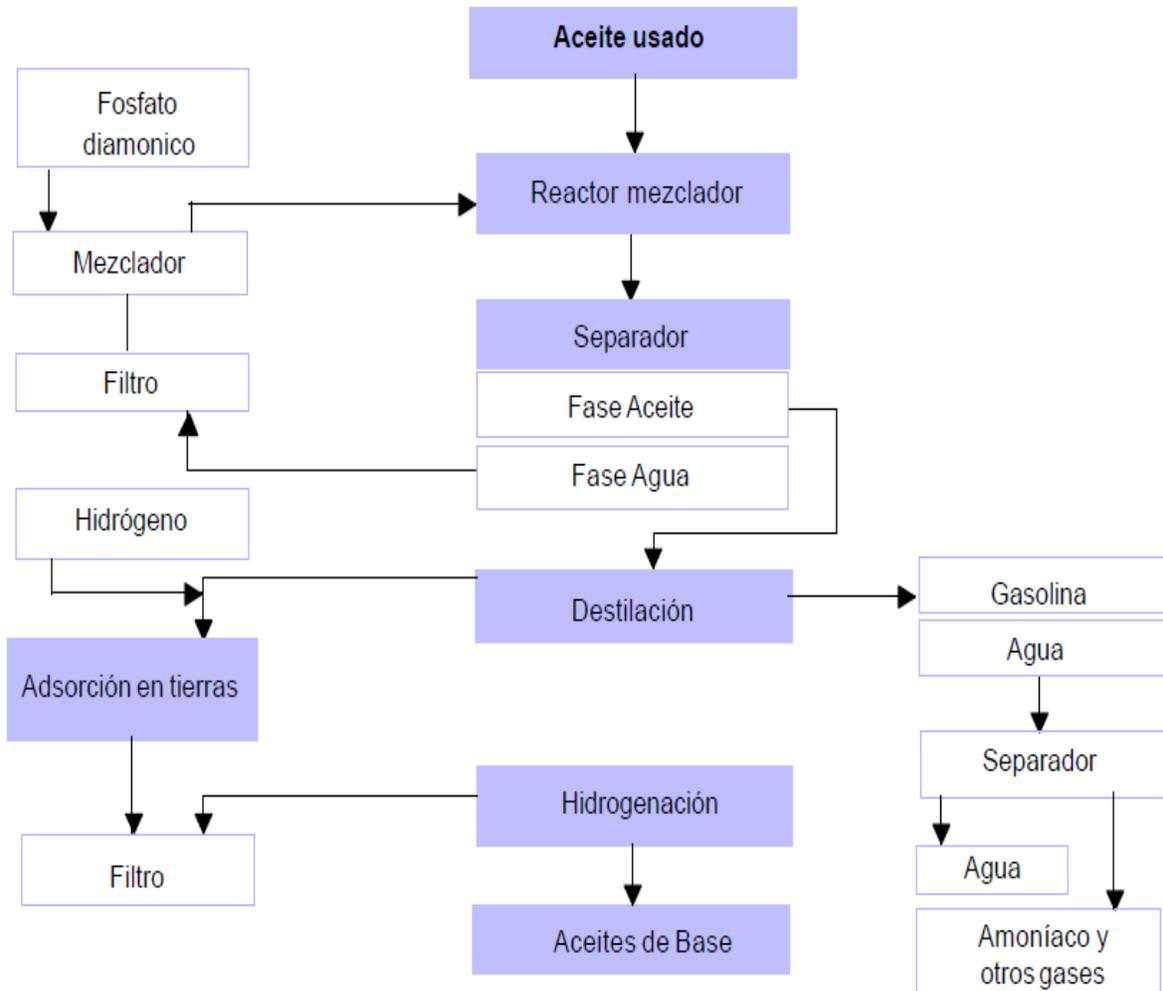
1. Desmetalización: da lugar a la disminución de los metales pesados contenidos en los aceites mezclando el aceite usado con una solución acuosa de fosfato diamónico, formándose compuestos de fosfatos metálicos.
2. Separación de los fosfatos metálicos: los fosfatos metálicos formados en la fase anterior se eliminan por filtración.
3. Destilación al vacío: se eliminan los hidrocarburos ligeros y el agua.
4. Tratamiento en tierras y catalizador Ni / Mo: se mezcla el aceite con hidrógeno, pasándose por un lecho de tierras con el catalizador de Ni / Mo
5. Hidrogenación: durante esta fase se eliminan los compuestos sulfurosos, oxigenados, clorados y nitrogenados, mejorándose así el color del aceite resultante.

Como ventajas de esta tecnología se puede citar la alta calidad de los aceites de base obtenidos, que contienen menos de 10 ppm de metales, elementos sulfurosos y nitrogenados, producción de un 90% de aceites de base y que la tecnología es altamente respetuosa con el medio ambiente.

Los inconvenientes más importantes son el alto coste de la inversión y que la fase de hidrogenación requiere un tratamiento absorbente con tierras.

La única planta de tecnología PROP en funcionamiento actualmente está situada en México.

Se adjunta a continuación el diagrama del proceso.



**Figura 1.12**

Diagrama de la tecnología PROP Fuente: monografías/refinacion-petroleo

Procesos Operaciones <sup>a</sup>	Operaciones																
	Meinken	KTI	Mohawk	Berc o Niper	Prop	Safety Kleen	IFP	Snamprogetti	UOPDCH	Viscoluble	RTI	Interline	Ross Kellog	Entra	Recyclon	Vaxon	CEA
Destilación Atmosférica	1	1	2	1		1	1	1		1	2	3					
Pretratamiento Químico			1														
Desmetalización					1												
Separación										1							
Extracción disolvente				3			4	2,5			1	1					
Recuperación				4				3			2						
Tratamiento de tierras ácidas	2																
Destilación al vacío		2	3	2	2		2	4	3	2	3,4	4	2	1,2	1	1	
Tratamiento químico									2					3	2	2	
Hydrogenación		3	4	6	3	3	3,5	6	1	3		3					
Destilación de película fina	3					2								4	3	3	
Fraccionamiento		4	5	5	4				4			4					
Tratamiento en tierras				7													
Autoclave con ultrafiltrado																	x

**Tabla N°1.10**

Tecnologías aplicadas para regenerar aceite y sus etapas de operación

Fuente: la comunidad petrolera

Luego de realizada la operación de separación, se origina un desecho o lodo con alto contenido de metales pesados, el cual debe ser dispuesto de forma tal que asegure de cualquier manera que estos metales no serán absorbidos por los seres vivos.

La búsqueda de información sobre el tema y las prácticas comunes de países donde se utilizan los aceites usados tratados, llevó a establecer 4 opciones posibles para tratar estos lodos, así: Incineración, encapsulamiento en Clinker, vitrificación o ceramizado y relleno en las vías durante la elaboración de capa asfáltica.

Evaluando nuestro entorno y las condiciones bolivianas, es mejor establecer una lucha frontal contra el daño al medio ambiente. “Hay bastante aceite negro” que se puede recuperar y transformarlo en Diésel N°2, debido a que ha crecido el parque automotor. “Antes se votaba el aceite en las cloacas, en las calles, pero ahora no, gracias a los recicladores. Los mismos talleres saben que es dinero y tienen más cuidado

## CAPITULO II

### 2 PROCEDIMIENTO PARA REGENERAR ACEITES USADOS PARA OBTENER DIESEL N° 2 POR LOS METODOS DE DESMETALIZACION Y DESTILACION

#### 2.1 RESUMEN

El presente proceso se refiere a un procedimiento para regenerar aceites usados de origen petrolífero que comprende las siguientes etapas:

- (a) Desmetalización del aceite mineral usado mediante tratamiento químico de dicho aceite con una solución acuosa de un reactivo químico que contiene aniones que forman sales poco solubles con los metales del aceite, seguido de separación del aceite desmetalizado.
- (b) Filtración al vacío para separar las partículas que se forman después de la desmetalización.
- (c) Destilación al vacío del aceite desmetalizado obtenido en la etapa (a) a presión atmosférica y en presencia de hidróxidos alcalinos.
- (d) Filtración al vacío para separar las partículas que se formaron en la 1° destilación al vacío.
- (e) Destilación del residuo líquido obtenido en la destilación atmosférica de la etapa (c) a vacío y en presencia de hidróxidos alcalinos para obtener Diésel N°2.

#### 2.2 PROCEDIMIENTO PARA LA DESMETALIZACIÓN DE ACEITES USADOS PARA SU EMPLEO COMO COMBUSTIBLE.

##### 2.2.1 Descripción detallada de todo el proceso

La presente invención proporciona un procedimiento de regeneración de aceites minerales usados para la obtención de bases lubricantes que comprende las siguientes etapas: (a) desmetalización del aceite mineral usado mediante tratamiento químico de dicho aceite con una solución acuosa de un reactivo químico que contiene aniones que forman sales poco solubles con los metales del aceite, seguido de separación del aceite desmetalizado; (b) destilación del aceite desmetalizado obtenido en la etapa (a) a presión atmosférica y en presencia de hidróxidos alcalinos; y (c) destilación del residuo líquido obtenido en la destilación atmosférica de la etapa (b) a vacío y en presencia de hidróxidos alcalinos para obtener bases lubricantes.

Dicho procedimiento puede realizarse en modo continuo o en modo discontinuo, preferentemente en modo continuo.

El término “sales poco solubles” en el contexto de la invención se refiere a sales que tienden a precipitar en el medio en el que se encuentran disueltas.

Se ha comprobado experimentalmente que la eliminación de los metales de los aditivos transcurre con rendimientos razonables de desmetalización (consiguiendo un contenido

en metales), cuando los aceites se tratan con soluciones de fosfatos amónicos (mono o diamónico) a temperaturas moderadas (80 - 95°C), lo que permite realizar la operación sin deteriorar los aceites base, al no tener que recurrir a las temperaturas descritas en la bibliografía (del orden de 350 °C) para conseguir rendimientos de desmetalización altos (contenido en metales inferior a 50 ppm) . Otras sales amónicas, cuyo anión tiene la característica de formar sales insolubles o poco solubles en agua con los metales presentes en los aceites usados, son igualmente efectivas como reactivos en la desmetalización. Así, por ejemplo, pueden utilizarse, además de los ya citados fosfato mono y diamónico, el fosfato triamónico, los sulfatos mono y diamónico, el bisulfato amónico y los poli fosfatos amónicos o mezclas de dichas sales, cuyos aniones forman sales insolubles o poco solubles con los metales de los aditivos (principalmente Ca, Zn y Mg) o con otros metales presentes en los aceites usados (Pb, Fe, Cu y otros).

Así pues, en una realización particular del procedimiento, el reactivo químico empleado en la etapa (a) es una sal amónica; empleándose dicho reactivo en una proporción del 0,5 al 5% en peso de sal amónica con relación al aceite usado.

En otra realización particular, dicha sal amónica contiene aniones del grupo de los fosfatos y sulfatos, pudiendo ser dicha sal fosfato monoamónico o diamónico, o sulfato monoamónico o diamónico, o una mezcla de los mismos.

### **2.2.2 Resumen desmetalización:**

Procedimiento e instalación para la desmetalización de aceites usados para su empleo como combustible, que se caracteriza porque en un reactor se introducen los aceites usados, se agitan, se calientan a una temperatura de 85 – 95 °C, a continuación se añade una disolución de fosfato diamónico con un hidróxido de carácter básico débil, con un pH entre 6.5 y 11 y con impurezas insolubles en fase acuosa de alto peso específico y manteniéndose la agitación y temperatura, a continuación se centrifuga durante unos minutos a más de 250 rpm, y se separan los sedimentos.

### **2.3 DESCRIPCION**

Procedimiento e instalación para la desmetalización de aceites usados para su empleo como combustible.

Por los métodos físicos de purificación (Centrifugación) de aceites usados o residuales se sabe que la disminución de la concentración de determinados metales pesados en los residuos de este tipo de aceites usados, se debe a la separación de los sedimentos sólidos que contienen.

La presente invención tiene por objeto regenerar los aceites usados mediante un proceso de desmetalización química que no requiere tratamientos costosos de hidrogenación o por ácido y tierras, para conseguir bases lubricantes que cumplen las especificaciones de las bases de primer refino.

Es también objeto del procedimiento realizar la regeneración en condiciones moderadas de temperatura de forma que se eviten los ensuciamientos de los equipos y la necesidad de limpiezas frecuentes en las instalaciones de tratamiento del aceite usado.

Finalmente, es también objetivo de la presente invención realizar la regeneración de aceites usados mediante un proceso industrial continuo que requiera baja inversión y que tenga costes de operación moderados, con rendimientos elevados, a fin de poder hacer competitivas instalaciones de capacidad moderada (15.000 - 30.000 t/a).

Ahora bien, es conocido que el origen de los compuestos metálicos en los aceites, además de los ocasionados por la abrasión durante el funcionamiento, está en que estos, contienen aditivos para mejorar sus propiedades fisicoquímicas y que algunos de ellos son compuestos inorgánicos y organometálicos en disolución, como es el caso de los compuestos de zinc, calcio, bario, etc.

En el laboratorio ha ensayado diferentes procedimientos para eliminar los citados compuestos metálicos y ha llegado a la conclusión que el procedimiento óptimo de desmetalización debe de tener las siguientes características:

1. un proceso químico de precipitación y/o formación de complejos con los metales a separar, manteniendo el pH entre 6.5 y 11 unidades.
2. añadir un agente desmetalizante con algunas impurezas insolubles en fase acuosa.
3. En un principio se hizo en laboratorio las experiencias que se describen a continuación.
4. En un reactor se introduce una determinada cantidad de aceite usado de motor. Una vez montada la instalación se pone en marcha la agitación, con una velocidad de 70 - 450 rpm y se le suministra calor hasta alcanzar una temperatura de 80 -85 °C. Conseguido esto se adiciona un reactivo, por ejemplo, 150 ml de disolución, manteniéndose la agitación y la temperatura durante un tiempo predeterminado, que se manejó en 15 a 25 minutos.

## 2.4 CÁLCULOS DEL PROCESO DE DESMETALIZACIÓN

2.4.1 *A través de la siguiente fórmula se obtendrá la densidad del aceite usado ( $\rho_1$ ) proceso de cálculo en el Anexo C*

$$\rho_1 = \left( \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \right) \times \rho_{H_2O} \quad (1)$$

Resultado obtenido  $\rho_1$

$$\rho_1 = 0.88075 \text{ g/cm}^3$$

#### 2.4.2 Determinación de la masa del aceite usado para un volumen de 400 ml

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = \rho_1 \times V_1$$

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = 0.88075 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 500 \text{cm}^3$$

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = 352.3 \text{ g}$$

#### 2.4.3 Determinación del porcentaje en peso de fosfato diamónico al 4% proceso de cálculo en el Anexo C

di-ammoniumhydrogenphosphat  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

$m_{\text{masa soluto}}$  = masa del fosfato diamónico

$m_{\text{masa solvente}}$  = masa del aceite

$$\%_{\text{peso}} = m_{\text{soluto}} / m_{\text{solucion}} \times 100$$

$$m_{\text{soluto}} = 14.679 \text{ g } (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$$



Figura N° 2.1

Equipos para el proceso de desmetalización Fuente: Propia

En un vaso de precipitado de 1000ml se agrega los 400ml de aceite usado, más  $14.679 \text{ g } (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  en un agitador y calentador con los siguientes datos:

- Temperatura de 80 a 90°C
- Agitación a 450 rpm el cual se midió con un tacómetro

- Tiempo de 55 min
- Agregar 3 ml de  $NH_3$  al 25% al cabo de 15 min
- Verificar que el PH  $\geq 9$  con un PH -metro



**Figura N° 2.2**

Cuadro de Filtración al Vacío Fuente: Propia



**Figura N° 2.3**

Cuadro de Filtración al Vacío después de la desmetalización Fuente: Propia  
El Volumen obtenido después del filtrado es de  $V=389$  ml de aceite desmetalizado

## 2.5 CALCULOS PARA LA 1° DESTILACIÓN SIMPLE AL VACÍO

2.5.1 A través de la siguiente fórmula se obtendrá la densidad del aceite usado ( $\rho_1$ ) después de la desmetalización proceso de cálculo en el Anexo C

$$\rho_1 = \left( \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \right) \times \rho_{H_2O d} \quad (2)$$

Por tablas en el anexo A se determinó la densidad del Agua destilada

$$\rho_{H_2O d.} = 0.99858 \text{ g/ml}$$

$$Temp = 18.7^\circ C$$

Reemplazamos los datos obtenidos del Picnómetro en la ecuación (2) para determinar la densidad de aceite usado  $\rho_1$

$$m_2 = \text{aceite usado}$$

$$m_1 = H_2O \text{ destilada}$$

$$m_0 = \text{picnómetro vacío}$$

$$\rho_1 = \left( \frac{20.5648 \text{ g} - 11.5736 \text{ g}}{21.7826 \text{ g} - 11.5736 \text{ g}} \right) \times 0.99858 \text{ g/cm}^3$$

Resultado obtenido  $\rho_1$  para la 1° destilación al vacío

$$\rho_1 = 0.8794 \text{ g/cm}^3$$

2.5.2 Determinación de la masa del aceite usado para un volumen de 389 ml

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = \rho_1 \times V_1$$

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = 342.08 \text{ g}$$

2.5.3 Determinación del porcentaje en peso de Hidróxido de Sodio NaOH al 3% en peso proceso de cálculo en el Anexo C

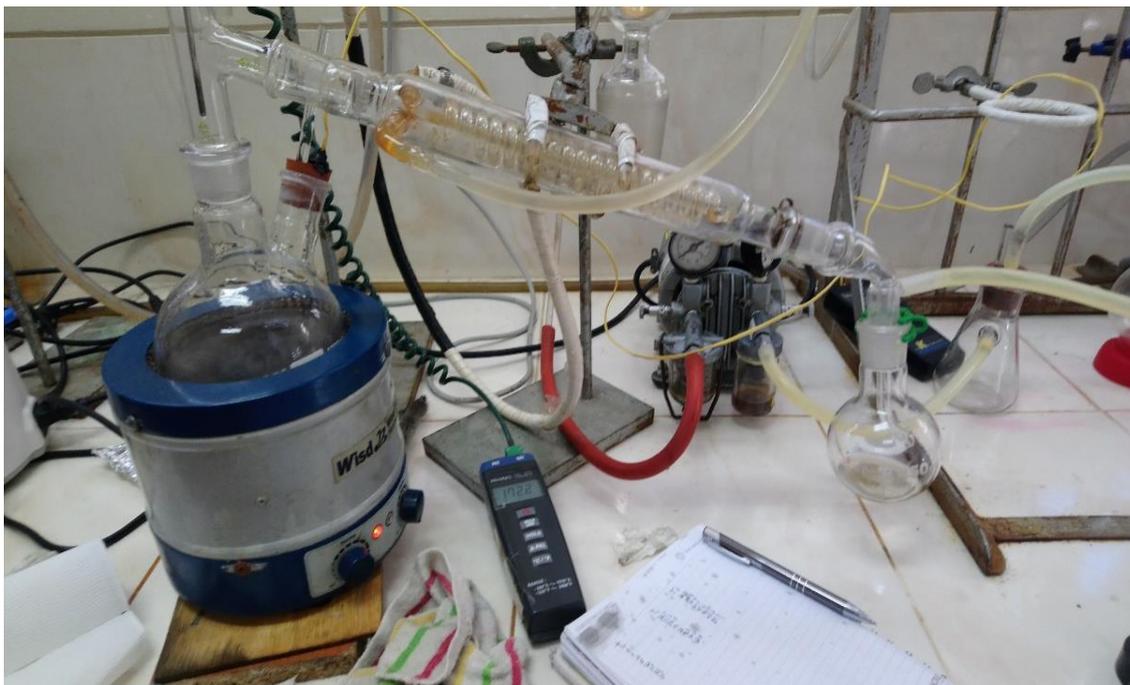
$masa_{\text{soluta}}$  = masa del Hidróxido de Sodio

$masa_{\text{solvente}}$  = masa del aceite

$$\%_{\text{peso}} = m_{\text{soluta}} / m_{\text{solucion}} \times 100$$

$$m_{\text{soluta}} = 10.579 \text{ NaOH}$$

**2.5.4 Se arma el Equipo y se empieza con la 1° destilación al vacío**



**Figura N° 2.4**

Armado del equipo para la 1° destilación al Vacío Fuente: Propia



**Figura N° 2.5**

Armado del equipo para la 1° destilación al Vacío Fuente: Propia

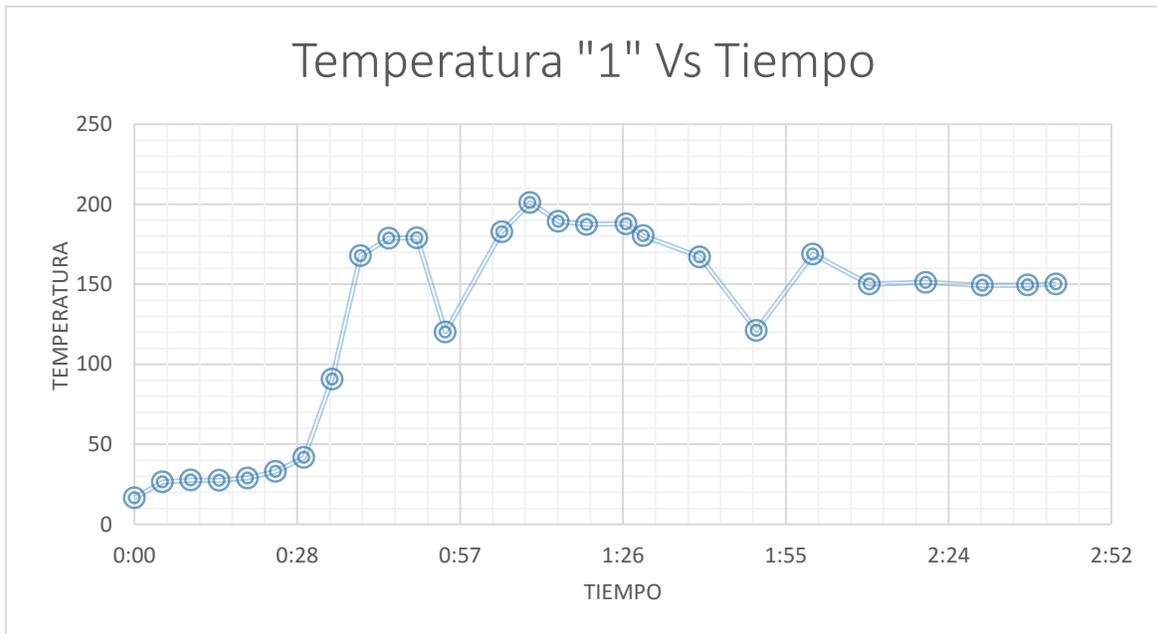
**2.5.5 Cálculos obtenidos en la 1° Destilación al Vacío**

Patm	t(min)	T1 °C	T2 °C	Tamb
180mmHg	0:00	16,5	18	16,5°C
	0:05	26,5	30,1	
	0:10	27,7	30,7	
	0:15	27,5	33,4	
	0:20	29	38,9	
	0:25	33	45,6	
	0:30	41,8	48,9	
	0:35	90,8	47,7	
	0:40	167,8	59,7	
	0:45	178,8	74,8	
se bajó la presión atm a 150 mmHg	0:50	179	114,2	
	0:55	120,2	117,2	
	1:05	182,8	136,4	
	1:10	201	111,2	
	1:15	189,3	126,9	
	1:20	187,4	129,1	
	1:27	187,8	135,4	
se bajó la presión atm a 100 mmHg	1:30	180,3	140,2	
	1:40	167,1	161,1	
	1:50	121,2	166,3	
	2:00	168,8	228,7	
	2:10	150,1	213,6	
	2:20	151,2	190,1	
	2:30	149,3	174	
	2:38	149,5	174,5	
	2:43	150,1	175	

**Tabla 2.1**

1° Destilación al Vacío Fuente: Propia

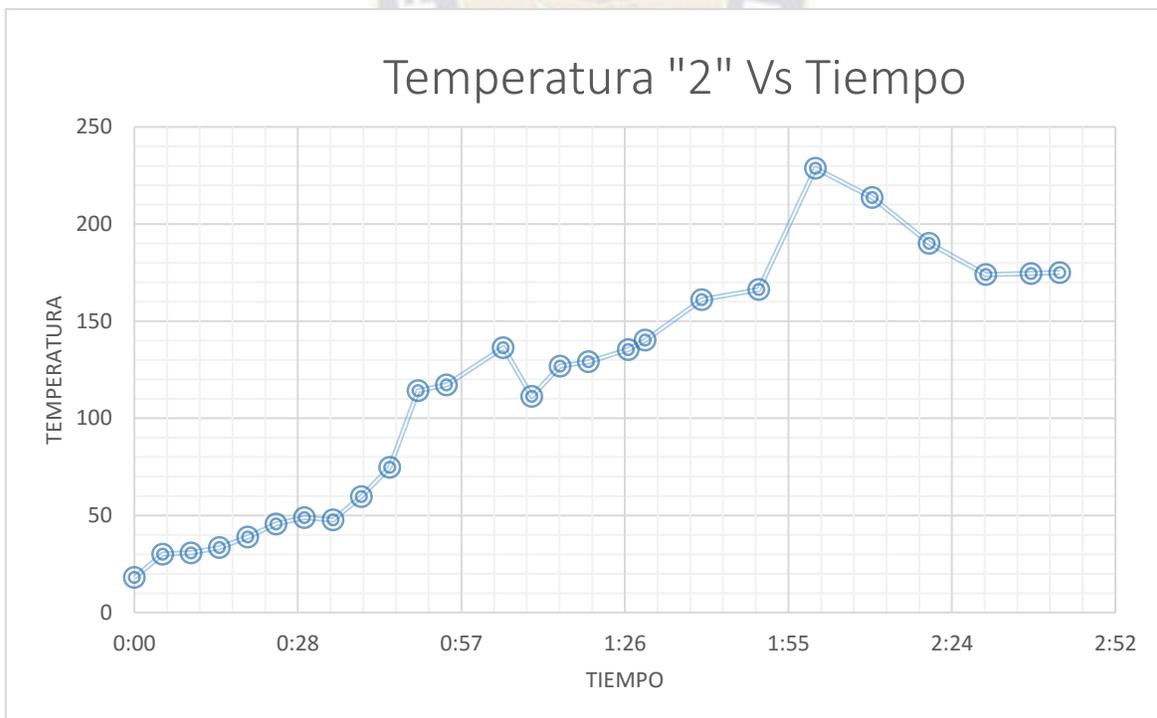
## 2.6 GRAFICOS OBTENIDOS



**Gráfico N° 2.1**

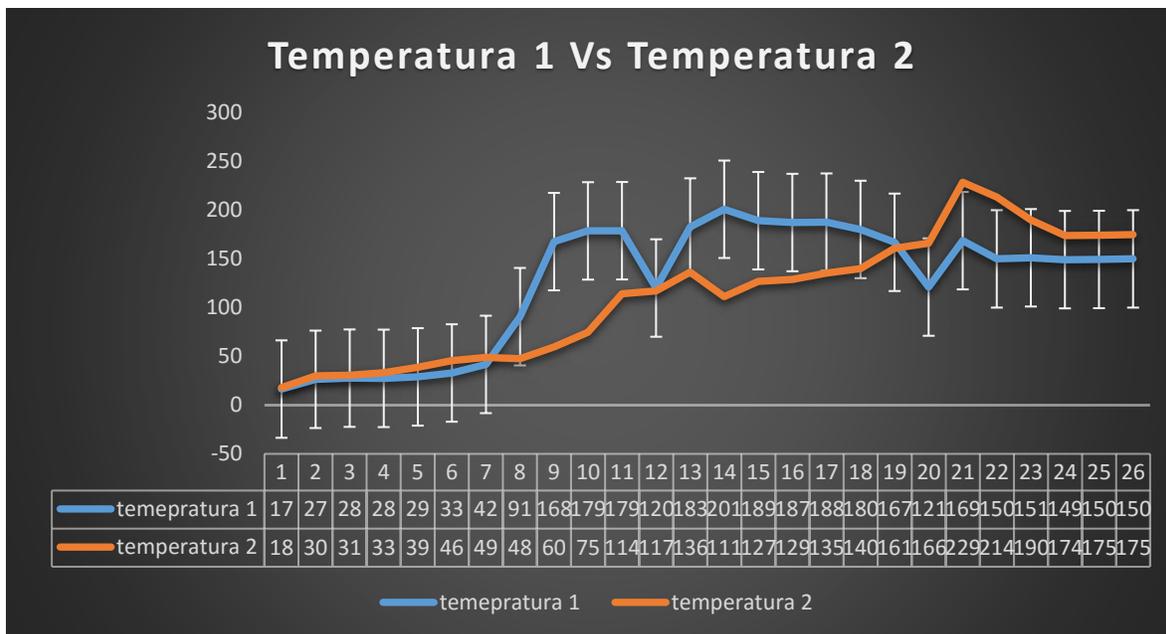
GRAFICA DE LA CURVA DE LA 1° DESTILACION EN EL PUNTO UNO

Fuente: Propia



**Gráfico N° 2.2**

GRAFICA DE LA CURVA DE LA 1° DESTILACION EN EL PUNTO DOS. Fuente: Propia



**Gráfico N° 2.3**

GRAFICA DE LA CURVA DE LA 1° DESTILACION DE LAS 2 TEMPERATURAS

Fuente: Propia

**VOLUMEN OBTENIDO DESPUÉS DE LA 1° DESTILACIÓN ES DE 289 ml**

**2.7 SE REALIZA UNA FILTRACIÓN AL VACÍO PARA SEGUIR CON LA 2° DESTILACIÓN**



**Figura N° 2.6**

Filtración al Vacío de la 1° destilación Fuente: Propia



**Figura N° 2.7**

Filtración al Vacío de la 1° destilación Fuente: Propia

Terminado el proceso de filtración al vacío de la 1° destilación se obtiene un Volumen de 284 ml

## 2.8 CALCULOS PARA LA 2° DESTILACIÓN SIMPLE AL VACÍO

2.8.1 A través de la siguiente formula se obtendrá la densidad del aceite usado ( $\rho_1$ ) después de la desmetalización proceso de cálculo en el Anexo C

$$\rho_1 = \left( \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \right) \times \rho_{H_2O d} \quad (3)$$

Por tablas en el anexo A se determinó la densidad del Agua destilada  
 $\rho_{H_2O d.} = 0.99786 \text{ g/ml}$

$Temp = 22^\circ C$

Reemplazamos los datos obtenidos del Picnómetro en la ecuación (3) para determinar la densidad de aceite usado  $\rho_1$

$m_2 = \text{aceite usado}$

$m_1 = H_2O \text{ destilada}$

$m_0 = \text{picnometro vacio}$

Resultado obtenido  $\rho_1$  para la 2° destilación al vacío

$$\rho_1 = 0.8646 \text{ g/cm}^3$$

2.8.2 *Determinación de la masa del aceite usado para un volumen de 284 ml proceso de cálculo en el Anexo C*

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = \rho_1 \times V_1$$

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = 249.75 \text{ g}$$

2.8.3 *Determinación del porcentaje en peso de Hidróxido de Sodio NaOH al 3% en peso proceso de cálculo en el Anexo C*

$m_{\text{masa}_{\text{soluto}}}$  = masa del Hidróxido de Sodio

$m_{\text{masa}_{\text{solvente}}}$  = masa del aceite

$$\%_{\text{peso}} = m_{\text{soluto}}/m_{\text{solucion}} \times 100$$

$$m_{\text{soluto}} = 7.724 \text{ NaOH}$$

2.9 SE ARMA EL EQUIPO Y SE EMPIEZA CON LA 2° DESTILACIÓN



Figura N° 2.8

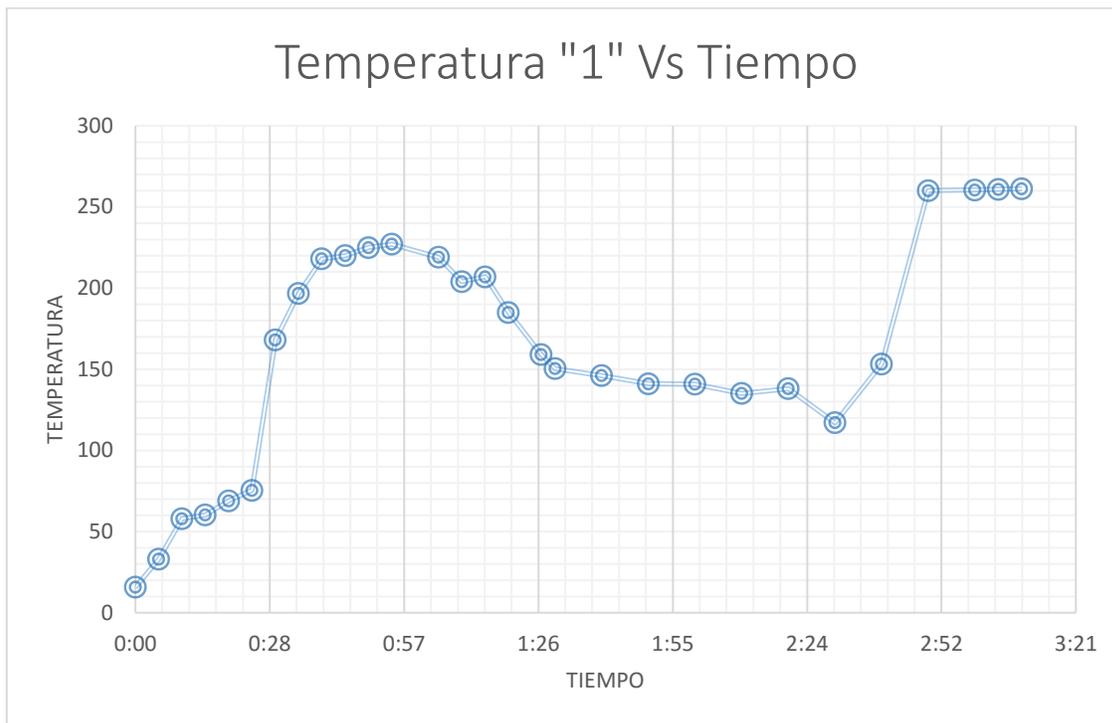
Proceso de la 2° destilación al vacío Fuente: Propia

**2.9.1 Cálculos obtenidos en la 2° Destilación al Vacío**

Patm	t(min)	T <sub>1</sub> °C	T <sub>2</sub> °C	T <sub>amb</sub>
120mmHg	0:00	15,7	19,6	15,7°C
	0:05	33	45,6	
	0:10	58	52,5	
	0:15	60,2	71,6	
	0:20	69	54,5	
	0:25	75,4	74,5	
	0:30	168,1	123,6	
	0:35	196,8	158	
	0:40	218	200,8	
	0:45	220	203,7	
	0:50	225	203,9	
se bajó la presión atm a 90 mmHg	0:55	227	209,8	
	1:05	219	223,8	
	1:10	204	221,4	
	1:15	207	218	
	1:20	185	200	
	1:27	159	204	
	1:30	150,4	205,6	
	1:40	146,1	203,7	
	1:50	141,1	199,4	
	2:00	140,8	216,3	
	2:10	135,1	214,1	
se bajó la presión atm a 85 mmHg	2:20	138,1	215,4	
	2:30	117,1	203,4	
	2:40	153,2	271	
	2:50	260,1	252,2	
	3:00	260,5	252,6	
	3:05	260,9	253,1	
	3:10	261,2	253,5	

**Tabla 2.2**  
2° Destilación al Vacío Fuente: Propia

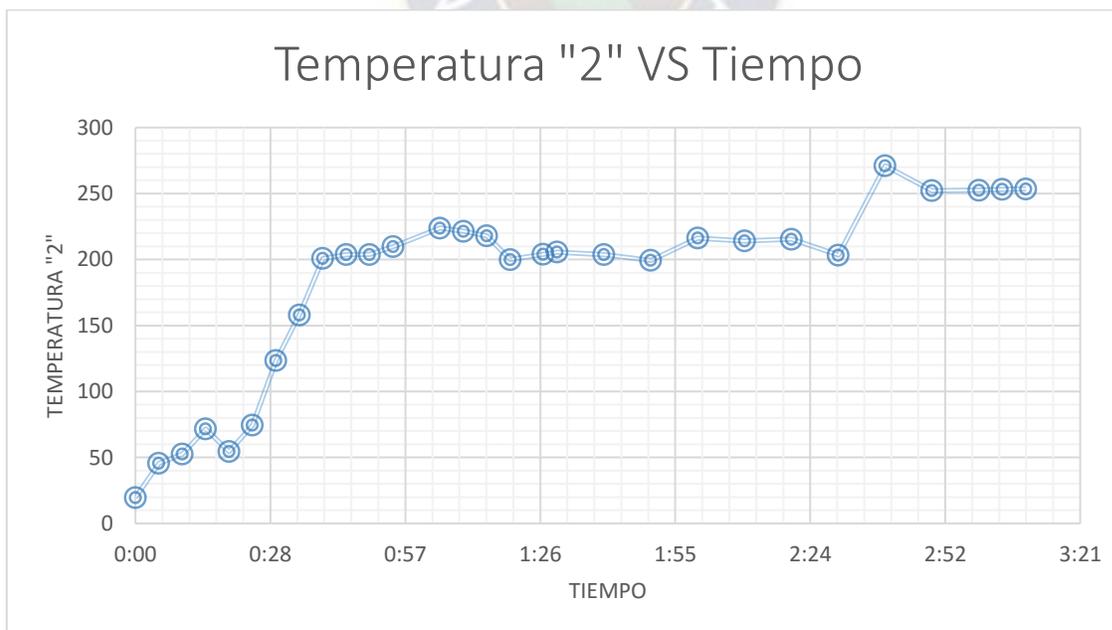
## 2.10 GRAFICOS OBTENIDOS



**Grafico N° 2.4**

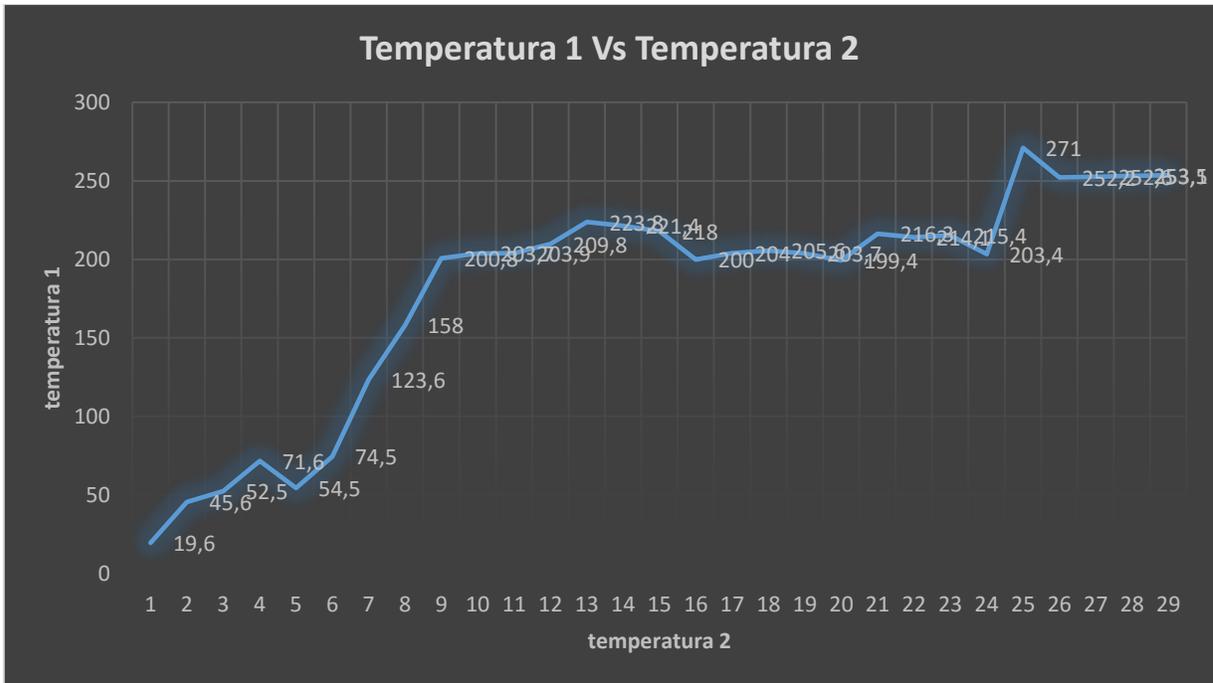
GRAFICA DE LA CURVA DE LA 2° DESTILACION EN EL PUNTO UNO

. Fuente: propia



**Grafico N° 2.5**

GRAFICA DE LA CURVA DE LA 2° DESTILACION EN EL PUNTO DOS Fuente: Propia



**Grafico N° 2.6**

GRAFICA DE LA CURVA DE LA 2° DESTILACION DE LAS 2 TEMPERATURAS

Fuente: Propia

**Volumen obtenido después de la 2° destilación Vol. 183 ml**



**Figura N° 2.9**

2° destilación al vacío proceso finalizado Fuente: Propia

## 2.11 VARIACION DE LA PRESION EN LA DESTILACION AL VACIO

Para que se produzca la "separación o fraccionamiento" de los cortes, se debe alcanzar el equilibrio entre las fases líquido-vapor, ya que de esta manera los componentes más livianos o de menor peso molecular se concentran en la fase vapor y por el contrario los de mayor peso molecular predominan en la fase líquida, en definitiva, se aprovecha las diferencias de volatilidad de los hidrocarburos.

La diferencia fundamental entre las unidades de Topping y Vacío es la presión de trabajo. El Topping o Destilación Atmosférica opera con presiones típicas de 1 Kg/cm<sup>2</sup> (manométrica), mientras que en el Vacío trabaja con presiones absolutas de 20 mmHg. Esto permite destilar hidrocarburos de alto peso molecular que se descompondrían o craquearían térmicamente, si las condiciones operativas normales del Topping fuesen sobrepasadas.

A la hora de seleccionar la presión de operación de la columna hay que tener en cuenta que, en general, un aumento de la presión de operación de la columna tiene los siguientes efectos **desfavorables**:

1. La volatilidad relativa disminuye y por tanto aumenta la dificultad de la separación: aumentan los requerimientos de número de pisos, reflujo y consumo en el condensador y en la caldera.
2. Hace aumentar la temperatura de la columna: aumentan las reacciones de degradación química, polimerización, etc.
3. Para presiones manométricas por encima de 6-7 atm, hay que aumentar el espesor del material de la columna, y por tanto aumenta el coste del inmovilizado. Este factor no es importante a presiones inferiores.
4. Aumenta la temperatura en la caldera y por tanto se requiere un medio de calefacción más caro (o incluso inexistente). Para el mismo agente de calefacción, aumenta el área de intercambio de calor.
5. Para separaciones súper atmosféricas, las fugas son mayores, y aumenta el peligro potencial en el caso de usar materiales tóxicos o inflamables.

También se producen los siguientes efectos **favorables**:

1. Aumenta el punto de ebullición del destilado, lo que permite el uso de refrigerantes más baratos.
2. Si la columna opera por debajo de 1 atm, un aumento de presión disminuye el coste de creación y mantenimiento de vacío (consumo de energía del eyector y costes del inmovilizado).
3. Aumenta la densidad del vapor, y, por tanto, la capacidad de la columna: si la columna trabaja a vacío, se produce una disminución grande del diámetro de columna necesario y de los costes del inmovilizado. La reducción es menor para presiones comprendidas entre 3 y 10 atm.

4. En la destilación de gases licuados, aumentan los puntos de ebullición del líquido que circula por la columna, lo que permite utilizar materiales de construcción más baratos.
5. Disminuye el diámetro de las tuberías y el tamaño de las válvulas por las que circula el vapor.
6. Por debajo de 1 atm disminuyen las fugas y por tanto el peligro potencial de los materiales tóxicos o inflamables.

Casi la única razón para diseñar una columna a vacío es el punto 4º de los aspectos desfavorables. Cuando las reacciones secundarias no son significativas y, si se dispone de un medio de calefacción adecuado, las separaciones se realizan a presiones iguales o superiores a la atmosférica. Para separaciones a vacío, es deseable que la presión sea lo más alta posible: se fija aquella presión lo más alta posible que dé una temperatura de burbuja lo suficientemente baja como para evitar la degradación de los productos de colas y para permitir el funcionamiento adecuado de la caldera con el agente de calefacción disponible.

Para separaciones a presión, los factores controlantes suelen ser el punto 1º de los aspectos favorables y el punto 1º de los aspectos desfavorables. Se suele fijar la presión más baja que permita la condensación del destilado utilizando aire o agua como agentes refrigerantes.

En la separación de gases licuados, la temperatura crítica del destilado suele ser menor que la temperatura del agua de refrigeración, por lo que se suele necesitar otro tipo de refrigeración. El balance económico está determinado fundamentalmente por el punto 1º de los aspectos favorables y el punto 1º de los aspectos desfavorables, pero la refrigeración complica el análisis. Se requiere un proceso de optimización para seleccionar la mejor presión y el proceso suele ser lento y tedioso si se realiza correctamente.

Se suele suponer una caída de presión en la columna de 0.3 atm y de 0 a 0.15 en el condensador. Sin embargo, cuando se conozca el número de platos, se podrá realizar cálculos más refinados considerando una caída de  $P$  de 0.007 atm/plato para columnas operando a presión atmosférica o superatmosférica y 0.003 atm/plato para columnas operando a vacío. Se debe tener también en cuenta que el producto de colas no debe estar próximo a su temperatura de descomposición o a su estado crítico.

## CAPITULO III

### 3 PROCEDIMIENTO PARA PURIFICACION DE DIESEL N°1 A DIESEL N° 2

#### 3.1 LIMPIEZA PARA EL DIÉSEL N°2 ELIMINACIÓN DE AZUFRE, AGUA, HOLLÍN

##### 3.1.1 *La importancia*

Se llevó las muestras de DIESEL obtenidas en el IIDEPROQ a ser analizadas a los laboratorios de FINNING CAT, haciendo la respectiva interpretación del informe de Análisis de Combustible que nos dio FINNING CAT (Anexo B se halla los resultados), nos muestra que el Azufre está en 3288 ppm, por lo cual no estamos cumpliendo con el rango de Diésel N° 2 el cual nos pide que dicho combustible debe contener solo de 500 a 15 ppm (partes por millón) de Azufre, en nuestro país el mismo alcanza a de 1500 a 3.000ppm (Anexo C)

Para equipos EURO IV que requieren un Diésel N° 2 y basándonos en la Ley No 165 del 16 de agosto de 2011, en su Artículo 191 inciso II y III.

#### **Artículo 191. (PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE EN ACTIVIDADES TERRESTRES).**

II. A partir de la emisión de la presente Ley, solamente se permite la importación de vehículos automotores que cumplan con la Norma de Emisiones Atmosféricas EURO II o equivalentes y en un plazo de cinco (5) años se deberá llegar a la Norma EURO IV o equivalentes.

##### 3.1.2 *La mecánica*

El problema es que no podemos ver las partículas dañinas en el aceite o el combustible. Solamente tenemos la habilidad de ver partículas de 40 micrones y mayores con nuestros ojos. Estas partículas pueden dañar una transmisión o un reductor, un sistema de combustible, motor o sistema hidráulico. Sólo las partículas grandes serán capturadas por el filtro de aceite o combustible. Harán algo de daño al pasar por el sistema la primera vez, pero después se quedarán atrapadas. Las más pequeñas continuarán circulando y estas también causan problemas; razón por la cual, también, cuantas más partículas pequeñas se retengan en los filtros es algo que contribuirá positivamente a la limpieza de un circuito.

El Diésel hoy en día para los inyectores; tienen menor tolerancia cada año. Algunas marcas tienen menos de 2  $\mu\text{m}$  de tolerancia para que pase el diésel. Si el sistema de inyección empuja partículas de 5  $\mu\text{m}$  por un espacio de 2  $\mu\text{m}$  con 2000 bares de presión, se gasta el inyector, causando mayor consumo de diésel, mayor producción de hollín, periodos más cortos entre cambios de aceite, más contaminación al medio ambiente, etc.

### **3.1.3 Cambio de nuevas prácticas en la limpieza del diésel**

Nos preguntamos por qué deben cambiar sus prácticas ahora cuando han trabajado de la misma manera por años. La respuesta es simple:

Los sistemas de alimentación de diésel de los motores de los años de 1960 operaban entre 400 y 500 bares de presión y tenían tolerancias cerca de 50  $\mu\text{m}$ . Podíamos ver los contaminantes que harían daño y los filtros retenían partículas mayores de 25  $\mu\text{m}$ , evitando problemas. Los sistemas de los años de 1990 ya operaban con inyectores a presiones cerca de 1400 bares, tolerancias de 35  $\mu\text{m}$  y filtros de 15  $\mu\text{m}$ .

Para sacar mayor provecho del combustible y mayor potencia en motores más pequeños, durante los últimos diez años los motores empezaron a usar inyectores que operan con presiones cerca de 2000 bares y tolerancias entre 1  $\mu\text{m}$  y 2  $\mu\text{m}$ . Cualquier partícula de mayor tamaño tiene que ser retirada por el sistema de filtración antes de llegar a los inyectores. La partícula que pasa por el filtro raspará la boquilla del inyector o la trancará.

### **3.1.4 Cuán serio es el problema de contaminación**

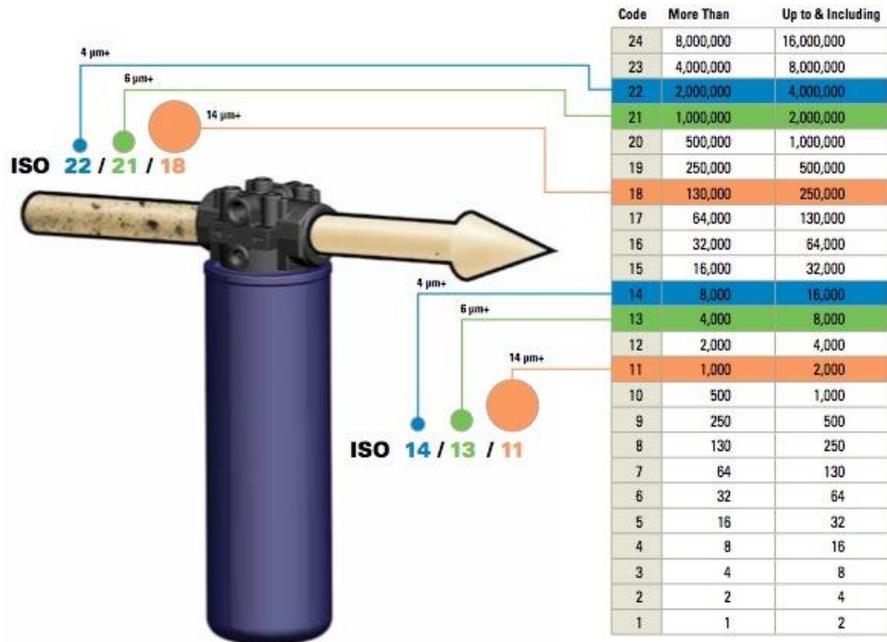
Varios años atrás se estableció una norma mundial de limpieza de diésel entregado de la planta o dispensado del surtidor utilizando las pruebas de limpieza ISO 4406 y un mínimo de 18/16/13, la cual indica un límite de partículas por ml entre:

- 18 = 1300 y 2500 partículas  $>4 \mu\text{m}$
- 16 = 320 y 640 partículas  $>6 \mu\text{m}$
- 13 = 40 y 80 partículas  $>14 \mu\text{m}$

La idea era que las máquinas, los camiones o los autos podían tener sistemas de filtración capaces de alcanzar el nivel de limpieza necesario para proteger sus inyectores. En general, ese nivel es definido por los fabricantes con un nivel de limpieza ISO 4406 de 12/9/6, la cual indica un límite de partículas por ml entre:

- 20 y 40 partículas  $>4 \mu\text{m}$
- 9 = 2.5 y 5 partículas  $>6 \mu\text{m}$
- 6 = 0.3 y 0.64 partículas  $>14 \mu\text{m}$

En teoría, una buena filtración montada en una máquina o camión nuevo podría filtrar el combustible diésel bastante bien obteniendo una duración del filtro igual al periodo de mantenimiento recomendado y la máquina no sufrir desgaste pero eso no es posible de obtener, aun cuando muchas máquinas finas tienen filtros de diésel de 2  $\mu\text{m}$ , porque la contaminación de combustible diésel es tan alta que supera los parámetros de diseño de las máquinas producidas actualmente.



**Figura N° 3.1**

Tabla de interpretación del código de limpieza ISO 4406. Fuente: donaldson-filters

Range Code	ISO 4406:1999 Code Chart	
	Partículas por m <sup>3</sup>	
	Desde	Hasta
24	80000	160000
23	40000	80000
22	20000	40000
21	10000	20000
20	5000	10000
19	2500	5000
18	1300	2500
17	640	1300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2.5	5
8	1.3	2.5
7	0.64	1.3
6	0.32	0.64

**Tabla N° 3.1**

código de limpieza ISO 4406. Fuente: donaldson-filters

### 3.1.5 La realidad del Diésel en Bolivia

Cuando vemos que en un combustible diésel con nivel de limpieza de 18/16/13 podemos alarmarnos al comprobar que este tiene por ml de 1300 a 2500 partículas de 4 micrones y más grandes. Pero eso es lo que entregan en nuestro país y muchos otros de la región.

En las últimas muestras de diésel analizadas en Bolivia, la limpieza del diésel dispensado fue registrada con una limpieza ISO 4406 de 23/22/14, la cual indica entre:

- 23 = 80,000 y 160,000 partículas por ml sobre 4  $\mu\text{m}$
- 22 = 20,000 y 40,000 partículas por ml mayor que 6  $\mu\text{m}$
- 14 = 80 y 160 partículas por ml mayor que 14  $\mu\text{m}$

Nuestro diésel, si esas muestras son representativas, es entre 61 y 62 veces más contaminado que la norma mundial. Un buen filtro que realmente trabaja para obtener diésel limpio y proteger los inyectores se taponará mucho más rápidamente por que tiene que retener una mucha mayor contaminación que la que se consideró para diseñarlo

Para complicar las cosas, la mayoría del diésel en nuestras máquinas, después de pasar por el filtro, solamente es utilizado para enfriar los inyectores y volver a pasar ese calor al diésel sucio del tanque, contaminándose de nuevo. Esto aumenta la importancia de limpieza antes de entrar al tanque.

Además en la mayoría de los vehículos y muchos de los equipos agrícolas o de construcción o de minería los respiraderos no tienen filtros suficientemente dimensionados para nuestro ambiente polvoriento.

Para cada 100 litros de combustible que usamos, entran 100 litros de aire húmedo y sucio al tanque. Cuando llenamos el tanque, el aire sale, pero la tierra y el agua se quedan.

Pero es el almacenamiento en nuestros campamentos y el traslado de diésel en tambores y bidones, traspasando el diésel al tanque del equipo con baldes y embudos lo que empeora la situación. Hay que acordarse de que lo malo es invisible.

Es importante reconocer que los inyectores de nuestros motores operan con una "luz" de 1 $\mu\text{m}$  a 2 $\mu\text{m}$  (micrones o micras) y presiones de 1500 a 2500 bares.

Esta inmensa presión (si existiera en el planeta un océano de 25 km. de profundidad, es la presión que hallaríamos en el fondo) empuja a las partículas finas a los inyectores.

Estos se truncan, rayan, rasguñan, o se agrandan los orificios debido al tremendo poder abrasivo de estas micro partículas bajo esa tremenda presión, aumentando tanto el consumo de combustible como el hollín que forma en el motor, el aceite y el escape. Este hollín causa la formación de lodo, calentamiento del motor y causando mayor frecuencia de cambios de aceite. Este aumento en la luz de los inyectores reduce la pulverización del diésel, reduciendo la potencia del motor.

Los filtros de los vehículos están diseñados para retener una pequeña cantidad de contaminantes, típicamente el filtro primario está diseñado para retener 50% de las partículas mayores de 10  $\mu\text{m}$  en cada paso. Por lo que el diésel es re-circulado, con un tanque limpio, poco a poco se limpia más hasta saturarlo.

Los filtros secundarios actuales son diseñados para retener cerca de 95% de las partículas de 3  $\mu\text{m}$  o 4  $\mu\text{m}$ . Cada año se mejora esta filtración para proteger los inyectores que cada vez son de menos luz.

Combustible no es conductivo. Cuando pasa por un filtro conductivo, crea un corriente electrostático. Ese efecto sujeta varias partículas de suciedad en la capa del filtro. Pero cada vez que se varía el flujo, se invierte la polaridad del filtro.

Por eso la filtración de combustible en equipos en los que varía su flujo no es eficiente.

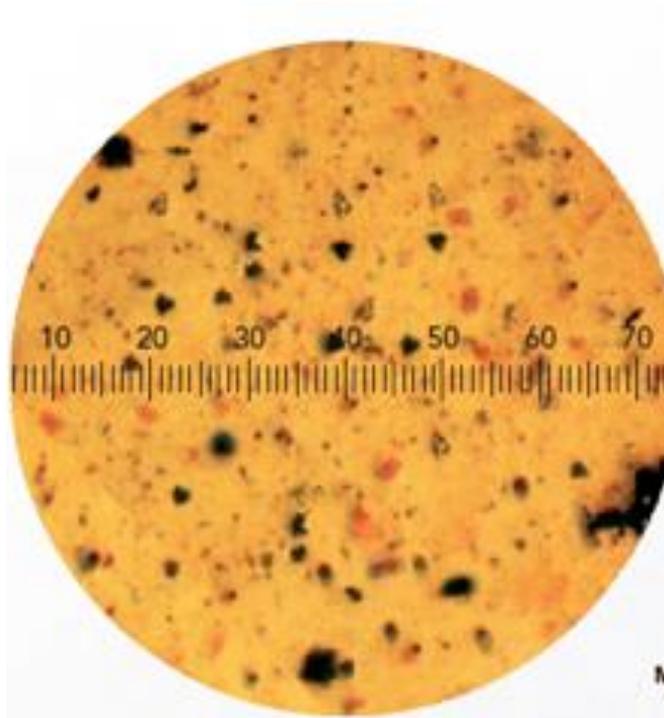
Cuando el motor está en ralentí o bajas revoluciones hay buena filtración. Pero al momento que aceleramos, aumenta el flujo de combustible y mucho de lo que fue atrapado es liberado y arrastrado al motor por ese aumento de flujo y cambio de polaridad de la media filtrante. Largamos el acelerador y el cambio de polaridad vuelve a soltar una parte de la suciedad que había retenido. Esto ocurre con todos los filtros de todas las marcas. La solución óptima es llenar el tanque con combustible pre-filtrado.

En este ejemplo podemos ver muestras de diésel con contaminación típica y compararlas con diésel que sale de los filtros Donaldson Azules (P568666) para filtración de diésel a granel.

Actualmente el diésel analizado en Bolivia es ISO 23/22/14 - Eso quiere decir que las muestras analizadas del diésel boliviano tienen el doble de partículas que la muestra.

Más abajo mostramos varios ejemplos de diésel que analizamos aquí:

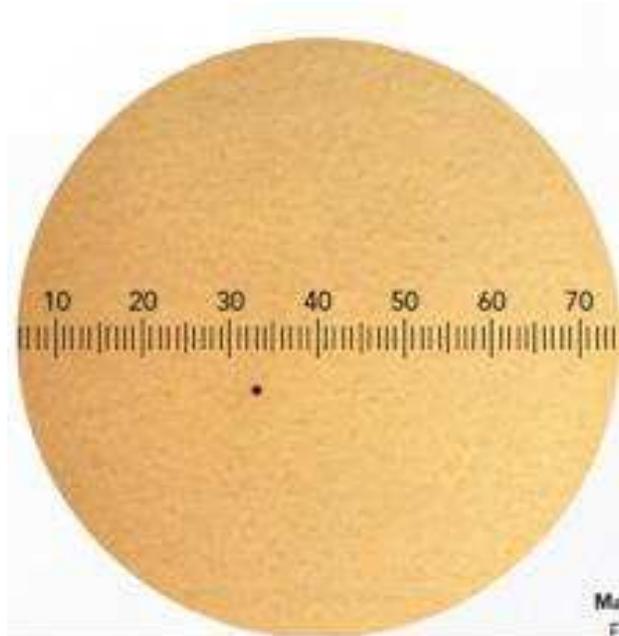
- 22 = entre 2,000,000 y 4,000,000 de partículas mayores de 4  $\mu\text{m}$ , en cada 100 ml.
- 21 = entre 1,000,000 y 2,000,000 de partículas mayores de 6  $\mu\text{m}$ , en cada 100 ml.
- 14 = entre 8,000 y 16,000 de partículas mayores de 14  $\mu\text{m}$ , en cada 100 ml.



**Figura N° 3.2**

Contaminación "**normal**" en diésel ISO 22/21/18 Fuente: donaldson-filters  
**Después de filtrar por Donaldson P568666ISO 14/13/11**

- 14 = entre 8,000 y 16,000 de partículas mayores de 4  $\mu\text{m}$ , en cada 100 ml.
- 13 = entre 4,000 y 8,000 de partículas mayores de 6  $\mu\text{m}$ , en cada 100 ml.
- 11 = entre 1,000 y 2,000 de partículas mayores de 14  $\mu\text{m}$ , en cada 100 ml.



**Figura N° 3.3**

**Limpieza del diésel después del uso de la ISO 14/13/11 Fuente:** Donaldson- filters

Estas fotos son de diésel que compramos en Santa Cruz en septiembre del 2011, analizado en nuestras oficinas.

La figura 3.2 muestra la suciedad de 25 ml de combustible a través de la lente macro de la cámara. La siguiente es una imagen figura 3.3 a través del microscopio de alguna parte de la misma muestra de combustible.

Este combustible tiene una apariencia totalmente transparente.

Todas estas partículas son demasiado pequeñas para ver con el ojo.

Estas dos muestras son de los tanques de combustible de dos vehículos en la ciudad de La Paz, ambos vehículos tenían fallas severas.

La cantidad de partículas contaminantes sobrepasa los valores de la escala ISO.



**Figura N° 3.4**  
Separador de agua Fuente: Donaldson



**Figura N° 3.5**  
Múltiple para sistemas grandes Fuente: Donaldson

### 3.2 FILTROS PARA COMBUSTIBLE

Filtro de partículas (motores Diésel)

Las partículas (hollín) generadas por un motor Diésel son perceptibles por el denso humo negro que deja tras de sí un vehículo propulsado por este tipo de motor en plena aceleración. El gasóleo está formado por cadenas de hidrocarburos muchos mayores y pesadas que la gasolina.

Cuando el motor trabaja a cargas medias y bajas se inyecta muy poco combustible en comparación con el aire introducido en los cilindros, de modo que en todo el volumen de la cámara hay una gran cantidad de oxígeno para completar la combustión.

Sin embargo, cuando se hace trabajar el motor a plena carga (por ejemplo, en una aceleración), puede ocurrir que una parte de la gran cantidad de combustible inyectada no encuentre en sus inmediaciones un volumen suficiente de oxígeno como para terminar la oxidación, haciendo que queden tras la combustión largas cadenas de hidrocarburos parcialmente oxidadas, que tienden a reagruparse y formar el hollín.

En lo que respecta a los efectos nocivos para el medio ambiente y la salud de las personas, los gases de escape del motor diésel contienen diversos componentes contaminantes.

Además de los componentes contaminantes que emiten los motores a Diésel suma a estos, el dióxido de azufre y las partículas de hollín.

- El dióxido de azufre: tiene su origen al quemarse un combustible con contenido de azufre. Es un gas incoloro, de olor penetrante. Los contenidos de azufre en los combustibles vienen siendo cada vez menores.
- Partículas de hollín: estas partículas se producen por falta de oxígeno a causa de una combustión incompleta.

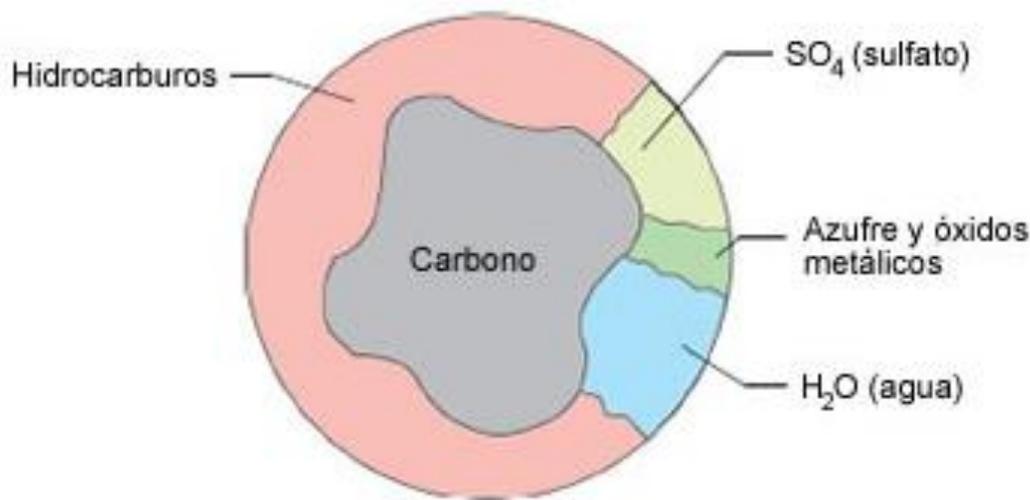
### **3.2.1 Oxigenación de las partículas de hollín**

El origen de las partículas de hollín en el motor diésel está dado a las diferentes operaciones que caracterizan a la combustión en el motor diésel, como son la alimentación de aire, la inyección o la propagación de la flama. La calidad de la combustión depende del modo en que se genere la mezcla de combustible y aire. Puede suceder que la mezcla sea demasiado rica en determinadas áreas de la cámara de combustión, por no haber suficiente oxígeno disponible. En ese caso la combustión se mantiene incompleta y se produce la generación de partículas de hollín.

La masa de las partículas y su cantidad dependen básicamente, por tanto, de la calidad de la combustión en el motor. El sistema de inyección por inyector-bomba trabaja con alta presión y tiene un desarrollo de la inyección que corresponde con las necesidades del motor para contar con una combustión eficiente, con lo cual viene a reducir la generación de partículas de hollín en el proceso de la combustión.

Una alta presión de la inyección y la correspondiente fina pulverización del combustible, sin embargo, no conducen necesariamente a que las partículas sean más pequeñas.

En mediciones se ha manifestado, que el reparto de los tamaños de las partículas en los gases de escape es independiente del principio de combustión aplicado en el motor, es decir, que son muy parecidos los resultados, indistintamente de que se trate de motores de cámara de turbulencia, o inyector-bomba



**Figura N° 3.6**  
Esquema de una partícula de hollín Fuente: Donaldson- filters

En el proceso de la combustión en un motor diésel se producen partículas de hollín (Fig. 3.6). Son esferas microscópicas de carbono, con un diámetro aproximado de 0,05  $\mu\text{m}$ . En su núcleo constan de carbono puro. En este núcleo se asocian diversas combinaciones de hidrocarburos, óxidos metálicos y azufre. Ciertas combinaciones de hidrocarburos se catalogan como sustancias críticas para la salud.

La composición exacta de las partículas de hollín depende de la tecnología aplicada en el motor, las condiciones de aplicación y el combustible empleado.

### 3.2.2 *Medidas para la reducción de las emisiones de partículas*

Existe una serie de soluciones técnicas para la reducción de las emisiones de escape. A este respecto se diferencia entre las medidas endomotrices y las ectomotrices.

#### 3.2.3 *Medidas endomotrices*

Consisten en una optimización eficaz de la combustión para que no se genere desde un principio sustancias contaminantes.

A las medidas endomotrices pertenecen:

- La geometría específica de los conductos de admisión y escape, para establecer condiciones de flujo óptimas.
- Altas presiones de inyección por medio de la tecnología de inyectores-bomba.
- La geometría específica de la cámara de combustión, por ejemplo, la reducción del espacio nocivo y el diseño específico de la cámara en la cabeza del pintón.

### 3.2.4 Medidas ectométricas

Consisten en la reducción de las partículas de hollín por medio de un sistema de filtración en los gases de escape.

### 3.2.5 Resumen

No importa que filtro esté usando, el análisis es la única manera de saber que tan limpio está realmente su combustible. Los resultados del análisis de limpieza son expresados bajo el estándar ISO 4406.

**ISO 22/21/18** Limpieza típica en las áreas de dispensado de ULSD (Diésel Ultra Bajo Azufre), esto puede variar enormemente dependiendo de la región e infraestructura.

**ISO 18/16/13** Nivel mínimo de limpieza recomendado por la Carta Internacional de Combustibles (Word wide Fuel Chárter) Hace más de 10 años.

**ISO 14/13/11** Limpieza recomendada en el combustible cuando se dispensa a los tanques de los equipos y maquinarias

Los códigos ISO son tres números que definen **4  $\mu\text{m}$  y mayores** **6  $\mu\text{m}$  y mayores** **14  $\mu\text{m}$  y mayores** la cantidad y tamaño-distribución de partículas presentes en el fluido.

Combustible a diferentes niveles de limpieza bajo el microscopio:



**Figura N° 3.8**

Grado de Limpieza después del uso de los códigos ISO Fuente: Donaldson- filters

Un filtro de partículas finas retendrá contaminantes más pequeños del combustible y tal vez alcance su capacidad de retención máxima más rápido. Este tal vez requiera ser reemplazado más frecuentemente que un filtro para partículas más grandes.

Un buen filtro es una protección económica y de alto desempeño para los costosos componentes de un motor.

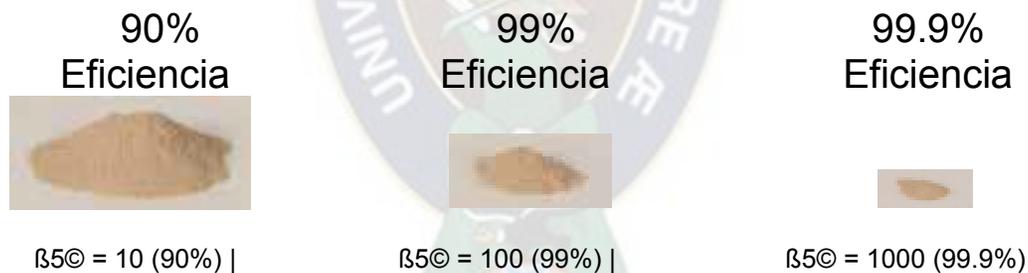
La tecnología utilizada en los motores a diésel modernos para alcanzar los exigentes requerimientos de emisiones es avanzada en un nivel sin precedencia. Los modernos sistemas de alta presión de riel común proveen un alto nivel de eficiencia operacional y confiabilidad.

Las altas presiones y reducidas tolerancias requieren una limpieza de combustible como nunca antes.

El micraje publicado de algunos filtros (o tamaño de partículas que un filtro captura), no brinda un completo entendimiento acerca del desempeño del elemento, a menos que también sepa la eficiencia a la que esto es medido. La eficiencia de un filtro de líquidos de un tamaño dado de partículas es frecuentemente descrita como Rango Beta ( $\beta$ ), o como porcentaje (%).

En otras palabras, dos filtros que dicen capturar el mismo tamaño de partículas o tienen el mismo micraje pueden tener una gran diferencia en su desempeño.

En resumen, los micrones o tamaño de partículas no significan nada sin la medida o porcentaje de eficiencia; así como la eficiencia no describe a un filtro sin el tamaño de partículas que puede retener. Si tiene preguntas sobre el filtro que está utilizando o el que quisiera utilizar.



**Figura N° 3.10**

Grado de eficiencia mediante el Rango Beta ( $\beta$ ) Fuente: Clean Solutions de Donaldson.

### 3.2.6 *Rango Beta*

El rango Beta ( $\beta$ ) es la fórmula utilizada para calcular la eficiencia de filtración.

En una prueba multipaso, se inyecta continuamente al fluido una cantidad uniforme polvo ISO calibrado para pruebas, después se bombea a través del filtro. La eficiencia es determinada monitoreando los niveles de contaminación antes y después del filtro en intervalos específicos. El conteo de partículas antes y después del filtro es conocido con el rango beta.

Un complicado factor cuando se trata de determinar la eficiencia de un sistema de filtración a granel es la naturaleza multipaso de este método de prueba, donde para obtener el resultado el combustible pasa múltiples veces a través del filtro.

La filtración a granel se refiere a la transferencia del fluido normalmente en grandes volúmenes desde el tanque de almacenamiento al tanque del equipo donde será utilizado, requiriendo esto de una filtración de un solo paso. Porque el combustible solo pasa por el filtro una vez. Cualquier contaminante remanente pasa directamente junto con el combustible a través del filtro.

Por esta razón, generalmente se recomienda que los sistemas de filtración a granel sean extremadamente eficientes.

Indica que el test fue realizado con APC's calibrados con fluido NIST

$$\beta_{10c} = 1000$$

1000 veces más partículas antes que después del filtro que son de 10µm y mayores

$$\text{Rango Beta}(x) = \frac{\text{conteo de partículas antes del filtro}}{\text{conteo de partículas después del filtro}}$$

Donde (x) es el tamaño dado de partículas

NOTA: cuando se interpreta la Eficiencia de un filtro, es importante entender lo que los estándares están diseñados a hacer. Los estándares de laboratorio están diseñados para comparar resultados utilizando parámetros muy controlados para asegurar consistencia y repetitividad. Los estándares de pruebas utilizan contaminante controlado y calibrado y no consideran vibraciones y variaciones de flujo. Estos estándares incluso utilizan un fluido especificado para pruebas que puede ser diferente al combustible utilizado realmente.

### 3.3 NIVELES DE LIMPIEZA COMPROMETIDOS POR DONALDSON

- Combustibles Diésel – ISO 14/13/11
- Aceites Hidráulicos y de Transmisión – ISO 16/14/11
- Aceites de Engranajes y Motor – ISO 18/16/13



**Figura N° 3.11**

Equipo de filtración de Diésel Fuente: Clean Solutions de Donaldson

### 3.4 ELEMENTOS

**Max. Presión Trabajo: 350 PSI. Max. Caudal: 246 lpm. T° Trabajo: -40°C a 88°C**

Referencia	Niveles ISO	Eficiencia	Tipos Fluidos
P568666	14 / 13 / 11	4 micrón @ Beta 2000	Combustible
P570248	18 / 16 / 13	20 micrón @ Beta 2000	Absorbente de Agua

**Tabla N° 3.2**

Rango de desempeño del equipo Fuente: Clean Solutions de Donaldson



**Tabla N° 3.3**

Rangos de eficiencia de limpieza del equipo Fuente: Clean Solutions de Donaldson



# CAPITULO IV

## 4 SIMULACIÓN DEL REACTOR DE HDS CON VAPORIZACIÓN.

### 4.1 SIMULACIÓN DE PROCESOS

“Para el diseño de un proceso, el análisis de su operación, la búsqueda de alternativas de mejoras o modificación para la optimización, una de las alternativas de estudio es la formulación y resolución de un modelo matemático que reproduzca el comportamiento del proceso o una parte de éste, denominándose a este procedimiento, simulación. La resolución de estos modelos implica aplicar modelos matemáticos iterativos, y requiere el uso de computadoras que permitan una solución más rápida y exacta que el cálculo manual, por lo tanto, se puede decir que la simulación es un programa que incluye módulos que hacen la función de las operaciones del proceso y reportan las condiciones de salida de las misma a partir de unas condiciones de entrada”.

“La importancia de los simuladores de procesos, es que permite a los ingenieros químicos la realización de: estudios de viabilidad del proceso; balances de materia y energía en los diagramas de flujo de los procesos para el dimensionamiento de los equipos; estudiar el comportamiento de las variables de operación con libertad y economía; la optimización del mismo, mejora de los rendimientos e identificación de los problemas de reparto de flujos”.

“La simulación es sensible a diferentes tipos de carga y condiciones de operación y es capaz de predecir los rendimientos de los productos de desintegración catalítica, la composición de los gases de combustión, la formación de coque y otras variables dependientes del proceso.”

Por lo expuesto en el presente proyecto de grado se utilizará el Simulador HYSYS V8.8 para por disminuir el porcentaje de azufre obtenido, cuyos resultados se hallan en el Anexo B y no cumplen con lo requerido para el Diésel N°2. Salve aclara también que la decisión de utilizar el Simulador HYSYS V8.8 se debe al alto costo de los catalizadores

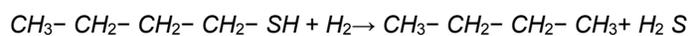
### 4.2 BALANCE DE MATERIALES

#### 4.2.1 REACCIONES DE HIDRODESULFURACIÓN

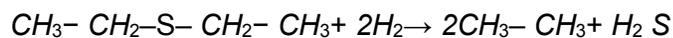
Las reacciones primarias son la remoción de azufre y nitrógeno, así como olefinas de saturación. Los productos de estas reacciones son los contaminantes de los hidrocarburos libres, junto con  $H_2S$  y  $NH_3$ ; otras reacciones incluyen oxígeno, metal, remoción de haluro y saturaciones aromáticas. En cada una de las reacciones el hidrógeno es consumido y se libera calor.

#### 4.2.1.1 Remoción de azufre

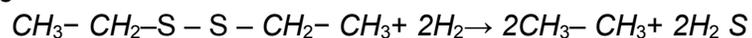
- Mercaptanos



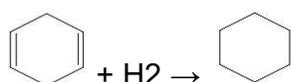
- Sulfuros



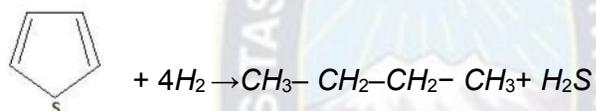
- Di sulfuros



- Sulfuros cíclicos

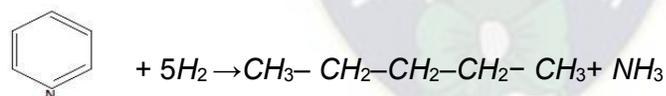


- Tiofenos

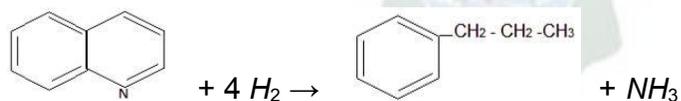


#### 4.2.1.2 Remoción de nitrógeno

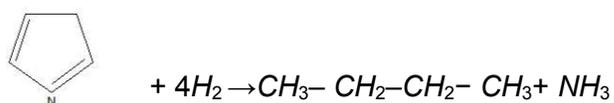
- Piridina



- Quinoleína



- Pirrol

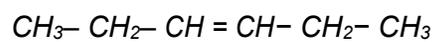


#### 4.2.1.3 Remoción de Oxígeno

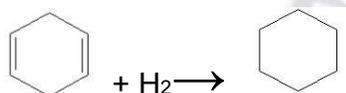


#### 4.2.1.4 Saturación de olefinas

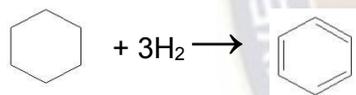
- Olefinas lineales



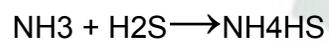
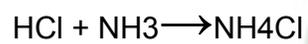
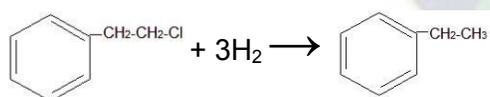
- Olefinas Cíclicas



- Saturación Aromática



#### 4.2.1.5 Remoción de Haluros



### 4.3 CÁLCULOS

Alimentación de diésel = 100 bbl/d (barriles por día)

Gravedad Específica @ 15,6°C		0,88
Densidad @ 15,6°C [Kg/m <sup>3</sup> ]		880
Punto de fluidez [°C]		-10
Intervalo de ebullición (ASTM) [°C]		232-350
<b>Composición %</b>		
Parafinas		56,3
Aromáticos		27
Olefinas		4
Compuestos nitrogenados		2,5
Haluros		4,8
Azufre total (%)		0,7
Compuestos de Azufre (%)	Mercaptanos	0,14
	Sulfuros	0,14
	Disulfuros	0,14
	Tiofenos	0,14
	Sulfuros cíclicos	0,14

**Tabla N°4.1**

Propiedades y composición del combustible diésel Fuente: lacomunidadpetrolera.com

Tabla de especificaciones  
Nombre del producto: DIESEL OIL

Prueba	ORIENTE (*)		OCCIDENTE		Unidad	Método ASTM		
	Min.	Max.	Min.	Max.		Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3
Gravedad específica a 15,6/15,6°C	0,79	0,88	0,80	0,88		D 1298	D 4052	
Corrosión lámina de cobre (3h / 100°C)		3		3		D 130		
Azufre total		0,5		0,5	% peso	D 1266	D 4294	D 2622
Punto de escurrimiento		*		-1,1 (30)	°C (°F)	D 97		
Punto de inflamación	38 (100,4)		38 (100,4)		°C (°F)	D 93		
Apariencia	Cristalina		Cristalina			Visual		
Viscosidad cinemática a 40°C	1,7	5,5	1,7	5,5	cSt	D 445	D 7042	
Índice de Cetano (**)	45		45			D 976	D 4737	
Número de Cetano	42		42			D 613		
Residuo Carbonoso Ramsbottom del 10% de residuo destilado		0,30		0,30	% peso	D 524	D 189	D 4530
Cenizas		0,02		0,02	% peso	D 482		
Agua y sedimentos		0,05		0,05	% vol.	D 1796	D 2709	
Destilación Engler (760 mmHg)								
90% vol.	282 (540)	382 (720)	282 (540)	382 (720)	°C (°F)	D 86		
Poder calorífico	Informar		Informar		BTU/lb	D 4868	D 240	
Color ASTM	Informar		Informar			D 1500		
Contenido de Aromáticos Totales	Informar		Informar		% vol.	D 1319		

ZONA ORIENTE (*)	Ene Feb Mar	Abr	May Jun Jul Ago	Sep	Oct Nov	Dic
PUNTO DE ESCURRIMIENTO	12 (53,6)	7 (44,6)	3 (37,4)	7 (44,6)	9 (48,2)	12 (53,6)

(\*) Se considera Oriente a los departamentos de Santa Cruz, Beni, Pando y las zonas tropicales de La Paz, Cochabamba, Chuquisaca y Tarija, y Occidente el resto de departamentos

(\*\*) Se deberá cumplir la especificación de Índice de Cetano Número de Cetano

#### Tabla N° 4.2

Especificaciones del diésel en Bolivia Fuente: INE

#### 4.4 DATOS PARA EL COMBUSTIBLE DIÉSEL:

Gravedad específica del diésel = 0,88

Densidad del agua,  $\rho_{H_2O}$  = 1000 Kg/m<sup>3</sup>

Densidad del diésel,  $\rho_{oil}$  = 880 Kg/m<sup>3</sup>

Flujo de alimentación de combustible,  $F_1$  =

100	bbl/d
15.89873	m <sup>3</sup> /d
13,990.46	Kg/d
582.936	Kg/h

$$100 \frac{\text{bbl}}{\text{d}} * \frac{880 \text{Kg}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{m}^3}{6,29 \text{bbl}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 582.936 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

#### 4.5 BALANCE DE MATERIAL ALREDEDOR DEL REACTOR

Hidrógeno Requerido (H<sub>2</sub>)

Hidrógeno para la remoción de azufre

**4.5.1 Total, compuestos Azufre en la alimentación= Alimentación \* (% Azufre)**

$$582.936 \frac{kg}{h} * 0.007 = 40.8055 \frac{kg}{h}$$

**4.5.2 Mercaptanos en el azufre de alimentación\* % mercaptanos**

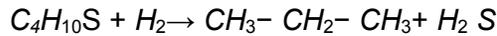
$$582.936 \frac{kg}{h} * 0.0014 = 8.162 \frac{kg}{h}$$

	Componentes	Flujo Másico	Hidrógeno requerido
		(Kg/h)	(Kg/h H <sub>2</sub> )
Compuestos de Azufre	Mercaptanos	8.162	0.1814
	Sulfuros	8.162	0.3627
	Disulfuros	8.162	0.268
	Sulfuros cíclicos	8.162	0.371
	Tiofenos	8.162	0.777
	Total	40.8055	2.3201

**Tabla N° 4.3**

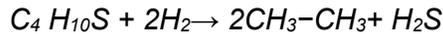
Cantidad de compuestos de azufre en la alimentación Fuente: Propia

#### 4.5.2.1 Mercaptanos



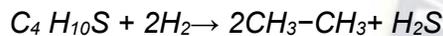
$$8.162 * \frac{Kg C_4 H_{10}S}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_{10}S}{90 Kg C_4H_{10}S} * \frac{1K_{mol}H_2}{1K_{mol}C_4H_{10}S} * \frac{2KgH_2}{1K_{mol}H_2} = 0,1814 \frac{Kg}{h} H_2$$

#### 4.5.2.2 Sulfuros



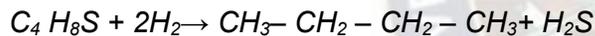
$$8.162 * \frac{Kg C_4 H_{10}S}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_{10}S}{90 Kg C_4H_{10}S} * \frac{2K_{mol}H_2}{1K_{mol}C_4H_{10}S} * \frac{2KgH_2}{1K_{mol}H_2} = 0.3627 \frac{Kg}{h} H_2$$

#### 4.5.2.3 Disulfuros



$$8.162 * \frac{Kg C_4 H_{10}S_2}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_{10}S_2}{122 Kg C_4 H_{10}S_2} * \frac{2K_{mol}H_2}{1K_{mol}C_4H_{10}S_2} * \frac{2KgH_2}{1K_{mol}H_2} = 0.268 \frac{Kg}{h} H_2$$

#### 4.5.2.4 Sulfuros Cíclicos



$$8.162 * \frac{Kg C_4 H_8S}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_8S}{88 Kg C_4 H_8S} * \frac{2K_{mol}H_2}{1K_{mol}C_4H_8S} * \frac{2KgH_2}{1K_{mol}H_2} = 0.371 \frac{Kg}{h} H_2$$

#### 4.5.2.5 Tiofenos



$$8.162 * \frac{Kg C_4 H_4S}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_4S}{84 Kg C_4 H_4S} * \frac{4K_{mol}H_2}{1K_{mol}C_4H_4S} * \frac{2KgH_2}{1K_{mol}H_2} = 0.777 \frac{Kg}{h} H_2$$

El hidrógeno total requerido para la remoción de azufre = Hidrógeno para mercaptanos +  
Hidrógeno para sulfuros + Hidrógeno para Disulfuros + Hidrógeno para sulfuros cíclicos +  
Hidrógeno para tiofenos =  $2.3201 \frac{Kg}{h}$

#### 4.5.3 Hidrógeno para la remoción de nitrógeno

Nitrógeno total en la alimentación = Flujo de Alimentación \* (%N<sub>2</sub>)

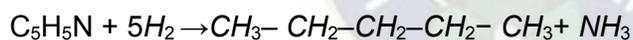
$$582.936 \frac{kg}{h} * 0.025 = 14.5734 \frac{kg}{h}$$

Componentes	Composición	Flujo Másico	Hidrógeno requerido
	(%)	Kg/h	(Kg/h H <sub>2</sub> )
Piridina	30	4.372	0.553
Pirrol	35	5.100	0.609
Quinolina	35	5.100	0.316
Total	100	14.5734	1.771

**Tabla N° 4.4**

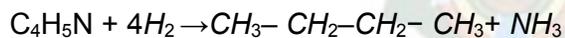
Compuestos nitrogenados en la alimentación Fuente: Propia

#### 4.5.3.1 Piridina



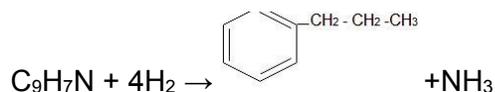
$$4.372 * \frac{Kg C_5 H_5 N}{h} * \frac{1 K_{mol} C_5 H_5 N}{79 Kg C_5 H_5 N} * \frac{5 K_{mol} H_2}{1 K_{mol} C_5 H_5 N} * \frac{2 Kg H_2}{1 K_{mol} H_2} = 0.553 \frac{Kg}{h} H_2$$

#### 4.5.3.2 Pirrol



$$5.100 * \frac{Kg C_4 H_5 N}{h} * \frac{1 K_{mol} C_4 H_5 N}{67 Kg C_4 H_5 N} * \frac{4 K_{mol} H_2}{1 K_{mol} C_4 H_5 N} * \frac{2 Kg H_2}{1 K_{mol} H_2} = 0.609 \frac{Kg}{h} H_2$$

#### 4.5.3.3 Quinolina



$$5.100 * \frac{Kg\ C_9\ H_7N}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_5N}{129\ Kg\ C_9H_7N} * \frac{4K_{mol}H_2}{1K_{mol}C_9H_9N} * \frac{2KgH_2}{1K_{mol}H_2} = 0.316 \frac{Kg}{h} H_2$$

El hidrógeno total requerido para la remoción de nitrógeno = Hidrógeno para piridina +  
Hidrógeno para pirrol + Hidrógeno para quinoleína =  $1.771 \frac{kg}{h}$

#### 4.5.4 Hidrógeno para saturación de olefinas

Total, de olefinas en la alimentación = Flujo de Alimentación \* (% Olefinas)

$$582.936 \frac{kg}{h} * 0.04 = 23.317 \frac{kg}{h}$$

Componentes	Composición (%)	Flujo másico kg/h	Hidrógeno requerido (Kg/h H2)
Olefinas lineales	50	11.658	0.277
Olefinas cíclicas	50	11.658	0.291
Total	100	23.317	0.568

**Tabla N° 4.5**

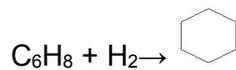
Hidrogeno para saturación de olefinas Fuente: Propia

##### 4.5.4.1 Olefinas lineales



$$11.658 * \frac{Kg\ C_6\ H_{12}}{h} * \frac{1K_{mol}C_6H_{12}}{84\ Kg\ C_6H_{12}} * \frac{1K_{mol}H_2}{1K_{mol}C_6H_{12}} * \frac{2KgH_2}{1K_{mol}H_2} = 0.277 \frac{Kg}{h} H_2$$

##### 4.5.4.2 Olefinas cíclicas



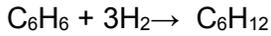
$$11.658 * \frac{Kg\ C_6\ H_8}{h} * \frac{1K_{mol}C_6H_8}{80\ Kg\ C_6H_8} * \frac{1K_{mol}H_2}{1K_{mol}C_6H_8} * \frac{2KgH_2}{1K_{mol}H_2} = 0.291 \frac{Kg}{h} H_2$$

Hidrógeno total requerido para la saturación de olefinas = Hidrógeno para olefinas  
lineales + Hidrógeno para olefinas cíclicas =  $0.568 \frac{Kg}{h}$

#### 4.5.5 Hidrógeno para Saturación de aromáticos

Total, de aromáticos en la alimentación = Flujo de Alimentación • (% Aromáticos)

$$582.936 \frac{kg}{h} * 0.27 = 157.393 \frac{kg}{h}$$

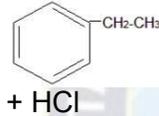
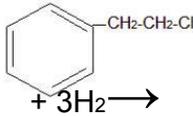


$$157.393 * \frac{Kg C_6 H_6}{h} * \frac{1KmolC_6H_6}{78 Kg C_6H_6} * \frac{3KmolH_2}{1KmolC_6H_6} * \frac{2KgH_2}{1KmolH_2} = 12.107 \frac{Kg}{h} H_2$$

#### 4.5.6 Hidrógeno para la remoción de Haluros

Total, de haluros en la alimentación = Flujo de Alimentación\*(% Haluros)

$$582.936 \frac{kg}{h} * 0.048 = 27.981 \frac{kg}{h}$$



$$27.981 * \frac{Kg C_8 H_9 Cl}{h} * \frac{1KmolC_6H_6}{140 Kg C_8 H_9 Cl} * \frac{3KmolH_2}{1KmolC_6H_6} * \frac{2KgH_2}{1KmolH_2} = 1.199 \frac{Kg}{h} H_2$$

$$27.981 \text{ kg de Haluros requiere} = 1.199 \frac{Kg}{h} H_2$$

El hidrógeno total requerido = H<sub>2</sub> para desulfuración + H<sub>2</sub> para desnitrógenación + H<sub>2</sub> para saturación de olefinas + H<sub>2</sub> para saturación de aromáticos + H<sub>2</sub> para remoción de haluros =  $17.397 \frac{Kg}{h} H_2$

#### 4.5.7 Usando el 100 % del exceso de hidrógeno, se tiene:

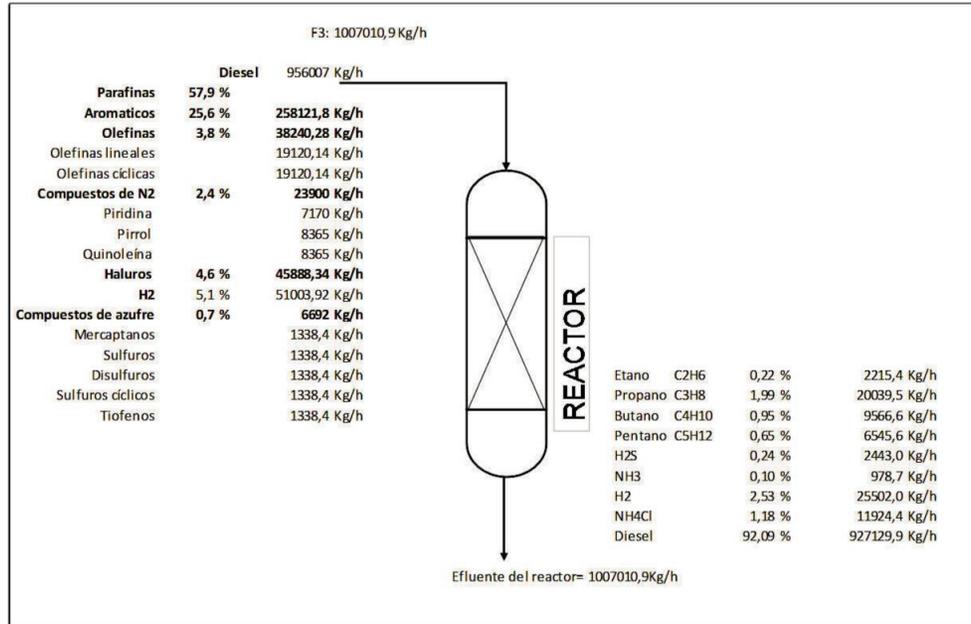
$$\text{Exceso de hidrógeno} = 17.397 \frac{Kg}{h}$$

$$H_2 \text{ requerido} + \text{Exceso } H_2 = 34.794 \frac{Kg}{h}$$

$$\text{Hidrógeno total en la alimentación, } F_2 = 34.794 \frac{Kg}{h}$$

#### 4.6 BALANCE TOTAL ALREDEDOR DEL REACTOR

$$F_3 = F_1 + F_2 = 582.936 + 34.794 = 617.73 \frac{Kg}{h}$$

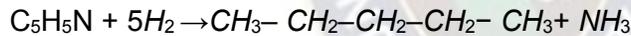


**Figura 4.1**

Balace de masa en el reactor Fuente: Propia

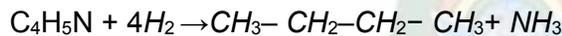
#### 4.6.1 Amonio producido

##### 4.6.1.1 Piridina



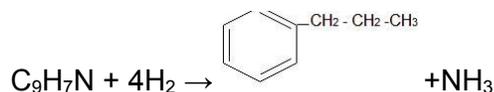
$$4.372 \frac{Kg C_5 H_5 N}{h} * \frac{1 K_{mol} C_5 H_5 N}{79 Kg C_5 H_5 N} * \frac{1 K_{mol} NH_3}{1 K_{mol} C_5 H_5 N} * \frac{17 Kg NH_3}{1 K_{mol} NH_3} = 0.941 \frac{Kg}{h} NH_3$$

##### 4.6.1.2 Pirrol



$$5.100 \frac{Kg C_4 H_5 N}{h} * \frac{1 K_{mol} C_4 H_5 N}{67 Kg C_4 H_5 N} * \frac{1 K_{mol} NH_3}{1 K_{mol} C_4 H_5 N} * \frac{17 Kg NH_3}{1 K_{mol} NH_3} = 1.294 \frac{Kg}{h} NH_3$$

##### 4.6.1.3 Quinolina



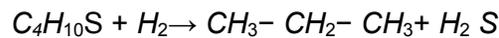
$$5.100 \frac{Kg C_9 H_7 N}{h} * \frac{1 K_{mol} C_9 H_7 N}{129 Kg C_9 H_7 N} * \frac{1 K_{mol} NH_3}{1 K_{mol} C_9 H_7 N} * \frac{17 Kg NH_3}{1 K_{mol} NH_3} = 0.672 \frac{Kg}{h} NH_3$$

Amonio total requerido =  $NH_3$  producido desde piridina +  $NH_3$  producido desde pirrol +  $NH_3$  producido desde quinoleína =  $2.907 \frac{Kg}{h}$

$$NH_{3\text{ PRODUCIDO}} = 0.171 \frac{kmol}{h} NH_3$$

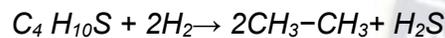
#### 4.6.2 Sulfuro de hidrógeno producido

##### 4.6.2.1 Mercaptanos



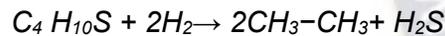
$$8.162 * \frac{Kg\ C_4\ H_{10}S}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_{10}S}{90\ Kg\ C_4H_{10}S} * \frac{1K_{mol}H_2S}{1K_{mol}C_4H_{10}S} * \frac{34H_2S}{1K_{mol}H_2S} = 3.083 \frac{Kg}{h} H_2S$$

##### 4.6.2.2 Sulfuros



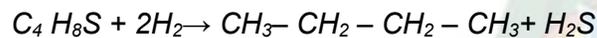
$$8.162 * \frac{Kg\ C_4\ H_{10}S}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_{10}S}{90\ Kg\ C_4H_{10}S} * \frac{1K_{mol}H_2S}{1K_{mol}C_4H_{10}S} * \frac{34H_2S}{1K_{mol}H_2S} = 3.083 \frac{Kg}{h} H_2S$$

##### 4.6.2.3 Disulfuros



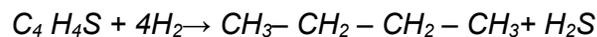
$$8.162 * \frac{Kg\ C_4\ H_{10}S_2}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_{10}S_2}{122\ Kg\ C_4\ H_{10}S_2} * \frac{1K_{mol}H_2S}{1K_{mol}C_4H_{10}S_2} * \frac{34H_2S}{1K_{mol}H_2S} = 2.275 \frac{Kg}{h} H_2S$$

##### 4.6.2.4 Sulfuros Cíclicos



$$8.162 * \frac{Kg\ C_4\ H_8S}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_8S}{88\ Kg\ C_4\ H_8S} * \frac{1K_{mol}H_2S}{1K_{mol}C_4H_8S} * \frac{34H_2S}{1K_{mol}H_2S} = 3.153 \frac{Kg}{h} H_2S$$

##### 4.6.2.5 Tiofenos



$$8.162 * \frac{Kg\ C_4\ H_4S}{h} * \frac{1K_{mol}C_4H_4S}{84\ Kg\ C_4\ H_4S} * \frac{1K_{mol}H_2S}{1K_{mol}C_4H_4S} * \frac{34H_2S}{1K_{mol}H_2S} = 3.303 \frac{Kg}{h} H_2S$$

El total de sulfuros de hidrógeno producido =  $H_2S$  desde mercaptanos +  $H_2S$  desde sulfuros +  $H_2S$  desde disulfuros +  $H_2S$  desde sulfuros cíclicos +  $H_2S$  desde tiofenos =  $14.897 \frac{Kg}{h} H_2S$



#### 4.8.1 Caudal de agua de lavado, $F_4$

$$\text{Caudal de alimentación } F_1 = 582.936 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{\text{m}^3}{880 \text{ Kg}} = 0.662 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \rho = 880 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

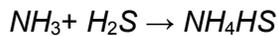
$$\text{Volumen del caudal de alimentación} = 0.662 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Asumiendo que el flujo del agua de lavado es el 5 % del volumen de la alimentación fresca.

$$\text{Flujo de agua de lavado } F_4 = 0.662 * 0.05 = 0.038 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ agua}$$

$$\text{Flujo másico de H}_2\text{O de lavado, } F_4 = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.038 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 38 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

#### 4.8.2 Flujo del agua ácida, $F_7$



$$0.595 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{NH}_3 * \frac{1 \text{KmolNH}_3}{17 \text{KmolNH}_3} * \frac{1 \text{KmolH}_2\text{S}}{1 \text{KmolNH}_3} * \frac{34 \text{H}_2\text{S}}{1 \text{KmolH}_2\text{S}} = 1.19 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{H}_2\text{S}$$

$$\text{H}_2\text{S libre} = 14.897 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{H}_2\text{S} - 1.19 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{H}_2\text{S} = 13.707 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{H}_2\text{S}$$

$$0.595 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{NH}_3 * \frac{1 \text{KmolNH}_3}{17 \text{KmolNH}_3} * \frac{1 \text{KmolNH}_4\text{HS}}{1 \text{KmolNH}_3} * \frac{51 \text{KgNH}_4\text{HS}}{1 \text{KmolNH}_4\text{HS}} = 1.785 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{NH}_4\text{HS}$$

##### 4.8.2.1 El agua ácida contiene

$$\text{NH}_4\text{HS} = 1.785 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} ; 7.249 \frac{\text{KgNH}_4\text{Cl}}{\text{h}} ; \text{Agua de lavado} = 38 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Flujo del Agua Acida} = F_7 = m_{\text{NH}_4\text{HS}} + m_{\text{NH}_4\text{Cl}} + m_{\text{agua lavado}} = 47.034 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$F_6$ (Gases  $\text{H}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ )

$$\text{H}_2 \text{ libre} = \text{H}_2 \text{ entrada} - \text{H}_2 \text{ consumido} = 34.794 - 17.397 = 17.397 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$\text{H}_2\text{S libre} = \text{H}_2\text{S producido} - \text{H}_2\text{S reaccionado con NH}_3$$

$$\text{H}_2\text{S libre} = 14.897 - 1.19 = 13.707 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Por las especificaciones de diseño del separador y tomando en cuenta un 60% de eficiencia de separación, se obtiene la cantidad de:  $13.707 * 0.6 = 8.224 \frac{Kg}{h} H_2S$  es removido en el separador, mientras que el resto de  $H_2S$  se dirige al stripper

$$F_6 = H_2 \text{ libre} + H_2 \text{ removido en el separador} = 17.397 + 8.224 = 25.621 \frac{Kg}{h}$$

#### 4.8.3 Aplicación de balance total alrededor del separador, $F_3 + F_4 = F_5 + F_6 + F_7$

$$F_5 = F_3 + F_4 - F_6 - F_7 = 617.73 + 0.038 - 25.621 - 47.034$$

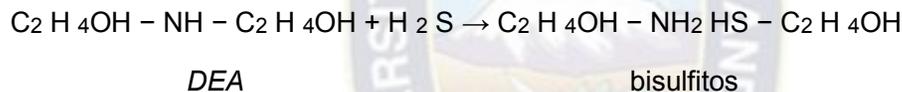
$$F_5 = 545.113 \frac{Kg}{h}$$

#### 4.9 BALANCE DE MATERIAL ALREDEDOR DEL ABSORBEDOR

Tomado el 25 % en peso de DEA (Dietanol amina) y 75 % en peso de agua.

Fracción de DEA = 0,25

Fracción de agua = 0,75



Peso molecular DEA=105 Kg/Kmol

1 Kmol de  $H_2S$  requiere = 1 Kmol de solución DEA

$$34 \text{ Kg de } H_2S \text{ requiere} = 0.25 * 105 + 0.75 * 18 = 39.75 \frac{Kg}{h} \text{ DEA}$$

$$8.224 \text{ Kg de } H_2S \text{ requiere} = \frac{39.75}{34} * 8.224 = 9.615 \frac{Kg}{h} \text{ DEA}$$

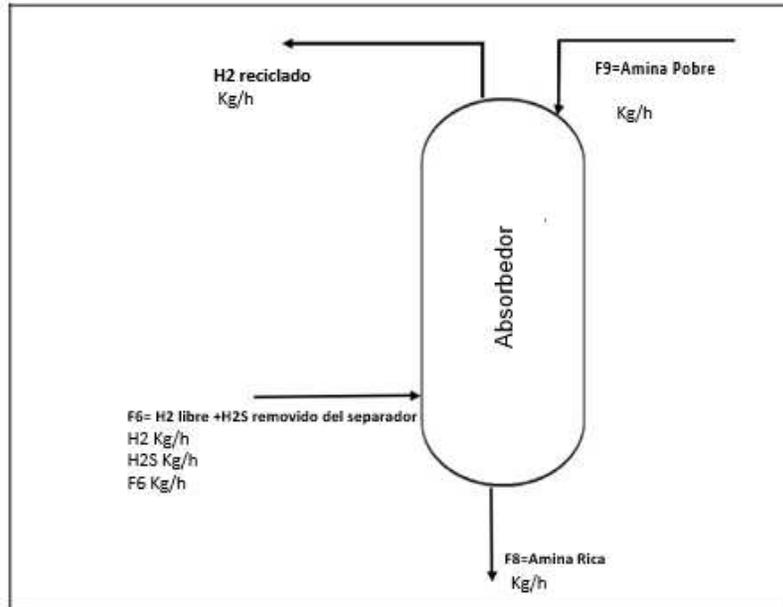
$$\text{Amina pobre (solución DEA) requiere} = F_9 = 9.615 \frac{Kg}{h}$$

$$\text{Amina rica} = F_8 = H_2S \text{ removida} + \text{amina pobre} = 8.224 + 9.615 = 17.839 \frac{Kg}{h}$$

$$\text{Amina rica} = F_8 = 17.839 \frac{Kg}{h}$$

$H_2$  reciclado =  $F_6 - H_2S$  absorbido en la solución DEA

$$H_2 \text{ reciclado} = 25.621 - 8.224 \frac{Kg}{h}$$

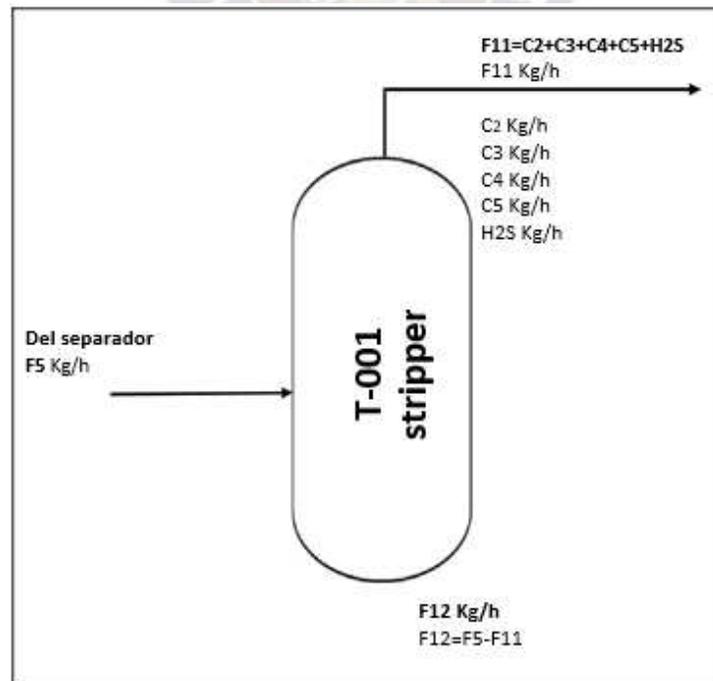


**Figura N° 4.3**

Balance de material en el absorbedor Fuente: Propia

#### 4.10 BALANCE DE MATERIAL ALREDEDOR DEL STRIPPER

Generalmente el stripper remueve componentes desde  $C_2 - C_5$

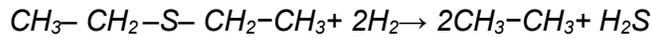


**Figura N° 4.4**

Balance de alrededor del stripper Fuente: Propia

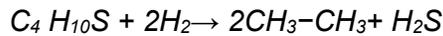
#### 4.10.1 C<sub>2</sub> producido

##### 4.10.1.1 Sulfuros



$$8.162 \text{ Kg de Sulfuro} * \frac{1\text{K}_{\text{mol}}\text{sulfuro}}{90 \text{ Kg sulfuro}} * \frac{2\text{K}_{\text{mol}}\text{H}_2\text{C}_6}{1\text{K}_{\text{mol}}\text{C}_4\text{H}_{10}\text{S}_2} * \frac{30 \text{ H}_2\text{C}_6}{1\text{K}_{\text{mol}}\text{H}_2\text{C}_6} = 5.441 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{H}_2\text{C}_6$$

##### 4.10.1.2 Disulfuros

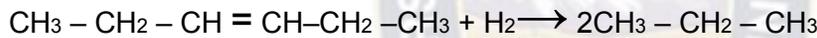


$$8.162 \text{ Kg de Sulfuro} * \frac{1\text{K}_{\text{mol}}\text{sulfuro}}{122\text{Kg sulfuro}} * \frac{2\text{K}_{\text{mol}}\text{H}_2\text{C}_6}{1\text{K}_{\text{mol}}\text{sulfuro}} * \frac{30 \text{ Kg H}_2\text{C}_6}{1\text{K}_{\text{mol}}\text{H}_2\text{C}_6} = 4.014 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{H}_2\text{C}_6$$

$$\text{Producción total de C}_2 - \text{C}_5 \text{ desde sulfuros} + \text{C}_2 \text{ desde disulfuros} = 9.455 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{C}_2$$

#### 4.10.2 C<sub>3</sub> producido

##### 4.10.2.1 Desde olefinas lineales



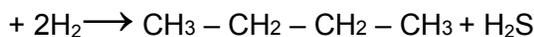
$$8.162 \text{ Kg de Olefina} * \frac{1\text{K}_{\text{mol}}\text{olefina}}{84\text{Kg olefina}} * \frac{2\text{K}_{\text{mol}}\text{H}_8\text{C}_3}{1\text{K}_{\text{mol}}\text{olefina}} * \frac{44\text{Kg H}_8\text{C}_3}{1\text{K}_{\text{mol}}\text{H}_8\text{C}_3} = 8.551 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{H}_8\text{C}_3$$

#### 4.10.3 C<sub>4</sub> producido

##### 4.10.3.1 Desde mercaptanos

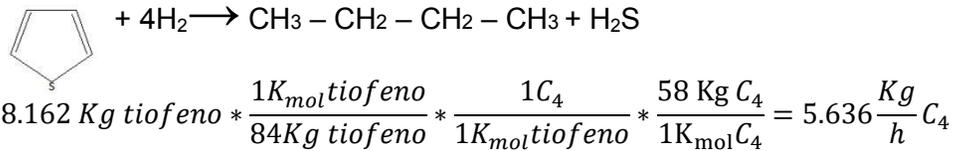
$$8.162 \text{ Kg mercaptanos} * \frac{1\text{K}_{\text{mol}}\text{mercaptanos}}{90\text{Kg mercaptanos}} * \frac{1\text{K}_{\text{mol}}\text{C}_4}{1\text{K}_{\text{mol}}\text{mercaptanos}} * \frac{58 \text{ Kg C}_4}{1\text{K}_{\text{mol}}\text{C}_4} = 5.259 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{C}_4$$

##### 4.10.3.2 Desde sulfuros cíclicos

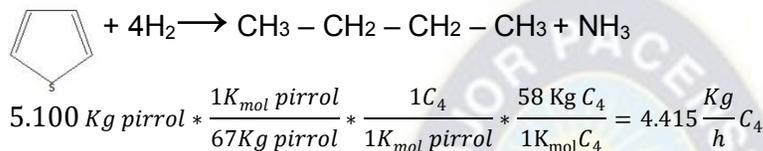


$$8.162 \text{ Kg sulf. cíclicos} * \frac{1\text{K}_{\text{mol}}\text{sulf. cíclicos}}{88\text{Kg sulf. cíclicos}} * \frac{2\text{K}_{\text{mol}}\text{C}_4}{1\text{K}_{\text{mol}}\text{sulf. cíclicos}} * \frac{58 \text{ Kg C}_4}{1\text{K}_{\text{mol}}\text{C}_4} = 10.759 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{C}_4$$

#### 4.10.3.3 Desde tiofenos



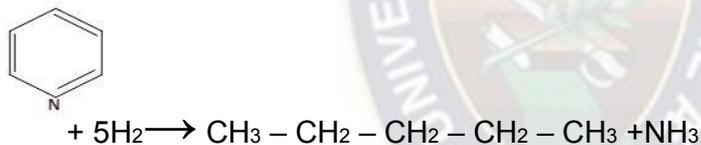
#### 4.10.3.4 Desde pirrol



$C_4$  total producido =  $C_4$  desde los mercaptanos +  $C_4$  desde los sulfuros cíclicos +  $C_4$  desde los tiofenos +  $C_4$  desde pirrol =  $26.069 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$

#### 4.10.4 $C_5$ producido

##### 4.10.4.1 Desde piridina



$$4.372 \text{ Kg piridina} * \frac{1 \text{K}_{\text{mol}} \text{piridina}}{67 \text{Kg piridina}} * \frac{1 \text{C}_5}{1 \text{K}_{\text{mol}} \text{piridina}} * \frac{58 \text{ Kg C}_5}{1 \text{K}_{\text{mol}} \text{C}_5} = 3.785 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{C}_5$$

$$H_2 \text{ Sremovido en el stripper} = 10 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Desechos ligeros} = F_{11} = 10 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 = 57.86 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

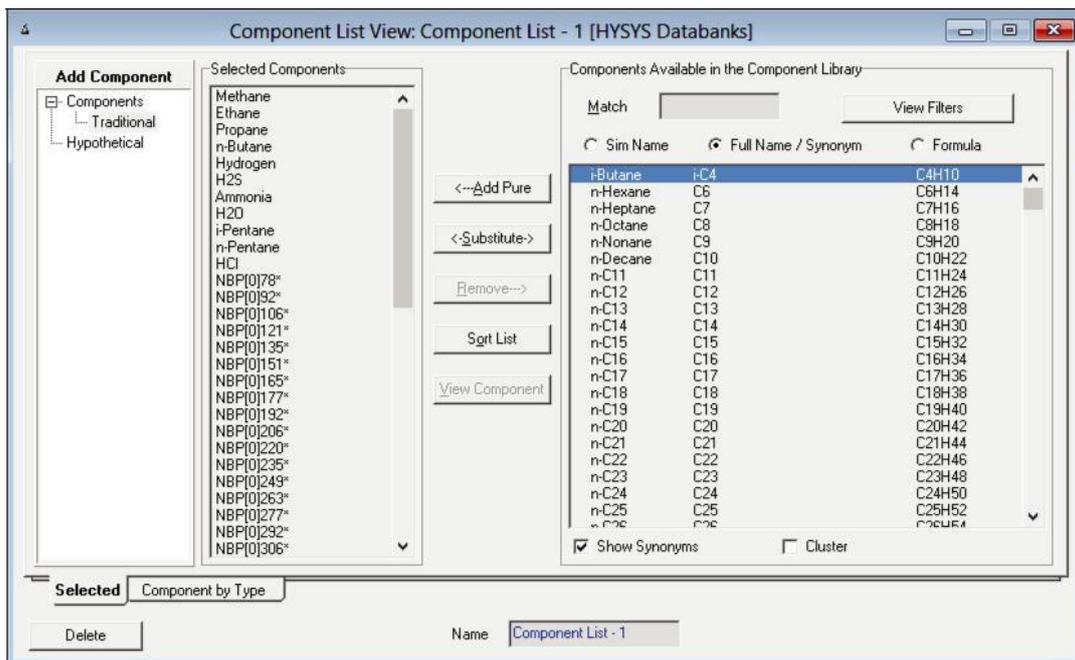
$$\text{Producto Final} = F_{12} = F_5 - F_{11} = 545.113 - 57.86 = 487.253 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Contenido de azufre en el producto} = 487.253 * 0.0005 = 0.244 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{ S}$$

## 4.11 SIMULACION DE LA UNIDAD HIDRODESULFURACION (HDS)

### 4.11.1 CARACTERIZACIÓN DEL DIÉSEL A SIMULAR

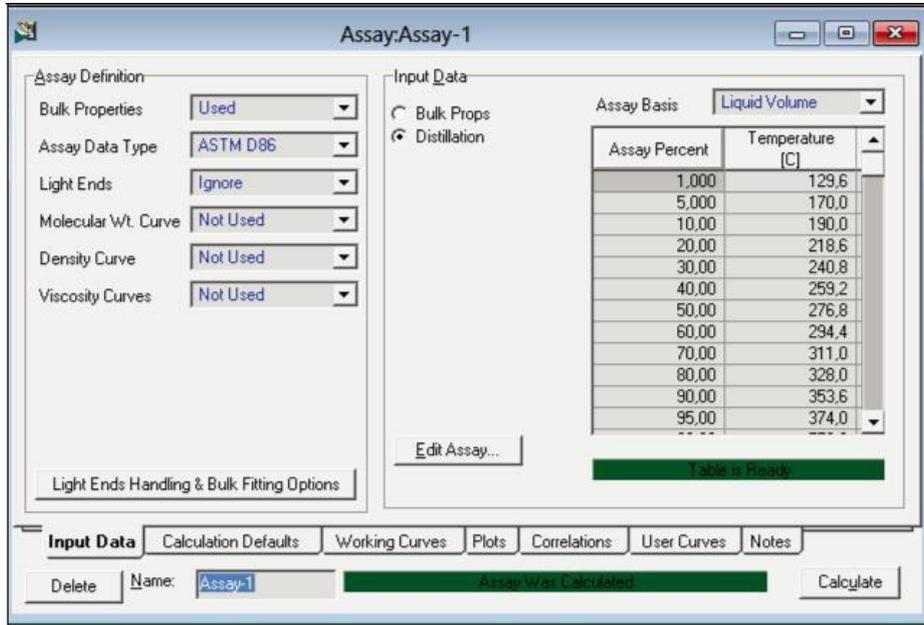
Para la caracterización del diésel se procede a iniciar un nuevo caso de simulación y a la selección de componentes en la corriente de alimentación, así como del paquete fluido a utilizarse. Los pseudo-componentes están identificados como NBP-No., NBP significa Normal Boiling Point, mientras que el número es la temperatura de ebullición del componente en cuestión a presión atmosférica.



**Figura 4.5**

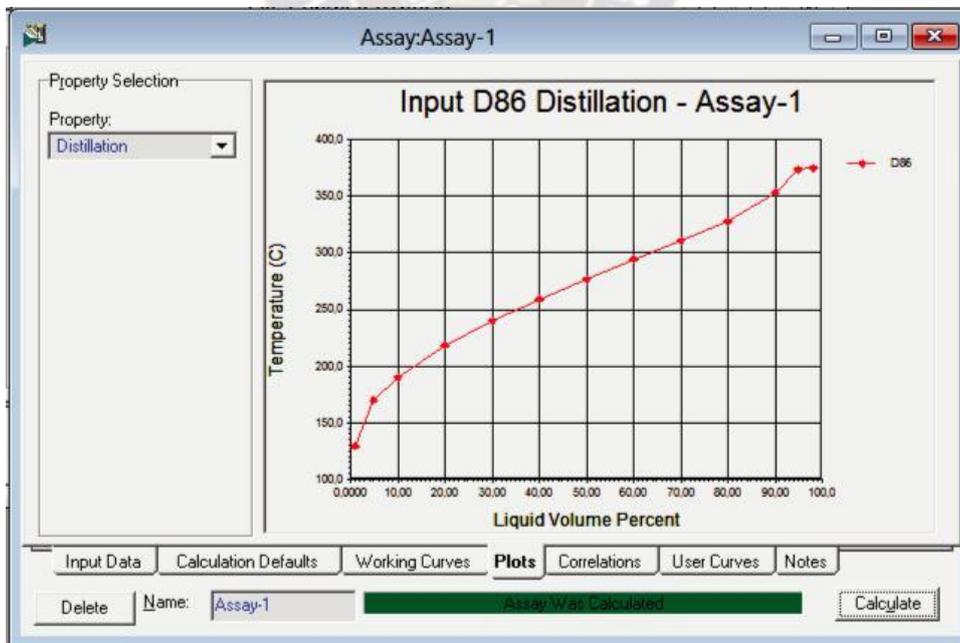
Lista componentes de la corriente de alimentación Fuente: Propia HYSYS V8.8

Luego se elige el paquete termodinámico Peng- Robinson. Ya seleccionado la lista de componentes y el paquete termodinámico, se utiliza la herramienta de caracterización “Oíl manager” y se selecciona “enter oil environment”. Posteriormente se selecciona añadir para ingresar el corte de diésel según la normativa ASTM D86, obteniéndose la curva respectiva.



**Figura 4.6**

Datos de la curva de destilación ASTM D86 del diésel Fuente. Propia HYSYS V8.8



**Figura 4.7**

Curva del ensayo del diésel Fuente: Propia HYSYS V8.8



## 4.12 SIMULACION DE EQUIPOS

### 4.12.1 Diseño del Absorbedor

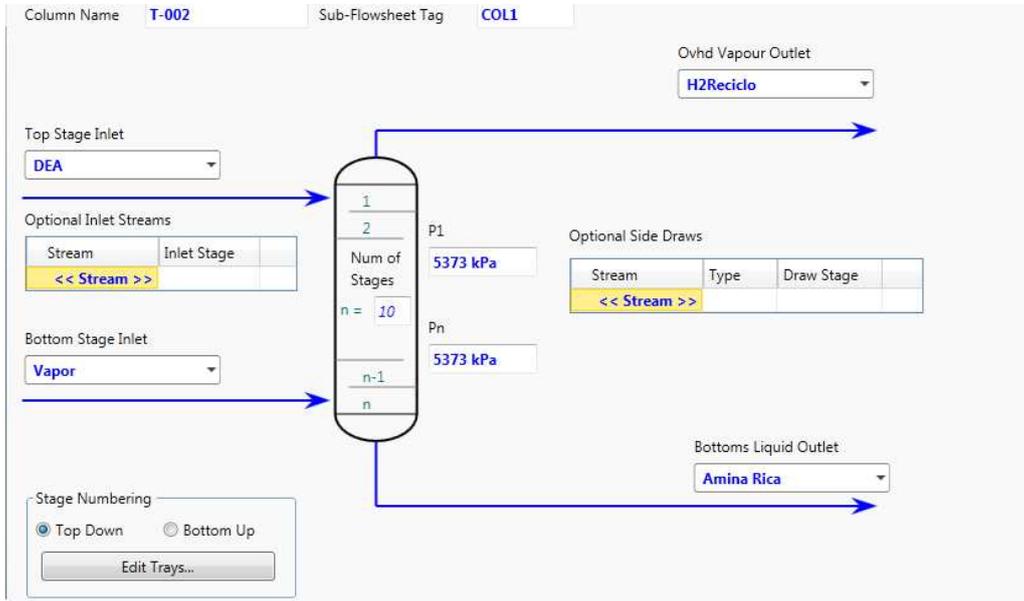


Figura N° 4.9

Corriente de Entrada y Salida Fuente: Propia HYSYS V8.8

### 4.12.2 Especificaciones del Despojador

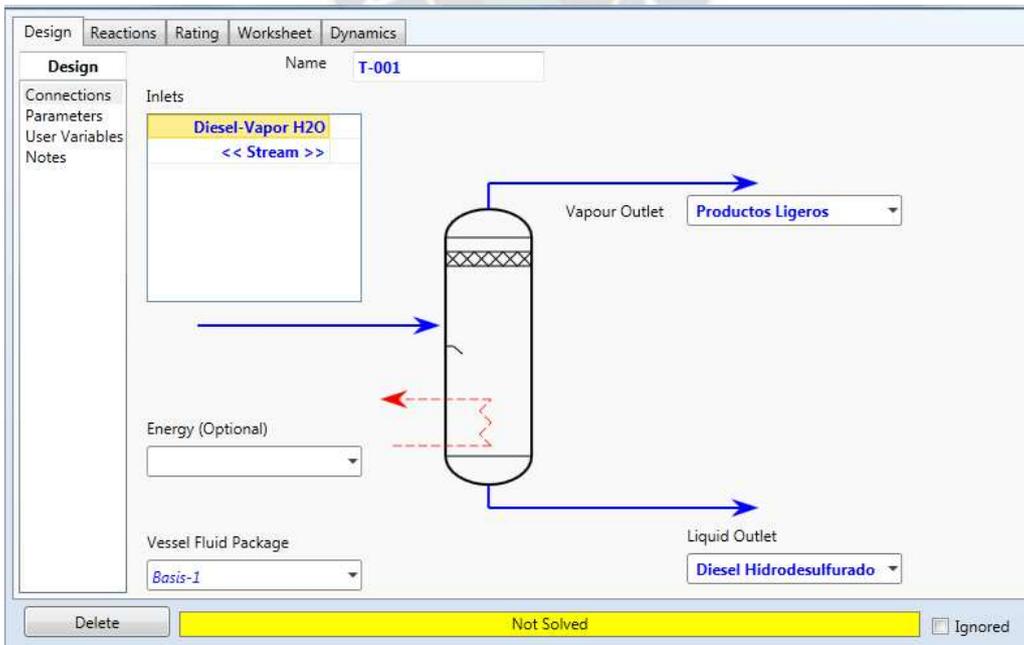


Figura N° 4.10

Corrientes de entrada y salida Fuente: Propia HYSYS V8.8

### 4.12.3 Separador de Diésel

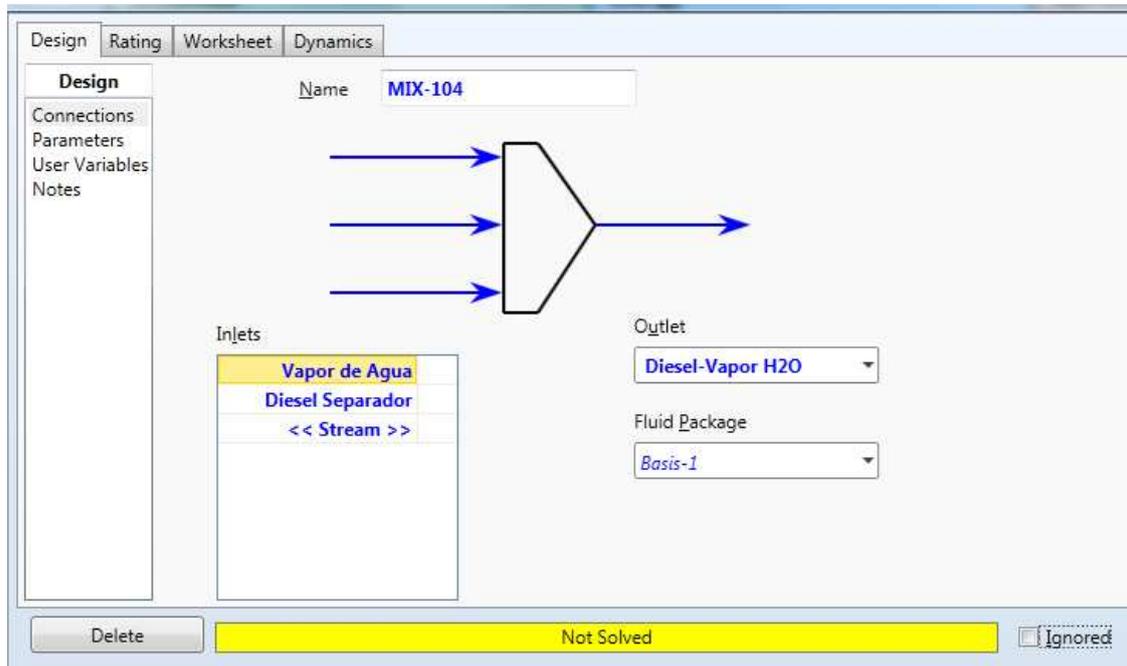


Figura N° 4.11

Separador de Diésel- Vapor de agua Fuente: Propia HYSYS V8.8

### 4.12.4 Diseño del separador V-001

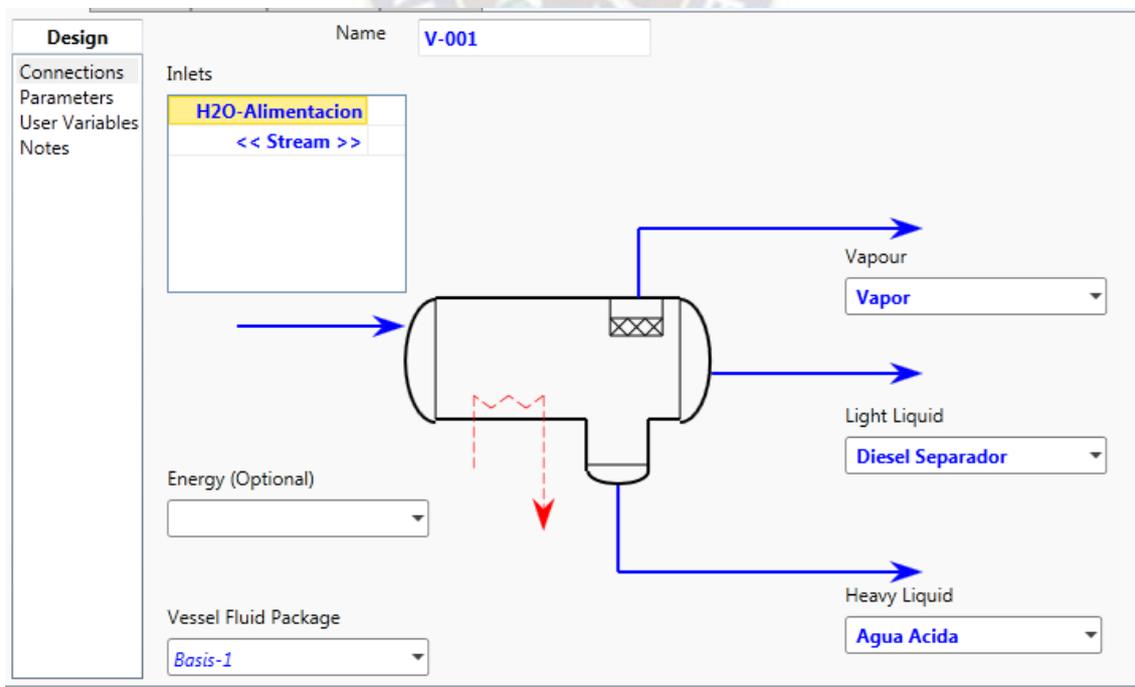
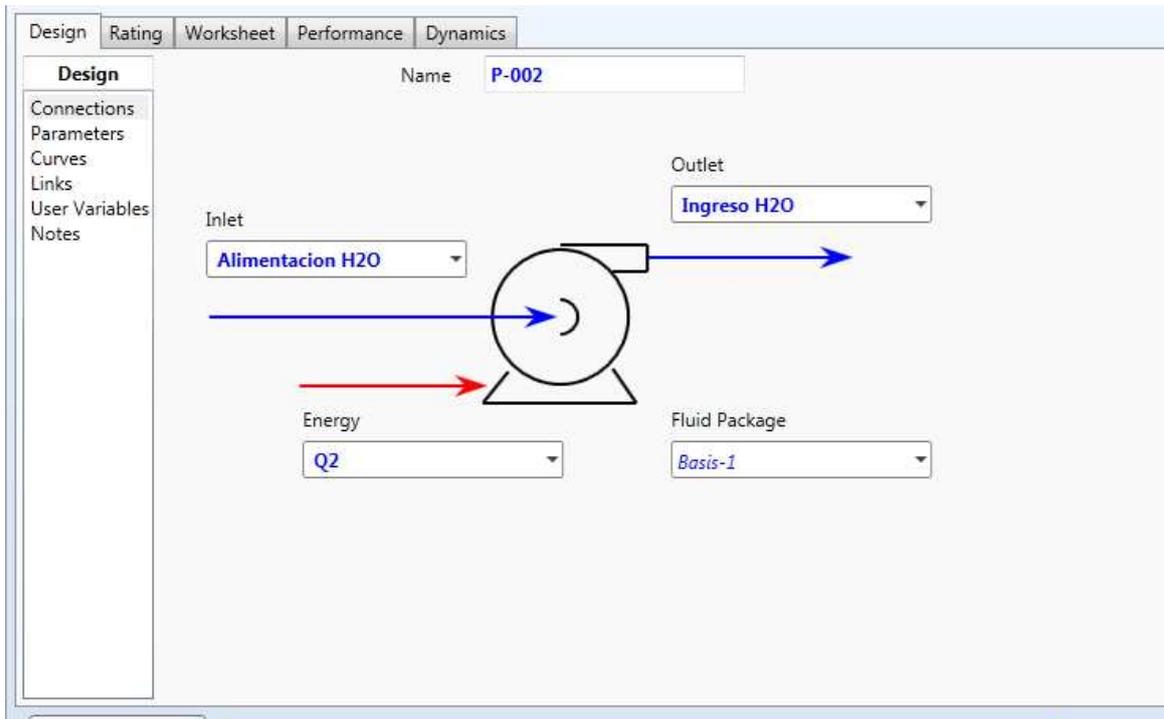


Figura N° 4.12

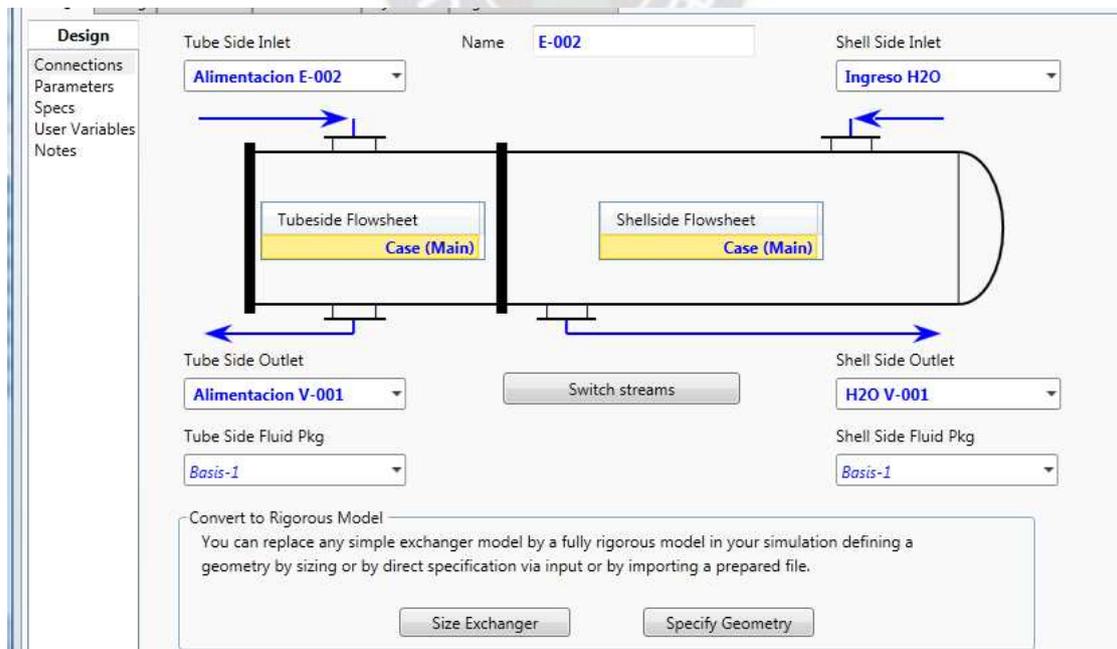
Corrientes de entrada y salida Fuente: Propia HYSYS V8.8

#### 4.12.5 Diseño de la bomba P-002



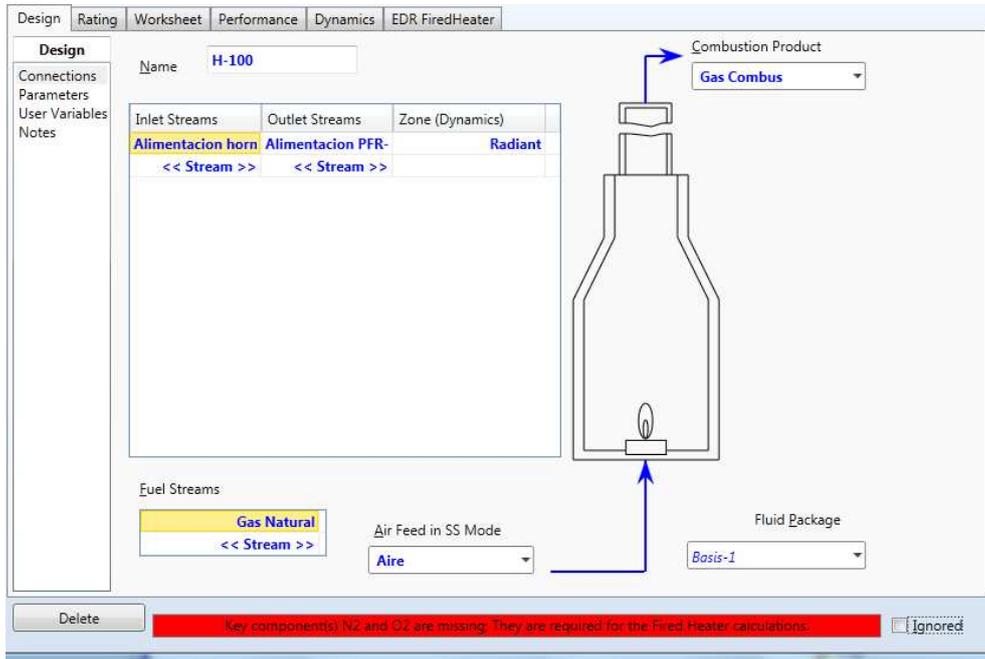
**Figura N° 4.13**  
Corrientes de entrada y salida Fuente: Propia HYSYS V8.8

#### 4.12.6 Enfriador E-002



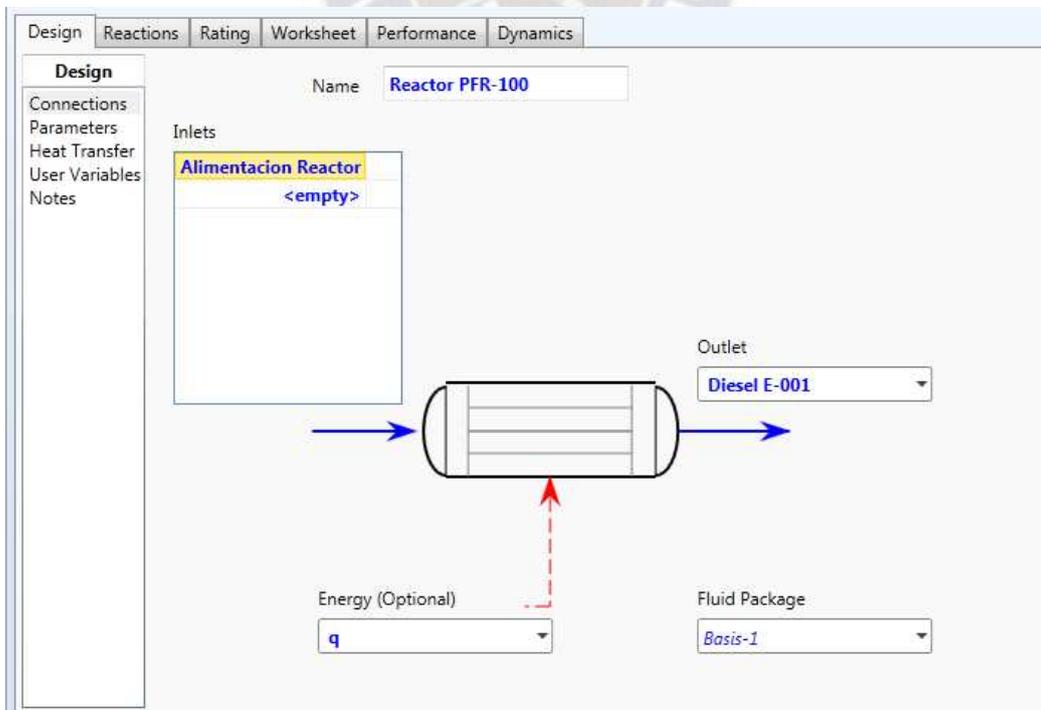
**Figura N° 4.14**  
Corrientes de entrada y salida Fuente: Propia HYSYS V8.8

#### 4.12.7 Horno H-001



**Figura N° 4.15**  
Corrientes de entrada y salida Fuente: Propia HYSYS V8.8

#### 4.12.8 Reactor



**Figura N° 4.16**  
Corrientes de entrada y salida Fuente: Propia HYSYS V8.8

# CAPITULO V

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

En este Proyecto de grado se presenta el estudio del proceso de conversión de Aceite Usado de Motor a diésel a combustible Diésel #2.

Este trabajo es llevado a cabo con muestras de aceite lubricante usado de motor de los camiones IVECO que maneja la empresa TRANSCRUZ, los cuales hacen su mantenimiento en los talleres IMCRUZ COMERCIAL S.A. ubicados en EL ALTO.

▪Al someter al aceite usado al proceso de Destilación al Vacío se obtienen tres productos: hidrocarburos livianos, que se pierden en forma de gases; hidrocarburos pesados, que es el residuo que contiene las impurezas concentradas; y un producto intermedio, que sometido a un análisis de aceite en los laboratorios de FINNING CAT para determinar el grado de limpieza que contiene el diésel obtenido y el porcentaje de azufre que se hallaba, los resultados fueron porcentaje de Azufre en la muestra de 3288 ppm y un grado de limpieza para el diésel de la ISO 22/20/16, dando la recomendación de usar un equipo de filtración de código ISO 18/16/13, se procedió a mejora la limpieza del diésel mediante un equipo de filtración que cumpla con el código ISO 14/13/11, esto para obtener un Diésel más limpio y poder disminuir el porcentaje de azufre, se volvió a mandar la muestra a los laboratorios de FINNING CAT donde nos mandó los resultado de la disminución de azufre a 2868 ppm, disminución de agua a 0,05% ppm, debido al elevado contenido de azufre en la muestra de diésel se procedió a realizar la Hidrodesulfuración y el proceso más factible fue realizar una simulación de hidrodesulfuración para el Diésel en el programa HYSYS V8.8 donde el combustible Diésel debe cumplir de 500 a 15 ppm de azufre, lo que pide la norma EURO III, lo cual nos indica que cumple con los requisitos para ser Diésel #2°.

▪Se procedió a realizar una sedimentación en un vaso de precipitado de 1000ml, el cual se sometió a un baño maría, para luego llevar la muestra de aceite usado, al equipo de filtración al vacío que se armó, esto para poder retener las partículas más grandes que se hallan en el aceite usado de motor a Diésel, las cuales fueron producto de la limpieza que proporciono el aceite de motor.

▪El proceso de la desmetalización, se conoce que el origen de los compuestos metálicos en los aceites, además de los ocasionados por la abrasión durante el funcionamiento, está en que estos, contienen aditivos para mejorar sus propiedades fisicoquímicas y que algunos de ellos son compuestos inorgánicos y organometalicos en disolución, como es el caso de los compuestos de zinc, calcio, bario, etc. Por tal motivo se determinado usar el siguiente procedimiento:

1. En un vaso de precipitado de 1000 ml se introduce una determinada cantidad de aceite usado de motor, el cual previamente se le realizo una filtración al vacío.
2. Una vez armado el equipo para la desmetalización se le agrega calor que debe estar alrededor de 80 a 90 °C, se pone en marcha la agitación, con una velocidad de 450 rpm. Conseguido esto se adiciona un reactivo Fosfato Diamónico al 4%, el cual permita realizar una precipitación y/o formación de

complejos, manteniendo el pH entre 6.5 a 11, para esto de le agrego NH<sub>3</sub> al 25%, al cabo de 15 minutos; la agitación y la temperatura debe ser constante durante el tiempo de 55 a 60 minutos.

3. Terminado el proceso de desmetalización procede a realizar un nuevo proceso de filtración al vacío.

▪La adecuación y el uso de un equipo de Destilación al Vacío, se dio debido a que la diferencia fundamental entre las unidades de Topping y Vacío es la presión de trabajo. El Topping o Destilación Atmosférica opera con presiones típicas de 1 Kg/cm<sup>2</sup> (manométrica), mientras que en el Vacío trabaja con presiones absolutas de 20 mmHg, permitiendo generar mayor temperatura en la columna a menor presión, esto nos permite aumentar el punto de ebullición del destilado y nos permite el uso de refrigerantes más baratos como ser el agua. Además, nos ayuda a disminuir el diámetro de la columna, acoples por donde circula el vapor, y que por debajo de 1 atm disminuyen las fugas y por tanto el peligro potencial de los materiales tóxicos o inflamables. También se vio prudente realizar solo dos destilaciones al vacío debió a que en cada proceso se iba perdiendo alrededor de 100 ml, que el volumen requerido para los análisis en el laboratorio debían ser mayor 150 ml, y por la alta temperatura que se obtenía en el destilado al vacío, los balones usados tendían a clisarse.

▪Analizando los datos obtenidos después de la Filtración al Vacío, la Desmetalización, el proceso de Destilación al Vacío, la utilización del código de limpieza ISO 4406, en un equipo de filtración para combustible diésel, cuyos filtros utilizan la ISO 14/13/11 y mandando la muestra a los laboratorios de FINNING CAT nos muestra el bajo contenido de agua y sedimentos, se puede concluir que una importante cantidad de aditivos y contaminantes han sido eliminados durante el proceso, lo cual indica que el proceso para la obtención de Diésel # 2° a partir de aceite usado de motor, cumple para la obtención de un Diésel # 1°, Por tal motivo se tomó la decisión de realizar mediante el programa HYSYS V8.8 la simulación del proceso de hidrodesulfuración para bajar el contenido de azufre, para que cumpla con lo requiere un combustible Diésel # 2°

▪En la fase de caracterización del producto final, se obtuvieron resultados que nos indican que antes de aplicar la Simulación del proceso de Hidrodesulfuración, se obtuvo un Diésel que cumple con la norma EURO I y Euro II, esto es favorable ya que el producto cumple con estos requisitos de combustible diésel. En base al procedimiento descrito anteriormente y aplicando la el Proceso de Hidrodesulfuración se ha logrado obtener Diésel # 2° y basándonos el grafico que contiene en manera resumida las normas EURO. Es importante observar que el producto final cumple con todos los requisitos establecidos para ser comercializado como Diésel # 2. Y norma EURO III

	ESPECIFICACIONES EURO					
	Euro I 1993	Euro II 1996	Euro III 2000	Euro IV 2005	Euro V 2009	Euro 6 2014
DIESEL						
Aromáticos, %m/m, máx.	N/A	N/A	11	11	11	8
Azufre, mg/kg, máx.	2000	500	350	50(10)*	10	10
Número de cetano, min	49	49	51	51	51	51
Densidad @ 15°C, kg/m <sup>3</sup>	820-860	820-860	845	845	845	845
Destilación, T95°C, máx.	370	370	360	360	360	360

Fuente: UNEP

Fuente: decidio-producir-diesel-euro-vi.

▪El Proceso de hidrodesulfuración depende de factores como: la naturaleza del diésel a tratar (composición y tipos de compuestos de azufre presentes), de la selectividad y actividad del tipo de catalizador, de las condiciones de reacción (presión, temperatura, relación hidrocarburo/hidrógeno), del diseño del proceso y de la cantidad de agua de lavado que ingresa al separador. La variable más influyente en el proceso de hidrodesulfuración es la presión de operación, pues afecta al catalizador y está relacionada con el consumo de hidrógeno. Mediante el balance de masa de los equipos principales: reactor, separador y del stripper, se pudo constatar la reducción de azufre contenido en el diésel (entrada →2868 ppm, salida →338 ppm).

En relación al porcentaje de azufre, corrosión y punto de ebullición, el producto obtenido supera los requerimientos mínimos necesarios, siendo de mejor calidad que el diésel comercial.

## 5.2 RECOMENDACIONES

La optimización del proceso en la primera etapa está dada por Destilación al Vacío para la obtención de un diésel # 1, para después proceder a realizar un Proceso de Hidrodesulfuración mediante la simulación del programa ASPEN HYSYS V8.8 y el paquete térmico Peng- Robinson, nos hace notar que se puede mejorar el proceso y obtener un Diésel de ultra bajo porcentaje de azufre, para el cumplimiento de normas Euro V o VI, el cual nos pide la Ley N° 165 en su artículo 191 inciso II.

Diseñar y simular una planta de hidrógeno puesto que es indispensable para llevar a cabo las reacciones de hidrodesulfuración, y así alcanzar los límites establecidos por la normativa Euro IV.

Realizar una simulación para reducir el contenido de azufre de los valores actuales y llegarlos a  $\leq 50$  ppm mediante procesos como la hidrodesulfuración ultra profunda y destilación reactiva, procesos que son muy comunes y empleados en las grandes refinерías del mundo, con resultados exitosos.

Rediseñar e innovar la ingeniería del proceso de hidrodesulfuración con el objetivo de reducir la cantidad de azufre para cumplimiento de la ley N° 165.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- <https://compralubricantes.com/blog/clasificacion-de-los-aceites-y-lubricantes-para-motor/>
- <http://www.highmotor.com/clasificacion-aceites-motores-debes-saber.html>
- Por Richard Widman (Boletín 88)
- [www.deq.uem.br/biblioteca/deq/Anais/CobeqXIII/pdf/870.pdf](http://www.deq.uem.br/biblioteca/deq/Anais/CobeqXIII/pdf/870.pdf)
  
- Ley N° 165  
Ley De 16 De agosto De 2011  
Evo Morales Ayma  
Presidente Constitucional Del Estado Plurinacional De Bolivia
- Widman International SRL contribuye a la capacitación de los ingenieros y usuarios para mejorar su competitividad. Para mayores informaciones prácticas, visite nuestra página Web: [www.widman.biz](http://www.widman.biz)
- La información de este boletín técnico es de única y completa propiedad de Widman International S.R.L. Su reproducción solo será permitida a través de una solicitud a [info@widman.biz](mailto:info@widman.biz) no permitiendo que esta altere sus características ni su totalidad.
- <https://compralubricantes.com/blog/clasificacion-de-los-aceites-y-lubricantes-para-motor/>
- Muhammad, S. R. (2013). Hydrodesulfurization of diesel oil. University of the Punjab, Lahore, Pakistán.
- S. Fogler. (2001). *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. (3ra. Ed.) Pearson Educación.
- Rodríguez, J. Edwin, et al., Simulación y Diseño de una Unidad Hidrodesulfuradora (HDS) de Nafta en el Proceso de Refinación de Petróleo.
- [www.deq.uem.br/biblioteca/deq/Anais/CobeqXIII/pdf/870.pdf](http://www.deq.uem.br/biblioteca/deq/Anais/CobeqXIII/pdf/870.pdf)
- <https://usmpetrolero.wordpress.com/>

## 7 ANEXOS

### 7.1 ANEXO A

#### Densidad del agua líquida entre 0 °C y 100 °C

Presión externa: 1 atm = 101 325 Pa

Temperatura Densidad Temperatura Densidad Temperatura Densidad

°C	kg / m3	°C	kg / m3	°C	kg/ m3
0 (hielo)	917,00	33	994,76	67	979,34
0	999,82	34	994,43	68	978,78
1	999,89	35	994,08	69	978,21
2	999,94	36	993,73	70	977,63
3	999,98	37	993,37	71	977,05
4	1000,00	38	993,00	72	976,47
5	1000,00	39	992,63	73	975,88
6	999,99	40	992,25	74	975,28
7	999,96	41	991,86	75	974,68
8	999,91	42	991,46	76	974,08
9	999,85	43	991,05	77	973,46
10	999,77	44	990,64	78	972,85
11	999,68	45	990,22	79	972,23
12	999,58	46	989,80	80	971,60
13	999,46	47	989,36	81	970,97
14	999,33	48	988,92	82	970,33
15	999,19	49	988,47	83	969,69
16	999,03	50	988,02	84	969,04
17	998,86	51	987,56	85	968,39
18	998,68	52	987,09	86	967,73
19	998,49	53	986,62	87	967,07
20	998,29	54	986,14	88	966,41
21	998,08	55	985,65	89	965,74
22	997,86	56	985,16	90	965,06
23	997,62	57	984,66	91	964,38
24	997,38	58	984,16	92	963,70
25	997,13	59	983,64	93	963,01
26	996,86	60	983,13	94	962,31
27	996,59	61	982,60	95	961,62
28	996,31	62	982,07	96	960,91
29	996,02	63	981,54	97	960,20
30	995,71	64	981,00	98	959,49
31	995,41	65	980,45	99	958,78
32	995,09	66	979,90	100	958,05

## 7.2 ANEXO B

### LA MUESTRA DE LA DESTILACION AL VACIO SE MANDA AL LABORATORIO DE FINNING CAT PARA VERIFICAR SI CUMPLE CON LOS PARAMETROS ESTABLECIDOS PARA EL DIESEL N°2

FINNING CAT		FINNING BOLIVIA S.A. - Analisis de Fluidos, Km.3,5 Carretera Norte, P.O. Box 2369, Santa Cruz, Bolivia. Bolivia FONNO: 591-2-2810071 Email: omar.ruiz@finning.com.bo Web: www.finningsudamerica.com/bolivia/																									
INFORMACIÓN DE CONTACTO			INFORMACIÓN DEL EQUIPO										INFORMACIÓN DE MUESTRA														
IMCRUZ			NÚMERO DE EQUIPO : DIESEL_DVACIO NÚMERO DE SERIE : DIESEL_DVACIO MODELO : FUEL_OTHER MARCA : OTHER CLIENTE : IMCRUZ LUGAR DE TRABAJO : LA PAZ AREA: REGION:										COMPONENTE : DIESEL_DEST_VACIO SERIE COMPONENTE : FABRICANTE DEL COMP. : NÚMERO DE ETIQUETA:1 N° ORDEN DE TRABAJO: TIPO DE MUESTRA : FUEL ENVÍO DE MUESTRAS (días): 2 SAMPLE LOCATION :														
FONO: FAX: Email: OMAR.RUIZ@FINNING.COM			Interp By: Omar Ruiz																								
Sin Comentarios			AZUFRE EN COMBUSTIBLE 3288ppm. LA VISCOSIDAD EN LIMITE PERMITIDO AL IGUAL LA DENSIDAD API, AGUA MENOR AL 0.1%. GRADO DE LIMPIEZA ISO 22/20/16 ELEVADO SE RECOMIENDA PARA ESTE TIPO DE COMBUSTIBLES ISO 18/16/13.																								
LAB # R180-47354-0163																											
HISTORICAL SAMPLE INFORMATION - METALS																											
TOMA DE MUESTRA	IDENT. MUESTRA	HORAS (HR)	HORAS ACEITE	CAMBIO FILTRO	Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	Mo	Ni	Ag	Ti	V	Mn	S	Ca	P	Zn	Mg	Ba	B	
18-Dic-17	R180-47354-0163	0	0		0	0	0	0	0	0	143	0	0	0	0	0	0	0	0	3288	0	0	2	0	0	0	8
FUEL PROPERTIES - FUEL PHYSICALS																											
TOMA DE MUESTRA	IDENT. MUESTRA	API Gravity	V40																								
18-Dic-17	R180-47354-0163	42.0	2.0																								
FUEL CLEANLINESS - CONTAMINATION																											
TOMA DE MUESTRA	IDENT. MUESTRA	ISO	PQI	4µ	6µ	14µ	50µ	H2O																			
18-Dic-17	R180-47354-0163	22/20/16	5	22882	8259	616	19	<0.100																			

Ag = Plata, Al = Aluminio, B = Boro, Ba = Bario, Ca = Calcio, Cr = Cromo, Cu = Cobre, Fe = Hierro, H2O = Karl Fisher, ISO = Nivel de limpieza, K = Potasio, Mg = Magnesio, Mn = Manganeso, Mo = Molibdeno, Na = Sodio, Ni = Niquel, P = Fósforo, PQI = Índice de Quantificador de Partículas, Pb = Plomo, Si = Silicio, Sn = Estano, Ti = Titanio, V = Vanadio, V40 = Viscosidad a 40°C, Zn = Zinc

Nota: El propósito de esta rutina es únicamente para detectar anomalías. No debe entenderse como garantía expresa o implícita de que no ocurrirá falla del equipo o alguno de sus componentes.

## MUESTRA MANDADA AL LABORATORIO DE FINNING CAT DESPUES DEL USO DE LA ISO 14/13/11

		FINNING BOLIVIA S.A. - Análisis de Fluidos, Km 3.5 Carretera Norte, P.O. Box 2369, Santa Cruz, Bolivia. Bolivia FONO: 591-2-2810071 Email: <a href="mailto:omar.ruiz@finning.com.bo">omar.ruiz@finning.com.bo</a> Web: <a href="http://www.finningsudamerica.com/bolivia/">www.finningsudamerica.com/bolivia/</a>																									
		<b>INFORMACIÓN DE CONTACTO</b>  IMCRUZ  FONO: FAX: Email: <a href="mailto:OMAR.RUIZ@FINNING.COM">OMAR.RUIZ@FINNING.COM</a>						<b>INFORMACIÓN DEL EQUIPO</b>  NÚMERO DE EQUIPO : DIESEL_DVACIO NÚMERO DE SERIE : DIESEL_DVACIO  MODELO : FUEL_OTHER MARCA : OTHER CLIENTE : IMCRUZ LUGAR DE TRABAJO : LA PAZ AREA: REGION:						<b>INFORMACIÓN DE MUESTRA</b>  COMPONENTE : DIESEL_DEST_VACIO SERIE COMPONENTE : FABRICANTE DEL COMP. : NÚMERO DE ETIQUETA : 1 N° ORDEN DE TRABAJO: TIPO DE MUESTRA : FUEL ENVÍO DE MUESTRAS (dias): 2 SAMPLE LOCATION :													
Intep by: Omar Ruiz		Sin Comentarios <b>AZUFRE EN COMBUSTIBLE 2868ppm.</b> LA VISCOSIDAD EN LIMITE PERMITIDO AL IGUAL LA DENSIDAD API. AGUA MENOR AL 0.05%. GRADO DE LIMPIEZA RECOMENDADO PARA ESTE TIPO DE COMBUSTIBLES ISO <b>18/16/13.</b>																									
LAB # R180-47354-0186		<b>HISTORICAL SAMPLE INFORMATION - METALS</b>																									
TOMA DE MUESTRA	IDENT. MUESTRA	HORAS (HR)	HORAS ACEITE	CAMBIO FILTRO	Ca	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	Mn	Ni	Ag	Ti	V	Mn	S	Ca	P	Zn	Mg	Ba	B	
16-Feb-18	R180-47354-0186	0	0		0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	2868	0	0	1	0	0	8	
<b>FUEL PROPERTIES - FUEL PHYSICALS</b>																											
TOMA DE MUESTRA	IDENT. MUESTRA	API Gravity	V40																								
16-Feb-18	R180-47354-0163	22.0	1.0																								
<b>FUEL CLEANLINESS - CONTAMINATION</b>																											
TOMA DE MUESTRA	IDENT. MUESTRA	ISO	PQE	4µ	6µ	14µ	30µ	H2O																			
16-Feb-18	R180-47354-0186	18/16/13	3	1682	401	73	19	<0.05																			

Ag = Plata, Al = Aluminio, B = Boro, Ba = Bario, Ca = Calcio, Cr = Cromo, Cu = Cobre, Fe = Hierro, H2O = Kef. Fosfo, ISO = Nivel de limpieza, K = Potasio, Mg = Magnesio, Mn = Manganeso, Mo = Molibdeno, Na = Sodio, Ni = Niquel, P = Fósforo, PQE = Índice de Quantificador de Particula, Pb = Plomo, Si = Silicio, Sn = Estaño, Ti = Titanio, V = Vanadio, V40 = Viscosidad@40C, Zn = Zinc

Nota: El propósito de este análisis es únicamente para detectar desgastes mecánicos. No debe entenderse como garantía expresa o implícita de que no ocurra una falla del equipo o alguno de sus componentes.

### 7.3 ANEXO C

#### CALCULOS PARA LA DESMETALIZACION

A través de la siguiente formula se obtendrá la densidad del aceite usado ( $\rho_1$ )

$$\rho_1 = \left( \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \right) \times \rho_{H_2O d} \quad (1)$$

Datos obtenidos por el Picnómetro

$$V_{pic.vacio} = 10ml$$

$$m_{pic.vacio} = 11.603 g$$

$$m_{pic. agua} = 21.769 g$$

$$m_{pic. aceite} = 20.576 g$$

$$t_{amb} = 22.2 ^\circ C$$

Por tablas en el anexo A se determinó la densidad del Agua destilada

$$\rho_{H_2O d.} = 0.99786 g/ml$$

$$Temp = 22^\circ C$$

Reemplazamos los datos obtenidos del Picnómetro en la ecuación (1) para determinar la densidad de aceite usado  $\rho_1$

$$m_2 = \text{aceite usado}$$

$$m_1 = H_2O \text{ destilada}$$

$$m_0 = \text{pictometro vacio}$$

$$\rho_1 = \left( \frac{20.576g - 11.603g}{21.769g - 11.603g} \right) \times 0.99786 g/cm^3$$

Resultado obtenido  $\rho_1$

$$\rho_1 = 0.88075 g/cm^3$$

Determinación de la masa del aceite usado para un volumen de 400 ml

$$m_{aceite(solvente)} = \rho_1 \times V_1$$

$$m_{aceite(solvente)} = 0.88075 g/cm^3 \times 500cm^3$$

$$m_{aceite(solvente)} = 352.3 g$$

Determinación del porcentaje en peso de fosfato diamónico al 4%

di-ammoniumhydrogenphosphat  $(NH_4)_2HPO_4$

$m_{soluta}$  = masa del fosfato diamónico

$m_{solvente}$  = masa del aceite

$$\%_{\text{peso}} = m_{\text{soluta}} / m_{\text{solucion}} \times 100$$

$$m_{\text{soluta}} + m_{\text{solvente}} = m_{\text{solucion}}$$

$$\%4 = \left( \frac{m_{\text{soluta}}}{(m_{\text{soluta}} + m_{\text{solvente}})} \right) \times 100$$

$$\%4 = \left( \frac{m_{\text{soluta}}}{(m_{\text{soluta}} + 352.3)} \right) \times 100$$

$$(4 \times m_{\text{soluta}}) + (4 \times 352.3) = (100 \times m_{\text{soluta}})$$

$$m_{\text{soluta}} = 14.679 \text{ g } (NH_4)_2HPO_4$$

### Descripción la segunda desmetalización

En un vaso de precipitado de 1000ml se agrega los 400ml de aceite usado, más **14.679 g  $(NH_4)_2HPO_4$**  en un agitador y calentador con los siguientes datos:

- Temperatura de 80 a 90°C
- Agitación a 450 rpm el cual se midió con un tacómetro
- Tiempo de 55 min
- Agregar 3 ml de  $NH_3$  al 25% al cabo de 15 min
- Verificar que el PH  $\geq 9$  con un PH –metro

El Volumen obtenido después del filtrado es de **V=389 ml** de aceite desmetalizado

### CALCULOS PARA LA 1° DESTILACIÓN SIMPLE AL VACÍO

A través de la siguiente formula se obtendrá la densidad del aceite usado ( $\rho_1$ ) después de la desmetalización

$$\rho_1 = \left( \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \right) \times \rho_{H_2O} \quad (2)$$

### Datos obtenidos por el Picnómetro

$$V_{\text{pic.vacio}} = 10 \text{ ml}$$

$$m_{\text{pic.vacio}} = 11.5736 \text{ g}$$

$$m_{\text{pic. agua}} = 21.7825 \text{ g}$$

$$m_{pic. \text{ aceite}} = 20.5648g$$

$$t_{amb} = 18.7^\circ C$$

Por tablas en el anexo A se determinó la densidad del Agua destilada

$$\rho_{H_2O d.} = 0.99858 \text{ g/ml}$$

$$Temp = 18.7^\circ C$$

Reemplazamos los datos obtenidos del Picnómetro en la ecuación (2) para determinar la densidad de aceite usado  $\rho_1$

$$m_2 = \text{aceite usado}$$

$$m_1 = H_2O \text{ destilada}$$

$$m_0 = \text{pictometro vacio}$$

$$\rho_1 = \left( \frac{20.5648g - 11.5736g}{21.7826g - 11.5736g} \right) \times 0.99858 \text{ g/cm}^3$$

Resultado obtenido  $\rho_1$  para la 1° destilación al vacío

$$\rho_1 = 0.8794 \text{ g/cm}^3$$

Determinación de la masa del aceite usado para un volumen de 389 ml

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = \rho_1 \times V_1$$

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = 0.8794 \text{ g/cm}^3 \times 389 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = 342.08 \text{ g}$$

Determinación del porcentaje en peso de Hidróxido de Sodio NaOH al 3% en peso

$masa_{soluta}$  = masa del Hidróxido de Sodio

$masa_{solvente}$  = masa del aceite

$$\% \text{ peso} = m_{soluta} / m_{solucion} \times 100$$

$$m_{soluta} + m_{solvente} = m_{solucion}$$

$$\%3 = \left( \frac{m_{soluta}}{(m_{soluta} + m_{solvente})} \right) \times 100$$

$$\%3 = \left( \frac{m_{\text{soluto}}}{(m_{\text{soluto}} + 342.08)} \right) \times 100$$

$$(3 \times m_{\text{soluto}}) + (3 \times 342.08) = (100 \times m_{\text{soluto}})$$

$$m_{\text{soluto}} = 10.579 \text{ NaOH}$$

Terminado el proceso de filtración al vacío de la 1° destilación se obtiene un Volumen de 284 ml

### CALCULOS PARA LA 2° DESTILACIÓN SIMPLE AL VACÍO

A través de la siguiente formula se obtendrá la densidad del aceite usado ( $\rho_1$ ) después de la desmetalización

$$\rho_1 = \left( \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \right) \times \rho_{H_2O d} \quad (3)$$

#### Datos obtenidos por el Picnómetro

$$V_{\text{pic.vacio}} = 10 \text{ ml}$$

$$m_{\text{pic.vacio}} = 11.5734 \text{ g}$$

$$m_{\text{pic. agua}} = 21.7809 \text{ g}$$

$$m_{\text{pic. aceite}} = 20.4179 \text{ g}$$

$$t_{\text{amb}} = 22^\circ \text{C}$$

Por tablas en el anexo A se determinó la densidad del Agua destilada

$$\rho_{H_2O d.} = 0.99786 \text{ g/ml}$$

$$Temp = 22^\circ \text{C}$$

Reemplazamos los datos obtenidos del Picnómetro en la ecuación (3) para determinar la densidad de aceite usado  $\rho_1$

$$m_2 = \text{aceite usado}$$

$$m_1 = H_2O \text{ destilada}$$

$$m_0 = \text{pictometro vacio}$$

$$\rho_1 = \left( \frac{20.4179 \text{ g} - 11.5734 \text{ g}}{21.7809 \text{ g} - 11.5734 \text{ g}} \right) \times 0.99786 \text{ g/cm}^3$$

Resultado obtenido  $\rho_1$  para la 2° destilación al vacío

$$\rho_1 = 0.8646 \text{ g/cm}^3$$

Determinación de la masa del aceite usado para un volumen de 284 ml

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = \rho_1 \times V_1$$

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = 0.8794 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 284 \text{cm}^3$$

$$m_{\text{aceite(solvente)}} = 249.75 \text{ g}$$

Determinación del porcentaje en peso de Hidróxido de Sodio NaOH al 3% en peso

$m_{\text{asa}_{\text{soluto}}}$  = masa del Hidróxido de Sodio

$m_{\text{asa}_{\text{solvente}}}$  = masa del aceite

$$\%_{\text{peso}} = m_{\text{soluto}} / m_{\text{solucion}} \times 100$$

$$m_{\text{soluto}} + m_{\text{solvente}} = m_{\text{solucion}}$$

$$\%3 = \left( \frac{m_{\text{soluto}}}{(m_{\text{soluto}} + m_{\text{solvente}})} \right) \times 100$$

$$\%3 = \left( \frac{m_{\text{soluto}}}{(m_{\text{soluto}} + 249.75)} \right) \times 100$$

$$(3 \times m_{\text{soluto}}) + (3 \times 249.75) = (100 \times m_{\text{soluto}})$$

$$m_{\text{soluto}} = 7.724 \text{ NaOH}$$

## 7.4 ANEXO D



### Re: Aseguramiento de Rendimiento de Producto

Estimado Cliente,

Como es de su conocimiento, el proceso de lubricación tiene como etapa inicial la Selección de Lubricante, la cual puede estar fundamentada o respaldada por la recomendación del respectivo fabricante del equipo o componente, por prácticas de mantenimiento y cumplimiento de especificaciones técnicas según el entorno operacional respectivo.

En ese sentido, la API, American Petroleum Institute indica en su respectiva guía de aceites para motores a diésel un criterio fundamental para la selección de lubricante: El contenido de azufre en el combustible.

En el concepto de entorno operacional, la calidad del combustible juega un papel determinante en la selección de lubricante, más potente inclusive que la misma recomendación del fabricante. En Bolivia, los tenores de Azufre varían entre 1,500.00 hasta 3,000.00 partes por millón, ppm (es decir entre 0.15% y 0.3% en peso). La categoría API CJ-4 y CK-4 exigen claramente el uso de combustibles con niveles de Azufre hasta 500.00 ppm (0.05% en peso), sin embargo con solo exceder las 15.00 ppm, o 0.0015% en peso ya se advierte una durabilidad limitada y afectación al sistema de post tratamiento de gases de escape del motor.

Por otra parte la categoría API CI-4 habla de un rango de hasta 5,000.00 ppm o 0.5% en peso de contenido de azufre, lo cual hace que esta categoría sea la idónea para motores diésel en Bolivia (entre 1,500.00 a 3,000.00 ppm de azufre).

CI-4	<b>Vigente</b>	Se comenzó a utilizar en el año 2002. Para motores diésel de alta velocidad con ciclos de cuatro tiempos, diseñados para cumplir con las normas de emisiones de gases de escape del año 2004 implementadas en el año 2002. Los aceites CI-4 están formulados para mantener la durabilidad del motor cuando se emplean sistemas de recirculación de gases de escape, y están diseñados para ser utilizados con combustibles diésel con un contenido en azufre de hasta 0.5 % en peso. Puede utilizarse en lugar de aceites CD, CE, CF-4, CG-4, y CH-4. Algunos aceites CI-4 también pueden calificarse como CI-4 PLUS.
------	----------------	---

Por lo tanto se recomienda el uso de los aceites Shell Rimula R4 X SAE 15W-40 (API CI-4) **Aceites tipo API CJ-4 o CK-4 NO APLICAN PARA UTILIZARSE CON EL DIESEL LOCAL.**

Atentamente,

**José Luis Montaña Sánchez**

*Imcruz Parts / Jefe de Ventas Shell & Soparte Técnico [B2B]*

Imcruz Comercial S.A.

Tel: +591 3 3366000 Int. 3749

Cel: +591 76710991

Carretera al Norte, Km 12

Santa Cruz - Bolivia