



**UNIVERSIDAD DE MATANZAS
FACULTAD DE CIENCIAS TECNICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA**

Evaluación del Impacto en la producción de Turbo combustible Jet A-1 con la introducción de Crudo Nacional en la Refinería Camilo Cienfuegos.

Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Tecnologías de refinación de petróleo

Autor: Ing. Yasnely Gell Piedra

Tutor: Dr. C. Jesús Luis Orozco

Esp. Naudis Garcia Navarro

Matanzas

2015



**UNIVERSIDAD DE MATANZAS
FACULTAD DE CIENCIAS TECNICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E
INGENIERÍA QUÍMICA**



**CENTRO POLITÉCNICO DEL
PETRÓLEO
SEDE: CIENFUEGOS**

Evaluación del Impacto en la producción de Turbo combustible Jet A-1 con la introducción de Crudo Nacional en la Refinería Camilo Cienfuegos.

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Tecnologías
de refinación de petróleo**

Autor: Yasnely Gell Piedra

Tutor: Dr. C. Jesús Luis Orozco

Esp. Naudis Garcia Navarro

Matanzas

2015

Pensamiento:

“ ... Cuando la sabiduría entre en tu corazón y el conocimiento sea agradable a tu alma, te guardará la sana iniciativa, y te preservará el entendimiento ... ”

Proverbios 2:10

Nota de aceptación

Presidente del Tribunal

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Calificación

Ciudad, fecha

Declaración de autoridad

Yo, Yasnely Gell Piedra me declaro como único autor de este trabajo realizado en la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, como requisito parcial para optar por el Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Tecnologías de refinación de petróleo y autorizo que el mismo sea utilizado como material de consulta. Para que así conste, debajo firma:

Nombre y Apellidos. Firma

Dedicatoria

Dedico este trabajo especialmente a mí querida madre por su apoyo incondicional y por brindarme todo su amor.

A mis hijos, por ser la fuente de inspiración en cada paso de mi vida.

A mi esposo por darnos amor, confianza y seguridad.

A mi padre por brindarme siempre todo su cariño.

A la Revolución Cubana por darme la oportunidad de desarrollarme intelectualmente.

A todos los que sinceramente, me han querido y me han brindado todo su apoyo dedicación y confianza.

Agradecimientos

Agradezco a mi amado Dios por compartir conmigo su sabiduría, su amor y llenarme de sus bendiciones.

A mis padres: Por su cariño y amor incondicional, quienes han contribuido a la realización de mis grandes sueños.

A mi esposo por su comprensión y apoyo.

A mi querida amiga Mayelin Gutiérrez Brunet: por su apoyo incondicional.

A todos mis compañeros de la Dirección de Arranque: por su cariño y ayuda.

A mi querida Lucy Cepero: por brindarme las herramientas para este trabajo.

A mis tutores: Naudis y Orozco por tenerme paciencia y brindarme su tiempo y conocimientos.

A todo el personal de la empresa que me ayudó en la realización de este trabajo final de la especialidad por su valiosa ayuda y cooperación en todo momento.

A todas las personas a las que les estoy profundamente agradecida: Familiares, amigos, compañeros, profesores y conocidos.

A todos mil gracias.....

RESUMEN

El presente trabajo tiene como título “Evaluación del impacto en la producción de Jet A-1 con la introducción de Crudo Nacional en la Refinería Camilo Cienfuegos involucrando las áreas de la Planta de Proceso y la Dirección de Refinación de Cuvenpetrol SA cuyo objetivo es realizar un estudio técnico – económico que defina el impacto que provoca en la producción de Jet A-1 la introducción de Crudo Nacional Cubano en la dieta de inyectos a la Destilación, con vistas a disminuir las pérdidas actuales mejorando la rentabilidad de la Refinería manteniendo la calidad de los productos. A consecuencia del esquema de diseño de la refinería este trae consigo pérdidas inherentes al no extraer al máximo los rendimientos de los derivados que mejoran la rentabilidad de la empresa, continuamente se realizan estudios costo beneficios y este trabajo aporta detalles que favorecen la toma de decisiones para resolver el problema en cuestión, se realizaron diferentes corridas de Aspen PIMS, se analizaron los datos en cuanto a especificaciones de calidad de los fracciones de la destilación y se realizó un análisis de mercado donde se obtuvo como resultado que la propuesta que se expone en este trabajo la producción de Jet A-1 es degradada a Diesel llevando un margen de refino de 473 352 \$/d y al reactivar la Unidad de hidrotatamiento trae consigo un margen de refino de 483 601 \$/d y un incremento en las ventas de productos finales de 10 248 \$/d.

ABSTRACT

The research presented is entitled "Evaluation of the impact in the Jet A-1 production using Native Crude developed in the "Camilo Cienfuegos" Oil Refinery" involving the Process Area and a Refining Manager in Cuvenpetrol SA which the main objective is to realize a technical and economical study for reduce the immediate losses to improve the rentability of the Refinery keeping the quality of the products. The present refining scene involve their owns losses but the Refinery technical team always working to reduce it and realizing all kind of the technical and economical studies and this job is one of them to showing the details to performance and taking the choice to solve them. Were used the Aspens PIMS results, working with the lab analysis results of the distillation fraction, made the market analysis where the Jet fuel without treatment is degraded to Diesel showing the Gross Margin is 473 352 \$/d and when the Hydrotrated Unit is working the Gross Margin increase to 483 601 \$/d and the final products sales increase to 10 248 \$/d.

TABLA DE CONTENIDOS.

Introducción	.....	1
Capítulo 1	Análisis Bibliográfico.....	5
1.1	Breve reseña sobre la historia del petróleo.....	5
1.1.1	Clasificación de las distintas clases de petróleo.....	6
1.1.2	Caracterización básica.....	9
1.1.3	Crudos Cubanos.....	11
1.1.3.1	Especificaciones de calidad del crudo.....	12
1.2	Procesos de refinación.....	13
1.3	Esquemas de refino.....	18
1.4	Características del Turbo Combustible Jet A-1.....	20
1.4.1	Principales parámetros de calidad del Turbocombustible Jet A-1	21
1.4.2	Métodos para mejorar la calidad del turbo combustible Jet A-1....	23
1.4.3	Comparación entre los métodos utilizados para mejorar la calidad del turbo combustible.....	25
1.5	Programación lineal en los procesos petroquímicos.....	26
1.5.1	LINDO.....	27
1.5.2	SOLVER	28
1.5.3	Sistema Aspen PIMS (<i>Process Industry Modeling System</i>).....	29
1.6	Conclusiones parciales del análisis bibliográfico.....	32
Capítulo 2	Diseño Metodológico.....	33
2.1	Introducción.....	33
2.2	Descripción del proceso tecnológico de la Sección 100.....	34
2.2.1	Desalación eléctrica.....	35
2.2.2	Destilación atmosférica.....	36
2.2.2.1	Caracterización de la destilación atmosférica de la T-102...	37
2.3	Caracterización de la materia prima y productos finales.....	39
2.4	Metodología para la evaluación del esquema de refinación...	42
2.4.1	Pasos a seguir para la evaluación con el Aspen PIMS.....	43
2.5	Metodología para el análisis de mercado y las ventas de productos derivados del petróleo.....	56
2.6	Validación del modelo.....	57
Capítulo 3	Resultados y discusión.....	58
3.1	Resultados del análisis de mercado.....	58
3.2	Resultados del análisis de las ventas.....	62
3.3	Resultados de la validación del modelo.....	64
Conclusiones	.....	67
Recomendaciones.	.....	68
Bibliografía	.....	69
Anexos	.....	71

INTRODUCCION

La Refinería de Petróleo "Camilo Cienfuegos", ubicada al norte de la bahía de Cienfuegos, es una de las grandes inversiones que se iniciaron en la década del 80 con la colaboración de la desaparecida Unión Soviética. Esta planta consta de una tecnología diseñada para el procesamiento del petróleo crudo tipo Romashkino según un esquema de refinación *Hydroskimming* donde aproximadamente el 50 por ciento del crudo procesado o refinado lo constituye el Fuel Oil, producto de bajo valor comercial.

Luego de los acuerdos alcanzados mediante la Alternativa Bolivariana para las Américas (ALBA) de integración latinoamericana se decide la reactivación de la refinería, prevista en dos fases: la primera, poner en explotación algunas de las unidades existentes, una segunda fase encaminada a la profundización de la conversión y su rentabilidad económica.

Continuamente se han realizado estudios para mejorar la rentabilidad de la empresa que contribuyan a disminuir las pérdidas que dicho esquema trae implícito al no extraer la mayor cantidad de derivados de alto valor comercial como el Jet A-1 y otros destilados que se quedan en el residuo atmosférico para lo cual se requiere de otros procesos más complejos y costosos.

La calidad del Jet A-1, tradicionalmente, se garantizaba en etapas tan iniciales como la cuidadosa selección de los crudos refinados, donde una composición mayoritaria de parafinas, isoparafinas y naftenos aseguraba una alta calidad y altos rendimientos sin necesidad de aplicar procesos secundarios hidrogenativos a un alto costo energético, además de la necesidad de, en ocasiones, tener que emplear aditivos para garantizar la estabilidad térmica del producto e incluso sus propiedades de lubricidad.

Sin embargo, la disponibilidad de este tipo de crudos es cada día menor y la demanda de los combustibles para turbinas de aviación es cada día mayor, así como las exigencias de la industria aeronáutica, tratando de garantizar una mayor autonomía de vuelo de las aeronaves, un mayor empuje en el despegue y mayores velocidades durante el vuelo.

Por lo que se hace necesario identificar otras fuentes de materia prima como los crudos pesados y extrapesados de menor costo. En el país anteriormente los laboratorios del Centro de Investigaciones del Petróleo en la Habana, los laboratorios de las refinerías de La Habana y Santiago de Cuba y, en colaboración con PDVSA, los laboratorios de INTEVEP, realizaron un estudio con el Crudo Nacional Cubano (CNC) del cual se llegó a la conclusión que para obtener destilados

medios y Jet A-1 cumpliendo la especificaciones de calidad para la comercialización de los mismos solo se puede utilizar en la Dieta a procesar en la Destilación atmosférica hasta el 20 % de Crudo. (Cavado et al, 2004)

Preliminarmente se conoce que es necesario que la inclusión de CNC trae implícito posibles cambios tecnológicos como son:

Reactivación de un Hidrofinador para garantizar la calidad del combustible de aviación.

Metales de torres de destilación, tambores, tubos de hornos y condensadores en la unidad de Destilación Atmosférica.

Bombas de carga y de fondo atmosférico.

Incorporación de un reactor adicional en el Hidrofinador de nafta.

Construcción y/o adaptación de líneas tecnológicas, facilidades de almacenamiento y estaciones de bombas para el manejo del crudo nacional.

Analizando detalladamente las condiciones actuales el personal técnico persiste en la búsqueda de posibles soluciones técnicas que ayuden a resolver el problema de la rentabilidad de la instalación por lo que se decide realizar un estudio que nos permita resolver el siguiente

PROBLEMA DE INVESTIGACION:

¿Cómo influye la introducción de CNC en la producción de Turbo combustible Jet A-1?

Como criterio de solución de este problema se propone la siguiente **HIPÓTESIS:**

Si se evalúa el esquema actual de Refinación se podrá determinar la posibilidad de obtener Jet A-1 a partir de la incorporación del CNC, en la materia prima a procesar en la Refinería Camilo Cienfuegos.

Para darle solución a la misma, se define como **OBJETIVO GENERAL** de este trabajo: Realizar una evaluación económica del esquema de refinación a partir de la utilización del CNC en la materia prima, verificando su influencia en la producción de Jet A-1.

Objetivos específicos:

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre los esquemas de refinación, la destilación atmosférica, herramientas matemáticas de programación lineal y la aplicación del Software Aspen PIMS para la toma de decisiones en cuanto a modificaciones en el proceso.
2. Caracterizar la materia prima, la fracción 120 – 230⁰C y el Jet A-1.
3. Realizar un análisis de Mercado. Análisis económico de las ventas de los productos derivados obtenidos para cada esquema
4. Comparar los resultados de la evaluación de los modelos propuestos

El trabajo está estructurado en tres capítulos:

Capítulo I. Análisis Bibliográfico.

En este capítulo se realiza una breve reseña sobre la historia del petróleo, se clasifican las distintas clases de petróleo y su caracterización básica, se mencionan las características del CNC así como sus especificaciones de calidad. Se hace un resumen de los diferentes procesos y esquemas de refinación, se describen las generalidades del proceso básico de destilación atmosférica, se caracteriza el Turbocombustible y se describen los principales parámetros de calidad, los métodos para mejorar la misma, además se trata de manera general lo relacionado a la programación lineal y el Software Aspen PIMS.

Capítulo II. Diseño metodológico.

En este capítulo se hace una descripción del proceso tecnológico de la Sección 100, se aplica Microsoft Excel para el procesamiento de los datos y realizar una análisis del comportamiento de la tendencia de la demanda de Jet A-1, se caracteriza además la materia prima y los productos finales para cada esquema propuesto, se explica la metodología utilizada para la evaluación del esquema de refino y los pasos a seguir para la evaluación con el software Aspen PIMS.

Capítulo III. Resultados y discusión.

En este capítulo se discuten los resultados del análisis de mercado donde se explica el comportamiento de la demanda de Jet A-1 en el mercado interno en el periodo 2007-2016, se realiza un análisis de la validación del modelo, así como el análisis de las ventas de productos para cada caso y se comparan los resultados del margen de refino entre los casos propuestos para este estudio.

Capítulo 1: Análisis Bibliográfico.

En este capítulo se realiza una breve reseña sobre la historia del petróleo, se clasifican las distintas clases de petróleo y su caracterización básica, se mencionan las características del CNC así como sus especificaciones de calidad. Se hace un resumen de los diferentes procesos y esquemas de refinación, se describen las generalidades del proceso básico de destilación atmosférica, la destilación atmosférica en el refinado de un crudo, los parámetros termodinámicos de la destilación atmosférica así como los diferentes tipos de torres y sus características. Se caracteriza el Turbocombustible y se describen los principales parámetros de calidad, los métodos para mejorar la misma, además se trata de manera general lo relacionado a la programación lineal y el Software Aspen PIMS.

1.1 Breve reseña sobre la historia del petróleo.

El petróleo es una mezcla homogénea de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua. También es conocido como petróleo crudo o simplemente crudo. La palabra petróleo viene de los Romanos *PETRAOLEUS* “aceite de las rocas”, “*petra*” significa roca, “*oleus*” es Aceite en latín.

Es de origen fósil, fruto de la transformación de materia orgánica procedente de zooplancton y algas que depositados en grandes cantidades en fondos anóxicos de mares o zonas lacustres del pasado geológico, fueron posteriormente enterrados bajo pesadas capas de sedimentos. Se originaron a partir de restos de plantas y microorganismos enterrados por millones de años y sujetos a distintos procesos físicos y químicos. La transformación química (craqueo natural) debida al calor y a la presión durante la diagénesis produce, en sucesivas etapas, desde betún a hidrocarburos cada vez más ligeros (líquidos y gaseosos). Estos productos ascienden hacia la superficie, por su menor densidad, gracias a la porosidad de las rocas sedimentarias. Cuando se dan las circunstancias geológicas que impiden dicho ascenso, trampas petrolíferas como rocas impermeables, estructuras anticlinales, márgenes de diapiros salinos, etc., se forman entonces los yacimientos petrolíferos, (Lluch Urpí, 2008).

En condiciones normales es un líquido bituminoso que puede presentar gran variación en diversos parámetros como color y viscosidad desde amarillentos y poco viscosos como la gasolina hasta líquidos negros tan viscosos que apenas fluyen, densidad (entre 0,75 g/ml y 0,95 g/ml), capacidad calorífica, etc. Estas variaciones se deben a la diversidad de concentraciones de los hidrocarburos que componen la mezcla.

Es un recurso natural no renovable y actualmente también es la principal fuente de energía en los países desarrollados. El petróleo líquido puede presentarse asociado a capas de gas natural, en yacimientos que han estado enterrados durante millones de años, cubiertos por los estratos superiores de la corteza terrestre.

El petróleo está formado principalmente por hidrocarburos, que son compuestos de hidrógeno y carbono, en su mayoría parafinas, naftenos y aromáticos. Junto con cantidades variables de derivados saturados homólogos del metano (CH₄).

Además de hidrocarburos, el petróleo contiene otros compuestos que se encuentran dentro del grupo de orgánicos, entre los que destacan sulfuros orgánicos, compuestos de nitrógeno y de oxígeno. También hay trazas de compuestos metálicos, tales como sodio (Na), hierro (Fe), níquel (Ni), vanadio (V) o plomo (Pb). Asimismo, se pueden encontrar trazas de porfirinas. (Fong , De Ruiz, 1996).

1.1.1 Clasificación de las distintas clases de petróleo.

Ante la complejidad de su composición y la diversidad de los existentes, no hay ningún tipo de clasificación de crudos que se pueda considerar como definitiva. Como consecuencia de su origen, condiciones de evolución y antigüedad, los crudos tienen diferente composición en cuanto al tipo y cantidad de familias químicas hidrocarbonadas de las que están formadas, hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos, cuyas características físicas variarán en función de esta composición y las posibilidades de refinado o aprovechamiento para la obtención de sus productos derivados, principalmente combustibles, lubricantes, asfaltos y materias primas para petroquímica, serán diferentes así como su valoración económica. (Lluch Urpí, 2008)

Capítulo I. Análisis Bibliográfico.

El factor de caracterización (K), es un valor que permite al refinador identificar o caracterizar el tipo de crudo en cuanto a su composición química, (base parafínica, mixta, nafténica, aromática), además para cada crudo existe una relación entre la temperatura de ebullición de un componente puro, su densidad y su relación H/C, también permite tener conocimiento de los rendimientos y calidad de los productos a obtener al realizar una evaluación de los mismos.

Base parafínica: Las parafinas livianas dan buenos aceites para usos domésticos, pues no producen humo al quemarse, tienden a resistir el calor. Las parafinas más espesas contienen cristales blancos y blandos que cuando son aislados y refinados forman lo que se conoce como cera parafinada. Se encuentran generalmente en Pensilvania, West Virginia y centro de Estados Unidos.

Base nafténica: Generalmente contienen gran proporción de fracciones volátiles, es decir, componentes que se evaporan fácilmente. Se encuentran generalmente en la antigua URSS, Perú, California y Golfo de Méjico. En Cuba se encuentra en la zona de Motembo.

Base asfáltica: Contienen además de carbono e hidrógeno, gran cantidad de azufre. En la destilación avanzada o más completa rinden una cantidad relativamente alta de alquitrán y asfalto. Se pueden encontrar en Méjico, Venezuela, California y el Caribe.

Base mixta: Ningún crudo es realmente netamente nafténico, asfáltico o parafínico en su composición química, sino que contienen proporciones de los otros tipos, caracterizándose por el predominio del compuesto en mayoría. Sin embargo, ciertos crudos de Kansas, Oklahoma y Texas, tienen tan parejos los contenidos de nafta, parafinas y asfaltos que resulta imposible clasificarlos en una sola de estas clases.

Este tipo de clasificación según su base no permite dar una idea de la valoración económica de un crudo y por lo tanto su utilización práctica es muy limitada, además también hay crudos de base mixta.

La clasificación de los crudos según el factor de caracterización, K se considera:

Base parafínica: $K > 12.2$

Intermedio $12.2 \geq K \geq 11.45$

Base nafténica $10.5 \leq K < 11.5$

Base aromática $K < 10.5$

Pueden definirse dos grandes grupos de hidrocarburos: saturados y no saturados. Cuando todas las valencias de los átomos de carbono se comparten con otros átomos, es saturado; cuando hay falta de hidrógeno es no saturado y se pueden compartir dos y hasta tres valencias entre un átomo de carbono con otro átomo. (Centro Politecnico del Petroleo, 1998)

La industria petrolera tiene en cuenta varios criterios para clasificar el petróleo crudo, uno de ellos es según su densidad o gravedad API (ligero, medio, pesado, extrapesado); los refinadores también lo clasifican como "crudo dulce", que significa que contiene relativamente poco azufre, o "ácido", que contiene mayores cantidades de azufre y, por lo tanto, se necesitarán más operaciones de refinamiento para cumplir las especificaciones actuales de los productos refinados. (Fong , De Ruiz, 1996)

Ejemplos de crudos de varios países productores:

- Arabian Ligero, de Arabia Saudita
- Bonny Ligero, de Nigeria
- Fateh, de Dubái
- Istmo, de México (no-OPEP)
- Minas, de Indonesia

- Saharan Blend, de Argelia
- Merey, de Venezuela
- Tía Juana Light, de Venezuela

1.1.2 Caracterización básica.

La calidad de un crudo se especifica a través de una serie mínima de propiedades: su densidad, contenido en azufre y curva de destilación TBP. El conocimiento de estas propiedades permite una diferenciación entre los crudos en términos de ligero o pesado según el valor de API (medida internacional del American Petroleum Institute), rendimientos en destilación mediante su curva TBP y el contenido en azufre que permite una primera valoración de sus dificultades de procesamiento.

Densidad

La densidad en °API se define a partir de la densidad relativa o “*specific gravity 60/60°F*” (Sp. Gr.) mediante la siguiente expresión:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{Sp.Gr\ 60/60^{\circ}F} - 131,5 \quad (1.1)$$

Donde Sp. Gr. Es la gravedad específica del crudo a 60 °F

Físicamente, la densidad API da una idea de la composición del crudo, que será más ligero cuanto mayor es su °API, con mayor proporción de destilados ligeros y por lo tanto más favorable para la obtención de productos destilados de mayor valor añadido como gasolinas y gasóleos mediante un esquema de refinado simple, mientras que un crudo con menor °API, más pesado, necesitará de un esquema de refinado más complejo que incluya procesos de conversión para obtener los mismos destilados. (Lluch Urpí, 2008)

Nótese que el valor numérico de la densidad en °API tiene el sentido inverso respecto a la densidad relativa, de esta forma cuanto mayor es el °API de un crudo más ligero será.

La clasificación según la densidad se considera:

> 30 °API ----- Petróleo ligero

20 - 30 °API ----- Petróleos medios

10 - 20 °API ----- Petróleos pesados

< 10 °API ----- Petróleos extrapesados

Azufre

El contenido en azufre de un crudo es un factor importante, ya que se trasladará casi en su totalidad a los productos de refino, que están sometidos a fuertes restricciones de calidad respecto a su contenido. Por lo general son más abundantes en las fracciones más pesadas. Será necesario eliminarlo de forma adecuada mediante una serie de procesos industriales que encarecen la operación, por esta razón, los crudos de bajo azufre necesitarán unos procesos más suaves y normalmente su valoración en el mercado será superior a los de alto azufre.

El azufre puede presentarse como ácido sulfhídrico, que se encuentra disuelto en el crudo, también puede encontrarse formando parte de compuestos hidrocarbonados como mercaptanos, sulfuros, tiofenos y benzotiofenos polisustituídos. También el azufre puede desprenderse como sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cual es altamente tóxico. Estos compuestos de azufre contribuyen a la corrosión de las instalaciones productivas, al envenenamiento de los catalizadores involucrados en los procesos y también al incremento de la contaminación ambiental como resultado de la combustión de los derivados utilizados como combustibles.

El contenido en azufre depende del origen y antigüedad del crudo, los hay con un contenido muy bajo, con valores del orden del 0,1 % en peso hasta valores superiores al 6% en peso. Ambos extremos son excepciones y normalmente se encuentra en el intervalo entre el 0,2 y el 4 % en peso. (Fong , De Ruiz, 1996)

Curva de destilación TBP

Al ser un crudo una mezcla de hidrocarburos de diferentes puntos de ebullición, la manera más simple de procesamiento será su separación por destilación en cortes o fracciones de diferente intervalo de ebullición y de diferente aplicación. El conocimiento previo de los rendimientos

que se obtendrán, mediante una destilación en condiciones atmosféricas y a vacío, permitirá diferenciar entre sí a los crudos.

La cantidad de cortes o fracciones que se utilicen pueden variar desde 4 hasta incluso 24, según las necesidades de las refinerías, pero las siguientes 8 fracciones proveen de una adecuada base para la evaluación de un crudo.

A nivel de laboratorio se determina la denominada curva TBP (*True Boiling Point*) y representa el volumen de líquido recogido en función de la temperatura de destilación en una columna estándar predefinida, a presión atmosférica hasta unos 350 - 370°C, temperatura en la que en las condiciones descritas puede empezar a aparecer el craqueo térmico de las moléculas más pesadas. (Lluch Urpí, 2008)

1.1.3 Crudos Cubanos.

El principal yacimiento de CUBA (Varadero) se descubrió en la década del 70 del siglo pasado, su mayor auge productivo fue en la del 90. Este yacimiento, de crudo extra pesado, tiene como promedio las siguientes características:

Grados API	8 a 10
Gravedad esp	1,0137 a 999,4
Azufre, % p/p	7 a 9
Viscosidad, cSt	10000 a 25000

En la Empresa de Perforación, Extracción de Petróleo Centro (EPEPC) existen otros yacimientos menores (llamados comúnmente satélites o asociados) como son: Varadero Sur, Guásimas, Cantel Serpentina, Cantel Caliza, Camarioca, Majaguillar, Motembo, etc. Muchos de ellos con crudo medio o pesado, aunque ante el crudo de Varadero, mayoritario en el compósito, se le llama habitualmente crudo ligero.

Capítulo I. Análisis Bibliográfico.

En la Empresa de Perforación, Extracción de Petróleo Occidente (EPEPO) la característica de los crudos de los yacimientos es diferente

Yacimiento	Grados API
Boca de Jaruco	11-14
Santa Cruz	18
Tarara	16

En el centro del país la característica de los crudos de los yacimientos de la U E. B MAJAGUA es diferente, éstos se utilizan para fabricar aceites básicos en la Refinería Sergio Soto de CABAIGUAN.

Yacimiento	Grados API
Cristales	+ 25
Motembo	+30
Pina	14-20

1.1.3.1 Especificaciones de calidad del crudo

La entidad EPEPC cuenta con dos clientes: la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas, adonde llega el crudo a través del Oleoducto Magistral de aproximadamente 15 Km y la refinería “Ñico López”. Las características de calidad pactadas son:

Índice de Calidad	Valor
Contenido de agua	< 1.5 % m/m
Viscosidad	1 000 a 1 200 cSt

Azufre	< 5 % p/p
Gravedad específica	0,995 a 0,900
Sales	< 850 ppm

Dada la gran diversidad de petróleo crudo existente es necesario disponer de alguna metodología que permita conocer, a priori, su calidad y características. Con el tiempo se han desarrollado varios criterios de clasificación de los crudos, ninguno de ellos tiene una aplicación universal, estas clasificaciones han sido superadas por la caracterización completa del crudo a través de técnicas normalizadas internacionalmente.

1.2 Procesos de refinación del petróleo.

El refino del petróleo comienza con la destilación o fraccionamiento de los crudos en grupos de hidrocarburos separados. (Disponible en web www.lacomunidadpetrolera.com//2346-Proceso-de-Refinación, 2010) Los productos resultantes están directamente relacionados con las características del petróleo crudo que se procesa. La mayoría de estos productos de la destilación se convierten a su vez en productos más útiles cambiando sus estructuras físicas y moleculares mediante craqueo, reforma y otros procesos de conversión. (Wauquier, 1998).

Los procesos y operaciones de refino de petróleo se clasifican básicamente en:

a) Destilación atmosférica y al vacío.

Según Hernández, 2009 y otros autores (Jiménez, 2003; Abdel-Aal y Aggour, 2005; Branan, 2006; (Fraser, R. et al., 2008); Albright, 2009) la destilación por fraccionamiento, es una operación unitaria utilizada para separar mezclas en productos individuales. Incluye separación de componentes por volatilidad relativa. La dificultad de la separación está relacionada directamente con la volatilidad relativa de sus componentes y la pureza requerida de los productos.

Capítulo I. Análisis Bibliográfico.

Este es el primer proceso que aparece en una refinería. El petróleo que se recibe por ductos desde las instalaciones de producción, se almacena en tanques cilíndricos de gran tamaño, de donde se bombea a las instalaciones de este proceso. El petróleo se calienta en equipos especiales y pasa a una columna de destilación que opera a presión atmosférica en la que, aprovechando la diferente volatilidad de los componentes, se logra una separación en diversas fracciones que incluyen gas de refinería, gas licuado de petróleo (GLP), nafta, queroseno (*kerosene*), gasóleo, y un residuo que corresponde a los compuestos más pesados que no llegaron a evaporarse. (Cortazar et al, 2000)

En una segunda columna de destilación que opera a condiciones de vacío, se logra la vaporización adicional de un producto que se denomina gasóleo de vacío, y se utiliza como materia prima en otros procesos que forman parte de las refinerías para lograr la conversión de este producto pesado en otros ligeros de mayor valor. En este proceso, el petróleo se separa en fracciones que después de procesamientos adicionales, darán origen a los productos principales que se venden en el mercado: el gas LP (comúnmente utilizado en las estufas domésticas), gasolina para los automóviles, turbosina para los aviones jet, diesel para los vehículos pesados y combustóleo para el calentamiento en las operaciones industriales. Pero estos productos tienen que cumplir con una serie de especificaciones que aseguren su comportamiento satisfactorio.

Originalmente, las especificaciones tuvieron un enfoque eminentemente técnico, como el número de octano de la gasolina, o el de cetano del diesel, o el punto de humo del queroseno, o la viscosidad del combustóleo; actualmente, las consideraciones de protección ambiental han incorporado muchos más requerimientos, limitándose, por ejemplo en la gasolina, el contenido del azufre (este compuesto al quemarse, produce dióxido de azufre que al pasar a la atmósfera se oxida, y con el agua da origen a la lluvia ácida), el benceno (que es un hidrocarburo que tiene carácter cancerígeno), las olefinas y los aromáticos (que son familias de hidrocarburos altamente reactivas en la atmósfera, promotoras de la formación de ozono); la presión de vapor (que debe limitarse para reducir las emisiones evaporativas en los automóviles y gasolineras), e inclusive se requiere la presencia de compuestos oxigenados que no ocurren naturalmente en el petróleo (estos compuestos favorecen la combustión completa en los motores automotrices).

Mediante el proceso de destilación se separan las fracciones volátiles y medianas del petróleo, permitiendo hacer:

- Cortes que se mezclan directamente para la elaboración de productos comerciales como la gasolina de motor, kerosén, gasóleos, entre otros.
- Cortes que se usan como materia prima de procesos que presentan la particularidad de transformar o reordenar la constitución de las moléculas de los hidrocarburos, como craqueo catalítico, isomerización, reformación catalítica, etc. para obtener gasolina de alta calidad.
- Cortes que utilizan como material de alimentación a procesos extractivos y/o tratamiento, con la finalidad de obtener determinadas fracciones de alto grado de pureza, como el proceso de hidrotratamiento de diesel y nafta. para alimentar otros procesos. (Kraus, R. S. y Wauquier, 1998).

Dentro de las ventajas que tiene la destilación sobre otros procesos de separación, se encuentra que a pesar de que la nueva fase difiere de la original por su contenido calórico, el calor se adiciona o extrae rápidamente sin dificultad. Existen limitaciones para utilizar la destilación como proceso de separación, por ejemplo, una de ellas consiste en que al crearse el gas mediante la aplicación de calor, inevitablemente se forman solamente componentes del líquido, por lo tanto, como el gas es químicamente muy parecido al líquido, el cambio en composición resultante de la distribución de los componentes entre las dos fases no es generalmente muy grande; y en algunos casos el cambio es tan pequeño que el proceso se hace impráctico. Sin embargo, la separación directa es posible generalmente mediante la destilación, permite obtener productos puros que no requieren de un procedimiento posterior y han hecho de la destilación una de las operaciones más importantes con transferencia de masa. (Treybal, 1999).

b) Reformación catalítica.

Con la Nafta pesada de destilación atmosférica no es posible la fabricación de gasolinas dado su bajo número de octano. El proceso capaz de incrementar su valor es el reformado catalítico. Para un mismo número de átomos de carbono, los hidrocarburos tienen diferente octano según su tipo, los de mayor número de octano son los aromáticos seguidos de los isoparafínicos, entre los de menor número de octano están los normal parafínicos y los nafténicos. El Reformado es un proceso catalítico en el que se producen una serie de reacciones químicas tendentes a

aumentar la aromaticidad de la alimentación y con esto obtener un alto octanaje en la gasolina. (Lluch Urpí, 2008) y (Kraus, R. S, 1998).

c) Craqueo catalítico fluidizado (CCU).

Para la conversión del gasoil de vacío en destilados ligeros se utiliza el proceso denominado Cracking catalítico en lecho Fluido (“*Fluid Catalytic Cracking*”). En este proceso la ruptura de las grandes moléculas componentes del VGO (Gas oíl de Vacío) da lugar a moléculas de hidrocarburos en el rango de destilación de las gasolinas y los gasóleos, además de GLP, un residuo pesado que se utiliza en la formulación de Fueloil y por último coque que se utiliza como fuente de energía para el propio proceso. (Lluch Urpí, 2008)Y (Kraus, R. S, 1998).

d) Coquificación retardada.

El proceso de coquización es un proceso de cracking térmico controlado que elimina el residuo de vacío y que junto con una elevada cantidad de coque (carbón) produce destilados medios y ligeros y una pequeña proporción de GLP olefínico.

En este proceso, aparte de la alimentación, las condiciones de operación son prácticamente fijas en función del diseño de la planta, únicamente puede actuarse sobre el reciclado interno para optimizar la unidad. No existen por tanto operaciones a diferentes severidades. (Lluch Urpí, 2008) y (Kraus, R. S, 1998).

e) Alquilación.

La alquilación es un proceso que permite obtener componentes de gasolina a partir de hidrocarburos de C3 y C4. Consiste en la adición de isobutano a compuestos olefínicos, butenos, especialmente n-buteno (subproducto del proceso de MTBE), propileno y también amilenos. La reacción de alquilación es catalizada por un ácido fuerte, sulfúrico o bien fluorhídrico. Con sulfúrico la reacción opera entre 5 y 15 °C a una presión suficiente para producir la vaporización de los productos de reacción y de esta forma eliminar el calor de reacción y poder mantener la temperatura de reacción. En el caso del fluorhídrico, la refrigeración es por agua y por tanto puede trabajarse a temperaturas entre 25 y 40 °C. Puesto que las olefinas son elementos reactivos que polimerizan rápidamente es necesario trabajar a una alta relación isobutano/olefinas. Por otro lado, la reacción se produce en fase líquida siendo necesario un buen control de la mezcla de los reactantes. Puesto que la conversión depende de

la fortaleza del ácido es necesario eliminar y agregar continuamente el mismo. (Lluch Urpí, 2008) y (Kraus, R. S, 1998).

f) Isomerización.

El objeto de este proceso es mejorar el número de octano de la nafta ligera de destilación directa, en concreto los hidrocarburos normal parafínicos en C5 y C6 mediante su transformación en sus isómeros ramificados. La nafta ligera de destilación directa tiene un índice de octano entre 65 a 70, dependiendo del tipo de crudo y corte de destilación TBP. Los valores de octano de los componentes normal parafínicos son inferiores que los de los productos ramificados. (Lluch Urpí, 2008) y (Kraus, R. S, 1998).

g) Hidrocraqueo

El proceso de hidrocraqueo tiene por objetivo la conversión de destilados de vacío, productos de conversión e incluso naftas de destilación directa y residuos, en productos destilados. Es un proceso de cracking catalítico en presencia de hidrogeno. La alimentación compite con la del CCU pero sus productos, al ser hidrogenados presentan una mejor calidad, en especial los destilados medios. La nafta ligera tiene un número de octano inferior a la producida en CCU del orden de 78 a 85 RON, pero no presentan olefinas ni azufre. La nafta pesada de carácter marcadamente nafténico es una buena alimentación al reformado catalítico, y los destilados medios presentan un elevado número de cetano, entre 66 – 70. El residuo, altamente hidrogenado puede utilizarse como alimentación al CCU y también en la obtención de bases lubricantes. (Lluch Urpí, 2008) y (Kraus, R. S, 1998).

h) Oligomerización.

El proceso de Oligomerización tiene como objetivo procesar fracciones ligeras olefínicas de C3/C4 procedentes de procesos de conversión, debidamente tratados para reducir contenido de impurezas con el fin de producir cortes de gasolina, diesel y GLP. Las reacciones ocurren en la cama catalítica de tres reactores conectados en series, pero antes se hidrogena la materia prima en un reactor en presencia de hidrógeno; en estos dos procesos se ponen de manifiesto las reacciones de hidrogenación selectiva del butadieno de un corte de GLP olefínico y la oligomerización de propileno, isobuteno y normal butenos que conducen a la obtención de los productos deseados para esas condiciones de operación. (Lluch Urpí, 2008).

i) Hidrofinación.

Tratamiento de un hidrocarburo con hidrógeno, en presencia de un catalizador en reactores de lecho fijo y bajo condiciones de operación adecuadas, para remover contaminantes o saturar insaturaciones tiene como objetivos fundamentales los siguientes: (Lengiproneftekhim, 1981)

- Remoción de contaminantes.
- Conversión de compuestos en la misma fracción.
- Conversión a fracciones más livianas.

j) Otras operaciones en la refinación.

Dentro de las otras operaciones que se llevan a cabo en refinerías, se encuentran la recuperación de ligeros, "*stripping*" de agua ácida, tratamiento de desechos sólidos y de agua, tratamiento y enfriamiento de agua de proceso, almacenamiento, manejo y transportación de productos, producción de hidrógeno, tratamiento de ácidos y "colas", y recuperación de azufre. (Lengiproneftekhim, 1981)

Las operaciones e instalaciones auxiliares incluyen la generación de energía y vapor, sistemas de agua contra incendio y de proceso, sistemas de relevo, hornos y calentadores, bombas y válvulas, suministro de vapor, aire, nitrógeno y otros gases, alarmas y sensores, controles de ruido y contaminación, muestreo, pruebas, inspección, laboratorio, cuarto de control, mantenimiento, e instalaciones administrativas.

La industria petroquímica elabora a partir del petróleo varios productos derivados, además de combustibles, como plásticos, derivados del etileno, pesticidas, herbicidas, fertilizantes o fibras sintéticas. (LLuch Urpí, J, 2000) y (Wauquier, 1998).

1.3 Esquemas de refino.

La transformación del crudo de petróleo en sus productos derivados se realiza mediante la aplicación de una serie de procesos físicos y químicos con el objetivo de añadir el máximo valor añadido al producto refinado y al mínimo costo posible. El desarrollo de los diferentes procesos responde a la necesidad de producir mayor y mejor calidad de productos sin olvidar las exigencias medioambientales cada vez más restrictivas.

Históricamente el refino de petróleo consistía en una destilación simple del crudo, en batch, de forma que los hidrocarburos de mayor punto de ebullición, se vaporizaban y condensaban posteriormente, separándose a continuación diferentes fracciones según su intervalo de destilación. A partir de ahí se desarrolló la destilación continua actual. La utilización del *cracking* térmico cubrió una etapa intermedia en la que la utilización de temperaturas elevadas permitía la ruptura de las moléculas grandes del fondo del barril en otras más ligeras con un mayor rendimiento en gasolinas comerciales y además de mejor octanaje. Con la utilización de los catalizadores se abre la moderna historia del refino.

En el refino del crudo se obtiene un gran número de productos intermedios o finales, en la de los cuales se listan algunos de ellos:

Gases licuados (LPG): Propano y Butano

Gasolinas para automoción y aviación

Combustibles o Kerosenos de aviación

Gasóleos de automoción

Gasóleos para otros motores diesel (tractores, locomotoras, BB/TT, etc.)

Gasóleos de calefacción o Heating oil

Fueloil bunker para buques

Fuelóleos para hornos, calderas industriales y calefacción

Fuelóleos para Centrales Térmicas

Disolventes

Aceites lubricantes

Betunes para la fabricación de asfaltos

Coque combustible y para fabricación de electrodos

Productos derivados y especialidades (Azufre, Extractos aromáticos, parafinas, etc.) (Lluch Urpí, 2008)

Los combustibles de motor, que son los productos de mayor valor añadido, Gasolinas, Kerosenos y Gasoil tienen un peso molecular medio inferior a 30 mientras que el resto de intermedios, más pesados y de menor valor económico, tienen números moleculares mucho mayores y representan entre el 25 y el 50% del rendimiento en destilación directa. El interés

principal de los procesos de refino será en convertir estos productos de mayor peso molecular en otros de menor y mayor valor económico.

Se conoce como esquema de refino, al conjunto de procesos que constituye una de refinería, básicamente pueden considerarse cuatro esquemas típicos:

TOPPING o destilación atmosférica

HYDROSKIMING que incluye el hidrotratamiento

CONVERSION, con transformación de destilados de vacío en ligeros.

CONVERSION PROFUNDA, con transformación de residuos de vacío en destilados ligeros.

Disponer de uno u otro esquema de refino es función del entorno económico de la refinería, de su mercado y de sus posibilidades de aprovisionamiento de crudos. Cuanto más sofisticada es una refinería mayor habrá sido el costo de su inversión y también lo son los costos de operación. Como contrapartida el valor de los productos obtenidos es también mayor.

Además de la destilación atmosférica y al vacío existen otros procesos de refinación importantes como el hidrotratamiento, reformación de la nafta, isomerización, desintegración catalítica fluida (FCC), alquilación, fondo de barril, producción de lubricantes, endulzamiento y recuperación de azufre, procesamiento de gas natural etc. (Lluch Urpí, 2008)

1.4 Características del Turbo Combustible Jet A-1.

Uno de los productos finales de gran importancia debido a su alto valor comercial para la refinería es el Jet A-1 o turbo combustible para aviación, destilado medio proveniente de la destilación atmosférica que posee características especiales de calidad.

El combustible para un avión accionado por pistón motor tiene un punto de destello bajo para mejorar sus características de la ignición. Los motores de turbina pueden funcionar con una amplia gama de combustibles, y los motores del Jet-avión utilizan típicamente los combustibles con puntos de destello más altos, que son menos inflamables y por lo tanto más seguro transportar y dirigir. Los primeros combustibles de jet fueron basados en el keroseno o una mezcla de gasolina-keroseno, y la mayoría de los combustibles de Jet todavía se basan en el

keroseno. Este producto tiene especificaciones muy estrictas y las más importantes son el punto de congelación y el de flasheo. El punto inicial de ebullición es ajustado para obtener la temperatura mínima de flasheo aproximadamente de 100°F (37.8°C) y el punto final de ebullición es ajustado para obtener el punto máximo de congelación requerido aproximadamente de -52°F (-11°C). Los jet fuel básicos son: el Jet A, Jet A-1, Jet B. (Parkash, 2003)

Los combustibles de Jet se clasifican como tipo keroseno o tipo nafta. El tipo Keroseno incluye el Jet A, el Jet A-1, JP-5 y JP-8. El tipo Nafta incluye el Jet B y JP-4.

El Jet A es un tipo de keroseno similar al Jet A-1, a excepción de su punto de congelación más alto de -40°C . es usado mayormente por aerolíneas comerciales de varios países, donde el punto de congelación no impone limitaciones. El Jet B es un combustible que tiene un amplio rango, es decir su punto inicial de ebullición está en el rango de las gasolinas, y por ende tiene mayor contenido de ligeros que los restantes combustible con punto de congelación de -50 a -58°C y es mayormente utilizado por los aviones militares. El Jet A-1 también conocido como Turbo combustible, Turbosina tiene características parecidas al Jet A-1 pero un máximo punto de congelación de -47°C y el punto de flasheo de ambos de 38°C . Este tipo de combustible es usado por muchas aerolíneas internacionales. (Ecopetrol, 2005). En el Anexo 1 se muestra las especificaciones regidas a nivel mundial del Jet A-1.

1.4.1 Principales parámetros de calidad del Turbocombustible Jet A-1.

Normalmente y en la mayoría de las refinerías que cuentan con una Unidad de Producción de Turbocombustible, no se controlan la totalidad de los parámetros de calidad en la corriente de producción, dado que son varias las determinaciones que exige la especificación, así como los recursos de personal y tiempo que disponen los laboratorios de control de calidad, son limitados.

El análisis completo del producto, se realiza sobre muestras representativas de los tanques de producción.

No obstante, las características propias que hacen al proceso de elaboración de la unidad, permiten conseguir la especificación del producto, controlando las variables de operación y realizando los ensayos de laboratorio, de los principales parámetros de calidad.

Ello no implica que, para determinadas situaciones particulares o eventuales, se pueda monitorear en particular, algún parámetro de calidad en el laboratorio, ya sea porque ha salido de especificación o simplemente para ver su evolución a los cambios de las variables de proceso. Ejemplos de este control pueden ser, el seguimiento del WSIM o el contenido de sólidos.

Según (Grupo combustibles de aviación. Cupet, 2001) los principales parámetros que hacen al control diario de la corriente de producción de Jet de la unidad son:

- Color *Saybolt*: Mide el color del Jet según una escala de color determinada.
- Aspecto: Mide el aspecto de la muestra. Las posibilidades son: turbia, clara, con material sólido, opaca, amarillenta, etc. Se trata de una determinación visual. La especificación requiere que la muestra sea clara y brillante.
- Acidez total: Conocido también como Número de Acidez Total (TAN). Mide el contenido de ácidos nafténicos y carboxílicos, expresado en mg de Hidróxido de Potasio por gramo de muestra.
- Azufre total: Mide el contenido de Azufre orgánico (sulfuros y disulfuros) y mercaptanos.
- Azufre mercaptánico: Mide el contenido de mercaptanos.
- Ensayo Doctor: Se trata de un ensayo cualitativo para corroborar la presencia de Sulfuro de Hidrógeno y mercaptanos.
- Destilación ASTM D-86: Se trata de los puntos de ebullición promedio, de cada rendimiento de destilado.
- Punto de Inflamación: Es la temperatura más baja, a la cual los vapores de una mezcla se inflaman por acción de una fuente de ignición.
- Gravedad Específica: Es la densidad a 15 °C.

Punto de Congelación: Es la temperatura por debajo de la cual se pueden formar cristales en la muestra.

- Viscosidad: Representa la mayor o menor tendencia a fluir. La determinación se realiza a -20 °C.
- Micro separador de Agua WSIM: Da una medida de la capacidad del Jet, para liberar el agua arrastrada o emulsificada, cuando el producto pasa a través de un filtro coalescedor de fibra de vidrio.
- Contaminantes sólidos: Mide el contenido de partículas muy pequeñas de diámetro especificado. (Grupo combustibles de aviación. Cupet, 2001)

1.4.2 Métodos para mejorar la calidad del turbo combustible Jet A-1.

Según Marcilla D.et.al, 2001 existen varios métodos para mejorar la calidad del turbo combustible como uno de los procesos de mayor uso general en varias refinerías los cuales se describen a continuación.

• La hidrofinación

Esta tecnología se diseña para disminuir los contaminantes tales como sulfuros, el nitrógeno, los compuestos aromáticos condensados de anillo, o los metales. Tiene una historia larga de uso comercial, desde los años 50, con más de 500 unidades licenciadas en funcionamiento colocadas a nivel mundial. El proceso de hidrofinación del turbo combustible se basa en las reacciones de hidrogenación moderada en cuyo resultado los compuestos oxigenados, sulfurosos y nitrogenados se convierten en presencia de hidrogeno y catalizador en hidrocarburos con desprendimiento de sulfhídrico, agua y amoníaco; las olefinas se convierten en hidrocarburos más estables de la serie parafinita o nafténica en función de la naturaleza de olefinas en la materia prima inicial.

La velocidad relativa y profundidad de reacciones depende de las condiciones de realización del proceso que dependen de las propiedades físico químicas de la materia prima que se procesa, del catalizador utilizado y de la composición fraccionada y química del inyector. Los parámetros fundamentales que caracterizan la hidrofinación son la temperatura, presión, velocidad espacial de suministro del inyector, relación de recirculación de gas rico en hidrogeno con respecto al inyector y actividad del catalizador. Las principales reacciones que ocurren son reacciones de los

compuestos sulfurosos, compuestos oxigenados y nitrogenados y a la vez se efectúan numerosas reacciones de hidrocarburos. (Muñecas, 2005)

• **El tratamiento cáustico**

Es un proceso catalítico usado en refinerías de petróleo para endulzar el jet fuel. Los mercaptanos se convierten a disulfuros. Estos pueden permanecer en la corriente del hidrocarburo pues son solubles en productos de petróleo y menos corrosivos. El proceso de endulzamiento del tratamiento del Jet A-1 se utiliza en lugar de un hidrotratamiento cuando el azufre total es inferior a lo normado, es una planta con bajos costos de operación y se aplica a combustibles livianos. (Suarez, 2001)

En el tratamiento cáustico del jet fuel hay dos pasos importantes que son la reducción de la acidez total y la oxidación de mercaptanos. La acidez de los hidrocarburos es medida por su número de neutralización o por el valor de los ácidos totales que puede estar relacionado con su potencial de corrosión en el equipo. Los ácidos nafténicos son el principal contribuyente de la acidez en las fracciones de destilados. Su nombre es genérico para familia de compuestos que pertenecen a la amplia categoría de los ácidos carboxílico en donde uno o la combinación de hidrocarburos saturados tienen un radical de ácido orgánico unido a uno de los átomos de carbono. El mercaptano es el nombre genérico para una familia de compuestos orgánicos donde el radical SH se une a uno de los átomos de carbono en la molécula. El átomo de hidrogeno en el radical SH puede ionizarse y producir un ambiente ligeramente ácido pero en menor grado que los ácidos nafténicos. La más notable característica de los mercaptanos es su olor desagradable fuerte, incluso cuando su concentración es muy pequeña. Es interesante notar que las fracciones que se derivan de crudos que contienen grandes cantidades de ácidos nafténicos rara vez contienen significativas cantidades de mercaptanos. Igualmente lo opuesto es verdadero, por lo que la mayoría de las refinerías procesan una variedad de crudo mixto, esto requiere que se le realice tratamientos químicos para ambos tipos de impurezas. (Marcilla D.et.al, 2001)

La producción de turbo combustible varía desde un simple producto de corriente lateral por extracción de un fraccionador de crudo que no requiere tratamiento adicional ni limpieza, y en otros que sólo requiere limpieza mínima con técnicas de filtración con arcilla; otro caso puede

ser obtener un producto que requiere tratamiento cáustico seguido de lavado con agua, secado con sal y filtración con arcilla; y finalmente en algunos casos por un hidrotratamiento. (Suarez, 2001).

En el tratamiento cáustico del jet fuel hay dos pasos importantes que son la reducción de la acidez total y la oxidación de mercaptanos. La acidez de los hidrocarburos es medida por su número de neutralización o por el valor de los ácidos totales que puede estar relacionado con su potencial de corrosión en el equipo. Los ácidos nafténicos son el principal contribuyente de la acidez en las fracciones de destilados. Su nombre es genérico para familia de compuestos que pertenecen a la amplia categoría de los ácidos carboxílico en donde uno o la combinación de hidrocarburos saturados tienen un radical de ácido orgánico unido a uno de los átomos de carbono. El mercaptano es el nombre genérico para una familia de compuestos orgánicos donde el átomo SH se une a uno de los átomos de carbono en la molécula. El átomo de hidrogeno en el radical SH puede ionizarse y producir un ambiente ligeramente ácido pero en menor grado que los ácidos nafténicos. La más notable característica de los mercaptanos es su olor desagradable fuerte, incluso cuando su concentración es muy pequeña. Es interesante notar que las fracciones que se derivan de crudos que contienen grandes cantidades de ácidos nafténicos rara vez contienen significativas cantidades de mercaptanos. Igualmente lo opuesto es verdadero, por lo que la mayoría de las refinerías procesan una variedad de crudo mixto, esto requiere que se le realice tratamientos químicos para ambos tipos de impurezas. (Marcilla D.et.al, 2001)

1.4.3 Comparación entre los métodos utilizados para mejorar la calidad del turbo combustible.

El hidrotratamiento involucra una inversión de capital muy grande (10 a 20 veces) y requiere costos de operación altos (20 a 50 veces) en comparación con el tratamiento húmedo, frase que frecuentemente se usa para denotar el tratamiento cáustico con el proceso de limpieza acompañante. Por esta razón las refinerías evitan el hidrotratamiento siempre que sea posible. (Varadi, 1999)

Sin embargo el hidrotratamiento puede producir jet fuel de la mayoría de los crudos, pues destruye los ácidos nafténicos y fenoles; mientras que el tratamiento húmedo está limitado para jet fuel que tengan especificaciones apropiadas que no se afecten por dicho tratamiento.

El tratamiento cáustico posee otras ventajas, ya que usa un material convencional (acero al carbón) por no existir un ambiente corrosivo; tiene facilidad operativa; baja cantidad de desechos químicos, ausencia de reacciones colaterales y de contaminantes de la corriente tratada; además es un proceso altamente empleado a nivel mundial. (Suarez, 2001)

1.5 Programación lineal en los procesos petroquímicos.

Los modelos de Programación Lineal permiten tener simulada a toda una refinería incluyendo no solamente sus unidades de proceso, con sus capacidades, rendimientos, severidades, calidades de productos, etc., su sistema de *blending* o mezclado sino que además permite formular modos de operación: agrupando crudos de determinadas características (alto/bajo azufre, parafínicos / nafténicos, bajo/alto API), agrupando alimentaciones a unidades de conversión.

Un modelo debe ser el resultado del equilibrio adecuado entre los modos de operación normalmente usados en la refinería y la posibilidad de exploración de otras rutas o modos diferentes a la operación cotidiana. Un modelo basado en la experiencia diaria conducirá a resultados predeterminados sin más interés que el de la mera simulación mientras que un modelo excesivamente libre de restricciones puede dar resultados teóricos imposibles de materializar.

La Programación Lineal no tiene en cuenta el factor tiempo y normalmente los modelos se formulan con variables continuas con lo que tampoco tiene en cuenta la discrecionalidad de las operaciones (a menos que se formulen con variables enteras o mixtas). (Lluch Urpí, 2008)

Por otro lado, a medida que aumenta la complejidad de modelos (número de variables y restricciones) y puesto que alcanzar una solución óptima no significa nada más (ni nada menos) que maximizar el valor de una ecuación lineal en la que intervienen muy pocas de las variables del sistema para lo cual se habrán tenido en cuenta un número sensiblemente elevado de restricciones entre todas las variables, puede ocurrir que el resultado esté direccionado por el

efecto de alguna de las variables o coeficientes (precios, costos, rendimiento, etc.) que desde el punto de vista de producción o incluso de negocio no sea la más importante.

Estas consideraciones obligan a utilizar los modelos y analizar sus soluciones dentro de un entorno donde el conocimiento del negocio es fundamental, en el límite, la utilización del modelo debe servir como confirmación matemática y cuantificación de las previsiones hechas por el propio conocimiento del planificador del sistema de refino implicado y del entorno de su aplicación. Ello sin olvidar nunca que para la exploración de diferentes alternativas, no habituales o no claramente identificadas en el negocio, los modelos programación lineal son imprescindibles.

Se puede decir que con un modelo LP fielmente representativo de un esquema de refino determinado y que con unas bases de utilización: Disponibilidad, Demandas, coste y precios de materias primas y productos, se obtiene un margen a variables óptimo que debe servir de criterio-guía para preparar un programa de producción adecuado.

Del análisis de la optimización se pueden obtener criterios adecuados en cuanto a realización de los crudos, actividad y margen de operación de las unidades, blending de productos, productos a fabricar y sus márgenes... y estos criterios deben mantenerse, en lo posible, cuando se aplica el factor tiempo para pasar un Plan de Producción a un Programa de producción (Lluch Urpí, 2008)

Resolver manualmente un modelo en una refinería implica cálculos realmente tediosos por la inmensa cantidad de variables y de ecuaciones que posee el proceso de refinación. Para resolver estos problemas con rapidez existen herramientas computacionales: ASPEN PIMS, SOLVER, LINDO, QSB, SIAN, entre otras. En los subepígrafes siguientes se explica de forma general estas las herramientas.

1.5.1. LINDO

Optimización Linear, Interactiva y Discreta (LINDO) es una herramienta simple para formular problemas lineales y no lineales, resolverlos y analizar su solución. Proporciona el mejor resultado: la ganancia máxima, o el costo mínimo. A menudo estos problemas involucran el uso más eficiente de los recursos. Permite expresar un problema de una manera muy similar la

anotación matemática normal pudiendo también, expresar una serie entera de restricciones en una declaración compacta. Esto lleva a modelos que son mucho más fáciles de mantener.

Otro aspecto es la sección de los datos, que le permite aislar los datos de la formulación del modelo, de hecho los puede leer de una hoja de cálculo separada, base de datos, o archivo de texto. Con datos independientes del modelo, es mucho más fácil hacer cambios, y hay menos oportunidad de error cuando se realiza el modelo.

1.5.2. SOLVER

Es un paquete contenido en Microsoft Excel que optimiza los modelos sujetos a restricciones, como los modelos de programación lineal, la cual permite obtener soluciones óptimas para un modelo determinado y dependiendo de los niveles de organización se tomen las mejores decisiones para resolver los conflictos de una empresa. Consiste en dos programas: el primero es un programa de Visual Basic para Excel el cual traduce el modelo escrito en la hoja de cálculo en una representación interna al segundo programa que reside en la memoria fuera de Excel, este realiza la optimización y luego devuelve al primero la solución encontrada para actualizar la hoja de cálculo (Azofeifa C., 2003).

En términos generales, la idea de SOLVER es tener una celda que corresponda a la función objetivo del programa, esta puede ser de cualquier tipo, lineal o no lineal, contener funciones trigonométricas, probabilísticas o de cualquier otro tipo: esta celda, estará en función de otras que representan a las variables de decisión cuyo valor será cambiado por SOLVER para ajustarse a la definición del objetivo dentro de los límites que establezcan las restricciones que se deben plantear en otras celdas (J. Marín, 2006).

SOLVER utiliza diversos métodos de resolución, dependiendo del problema que tenga que resolver:

- Para los problemas de Programación Lineal utiliza el método simplex.
- Para problemas lineales enteros utiliza el método de ramificación y acotación implantado por John Watson y Dan Fylstra de Frontline Systems, Inc.
- Para problemas no lineales utiliza el código de optimización no lineal desarrollado por León Lasdon, de la Universidad de Austin (Texas) y por Allan Waren, de la Universidad de Cleveland.

1.5.3 Sistema Aspen PIMS (*Process Industry Modeling System*).

El Sistema avanzado para Ingeniería de Procesos - *Advanced System for Process Engineering* (ASPEN) es un mercado líder en herramientas de modelado de proceso de diseño conceptual, optimización y monitoreo de desempeño para la industria química, polímeros, especialidades químicas, metales y minerales. Desarrollado en la década de 1970 por investigadores del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) y comercializado desde 1980 por una compañía denominada AspenTech. Aspen Plus es un simulador estacionario, secuencial modular (en las últimas versiones permite la estrategia orientada a ecuaciones). Actualmente es posible que sea el más extendido en la industria. Se ha utilizado para modelar procesos en industrias: química y petroquímica, refinación de petróleo, procesamientos de gas y aceites, generación de energía, metales y minerales, industrias del papel y la pulpa y otros. Aspen Plus tiene la base de datos más amplia entre los simuladores de procesos comerciales, e incluye comportamiento de iones y de electrolitos. Además modela y simula cualquier tipo de proceso para el cual hay un flujo continuo de materiales y energía de una unidad de proceso a otra. Posee herramientas para cálculos de costos y optimizaciones del proceso, generación de resultados en forma gráfica, en tablas y otros. (Bechtel Corporation, 1994)

Aspen Plus permite:

- Regresión de datos experimentales.
- Diseño preliminar de los diagramas de flujo usando modelos de equipos simplificados.
- Realizar balance de materia y energía rigurosos usando modelos de equipos detallados.
- Dimensionar piezas clave de los equipos.
- Optimización on-line de unidades de proceso completas o plantas.

El paquete de programas desarrollado por Aspen Technologies denominado PIMS™ (*Process Industry Modeling System*) es una herramienta flexible para la planeación económica en la industria de la refinación de petróleo. Se considera una aplicación de tipo *Caja Negra* donde los usuarios no tienen control sobre los modelos (Verruchi, E et al, 2009)

El Aspen PIMS, es un sistema computarizado para formular modelos individuales de Refinerías, Industrias Petroquímicas y otras facilidades de la industria de procesos, mediante sistemas de ecuaciones lineales utilizando la técnica de programación lineal, con el fin de maximizar ganancias o minimizar costos. (Aspen technology, 2009)

Es una clase de Modelo de Programación Matemática que permite determinar la mejor asignación de recursos limitados de una Empresa, con el objetivo de satisfacer las metas deseadas (maximizar ganancias, minimizar costos).

La característica principal de estos modelos es que las funciones que representan el objetivo y las restricciones son lineales.

PIMS permite modelar de forma sencilla unidades de proceso. Los modelos contienen típicamente un balance de materiales y variables para el consumo de capacidad y servicios, además puede contener balances de energía y una variedad de ecuaciones y características de operación.

PIMS es una herramienta que permite estructurar modelos matemáticos y optimizarlos. El modelo matemático es una matriz de ecuaciones y variables que son definidas por el usuario. En la misma matriz se define la ecuación que representa la función objetivo. El manejo de información se realiza a través de hojas de cálculo.

El PIMS exige como datos de entrada entre otros, los siguientes:

- ✘ Tipos de crudos disponibles, sus calidades y cantidades asociadas.
- ✘ La definición de los volúmenes necesarios de cada uno y las características cualitativas exigidas por el mercado.
- ✘ Unidades de procesos que componen el esquema de refinación.
- ✘ Precios de compra de la materia prima y de venta para los productos refinados.

Para formular un modelo de optimización se debe definir los siguientes componentes:

- Variables de decisión: Representan las alternativas de decisión del problema
- Restricciones: Conjunto de valores que pueden tomar las variables de decisión.
- Función objetivo: Representa lo que se desea optimizar (ganancia).

Se debe tener en cuenta que tanto la función objetivo como las restricciones, presentan una estructura lineal, además de que deben ser proporcionales y aditivas. La primera requiere que la contribución de cada variable de decisión sea directamente proporcional al valor de la variable y la segunda estipula que la contribución total de todas las variables en la función objetivo y sus requerimientos en las restricciones sean la suma directa de las contribuciones o requerimientos individuales de cada variable (A. Taha, 2014).

En una refinería un modelo (LP) representa la operación mediante ecuaciones lineales y restricciones del tipo $<$, $>$ o $=$, donde el número de variables es mayor que el número de ecuaciones dando como resultado infinitas soluciones factibles pero solo una solución óptima que reportará un beneficio máximo. La función objetivo engloba los ingresos debido a las ventas de los productos de refinación y los costos asociados a la compra de materia prima y los insumos necesarios para la operación de las unidades.

Dentro de la amplia gama de aplicaciones del PIMS cuentan las siguientes:

- Evaluación de cambios en la alimentación en las unidades de proceso
- Dimensionamiento de plantas
- Optimización de mezclas de productos
- Programación de operaciones
- Elaboración de nuevos productos
- Optimización del margen de refinación.

La autora coincide con Martínez et al, 2000 que el *Aspen PIMS* es catalogado como un software estable dentro de la amplia gama de simuladores a utilizar en la industria y en el caso particular de la refinería se ha seleccionado como herramienta para la evaluación de los procesos en la refinería pues es el utilizado en PDVSA y al ser una empresa mixta con la cual esta empresa venezolana está asociada es empleado para que ambas partes puedan corroborar informaciones y/o resultados para la toma de decisiones.

1.6 Conclusiones parciales del análisis bibliográfico.

Para cumplir estos objetivos se realizó una búsqueda bibliográfica acerca de los documentos y libros presentes en el departamento de documentación de la refinería, además de diferentes bases de datos remota, disponible en INTERNET y otros documentos propios del proceso, incluyendo bases de datos y software. Se concluye lo siguiente:

1. El crudo y su refino avanza vertiginosamente acortando el período de existencia de las reservas petrolíferas a nivel mundial por lo que es necesario aplicar otras alternativas que sustituyan las normas convencionales de los procesos involucrados.
2. La obtención del turbocombustible Jet A-1 a partir de crudos pesados y extrapesados a partir de procesos de refinación involucran los procesos de destilación e hidrotratamiento donde el rendimiento de este producto y los parámetros de calidad puede variar teniendo en cuenta el porcentaje de contaminantes en la materia prima.
3. El contenido en azufre de un crudo es un factor importante, ya que se trasladará casi en su totalidad a los productos de refino, que están sometidos a fuertes restricciones de calidad respecto a su contenido.
4. El Jet A-1 es uno de los productos finales de gran importancia debido a su alto valor agregado, para la refinería juega un papel primordial para su economía.
5. De los software que se emplean para la programación lineal el PIMS es el más adecuado porque podemos analizar el cambio de dieta y la economía de la refinación una vez establecidos los modelos, además por razones económicas lo utilizamos de conjunto con PDVSA para comparar los resultados aplicando un mismo sistema de evaluación

Capítulo 2. Diseño Metodológico.

En este capítulo se describe la unidad de destilación atmosférica Sección 100, utilizando el reglamento tecnológico del proyecto ruso, se caracteriza la fracción de turbo combustible y el Jet A-1, para el caso utilizando crudo nacional cubano, verificado a través de los datos obtenidos en la evaluación del proceso, los rendimientos de los productos, y los parámetros de calidad a obtener, se explica los pasos a seguir para la utilización del Software PIMS los modelos propuestos así como para el análisis de mercado y de las ventas de productos, se valida el esquema propuesto y se emiten conclusiones parciales de este capítulo.

2.1 Introducción.

La producción de combustible de aviación a partir del corte Kerosén requiere de la utilización de varias etapas de tratamiento a efectos de cumplir con las especificaciones de Acidez, Mercaptanos y otras relacionadas con la presencia de Agua Libre y Sólidos en Suspensión.

Como el Kerosén se obtiene como un corte medio en la Torre de Destilación Atmosférica de la refinería, con un rango de ebullición típico de 120 °C a 230 °C, existe una cantidad de compuestos que destilan en este rango tales como Ácidos Nafténicos y Mercaptanos, y otros que son considerados como impurezas para su uso como combustible.

El combustible de aviación tiene también otros requerimientos a cumplir tales como Máximo Contenido de Aromáticos, Punto de Ecurrimiento, Punto de Humo, Color y WSIM, este último relacionado con el contenido de Agua Libre.

El tratamiento cáustico del Kerosén solo tiene impacto en la remoción de Ácidos Nafténicos de modo de obtener un Número de Acidez adecuado, y para servir como vehículo para la oxidación catalítica de Mercaptanos de modo de cumplir con el Ensayo Doctor o un máximo nivel de Mercaptanos normalmente establecido en 30 ppmw.

Para la situación actual de la refinería en particular, y basándose en las características de la fracción de Kerosén a ser procesado para producir combustible de aviación con las

especificaciones de calidad dadas por el cliente (Anexo 1), se recomienda la utilización de un Lavado Cáustico, Lavado con Agua de Proceso, Secador de Sal y Filtro de Arcilla.

En la medida que el contenido de azufre se modifique por un cambio en la dieta de crudos a procesar, se considerará en el futuro una unidad de hidrotreatmento.

Dada las características especiales de este combustible y la importancia del mismo en la rentabilidad del proceso, se hace necesario extremar las medidas y parámetros reglamentarios de operación para satisfacer las especificaciones de calidad del mismo en su entrega a mercado como producto terminado.

El petróleo crudo tiene en mayor o menor grado, dependiendo de su naturaleza y origen, un variado número de especies químicas indeseables que se transfieren a los productos, durante el proceso de destilación atmosférica. Las especies químicas indeseables que mayor impacto negativo tienen, sobre la calidad del JET son, los Compuestos de Azufre y los Ácidos Nafténicos.

Tienen propiedades tóxicas, como tales o cuando entran en combustión, liberando Óxidos de Azufre. Bajo determinadas condiciones pueden producir depósitos derivados del Azufre. También, generan procesos corrosivos, presentan olor desagradable y resultan ser un veneno para los catalizadores y adsorbentes, empleados en las unidades aguas abajo en el proceso.

Por esta razón se propone realizar esta investigación pues al introducir CNC en la dieta el contenido de impurezas aumenta, por lo que se modifican las características de la fracción de turbocombustible que se obtiene en la destiladora. Por lo que es necesario determinar el proceder para lograr un combustible de aviación con los requerimientos establecidos para su comercialización.

2.2 Descripción del proceso tecnológico de la Sección 100.

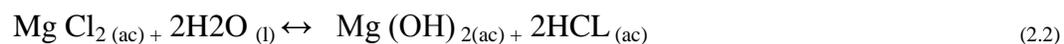
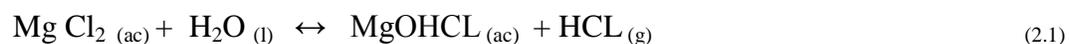
La Sección 100 está destinada para el procesamiento del petróleo no estable tipo *Romashkino*. Como resultado del proceso tecnológico se obtienen fracciones, algunas de las cuales después de mezclarlas constituyen la alimentación para otras secciones de la Planta Combinada o los componentes al mezclar los productos terminados.

El proceso se verifica en dos etapas: desalación eléctrica y destilación atmosférica.

2.2.1 Desalación eléctrica.

El petróleo que viene de la planta contiene las sales hasta 300mg/l. El agua contenida en el petróleo (hasta un 1% p/p) con sales disueltas en ella, esencialmente con cloruros, no solamente constituye una impureza, sino que provoca una fuerte corrosión en los equipos del proceso y empeora la calidad de los combustibles que son inyectados para los procesos catalíticos. (Gonzalez Mazorra Yosvany, 2002)

Al calentar el petróleo en el cual existen pequeñas trazas de agua tiene lugar la hidrólisis intensa de cloruros con el desprendimiento del agente fuerte de corrosión del cloruro de hidrógeno, como se muestra en las siguientes reacciones:



Aumentando la temperatura la velocidad de hidrólisis del cloruro aumenta considerablemente. De los cloruros contenidos en el petróleo el que se hidroliza más fácilmente es el cloruro de magnesio, luego sigue el cloruro de calcio y el cloruro de sodio que se hidroliza con más dificultad en comparación con los restantes.

Para evitar la corrosión de cloruro de hidrógeno de los aparatos de la Sección 100 se prevé el suministro al petróleo desalado de la solución al 1% de álcali, de la solución al 2% de cobre-amoniaco (Kronoks "C") y de la solución al 2% del inhibidor de corrosión (NkG-2-2) a las líneas de reflujo de tope y a las líneas de tope de las columnas de la unidad de destilación atmosférica.

Para extraer las sales todo el petróleo se somete a la desalación. Para ello el petróleo se mezcla con intensidad con el agua dulce en los mezcladores y la emulsión formada entre el agua y el petróleo se destruye y se dispersa en un campo eléctrico de los electro deshidratadores. La destrucción más rápida y completa de las emulsiones de petróleo se alcanza al calentar el petróleo con el empleo del reagente efectivo, solución al 2% del desemulsionante (progalita).

La desalación del petróleo se efectúa por un esquema de dos etapas. El enfriamiento del agua se efectúa en el enfriador de aire hasta 55°C y luego en el enfriador de agua hasta 40 °C y el petróleo desalado y deshidratado va a la destilación atmosférica.

2.2.2 Destilación atmosférica.

La destilación del petróleo se efectúa por un esquema de dos torres. La gasolina no estable que se obtiene como resultado de la destilación atmosférica fluye a la torre de la destilación secundaria donde por la parte superior se extrae la fracción PIE 70°C y por el fondo la gasolina estable 70-120°C. (Gonzalez Mazorra Yosvany, 2002)

Producto de la destilación atmosférica en la segunda torre compleja se extraen los cortes laterales:

Fracciones: 120-180°C, 180-230°C, 230-270°C, 270-350°C.

Los primeros tres chorros se dirigen a cada una de las torres de despojamiento con el fin de despojar las fracciones ligeras. Cada una de las secciones de la torre compleja tiene una carga distinta de vapor, de líquido y de números de reflujo. Al tope de la torre compleja se inyecta el reflujo profundo. Esta torre tiene tres reflujo de circulantes. Mediante el aprovechamiento de su calor se mejoran los índices energéticos del proceso. Mezclando las fracciones se obtiene el inyectivo para los procesos secundarios de la Planta Combinada. (Lengiproneftequim, 1985)

- ✘ La fracción 70-180°C es el inyectivo de la sección 200. (Reformación catalítica)
- ✘ La fracción 120-230°C es el inyectivo de la sección 300-2PT. (HDS. Hidrodesulfuradora)
- ✘ La fracción 120-270°C es el inyectivo de la sección 300-2KO.
- ✘ La fracción 180-350°C es el inyectivo de la sección 300-1.(HDS)
- ✘ La fracción no estable PIE 70°C va a la sección 400. (Fraccionamiento de gases)
- ✘ El residuo atmosférico (fracción > 350°C) extraído del fondo de la torre compleja va al parque intermedio de almacenaje para mezcla con el fin de obtener un producto terminado.

En el Anexo 4 se muestra el diagrama de flujo de esta sección.

2.2.2.1 Caracterización de la destilación atmosférica de la T-102.

La línea que va al horno F-101/T-102, proveniente de la descarga de la bomba P-102/R se divide en tres para alimentar a cada sección de dicho horno. Por la línea proveniente del horno F-101/T-102 es alimentado por dos líneas el petróleo desgasolinado (fondo de T-101) a una temperatura de 354°C y una presión de 6,2 Kgf/cm² a la torre de destilación atmosférica T-102, en el plato 6. (TIVENCA, 2007) (Ver anexo 4 página 2)

Tope de la torre T-102.

En la línea de salida del tope y en la línea de reflujo de la torre T-102, se inyecta al 2% inhibidor de corrosión, procedente del bloque de reactivos.

Por el tope de la torre sale la fracción pie 120°C hacia los enfriadores de aire 2, 3,4-A-102 a una temperatura de 114°C y a una presión de 1,7 Kgf/cm². Esta fracción se enfría hasta una temperatura de 55°C y va al tambor de reflujo del tope T-102 (D-104).

Desde el tambor de reflujo (D-104), se succiona el producto a través de la bomba de reflujo a la T-102 (P-106/R), cuya descarga va al enfriador por aire 1-A-102, y de allí pasa al intercambiador, pie 120°C (E-110). Posteriormente sale de allí hacia el tope de la torre. En este tambor de reflujo D-104, el agua sulfhídrica se descarga hacia el enfriador E-120.

En el tambor D-104, el exceso va hacia el enfriador por aire 3-A-101. Luego pasa al enfriador (E-109) y la salida de este enfriador va al tambor D-105.

Fracciones de la Torre T-102.

De la torre T-102, se extraen tres cortes laterales:

- ✓ La Fracción 120-180°C, se extrae por los platos 45 y 47 y va a la parte superior de la primera sección de la torre despojadora T-103 a una temperatura 134 ° C y a una presión de 1,7 Kgf/cm².

- ✓ La Fracción 180-230°C, se extrae entre los platos 34 y 36 y va a la parte superior de la segunda sección de la torre despojadora T-103 a una temperatura 19 °C y a una presión de 1,7 Kgf/cm².
- ✓ La Fracción 230-270°C, se extrae entre los platos 22 al 24 y va a la parte superior de la tercera sección de la torre despojadora T-103 a una temperatura 252°C y a una presión de 1,8 Kgf/cm².
- ✓ La Fracción 270-350°C, se extrae entre los platos 12 al 14 y va a la succión de la bomba P-110/R, a una temperatura de 313°C y una presión de 1,8 Kgf/cm². La descarga de dichas bombas se ramifica en dos líneas que van a los 1,2-E-105, en el segundo banco de intercambiadores para ceder calor al crudo desalado. El flujo de esta fracción, va hacia los enfriadores por aire A-107 y A-109, para luego ir al nudo mezcla de la sección 100.

Reflujos circulantes de la torre T-102.

De la torre T-102, se extraen tres reflujos circulantes, los cuales se aprovechan para ceder calor en el I banco de intercambiadores y así precalentar el crudo, antes de su desalación.

✓ El primer reflujo circulante, se extrae por el plato 43 y es succionado por la bomba P-111/R, con una temperatura de 169°C y una presión de 1,7 Kgf/cm². La descarga de la misma va al intercambiador 2-E-101 y posteriormente va al intercambiador 1-E-101. Posteriormente va a dos secciones del enfriador A-111, para luego retornarlo a la torre T-102 en el plato 45 con una temperatura de 70°C. De acuerdo a la temperatura que trae esta fracción, la misma podrá pasar o no por el enfriador por aire A-111.

✓ El segundo reflujo circulante, se extrae por el plato 32 y es succionado por la bomba P-112/R, con una temperatura de 216°C y una presión de 1,8 Kgf/cm². La descarga de la misma va al intercambiador 2-E-102 y posteriormente va al intercambiador 1-E-102. Posteriormente va a una sección del enfriador A-111, para luego retornarlo a la torre T-102 en el plato 35 con una temperatura de 70°C. De acuerdo a la temperatura que trae esta fracción, la misma podrá pasar o no por el enfriador por aire A-111.

✓ El tercer reflujo circulante, se extrae por el plato 21 y es succionado por la bomba P-113/R, con una temperatura de 290°C y un presión de 1,8 Kgf/cm². La descarga de la misma va a intercambiador 2-E-103 y posteriormente va al intercambiador 1-E-103. Posteriormente va a una sección del enfriador A-106, para luego retornarlo a la torre T-102 en el plato 22 con una temperatura de 100°C. De acuerdo a la temperatura que trae esta fracción, la misma podrá pasar o no por el enfriador por aire A-106. La línea de salida de la fracción 230-270°C va hacia el nudo de mezcla.

Fondo de la torre T-102.

Por el fondo de la torre (T-102), sale el crudo reducido a una temperatura de 344°C y a una presión de 1,8 Kgf/cm² hacia la entrada del segundo banco de Intercambiadores y se ramifica en dos líneas, una línea entra en el 3-E-106, pasando posteriormente por el 2E-106 y 1E-106, la otra línea entra al 6E-106, pasando posteriormente por el 5E-106 y 4E-106.

A la salida de los intercambiadores 1,6-E-106, se dirige al primer banco de intercambiadores para ceder calor en contracorriente, al crudo que se precalienta en serie en los intercambiadores 1,2-E-104. Luego el crudo reducido sale hacia los enfriadores por aire 1,2 A-108, los cuales trabajan en operación normal en serie aunque dependiendo de la condición del crudo reducido tienen la facilidad de trabajar en paralelo. La salida de estos enfriadores se dirige al patio de tanques en el Título 29. (Gonzalez Mazorra Yosvany, 2002)

2.3 Caracterización de la materia prima y productos finales.

Para el desarrollo de esta investigación se recopilan los resultados de los ensayos de laboratorios correspondientes a las corrientes de salida de la T-102, fracción 120 – 230 °C, para caracterizar las corrientes de procesos y utilizar esta información en la validación y evaluación de la planta para el caso en estudio. Se utiliza la composición del producto en tanques terminados para caracterizar el producto final que va a mercado.

Capítulo II. Diseño Metodológico.

Se toman además los datos de diseño del reglamento tecnológico del proyecto ruso al no estar la planta hidrofinadora funcionando para validar los resultados del software así como las especificaciones de calidad establecidas en el reglamento nacional para los combustibles de aviación.

La inclusión del CNC en la dieta a procesar trae consigo cambio de composición apreciables en el inyector a planta tal como se muestra en la tabla 2.1 donde se resumen los parámetros de calidad de cada una de las materias primas que pasarían por la unidad de hidrotreamiento: por diseño, para la mezcla actual 28^o API y para la inclusión de crudo nacional en la dieta actual.

Tabla 2.1 Parámetros de calidad de la fracción 120 – 230^o C.

Parámetros de calidad	Diseño HDS	Mezcla 28^o API	Mezcla 28^o API + Crudo Nacional	DEF STAND 91-91.2005
Densidad a 20 ^o C, g/cm ³	0,8050	0,8221	0,8239	0.775-0.840
Contenido de Azufre, % p/p	Hasta 0,7	0,122	0,41	0.3 máx.
Punto de humo, min	21,5	0.0485	0,0128	25
Contenido de impurezas mecánicas	Falta	Falta	Falta	1 máx.
Acidez, mg KOH/ml	2,7	0,0193	-	0.015
Contenido de mercaptanos, % m/m	-	3,8485	-	0.003 máx.
Contenido de aromáticos, % v/v	-	20,48	20,74	25

Los datos de diseño fueron tomados del (Reglamento tecnológico de la Sección 300-2PT).

La caracterización de los libros de crudo llega a productores y compradores mediante los denominados ASSAYS, los cuales nos brindan una información detallada del crudo que se

pretende emplear pues en las refinerías se realizan los análisis más importantes para comprobar el régimen tecnológico, los utilizados en este trabajo se pueden encontrar en los Anexos 2 y 3. En la tabla 2.2 se hace un resumen de la caracterización de los crudos que se proponen procesar en este trabajo.

En el Anexo 5 muestra resultados de varios tipos de yacimientos de crudo cubanos donde se lo cual concuerda con la caracterización del crudo que se muestra en la tabla 2.1 en cuanto a porcentaje de azufre total y grados API.

Tabla 2.2 Parámetros de calidad de los crudos propuestos como materia prima.

Caracterización de la Materia Prima	Mezcla	28^o API	CNC
Gravedad Especifica 60/60 ^o F	0,8866		0,9916
Gravedad Especifica API A 60 ^o F	28		11,2
Contenido de Azufre, % masa	1,27		8,05
Punto de fluidez, ^o C	< - 42		0
Contenido de parafinas, % P			0,48
Factor de caracterización KUOP	11,7		11,3
Numero de neutralización, mg KOH/g	0,21		1,27
Punto de inflamación, ^o C	< -30		48
Presión de vapor REID 100 ^o F.psi	5,09		3,85
Asfaltenos	3		16,9
Cloruros inorgánicos, ppm P/P	<1		538
Contenido de Sales, ptb			> 150
Cenizas, % P	0,0175		0,1132
Vanadio, ppm P/P	71		86
Níquel, ppm P/P	17		46
Sodio, ppm P/P	< 5		274
Hierro, ppm P/P	< 5		8,49
Silicio, ppm P/P	No		< 10
Aluminio, ppm P/P	No		< 5
Nitrógeno, ppm P/P	2400		3393
Residuos de Carbón, % P	5,64		11,67

En este trabajo el análisis de las calidades de los productos tanto: materia primas, productos intermedios y terminados es fundamental para las acciones posteriores a realizar para la evaluación del esquema de refinación por lo que en la tabla 2.3 se muestran los valores de azufre total para cada caso el cual se considera es el objetivo principal para garantizar la calidad del producto final por las consecuencias anteriormente mencionadas que traen consigo estos compuestos.

Tabla 2.3 Parámetros de calidad del Producto hidrofinado.

Parámetros de calidad	Diseño HDS	Mezcla 28^o API	Mezcla 28^o API + CNC (PIMS)
Densidad a 20 ^o C, g/cm ³	0,8050	0,8221	0,8239
Contenido de Azufre, % m/m	0,05	0,03	0,04
Contenido de impurezas mecánicas, mg/l	Falta	Falta	Falta

2.4 Metodología para la evaluación del esquema de refinación.

Para la realización de este trabajo se decide utilizar el PIMS como herramienta matemática para conformar el modelo de programación lineal, encaminado a:

- ✘ La evaluación de cambios en la alimentación en las unidades de proceso.
- ✘ Optimización del margen de refinación.

Tomando estos dos aspectos se propone realizar el análisis del impacto en la producción de Turbo combustible Jet A-1 con la introducción del CNC en la Refinería a partir de los datos aportados por el Software Aspen PIMS.

Se decide realizar la comparación de los diferentes casos en la Refinería, se toma como caso base el esquema actual de refinación con la dieta de crudo Blend 28, (Mezcla 88 % Mesa 30 – 12% Mery 16). Y se utiliza el Software ante las siguientes variantes:

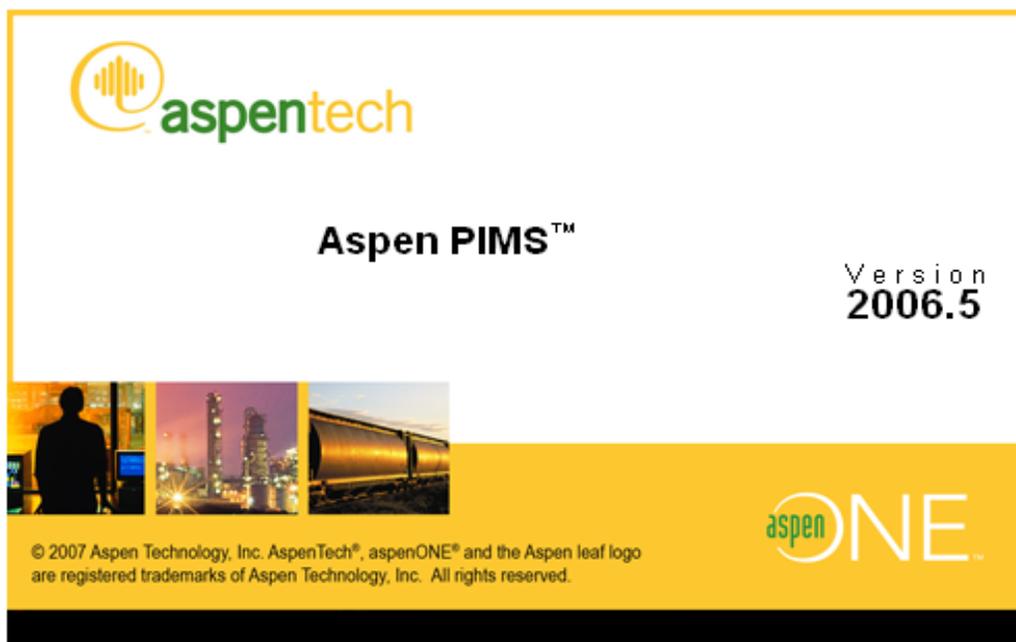
1. Esquema actual con la dieta, 80 % Blend 28, Mesa 30-Mery 16 + 20% Crudo Nacional.
2. Esquema actual + Sección 300 - 2 KO con la dieta, 80 % Blend 28, Mesa 30-Mery 16 + 20% Crudo Nacional.

Las características de la fracción 120 – 230 ° C obtenida actualmente en la destilación atmosférica permite el tratamiento Merox por lo que el esquema de refinación actual garantiza las especificaciones de calidad según el reglamento nacional para los combustibles de aviación.

2.4.1 Pasos a seguir para la evaluación con el Aspen PIMS.

Para llevar a cabo el propósito de este trabajo se siguen los siguientes pasos.

En la empresa se utiliza la siguiente versión del Aspen PIMS.



Paso 1.

Acceso al programa, página principal del mismo.

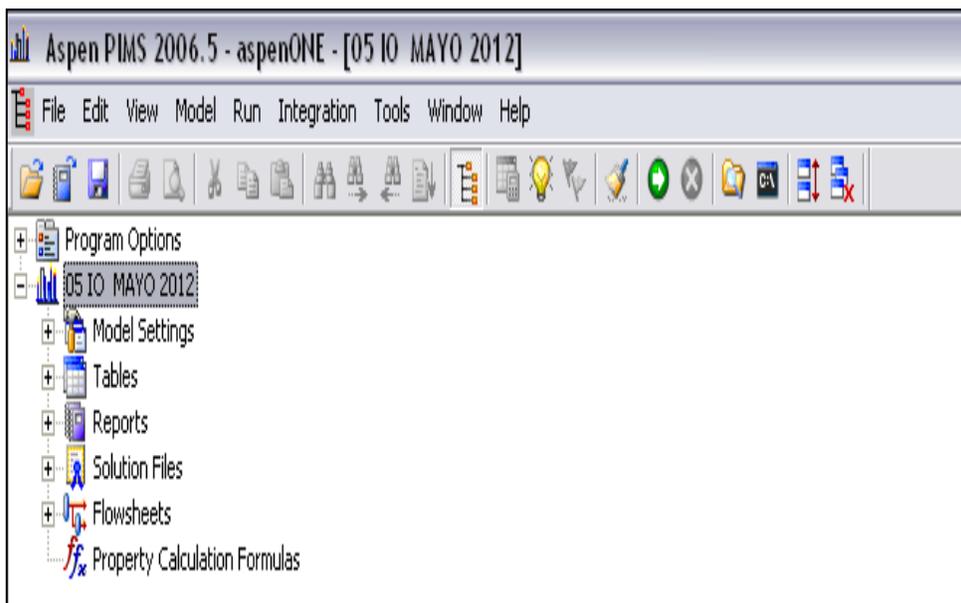


Figura 2.1 Página principal del PIMS.

Se escoge la opción con la cual se desea comenzar a trabajar, en este caso seleccionamos la opción *Tables* de la Figura 2.1 la cual se emplea para suministrar datos de entrada al PIMS. Está constituida por un conjunto de tablas que describen los aspectos económicos y la tecnología de los procesos que conforman un determinado complejo industrial. Las tablas del PIMS pueden definirse, modificarse y actualizarse por el usuario antes de la corrida del modelo. La elaboración de las mismas presenta la siguiente la codificación:

- ✗ Identificación de las corrientes: Código de tres letras definido por el usuario (XXX).
Identificación de las unidades de proceso: Código de tres letras definido por el usuario (YYY).
- ✗ Ecuaciones de balance de masa en peso: WBALXXX, código formado por dos partes; “WBAL” que significa balance en peso y “XXX” código de la corriente.
- ✗ Ecuaciones de balance de masa en volumen: VBALXXX, código formado Por dos partes;”VBAL”, significa balance en volumen y “XXX” código de las corrientes.

- ✘ Restricciones de capacidad: CCAPYYY, código formado por dos partes; “CCAP” más “YYY” código correspondiente a la restricción del consumo de capacidad.

Paso 2. Ejemplos de Nomenclatura a utilizar en el modelo.

Se define la nomenclatura para cada una de las corrientes que se utilizan en el programa.

CNC	Crudo Nacional Cubano
LPG	Gas Licuado del petróleo
URG	<i>Unleaded Gasoline</i>
LRG	<i>Leaded Gasoline</i>
JET	Kero/Jet
DSL	Diesel
LSF	<i>Low sulfur fuel oil</i>
HSF	<i>High sulfur fuel oil</i>
FLR	Fuel to flare, foeb
SUL	<i>Sulfur, wt%</i>
LN1	<i>Lt st run naphtha</i>
MN1	<i>Hv St Run Naphtha</i>
HN1	<i>Nap Swing</i>
LD1	<i>Light distillate</i>
MD1	<i>Mid Distilate</i>
HD1	<i>Heavy dist</i>
AR1	<i>CR1 atm btms</i>
H2S	<i>H2 sulfide, foeb</i>
KER	<i>Hydrotreated kero</i>
CCS	<i>Cat slurry</i>
PGA	<i>Polynafta Gasoline</i>
PGO	<i>Polynafta Gasoil</i>
C2=	<i>Ethylene, foeb</i>

HYH	<i>Hydrogen, foeb</i>
HCL	<i>Lt hydrocrackate</i>
HLD	<i>Hydrocracker kero</i>

Paso 3. Opción *Distillation*.

Se escoge dentro *Tables* la opción *distillation* en la figura 2.2. la cual permite transferir los datos de la destilación de los ensayos al resto de los procesos secundarios en el modelo de la refinería.

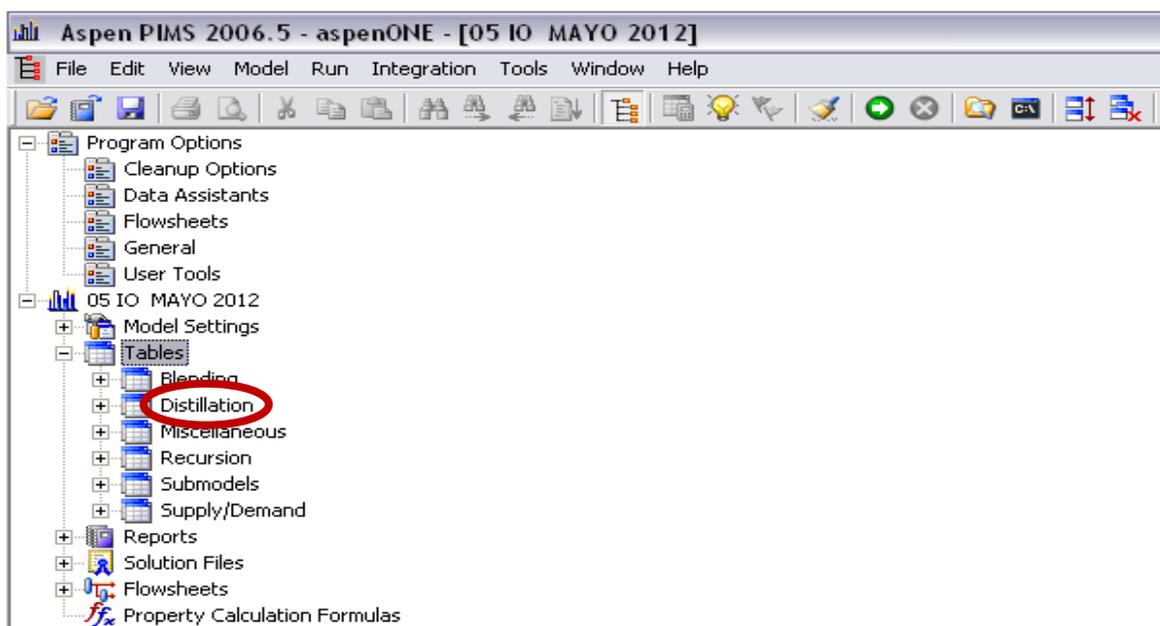


Figura 2.2 Tablas de Destilación.

Al desplegar las tablas de destilación se encuentran las siguientes opciones de tablas:

- ✘ ASSAYS: Tablas de ensayos de crudos.
- ✘ CRDDISTL: Definición de unidades lógicas.
- ✘ CRDCUTS: Esquema de cortes y segregaciones.
- ✘ ASSAYLIB: Tablas múltiples de ensayos de crudos.

A continuación se muestra el despliegue de las tablas que conforman la destilación en las Tablas 2.5, 2.6, 2.7 respectivamente.

Capítulo II. Diseño Metodológico.

Se crea la tabla ASSAYS: Se utiliza para proveer información de la destilación de cada crudo al modelo. La información se refiere a las diferentes corrientes de la destilación, rendimientos y propiedades.

La tabla de la biblioteca de crudos se crea con el objetivo de tener esta información por si se necesita para otro estudio.

Tabla 2.5 Tabla de ASSAYS Para caso de estudio.

* TABLE	ASSAYS	Crude Unit Data		
	TEXT	M30	M16	CNC
*				
*	Reported API Gravity	29.50	15.90	11.20
*	Calc API Gravity	29.36	25.45	11.62
*				
*	Reported Spec Gravity	0.8789	0.9600	0.9916
*	Calc Spec Gravity	0.8797	0.9016	0.9887
*				
*	Reported Sulfur, wt%	1.04	2.71	8.05
*	Calc Sulfur, wt%	0.000	0.00	0.00
*				
VBALNC1	Methane	0.0001	0.0000	0.0000
VBALNC2	Ethane	0.0001	0.0000	0.0000
VBALNC3	Propane	0.0039	0.0009	0.0000
VBALIC4	Iso Butane	0.0031	0.0012	0.0001
VBALNC4	N Butane	0.0075	0.0029	0.0004
VBALLN1	Lt St Run Naphtha	0.0253	0.0253	0.0087
VBALMN1	Hv St Run Naphtha	0.0713	0.0713	0.0313
VBALHN1	Nap/Ker Swing	<u>0.1091</u>	<u>0.1091</u>	0.0571
VBALLD1	Lt Distillate	0.1062	0.1062	0.0559
VBALMD1	Mid Distillate	0.0517	0.0517	0.0273
VBALHD1	Hv Distillate	0.1826	0.1826	0.1031
VBALAR1	Atmos Resid	0.4434	0.4434	0.7161
VBALLL1	L Lt Vac Gas Oil	0.0270	0.0411	0.0145
VBALLV1	Lt Vac Gas Oil	0.1270	0.1379	0.0893
VBALHV1	Hv Vac Gas Oil	0.1195	0.1157	0.1051
VBALVR1	Vac Resid	0.1811	0.3905	0.5074

Capítulo II. Diseño Metodológico.

En la Tabla 2.6 se especifican los cortes de la destilación, donde se agrupan las corrientes por:

- 0: Finales ligeros a las plantas.
- 1: destilados medios
- 2: residuos de la destilación atmosférica.
- 3: residuos de vacío.

Tabla 2.6 Tabla de CRDCUTS Para caso de estudio.

* TABLE	CRDCUTS	STANDARD CUTTING SCHEME AND PRODUCT POOLING				
*	TEXT	TYPE	CR1	!CR2	***	
NC1	Methane	0	1	1		Atmos Light Ends to Gas Plant
NC2	Ethane	0	1	1		Atmos Light Ends to Gas Plant
NC3	Propane	0	1	1		Atmos Light Ends to Gas Plant
IC4	Iso Butane	0	1	1		Atmos Light Ends to Gas Plant
NC4	N Butane	0	1	1		Atmos Light Ends to Gas Plant
LN1	C5-180 Lt Naphtha	1	1	1		Atmos Tower Cut
MN1	180-350 Md Naphtha	1	1	1		Atmos Tower Cut
HN1	350-400 Nap Swing	1	1	2		Atmos Tower (Swing) Cut
LD1	400-550 Light dist	1	1	1		Atmos Tower Cut
MD1	550-600 Mid Distilate	1	1	1		Atmos Tower Cut
HD1	550-650 Heavy dist	1	1	1		Atmos Tower Cut
AR1	650+ Atm Bottoms	2	1	2		Atmos Tower Cut
LL1	650-950 Lt vgo	3	1			Vacuum Tower Cut
LV1	650-950 Lt vgo	3	1	2		Vacuum Tower Cut
HV1	950-1050 Hv vgo	3	1	2		Vacuum Tower Cut
VR1	1050+ Vac Resid	3	1	2		Vacuum Tower Cut
*COK	Process coke	9	1	1		Deferred Cut

En la tabla 2.7 CRDDISTL contiene la composición de la materia prima a utilizar, las unidades de destilación (Atmosférica y/o vacío) y los consumos para dichas unidades.

Tabla 2.7 Tabla de CRDDISTL Para caso de estudio

* TABLE	CRDDISTL	CRUDE DISTILLATION	
		MAP	
	TEXT	CR1	!CR2
*			
	Estimated Crude Slate:		
ESTM30	Est'd charge M30	91.0	1.0
ESTM16	Est'd charge M16	9.0	
ESTCNC	Est'd charge BAC	1.0	
*ESTARH	Est'd charge ARH	0.0	
*ESTTJL	Est'd charge TJL	10.0	1.0
*ESTNCR	Est'd charge NCR	1.0	1.0
*	Tower Mapping:		
ATMTWR	Physical ATM tower	1.0	2.0
VACTWR	Physical VAC tower	1.0	1.0
	Utilities (Atmos):		
ATMFUL	FUL ATM tower	0.0417	0.0417
ATMKWH	KWH ATM tower	0.7931	0.7931
ATMSTM	STM ATM tower	0.0064	0.0064
*	Utilities (Vacuum):		
VACFUL	FUL VAC tower	0.0036	0.0036
VACKWH	KWH VAC tower	0.6368	0.6368
VACSTM	STM VAC tower	0.0217	0.0217

Paso 4. Opción SubModelos.

Esta tabla contiene una lista de todas las unidades de procesos y/o mezclas construidas por el usuario que requieran ser consideradas por el PIMS. Los nombres de las filas son de la forma SXXX donde S significa el submodelo y XXX los códigos para identificar cada proceso. Se definen además:

- Capacidad de cada unidad. Tabla CAPS.
- Consumos.
- Rendimientos/Componentes.

Como su nombre lo indica en la tabla 2.8 se define las capacidades de las unidades de procesos relacionadas con el modelo en estudio.

Tabla 2.8 Tabla de capacidad asociada al caso de estudio.

*TABLE CAPS		PROCESS CAPACITIES	
	TEXT	MIN	MAX
*	Crude Units:		
CAT1	Crude unit #1 BPD	0	65
*	Major Process:		
CNHT	Naph Hydrotrt BPD	8.755	9.812
CREF	Reformer BPD	0	23
CKHT	Kero Hydrotrt BPD	0	7
CDHT	Dist Hydrotrt BPD	0	15.095

Para definir los componentes de las corrientes y los consumos específicos de la unidad se crea la tabla 2.9 dentro de los submodelos.

Tabla 2.9 Tabla de consumos/componentes asociada al caso de estudio.

		KERO		
* TABLE	SKHT	HYDROTREATER		
*				
	TEXT	BAS	SUL	
*				
FREE	Free up adjustor			1
* Material Balance:				
VBALLD1	Lt distillate			
VBALHYL	Hydrogen, foeb	0.0420		0.0007
VBALH2S	H2 sulfide, foeb	-0.0033		-0.0002
VBALNC5	N Pentane	-0.0120		
VBALKER	Hydrotreated kero	-0.9862		0.0005
*	Balance check	-0.9595		1.0010
* Control Rows:				
ECHGKHT	Feed charge	1		
ESULKHT	Sulfur	1		0.5
* Capacity Rows:				
CCAPKHT	KHT Cap Usage, Bbl			
* Utilities:				
UBALFUL	Fuel mambrú	0.0085		
UBALKWH	Power kwh	1.7100		
UBALSTM	Steam mlbs	0.0069		
UBALH2O	Cooling water mgal	0.0013		
UBALCCC	Cat+chem \$	0.0398		

La opción de submodelo incluye las tablas *BUY* y *SELL*, las cuales se describen a continuación.

- Tabla *BUY*(Compras)

Esta tabla se muestra en la Tabla 2.10, en ella se listan todos los insumos que deben ser comprados por la industria, cada uno de los cuales se identifica con un código de tres letras elegido por el usuario y definido por él mismo en la columna *TEXT*. Las columnas MIN, MAX y FIX contienen las limitaciones en cuanto a la cantidad de producto a comprar expresada en miles de unidades de peso o volumen; cualquier entrada en la columna FIX equivale a decir que la limitación mínima es igual a la máxima e igual a ese valor. La columna COST indica el costo de cada uno de los insumos.

Tabla 2.10 Tabla de Materias Primas para el Caso en estudio.

Materias Primas		Unidad	U/d	Mínimo	Máximo	\$/Unidad	\$/Día
M30	Mesa 30	Bbl					
M16	Merey 16	Bbl					
CNC	Crudo Nacional	Bbl					
	Total Crudo						
	Total						

- Tabla *SELL*(Ventas)

Tiene el mismo formato que la tabla *BUY*, con la diferencia que los códigos identificados en *SELL* representan a los productos finales destinados al mercado interno y de exportación, según la cantidad mínima, máxima o fija a producir por el modelo. Es importante destacar que cuando se coloca un cero en la columna MIN y un 500 en la columna MAX, para un determinado insumo o producto, se le da libertad al modelo de comprar o producir la cantidad necesaria para optimizar económicamente el proceso; entonces se dice que dicho material está “abierto”. Se muestra en la Tabla 2.11 Tabla de ventas de productos.

Tabla 2.11 Tabla de Ventas de productos para el Caso en estudio.

Ventas de Productos		Unidad	U/d	Mínimo	Máximo	\$/Unidad	\$/Día
LPG	LPG	Bbl					
	Total LPG & Gases						
URG	Unleaded Regular	Bbl					
	Total Gasolina						
JET	Kero/Jet	Bbl					
DSL	Diesel	Bbl					
	Total Destillados						
LSF	Fuel Oil de Bajo azufre	Bbl					
HSF	Fuel Oil de Alto azufre	Bbl					
	Total Fuel Oil						
	Total Sales						

Paso 5. Tabla de Recursión.

Las tablas de este renglón controlan los procesos de recursión considerados por PIMS para solucionar modelos que involucren problemas no lineales, como la recursión distributiva de propiedades.

Esta tabla permite el cálculo de propiedades inicialmente estimadas por el usuario donde el proceso se repite hasta que las propiedades calculadas se mantienen dentro de niveles de tolerancia deseados.

La tabla **PGUESS** sirve para dar un estimado inicial de la propiedad de una corriente, que depende de corrientes anteriores.

Durante la recursión el valor de la propiedad va a ser recalculado en cada paso de la optimización si la actividad de balance del pool excede el valor del error en la ecuación.

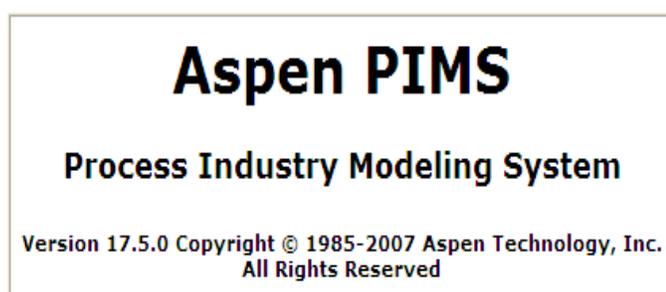
Tabla 2.12 Tabla PGUESS Propiedades de las corrientes del caso en estudio.

* TABLE PGUESS FOR MODEL 019									
ROWNAMES	SPG	SUL	RVP	RON	DON	D11	NPA	LUM	ARO
LN1	0.6829	0.0100	11.8454		64.1701	77.4164			
MN1	0.7659	0.0396					45.7097		16.0708
HN1	0.7986	0.0971					55.1662	56.9044	20.4759
HN2	0.7897	0.0500					40.7999	56.0000	20.9999
LD1	0.8311	0.3905						44.6579	21.6486
HD1	0.8662	0.9599							
AR1	0.9678	2.4667							
AR2	0.9517	2.8646							
LV1	0.9186	1.6647							
LV2	0.9156	2.1400							
HV1	0.9573	2.2386							
HV2	0.9478	2.6900							
VR1	1.0396	3.5369							
VR2	1.0245	4.2900							
COK		4.2360							
CCF		2.0639							
DTF	0.8364	1.2978							
RFT	0.7997			100.9988	95.4987	98.2988			
ALK	0.7000				94.4083	99.4084			
KTF	0.8312	0.3908						44.6305	21.6652
RFD	0.7631						53.0224		
C3M	0.5174								
C4M	0.5857								
DCX	0.8317	1.3434							

Este software tiene otras opciones de tablas las cuales se van creando e incrementando según sean necesarias para la corrida de cada modelo las cuales permiten realizar el cálculo de

propiedades a partir de datos iniciales, estos serán nuevamente calculados una vez corrido el modelo, además permite colocar en cada modelo restricciones ya sea por propiedades, características de la unidad y otros casos.

Una vez ejecutado el PIMS, se obtiene un reporte de salida del que se puede obtener información útil para la toma de decisiones permitiendo a los refinadores obtener dramáticos incrementos en la productividad de la operación, en la evaluación de alternativas optimizadas de utilización de dietas de crudos, lograr el óptimo en la cartera de productos obtenidos. El Reporte final de la evaluación con el Aspen PIMS es el que se muestra en la Figura 2.1



PIMS MODEL SOLUTION REPORT

Model: Modelo Cienfuegos EXP
Case: Esquema actual con 20% CNC

Obj Fn: 454,28
Solution Status: Optimal

Notes: Revised January 2008
Typical Refinery Model
Crude Units
Hydrotreaters
Cat Reformer
Hydrocracker
Cat Cracker
Alkylation Unit
Delayed Coker
Sulfur Plant

Figura 2.1 Reporte de Solución Modelo PIMS. Esquema actual con 20% Crudo Nacional Cubano.

A partir del cual se analiza la información obtenida para la toma de decisiones en cuanto a:

- Calidad de los productos finales.
- Rendimientos de los productos.
- Margen de refino.

2.5 Metodología para el análisis de mercado y las ventas de productos derivados del petróleo.

El mercado del petróleo es un mercado muy volátil dependiendo de múltiples factores que afectan el precio.

La autora coincide con (Orjuela et al, 2002) pues para realizar un análisis del mercado se hace una valoración del mismo con el objetivo de tener una visión global del mercado cubano de combustibles, se chequean las certificaciones de salidas y ventas del Jet A-1 en el periodo 2007 al 2015 y la proyección de las mismas para el 2016, según los datos de la tabla 2.4 se por analiza la demanda existente y el potencial de crecimiento, se buscan datos relacionados con las diferentes vías de salidas de Jet A-1, en el mercado interno desde la empresa y sus clientes potenciales, analizando cuál de ellas aporta el mayor volumen de salidas por concepto de ventas al mercado interno, además se realiza un análisis de la tendencia a partir del comportamiento de la demanda de Jet A-1 por concepto de producción de la refinería de Cienfuegos, según (www.makeanet.com, 2014) para seleccionar la línea de tendencia exponencial para lo cual se tiene en cuenta el comportamiento de la demanda.

Tabla 2.4: Demanda de Jet A-1 (2007-2016).

UM: Mton/año	Demanda Proyectada									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Jet A1										

2.6 Validación del modelo.

Para validar el modelo se analizan los esquemas propuestos, de forma tal que se comparan los resultados que pueden afectar el producto final con las especificaciones de calidad declaradas en el Reglamento Nacional para los combustibles de aviación, lo relacionado con el cambio de dieta incluyendo el rendimiento base y la composición del producto final.

A partir del problema de investigación detectado se propone el cambio de dieta para mejorar la rentabilidad de la empresa y reducir las pérdidas por lo que se decide evaluar el esquema de Refinación actual para este cambio. Se aplica para cada esquema la ecuación 2.1 para validar el modelo.

$$\%Error = \frac{\text{Proceso real} - \text{proceso simulado}}{\text{proceso real}} * 100 \quad (2.1)$$

El error calculado debe ser menor del 5 por ciento, para que el modelo se ajuste.

En este capítulo se puede llegar a la conclusión que las herramientas que utilizan para la evaluación de este trabajo responden a un conjunto de investigaciones sobre: competencia, clientes, demanda, oferta, características del entorno, vías de distribución, ventas del producto relacionadas a los rendimientos alcanzados en cada caso, promoción, precios, etc. Los datos recopilados, según suele suceder en el mercado del petróleo están sujetos a los cambios de escenarios en el momento que se desee aplicar las metodologías definidas en este capítulo, meritando un respectivo análisis posterior de los resultados.

Capítulo 3: Resultados y discusión.

En este capítulo se comparan los resultados obtenidos con el PIMS tanto en rendimiento, capacidad de la planta y calidad de los productos intermedios y finales, además se realiza un análisis de mercado para los casos propuestos, incluyendo el análisis de la demanda del producto en estudio, las vías de distribución y la validación del modelo propuesto.

3.1 Resultados del análisis de mercado.

La introducción del CNC en la dieta a procesar en la empresa trae consigo un aumento del porcentaje de azufre total en la Fracción de turbocombustible, de 0.122 a 0.40 % mm, lo cual se ve comprometida la producción de Jet A-1 pues el objetivo fundamental de la Planta Merox consiste en eliminar la acidez de la fracción de turbocombustible que se obtiene en la destilación para llevarla a los parámetros permisibles según se muestra en el Anexo 1, es decir 0.015 mg KOH/L mientras que se mantenga dentro de la norma el contenido de azufre total, el punto de humo y el contenido de aromáticos, expresados en % m/m. En el caso que se estudia, el contenido de azufre total en la fracción de turbo combustible sale de especificación por lo que esta es degradada a diesel, comprometiendo el mercado interno desde la Refinería de petróleo de Cienfuegos y por consiguiente un aumento de las importaciones de este producto en el país.

La refinería tiene un esquema de refinación del tipo *Hydroskimming* donde los valores de producción se comportan como se expresa en la figura 3.1 y el residuo atmosférico puede alcanzar valores cercanos al 50 % de la materia prima, dividiendo el resto entre los otros productos de mayor valor comercial.

En la figura 3.1 se muestra el comportamiento de los rendimientos de los productos derivados del petróleo para el caso base y cada uno de los casos propuestos.

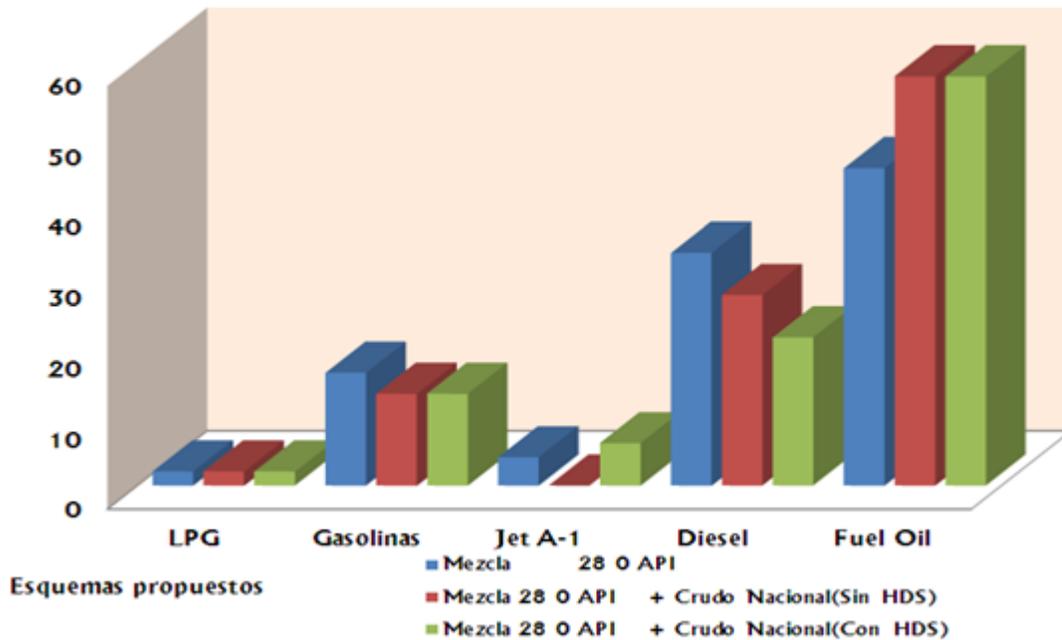


Figura 3.1 Grafico de los rendimientos de productos derivados del petróleo.

La autora coincide con (Orjuela et al, 2002) que al realizar un análisis de la demanda (existente, potencial de crecimiento y factores que inciden sobre la demanda) el comportamiento de la demanda de Jet A-1 de la Refinería, se muestra en la tabla 3.1 la cual aporta los datos de la comercialización del producto y su proyección en el periodo 2007 al 2016.

Tabla 3.1: Demanda de combustible proyectada (2007-2016).

UM: Mton/año	Demanda Proyectada									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Jet A1	370.1	377.5	385.1	392.8	400.6	1944.9	2025.1	2016.1	172906	239442

A partir de estos datos, utilizando la herramienta Microsoft EXCEL, se elabora el gráfico de la figura 3.1 donde se describe la tendencia de dicha demanda.

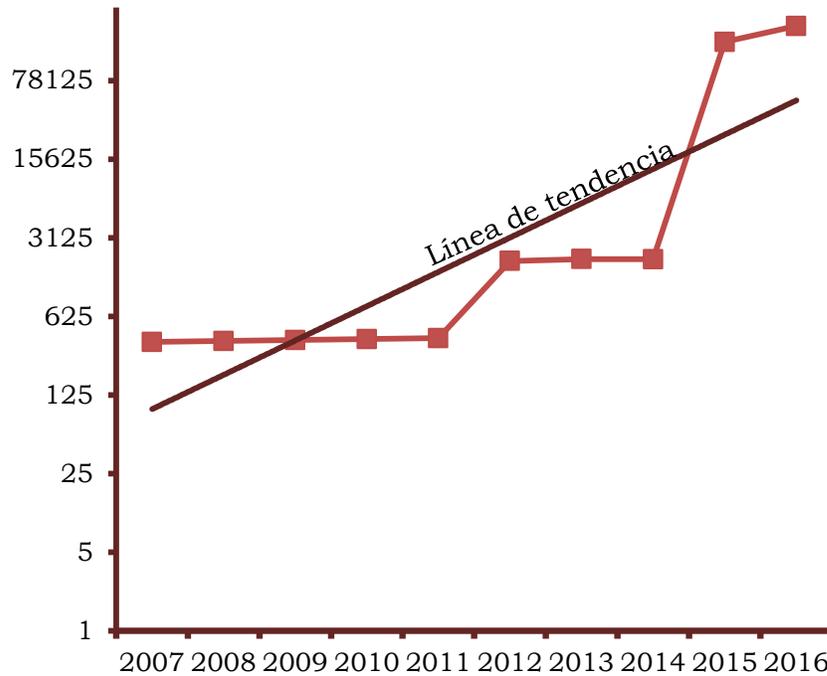


Figura 3.2 Demanda proyectada del Jet A-1.

La demanda del Jet A-1 para la producción de la refinería se puede clasificar como alcista, lo que demuestra el comportamiento ascendente de la misma como se muestra en la figura 3.1, en el periodo del 2007 al 2011 la demanda del Jet sufre un ligero incremento, debido a las garantías ofrecidas hasta el momento en la calidad del producto cumpliendo con las especificaciones establecidas, lo cual coincide con la reactivación de la refinería momento en el cual se inserta en el mercado nacional con este producto, otro factor que condiciona el incremento de la demanda lo constituye el alza del turismo internacional, y esto trae consigo un aumento del consumo del producto por un mayor tráfico aéreo en las terminales, por lo que la CUPET comienza a insertarnos en el mercado interno e influye en la disminución de las importaciones de este producto en el país, lo cual se muestra en la figura 3.1 como un incremento marcado en la demanda del producto hasta la actualidad.

Se puede afirmar que la demanda del producto es favorable para garantizar la producción de Jet A-1 en la Refinería Camilo Cienfuegos pues la misma constituye un factor importante en el mercado interno del país.

Al realizar el análisis de mercado se tiene en cuenta además el destino que alcanzan las producciones a través de la diversidad de los clientes finales del mismo y las vías de distribución.

El Jet A-1 como el resto de los productos de la refinería tiene como cliente potencial la Empresa Comercializadora de Combustibles de Cienfuegos, en lo adelante ECCC, a partir de ella los clientes finales son diversos comportándose como se muestra en la figura 3.2. Vías de distribución del Jet A-1.

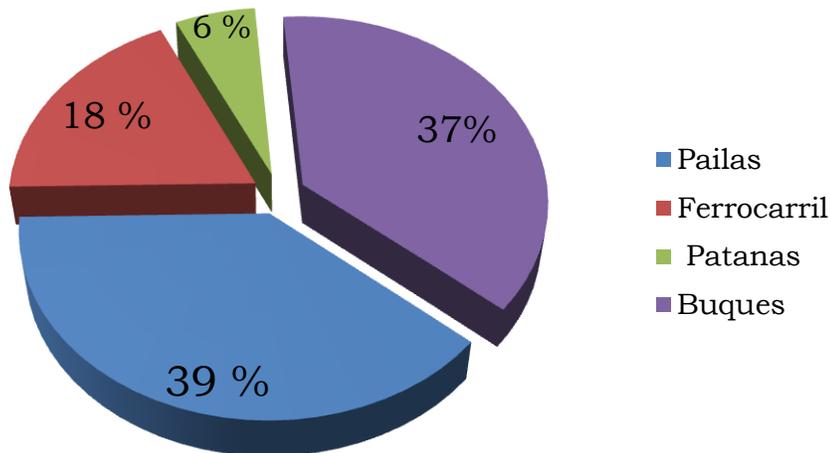


Figura 3.3 Vías de distribución del Jet A-1.

Como se puede observar en esta figura el mayor volumen de salidas de producto es a través de las pailas y los buques mediante ellos se distribuyen hacia el resto de las comercializadoras de Cupet (Habana, Matanzas, Nuevitas) o sea occidente, centro y oriente, abarcado todas las regiones de la isla.

3.2 Resultados del análisis de las ventas.

La actividad económica de una refinería, sea cual sea su esquema para el margen de refino, tiene como prioridad generar un beneficio que debe permitir, cubrir los gastos fijos y estructurales y su amortización, permitir la inversión en la propia estructura física de la refinería para mantener y adaptar, en cada momento, su esquema de refino a la demanda de venta de los productos residuales como el fuel oíl, para el resto de los productos dependerá del mercado. (Lluch, Urpi, Jose, 2008)

El margen de refinación, que no es más que la diferencia entre el costo de la materia prima y los ingresos generados en el proceso expresados sobre la base de un barril de crudo procesado, generalmente aumenta con un incremento de la complejidad del proceso, es decir de la profundidad de la conversión de petróleo crudo a productos refinados de mayor valor agregado.

Margen de Refino = Productos – Materia Prima – Costos de Operación. (3.1)

Expresado en \$/d se define como:

Productos= \sum Volumen de productos * Precio

Materia Prima= \sum Volumen de materia prima * Precio

Costos de operación = Gastos generados para la producción de un barril de crudo.

El análisis financiero relacionado con el esquema que se propone permite comparar diferentes escenarios o esquemas para el caso en estudio y cuyos resultados se muestran en la tabla 3.4 para una mejor comprensión de la información brindada por el PIMS, el mismo puede ser modificado si se produce un cambio de precios como es natural en el mercado del petróleo.

Tabla 3.2 Análisis de las ventas.

Parámetros	Actual Mezcla 28⁰ API	Mezcla 28⁰ API + CNC(Sin HDS)	Mezcla28⁰ API +CNC(Con HDS)
Materia Prima,\$/d	5,131.072	5,871.996	5,871.996
Ventas de productos,\$/d	5,223.059	6,345.348	6,355.596
Margen de Refino Bruto,\$/d	91987	473352	483601
Costos de Operación,\$/d	122436	317118	326280
Margen de Refino Neto,\$/d	- 30449	156234	157321

Actualmente el esquema de refinación opera con pérdidas pues no se explota al máximo al obtener de productos de menor valor comercial hasta un 50 por ciento de rendimientos por lo que el margen de refino es de – 30 449 \$/día.

El cambio de dieta aporta un incremento en los rendimientos de los productos de mayor valor agregado lo cual permite salir del estado de operación con pérdidas planificadas y lograr un margen de refino positivo de 156 234 \$/ día, lo cual se traduce como ventajoso para la economía de la empresa.

Los resultados que se muestran en la tabla 3.2 se traduce de la siguiente forma: La materia prima para el caso actual está compuesta por 88 por ciento de Mesa 30 y 12 por ciento de Merey 16 a una razón de 51 927 Barriles por día y para los casos propuestos esa razón se eleva a 65 000 barriles por día dividida en 74 por ciento Mesa 30, 6 por ciento de Merey 16 y 20 por ciento de CNC lo cual justifica el incremento del precio de la materia prima para el caso en estudio. Los rendimientos de los productos que se obtienen se pueden ver en la figura 3.1.

Los costos de operación se incrementan por la severidad de la composición de la materia prima, se acortan los periodos de regeneración del catalizador, los ciclos de limpieza y mantenimiento se acortan por lo que los gastos de materiales aumentan, mayor consumo de vapor y corriente eléctrica.

Como se puede apreciar esta información permite percibir que al utilizar un Crudo pesado a pesar de incrementarse los costos de operación e incluir la HDS se obtiene un incremento en el margen neto de refino de 1087\$/d para un mismo costo de materia prima.

En otras refinerías cuando se utiliza este tipo de crudos estos son sometidos a tratamientos previos para reducir su viscosidad lo cual permite un manejo favorable del producto y siempre va acompañado con un proceso de hidrotratamiento posterior para los destilados medios. Actualmente los crudos pesados y extrapesados no se refinan directamente sino que son procesados en los llamados mejoradores para llevar los °API hasta para metros favorables los cuales mejoran los precios y algunas de las características inherentes al producto.

3.3 Resultados de la validación del modelo.

El modelo en estudio en este proyecto está basado en la inclusión del crudo nacional dentro de la dieta de crudo a procesar en la instalación y el efecto que provocaría la misma en la producción de turbocombustible Jet A-1, producto de alto valor comercial cuya comercialización favorece grandemente la economía de la empresa. Al realizar la evaluación del modelo propuesto podemos tener como resultados preliminares los que se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Análisis de los parámetros de rendimiento y calidad del modelo en estudio.

Parámetros	Diseño	Mezcla 28⁰ API	Mezcla 28⁰ API +CNC(Sin HDS)	Mezcla 28⁰ API +CNC(Con HDS)
Productos, Bbl/d	2585	2,066	No hay fracción	2623
Azufre en materia prima, % m/m máximo	0,5	0,120	0,410	0,410
Azufre en producto final, % m/m máximo	0,05	0,120	0,410	0,040

Al evaluar el esquema el PIMS aporta los resultados que se muestran en la tabla 3.3 con el modelo propuesto no se obtiene producción de Jet A-1 pues la fracción que se obtiene por destilación directa tiene un 0.41 % m/m de azufre total, y el endulzamiento de la Merox no soluciona este parámetro fuera de especificaciones para comercializar el producto final y lo cual queda resuelto con la Hidrofinación que se obtiene un producto final con valores por debajo de la norma que es 0.3 % m/m.

A partir de los datos de esta tabla se hace un análisis comparativo de los resultados para validar el modelo según se muestra en la siguiente tabla 3.4.

Tabla 3.4 Análisis de datos para la validación del modelo.

Casos Propuestos	% Azufre en fracción		% Azufre en Jet A-1				Rendimientos		
	Real	Simulado	%E	Real	Simulado	%E	Real	Simulado	%E
Esquema actual con CNC	0.40	0.41	-2	0.40	0.41	-2	2066	0	100
Esquema actual con CNC + HDS	0.40	0.41	-2	0.042	0.04	4.8	2585	2623	-1

Se puede decir a partir de estos resultados obtenidos por el PIMS , que al introducir el CNC en la dieta actual desde el punto de vista de porcentaje de azufre total(% m/m), este valor está por encima del permisible por la norma y como se ha explicado anteriormente el proceso Merox no elimina azufre total sino que es un proceso de endulzamiento por lo que esto ratifica que no puede ser vendido como Jet A-1 con características comerciales, por lo que en este caso no se obtiene rendimiento de este renglón en la destilación y por lo tanto esta fracción será degradada a otro producto de menor valor comercial, el %Error calculado= 100 % al ser mayor al 5 % por lo que el modelo propuesto no se ajusta por lo que no queda validado.

Sin embargo al incluir en el esquema de refinación la Sección de Hidrotratamiento con desulfuración el parámetro relacionado con el % de azufre total en la fracción es 0.41 % m/m quedando por debajo del parámetro de diseño de la planta que es 0.5 % m/m y el producto hidrofinado que se obtiene queda con un porciento de azufre de 0.04 % m/m lo cual está por

debajo de lo establecido por la norma que es 0.3 % m/m máximo para ser vendido como Jet A-1, además según el resultado arrojado por el PIMS el rendimiento obtenido se ajusta al modelo propuesto pues el % Error calculado = 1 % en menor del 5 % por lo que queda validado este esquema.

3.4 Conclusiones parciales.

1. El modelo propuesto para este estudio no permite la obtención de Jet A-1 a partir de la introducción de CNC pues el tratamiento Merox instalado no permite la disminución del azufre total en la fracción 120 - 230 °C.
2. Según los parámetros de calidad obtenidos por el PIMS a partir de la mezcla del inyector con CNC es imprescindible la reactivación de la Unidad de Hidrotratamiento para garantizar las especificaciones de calidad requeridas para comercializar el producto final Jet A-1.
3. Al decidir la reactivación de la unidad de hidrotratamiento se debe tener presente la exclusividad de los equipos y sistemas relacionados con la producción y manipulación del Jet A-1 pues la promiscuidad de los mismo conllevan a incorporar agentes tensoactivos que disminuyen la tensión interfacial entre el combustible y el agua libre que pueda contener, lo que favorece la emulsión de ambos líquidos y se estabiliza la turbidez o suspensión que se forma al disminuir la capacidad coalescente del equipo separador de agua.

Conclusiones

1. Según los parámetros de calidad obtenidos por el Aspen PIMS, a partir de la mezcla del inyector con Crudo Nacional no es posible comercializar el producto final Turbocombustible Jet A-1 con el esquema de refinación actual.
2. La demanda de Jet A-1 en el mercado interno es favorable para planificar este proyecto.
3. La fracción 120-230 °C que se obtiene a partir de la incorporación de petróleos crudos cubanos pesados, con alto contenido de azufre, al ser hidrofinada en condiciones de baja severidad, permite obtener JET A-1, que cumple con los índices de calidad establecidos internacionalmente.
4. El rendimiento de la fracción 120-230 °C que se obtiene en la destilación puede ser procesado en la Sección 300 2-KO pues su capacidad de diseño lo permite.
5. Podemos decir que al utilizar un Crudo Nacional pesado e incorporar la Sección 300 2-KO en el esquema de refinación actual a pesar de incrementarse los costos de operación se reducen las pérdidas y se obtiene un incremento en el margen neto de refino de 1087\$/d para un mismo costo de materia prima.

Recomendaciones.

1. Implementar la propuesta de reactivación de la Unidad de Hidrotratamiento del Jet A-1 en la **Sección 300 2-KO** perteneciente a la Refinería Camilo Cienfuegos.
2. Aplicar esta propuesta en la modalidad de inversión de sostenimiento pues así se mantendría la Unidad de endulzamiento en funcionamiento hasta tanto se le dé puesta en marcha y la aceptación final a la Sección 300 2-KO sin interrumpir la producción de Jet A-1 a mercado.
3. Tener presente que al seleccionar equipos y materiales solamente se pueden utilizar los que están aprobados Nacionalmente por el Comité Técnico Asesor para los Combustibles de Aviación

Bibliografía

1. Abdel-Aal & Aggour. 2005. Petroleum and gas field processing. Marcel Dekker Inc.
2. Aguilar V, L et al. 2011. Caracterización físico*-química de crudos Cubanos de las estructuras en evaluación del Bloque IIA de la franja norte de crudos pesados. Cuba.
3. Albright, Lyle F. 2009. Albright's Chemical Engineering Handbook. CRC Press.
4. Aspen Technology . 2009. Disponible en web nc. <http://www.aspentech.com/product>. <http://www.aspentech.com/product>. [En línea] 2009. [Citado el: 24 de abril de 2012.]
5. Azofeita, C. 2003. Aplicación de Excel en la investigación de operaciones. Recuperado
Branan, C.R. 2006. Soluciones prácticas para el Ingeniero Químico. Mc Graw-Hill
6. Bechtel Corporation. ,1994. PIMS USER'S MANUAL Versión 7.00. U.S.A.
7. Cavado et al, 2004 Procesamiento de crudos pesados, aplicando la tecnología convencional de destilación atmosférica y de hidrocrqueo moderado "Mild Hydrocracking en la obtención de querosenos para la aviación.
8. Centro Politécnico del Petróleo, 1998. Manual de química y derivados del petróleo. La Habana.
9. Cortázar., Triana, C., Carro, D.2000. "Fundamentos de Destilación".
10. Disponible en web www.lacomunidadpetrolera.com//2346-Proceso-de-Refinación. (2010). www.lacomunidadpetrolera.com/.../2346-Proceso-de-Refinación. Obtenido de www.lacomunidadpetrolera.com/.../2346-Proceso-de-Refinación.
11. Ecopetrol. 2005. *Especificaciones mundiales del Jet A-1*. 2005.
12. Fraser, R. et al. 2008. Mass and Heat Transfer. Cambridge University Press
13. Fong, De Ruiz, 1996. El petróleo y su proceso de refinación. Panamá.
14. Gonzalez Mazorra Yosvany, 2002. Reglamento Tecnológico Sección 100. Cienfuegos.
15. Hernández, E. 2009. Optimización de los parámetros de operación de la Torre Debutanizadora instalada en la Planta Energas - Varadero. Tesis presentada en opción al título de Máster en Ciencias, Matanzas. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".

16. Kraus, R. S. 1998. Manual Proceso de Refino del Petróleo. En R. S. Kraus, *Petróleo y Gas Natural* (pág. página 3 hasta la 19).
17. Lluch, Urpi, Jose, 2008. Tecnología y margen de refino del petróleo. España.
18. Marcilla, D., Rivera, E., Aquino, L. y Gómez, W. 2001. Economía de Refinación. CUPET
19. Marín, J. 2006. Solver: la navaja Suiza de la programación lineal. Recuperado a partir de <http://jmingeneria.com/index.html/tabladecontenido.htm>
20. Martínez H et al, 2000. Simulación de procesos en ingeniería química.
21. Muñecas Vidal, M. Á. 2005. “Caracterización y tratamiento del crudo de petróleo”, *Ingeniería Química*, pág.87-93.
22. Orjuela et al, 2002. Guía del estudio de mercado para la evaluación de Proyectos. Santiago de Chile.
23. Parkash, S. 2003. *Refining Processes Handbook*.
24. Suarez, F. J. 2001. “Pluses and minuses of caustic treating” *Hydrocarbon processing*, Octubre.
25. Taha. A. 2014. *Investigación de Operaciones* (7ma Edición.). México: Prentice Hall.
26. TIVENCA, 2007. Filosofía de operación y control Sección 100
27. Treybal, R. 1999. *Operaciones con Transferencia de Masa*. Mc Graw Hill. Segunda edición. Nueva York, USA.
28. Varadi, T y France, E. 1999. *New Kerosene Mercaptan Oxidation Process, Hydrocarbon Technology International*. a partir de <http://www.una.ac.cr/mate/publicac/Excel.html>
29. Verruchi, E et al.2009. Como planificar la cadena de suministros de una refinería de petróleo.
30. Wauquier. 1998.

Anexo 1. Especificaciones de calidad del Turbocombustible Jet A-1(DEF STAN 91-91 ISSUE - 8 JUNE 2007 y LISTA DE CHEQUEO AFQRJOS “JOINT FUELLING SYSTEM CHECK LIST FOR JET A-1 ISSUE 21- JULIO 2006).

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO			
INDICE DE CALIDAD	U/M	METODO DE ENSAYO	VALOR ESPECIFICADO
1- Apariencia. 2-Color	-	ASTM-D 4176 ASTM-D 156 o ASTM-D 6045 ASTM-D 5452	Claro y Brillante (1) Reportar
3-Contaminación por Partícula en el punto de manufactura.	Mg/l	ASTM-D 5452	1.0 Máx. (2)
4-Acidez Total	mgKOH/g	ASTM-D 3242	0.015 máx.
5- Aromáticos ó	% v/v	ASTM-D1319	25.0 máx.
6-Aromáticos Totales	% v/v	ASTM-D 6379	26.5 máx.
7- Azufre Mercaptano o Prueba Doctor	% m/m	ASTM-D 3227 (3) ASTM-D 4952	0.0030 máx. negativa
8- Azufre Total	% m/m	ASTM-D 1266 (3) , D 1552, D 2622	0.30 máx.
9- Componentes Hidroprocesados	% v/v		Reportar (4)
10- Componentes Hidroprocesados con severidad	% v/v		Reportar (4)
11 - Destilación Inicial 10 % destilado 50 % destilado 90 % destilado Final Residuo Perdida	°C % v/v % v/v	ASTM-D 86	Reportar 205 máx. Reportar Reportar 300 máx. 1.5 máx. 1.5 máx.
12-Temperatura de Inflamación	°C	ASTM-D 56	40 mín.
13-Densidad a 15 °c	g/cm3	ASTM-D 1298	0.775 – 0.840
14-Temperatura de Congelación	°C	ASTM-D 2386 ASTM-D 5972	- 47 máx.

15-Viscosidad a – 20 °c	mm ² /s	ASTM-D 445	8.0 máx.
16- Valor calórico neto	MJ/kg (kcal/kg)	ASTM-D 4529 ASTM-D 3338 ASTM-D 4809	42.8 mín. (10222) mín.
17- Propiedades de Combustión: una de las siguientes: a) punto de humo b) punto de humo e hidrocarburos naftalenicos	mm mm % v/v	ASTM-D 1322 ASTM-D 1322 ASTM-D 1840	25 mín. 19 mín. 3.0 máx.
18- Corrosión al cu 2 h a 100 °C		ASTM-D 130	1 máx.
19-Estabilidad térmica (JFTOT) Control de temperatura 260 °c Diferencial de presión en el filtro Deposito en el tubo (visual)	mm Hg	ASTM-D 3241	25 máx. Menor de código 4 Y (5)
20-Goma Existente	mg/100cm ³	ASTM-D 381	7 máx.
21-Reacción al agua Rate de interfase	-	ASTM-D 1094	1b máx.
22- Rate microseparometro (MSEP) ➤ Con aditivo disipador estático ó ➤ Sin aditivo disipador estático		ASTM-D 3948	70 mín. 85 mín.
23- Conductividad Eléctrica	pS/m	ASTM-D 2624	50 – 600 (8)
24-Diámetro marca desgaste Bocle	mm	ASTM-D 5001	0.85 máx.
25- Aditivos (6) Antioxidantes • Obligatorio en combustibles hidroprocesados y sintéticos • Opcional en combustibles no hidroprocesados. Desactivador de metal (opcional) Disipador estático Stadis 450 (7) • Primera aditivación • re – aditivación: concentración acumulativa dosificación inicial desconocida: Redosificación	mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L		17.0 – 24.0 24.0 máx. 5.7 máx. (9) 3.0 máx 5.0 máx 2.0 máx.

Anexo 2. Características de la Mezcla Merrey 16 – Mesa 30 28,1 ° API (ASSAY, INTEVEP, 2005).

CARACTERÍSTICAS DEL CRUDO		HIDROCARBUROS LIVIANOS						INFORMACIÓN GENERAL												
GRAVEDAD API 60 ° F	API	28,1	CROMATOGRAFÍA DE GASES						LOS DATOS ANALITICOS EN ESTA HOJA REPRESENTAN LOS RESULTADOS DE UNA EVALUACIÓN COMPLETA REALIZADA EN OCTUBRE DEL 2007											
GRAVEDAD ESPECÍFICA 60/60 ° F	Adim	0,8866	PIE-20 20-80 80-145 145-185																	
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 100 ° F	cSt	12,85	% VOL	1,98	2,42	10,68	5,58													
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 140 ° F	cSt	8,75	C1 y C2	0,0060	0,0000	0,0000	0,0000													
AZUFRE	% Peso	1,27	C3	0,1950	0,0001	0,0052	0,0012													
PUNTO DE FLUIDEZ	° C	< -42	ISO-C4	0,2440	0,0004	0,0027	0,0004													
FACTOR DE CARACTERIZACIÓN K (UOP)	Adim	11,7	N-C4	0,6290	0,0120	0,0103	0,0010													
PRESIÓN DE VAPOR REID	100F, psi	5,09	ISO-C5	0,0860	0,3962	0,0308	0,0017													
PUNTO DE INFLAMACIÓN	° C	< -3,0	N-C5	0,0190	0,7111	0,0414	0,0021													
AGUA EN CRUDOS		< 0,1	C6+	0,0020																
SEDIMENTOS POR EXTRACCIÓN	% ml/m	0,01																		
AGUA Y SEDIMENTOS	% w/w	< 0,05																		
CLORUROS INORGÁNICOS	ppm P/P	< 1																		
FRACCIONES		CRUDO	DESTILACIÓN																	
FACTOR DE CARACTERIZACIÓN K (UOP)	Adim	11,7	PIE-20	20-80	80-145	145-185	185-240	240-290	290-343	343-398	398-454	454-526	343+	398+	454+	526+				
RENDIMIENTO EN EL CRUDO	% Peso		1,28	1,95	8,99	5,02	8,07	9,37	9,72	9,26	9,98	10,48	55,70	46,44	36,46	25,98				
RENDIMIENTO EN EL CRUDO	% Vol		1,98	2,42	10,68	5,58	8,71	9,71	9,83	9,14	9,63	9,88	51,09	41,95	32,32	22,44				
RENDIMIENTO ACUMULADO	% Peso		1,28	3,13	12,12	17,14	25,21	34,58	44,30	53,56	63,54	74,02	100,00	100,00	100,00	100,00				
RENDIMIENTO ACUMULADO	% Vol		1,98	4,40	15,08	20,66	29,37	39,08	48,91	58,05	67,68	77,56	100,00	100,00	100,00	100,00				
RENDIMIENTO PROMEDIO ACUMULADO	% Vol		0,99	3,19	9,74	17,87	25,02	34,23	44,00	53,48	62,87	72,62								
GRAVEDAD ESPECÍFICA 60/60 ° F	Adim	0,8866	0,5701	0,6743	0,7430	0,7938	0,8181	0,8520	0,8729	0,8974	0,9184	0,9403	0,9620	0,9800	1,0078	1,0261				
GRAVEDAD API A 60 F	API	28,1	116,7	78,3	58,9	46,7	41,4	34,5	30,6	26,1	22,5	18,9	15,5	12,8	8,9	6,4				
DESTILACIÓN ASTM		D 7169	D86	D86	D86	D86	D86	D86	D86	D1160	D1160	D1160	D7169	D7169	D7169	D7169				
PIE	° C	36,9	38,7	76,9	145,3	182,0	240,0	295,5	360,3	378,5	440,0	332,8	343,2	408,3	490,1					
* 5% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	104,0	43,7	90,6	151,2	192,0	249,0	302,0	364,2	393,3	453,4	355,4	386,1	444,5	521,5					
* 10% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	138,2	44,9	93,1	153,1	195,0	250,0	302,5	368,4	399,7	459,3	370,9	409,0	464,2	538,4					
* 20% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	208,2	46,2	96,5	154,8	199,0	252,0	303,4	370,2	407,7	466,2	403,4	440,2	494,7	568,3					
* 30% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	263,9	47,4	99,6	156,8	202,0	254,0	304,6	373,1	414,5	476,6	433,6	471,6	522,8	595,2					
* 40% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	314,2	48,9	103,1	158,5	205,0	256,0	305,7	374,7	418,4	484,0	466,8	505,6	554,8	624,4					
* 50% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	364,0	50,6	107,1	160,6	208,0	258,0	307,1	377,3	424,6	488,4	504,7	545,7	589,1	653,3					
* 60% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	417,3	52,6	111,6	162,8	211,0	260,0	308,3	382,9	435,4	493,8	550,9	592,3	627,3	686,6					
* 70% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	471,7	55,4	116,5	165,4	215,0	263,0	310,5	389,2	440,5	505,1	606,3	642,6	666,8						
* 80% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	542,6	58,8	122,5	168,9	220,0	266,0	313,3	396,3	446,6	514,6	685,3	693,0	716,3						
* 90% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	635,3	63,2	129,4	173,9	226,0	270,0	317,4	410,1	460,5	527,1									
* 95% [D-86 D-1160 %VOL D-7169 %OFF]	° C	675,1	66,6	134,0	178,2	232,0	273,0	321,7	420,1	470,3	538,8									
PFE	° C	707,8	103,5	144,6	190,1	238,0	278,0	325,2	430,9	491,6	553,2									

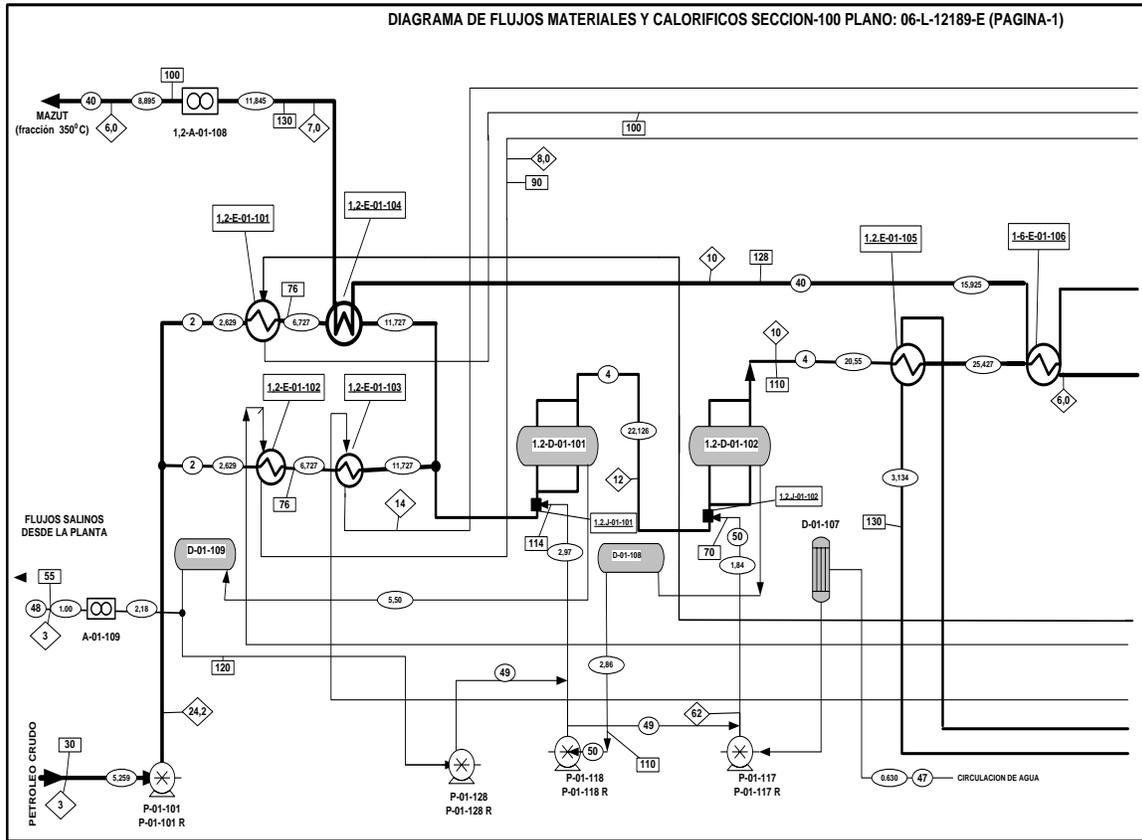
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 100F	cSt	12,85			0,802	1,380		6,358										
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 104F	cSt	12,29																
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 122F	cSt																	
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 140F	cSt	8,75			0,733	1,085	1,876	3,651	8,820	21,72	93,01							
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 180F	cSt					0,892	1,367	2,377	4,871	10,34	32,90	92,6	210,9	1365,0				
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 210F	cSt						1,116	1,818	3,364	6,748	18,27	44,66	91,29	460,1	9439			
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 275F	cSt											14,78	23,09	80,88	585,3			
VISCOSIDAD ABSOLUTA 60 °C	Poise													86,6	7090			
MERCAPTANOS (Como S)	ppm P/P	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	2,3	8,6	< 0,1										
AZUFRE	%Peso	1,27	0,0020	0,0027	0,0212	0,120	0,593	1,010	1,360	1,403	1,597	1,910	2,046	2,230	2,420			
CORROSIÓN A LA LAMINA DE COBRE	50 C/3h		1a	1b	2c	3a												
PUNTO DE FLUIDEZ	°C	< -42			< -42	< -42	< -39	-12	12	30	42	3	15	33	63			
PUNTO DE NUBE	°C				< -30	< -30	-14	-2	18									
PUNTO DE INFLAMACIÓN	°C	< -3,0			11,0	59,0	103,0	150,0	182,5	209	262	234	260	306	344			
PRESIÓN DE VAPOR REID	psi	5,09	10,96	2,21	0,13													
CLORUROS INORGÁNICOS	ppm P/P	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1												
CLORO TOTAL	ppm P/P		< 10	< 10	< 10	< 10												
NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN	mgKOH/g	0,21			< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,19	0,26	0,33	0,33	0,37	0,34	0,38	0,36			
ASFALTENOS	%Peso	3,0								< 0,5	< 0,5	5,1	6,5	8,7	11,3			
RON, CLARO	Octanos			61,0	53,0													
MON, CLARO	Octanos			61,0	53,0													
AROMÁTICOS (HPLC)	%Peso					7,74	26,61	31,72	38,74	43,01	46,83							
SATURADOS (HPLC)	%Peso					92,26	71,85	66,88	59,34	52,77	43,13							
RESINAS (HPLC)	%Peso					0,00	1,54	1,39	1,92	4,22	10,04							
AROMÁTICOS - FIA	%vol			13,1	16,8	17,6	25,0											
SATURADOS - FIA	%vol			86,0	82,0	80,0	72,0											
OLEFINAS - FIA	%vol			0,9	1,2	2,4	3,0											
PARAFINAS - PONA	%Peso		37,56	20,31	16,82													
PARAFINAS - PONA	%vol		38,69	21,98	18,21													
ISO PARAFINAS - PONA	%Peso		50,59	29,36	29,48													
ISO PARAFINAS - PONA	%vol		51,15	31,17	31,41													
NAFTENOS - PONA	%Peso		10,87	34,28	21,56													
NAFTENOS - PONA	%vol		9,41	33,10	21,10													
AROMÁTICOS - PONA	%Peso		0,99	15,73	28,77													
AROMÁTICOS - PONA	%vol		0,75	13,43	25,98													
N + A	%Peso		11,86	50,01	50,33													
N + A	%vol		10,16	46,53	47,08													
PUNTO DE HUMO	mm				24,0	22,0	18,0											
PUNTO DE CONGELACIÓN	°C				< -75	-49,5	-30											
NÚMERO LUMINÓMETRO (CALCULADO)	Adim				54,2	48,1	38,8											
NAFTALENOS	%Peso				0,06	1,81	7,18											
ÍNDICE DE REFRACCIÓN A 20°C(67°C)	Adim				1,4375	1,4530	1,4725	1,4840	1,4840	1,4945	1,5055							
RELACIÓN CARBONO / HIDRÓGENO	Adim		5,45	6,05	6,40	6,56	6,67	6,76	7,11	7,41	7,50							
NITRÓGENO TOTAL	ppm P/P	2400					56	270	1030	1753	2654	4257	4919	5921	7322			
NITRÓGENO BÁSICO	ppm P/P							153	364	662	956	1170						
COLOR ASTM	Adim							L1,5	L2,5	L7,5	L>8							
COLOR SAYBOLT	Adim		>30	+21	+22	+21	+19											
ESTABILIDAD DEL COLOR (después)	Adim (48h)				+22	+20	+17											
PUNTO DE ANILINA	°C				47,25	56,75	60,75	69,95	77,35	78,75	83,45							
ÍNDICE DE CETANO	Adim				31,4	41,1	44,9											
NÚMERO DE CETANO	Adim				34	40,0	41,1	47,6	48,1									
RESIDUOS DE MICROCARBÓN	%Peso	5,64								< 0,1	0,66	9,4	11,5	15,9	23,0			
CENIZAS	%Peso	0,0175								< 0,5	< 0,5	0,024	0,039	0,046	0,060			
VANADIO	ppm P/P	71								< 0,5	< 0,5	124	149	203	275			
NIQUEL	ppm P/P	17								< 0,5	< 0,5	30	35	48	64			
SODIO	ppm P/P	< 5,00										< 5,00	< 5,00	< 5,00				
HIERRO	ppm P/P	< 5,00										< 5,00	< 5,00	< 5,00				
PENETRACION A 25 °C, 100 g, 5 s	1/10 mm														37			
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°C														54,7			

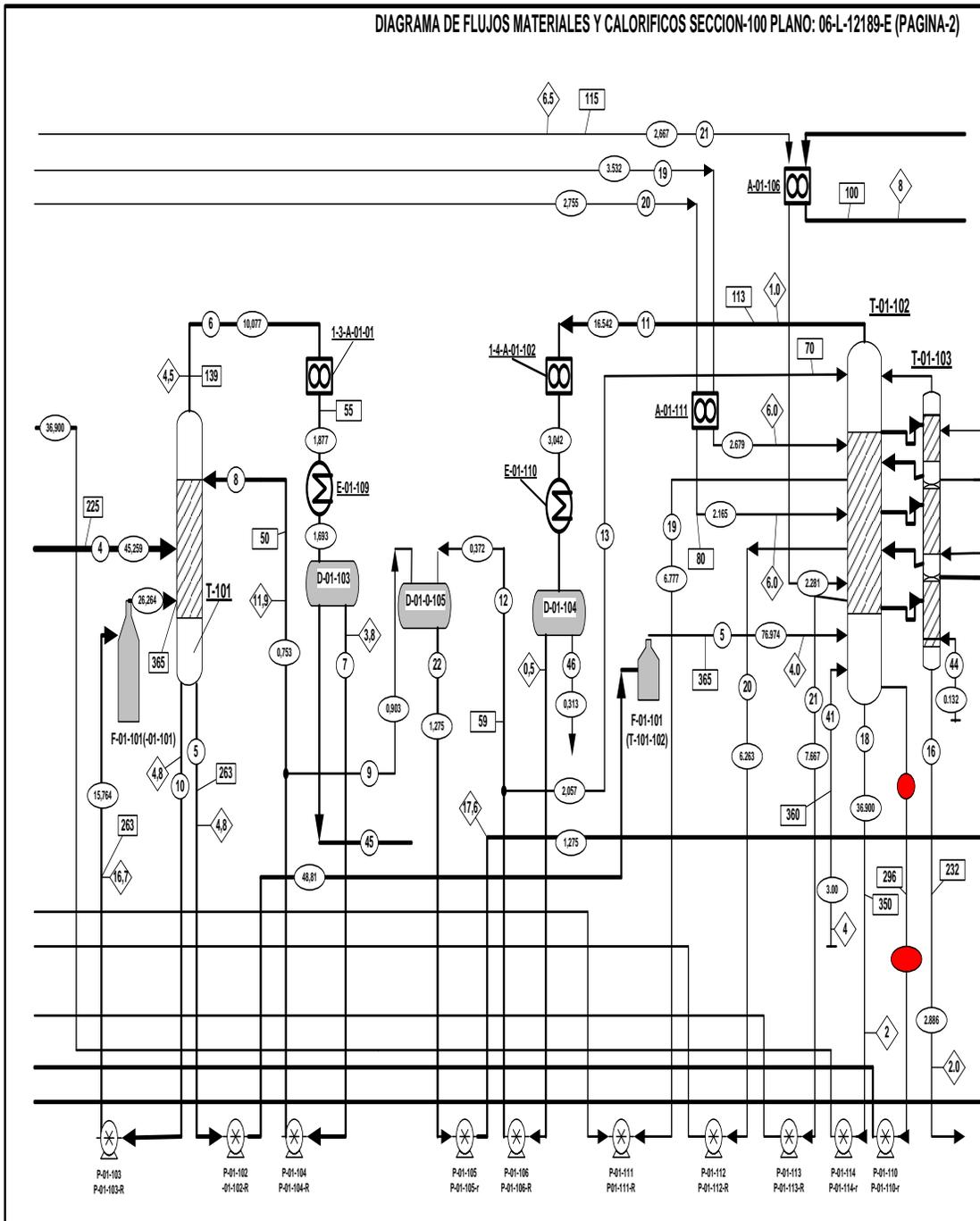
Anexo 3. Características del Crudo Nacional Cubano (ASSAY, INTEVEP, 2005).

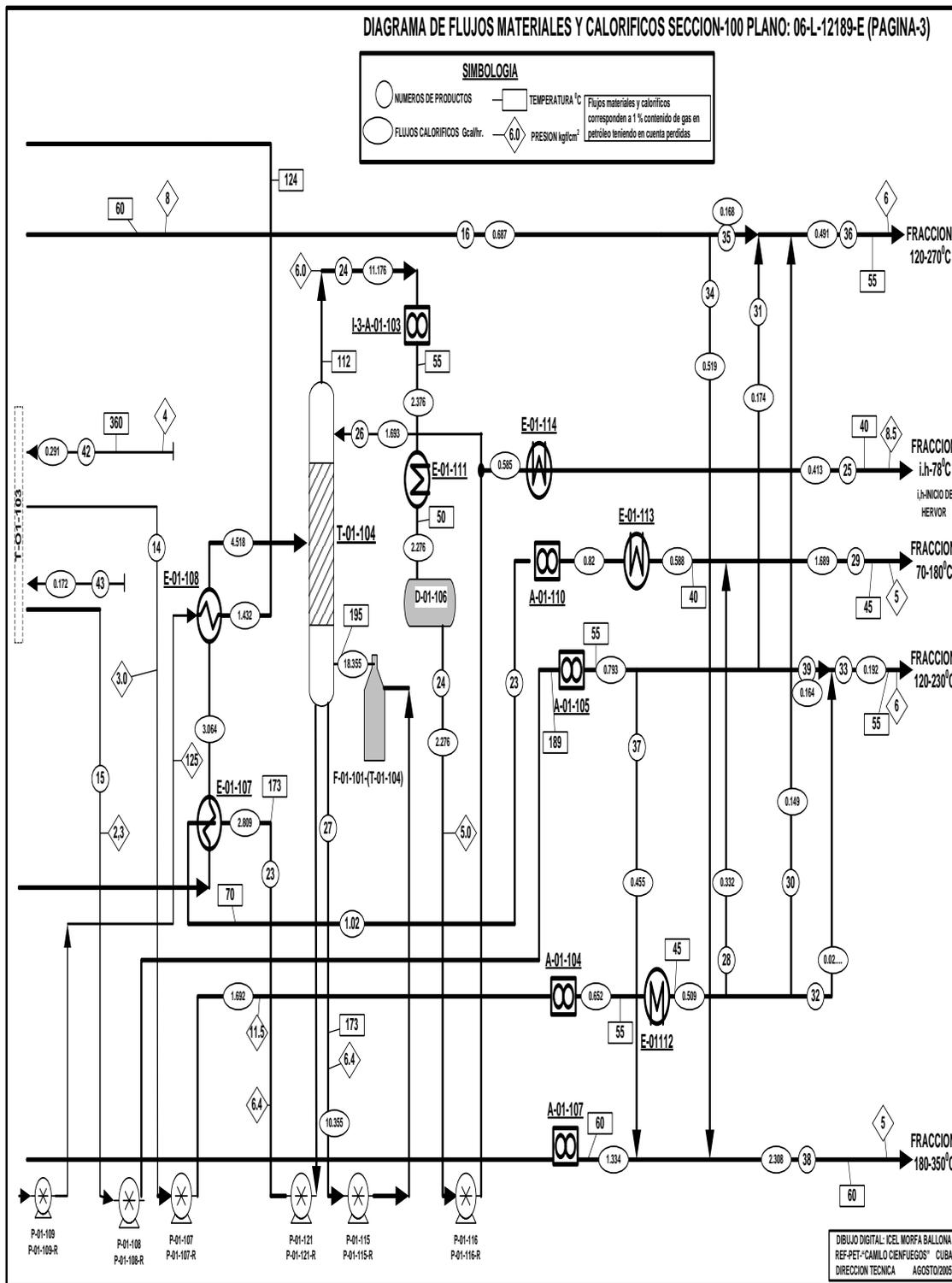
		CRUDO NACIONAL CUBANO							
CARACTERÍSTICAS DEL CRUDO		LOS DATOS ANALITICOS EN ESTA HOJA REPRESENTAN LOS RESULTADOS DE UNA EVALUACION COMPLETA REALIZADA EN ENERO DE 2005 EN PDVSA - INTEVEP,S.A							
GRAVEDAD ESPECIFICA 60/60 °F	Adim	0,9916	HIDROCARBUROS LIVIANOS						
VISCOSIDAD CINEMATICA A 70 °F	cSt	N/A	Rendimiento en el Crudo						
VISCOSIDAD CINEMATICA A 100 °F	cSt	3001	IBP-100 100-200						
VISCOSIDAD CINEMATICA A 122 °F	cSt	1172	% Peso						
VISCOSIDAD CINEMATICA A 140 °F	cSt	615,10	n-C3 0,0004 0,0008						
VISCOSIDAD CINEMATICA A 210 °F	cSt	89,85	iso-C4 0,0049 0,0011						
AZUFRE	% Peso	8,05	n-C4 0,0227 0,0038						
CONTENIDO DE PARAFINAS	% Peso	0,48	iso-C5 0,0085 0,0082						
PUNTO DE FLUIDEZ	°C	0	n-C5 0,0775 0,0057						
FACTOR DE CARACTERIZACION K (UOP)	Adim	11,30							
PRESION DE VAPOR REID	100°F, psi	3,85							
PUNTO DE INFLAMACION	°C	48							
CONTENIDO DE SAL	PTB	>150							
CLORUROS INORGANICOS	ppm P/P	538						INT-10508, 2005 EMISION FEBRERO DE 2005	
FRACCIONES		°C	CRUDO			DESTILACION			
			PIE-100	100-200	200-250	250-343	343-520	343+	520+
FACTOR DE CARACTERIZACION K (UOP)	Adim	11,30							
RENDIMIENTO EN EL CRUDO	% Peso		1,87	7,98	4,04	10,01	16,70	76,10	59,40
RENDIMIENTO EN EL CRUDO	% Vol		2,62	10,03	4,62	10,86	17,13	71,87	54,74
RENDIMIENTO ACUMULADO	% Peso		1,87	9,85	13,89	23,90	40,60	100,00	100,00
RENDIMIENTO ACUMULADO	% Vol		2,62	12,65	17,27	28,13	45,26	100,00	100,00
RENDIMIENTO PROMEDIO ACUMULADO	% Vol		1,31	6,33	7,32	7,74	14,00		
GRAVEDAD ESPECIFICA 60/60 °F	Adim	0,9916	0,7088	0,7879	0,8670	0,9129	0,9652	1,0481	1,0712
GRAVEDAD API A 60 F	*API	11,2	68,7	48,1	31,7	23,5	15,1	3,5	0,8
DESTILACION ASTM, PIE	°C	D 930/7	D 86	D 86	D 86	D 86	D 1180	D 1180	D 930/7
* 5% VOL RECOBRADO	°C	72,8	47,7	104,8	209,5	261,9	345,0	350,0	370,7
* 10% VOL RECOBRADO	°C	151,5	64,2	129,6	221,2	277,7	379,2	397,0	498,8
* 20% VOL RECOBRADO	°C	222,2	68,5	132,8	222,2	281,4	364,0	423,0	523,0
* 30% VOL RECOBRADO	°C	321,3	72,8	139,0	226,4	285,5	403,9	480,5	566,4
* 50% VOL RECOBRADO	°C	417,9	77,1	144,5	227,3	289,4	415,7	500,0	601,4
* 70% VOL RECOBRADO	°C	587,3	84,5	156,4	233,8	299,7	437,1		
* 80% VOL RECOBRADO	°C		91,9	170,4	239,5	311,5	455,8		
* 95% VOL RECOBRADO	°C		101,4	189,4	247,5	326,6	480,3		
PFE	°C		108,9	195,7	251,2	335,5	490,4		
VISCOSIDAD CINEMATICA A 70°F	cSt	N/A							
VISCOSIDAD CINEMATICA A 100°F	cSt	3001,0		0,81	1,92	5,38			
VISCOSIDAD CINEMATICA A 122°F	cSt	1172,0		0,72	1,57		48,14		
VISCOSIDAD CINEMATICA A 140°F	cSt	615,1		0,66	1,36	3,15	30,08		
VISCOSIDAD CINEMATICA A 180°F	cSt			0,54	1,05			8008	18086
VISCOSIDAD CINEMATICA A 210°F	cSt	89,85				1,81	7,94	2125	29151
VISCOSIDAD CINEMATICA A 275°F	cSt							283,5	1721,3
VISCOSIDAD ABSOLUTA 60 °C	Poise							950,3	39823
MERCAPTANOS (Como S)	ppm P/P		152/	1636	363	431			
H2S	ppm P/P		104	385	31,59	<1			
AZUFRE	% Peso	8,05	0,19	1,53	3,0	4,4	5,94	8,90	9,71
CORROSION A LA LAMINA DE COBRE	50°C/3h		4a	4a	3b	3b			
PUNTO DE FLUIDEZ	°C	0		<50	<50	-49	-21	+45	+76
PUNTO DE NUBE	°C			<50	<50	-42			
PUNTO DE INFLAMACION	°C	48		<10	81	119	219	251	357
PRESION DE VAPOR REID	psi a 100°F	3,85	7,26	2,41					
CLORUROS ORGANICOS	ppm P/P		<12	<12	<12				
NUMERO DE NEUTRALIZACION	mgKOH/g	1,27		0,87	0,42	0,9775	1,0034	0,43	0,1075
ASFALTENOS	% Peso	16,9						29,3	29,1

MON, MOTOR	Otanos		70,0	84,0					
MON, MOTOR	Otanos		69,0	52,0					
AROMATICOS - HPLC	% Peso				41,37	56,84	66,9		
SATURADOS - HPLC	% Peso				57,86	41,84	27,39		
RESINA - HPLC	% Peso				0,77	1,32	5,71		
AROMATICOS - FIA	% vol		3,6	17,8	41,0				
SATURADOS - FIA	% vol		96,4	82,2	59,0				
OLEFINAS - PNA	% vol								
PARAFINAS - PNA	% Peso		17,38	8,17					
PARAFINAS - PNA	% vol		18,89	8,97					
ISO PARAFINAS - PNA	% Peso		43,16	32,15					
ISO PARAFINAS - PNA	% vol		45,35	34,70					
NAFTENOS - PNA	% Peso		35,07	34,81					
NAFTENOS - PNA	% vol		32,38	34,01					
AROMATICOS - PNA	% Peso		4,29	23,78					
AROMATICOS - PNA	% vol		3,47	21,23					
N + A	% Peso		39,38	58,57					
N + A	% vol		35,85	55,24					
PUNTO DE HUMO	mm			29,0	19,0	14,0			
PUNTO DE CONGELACION	° C			<-75	<-70	-35			
NUMERO LUMINOMETRO (CALCULADO)	Adim			68,5	41,4	28,1			
NAFTALENOS	% vol			0,12	>5,00				
INDICE DE REFRACCION A 20°C(67°F)	Adim			1,4375	1,4775	1,3030	1,5145		
RELACION CARBONO / HIDROGENO	Adim	7,85	5,49	6,51	7,25	7,63	7,84		
NITROGENO TOTAL	ppm P/P	3393				293	1413	4658	5299
NITROGENO BASICO	ppm P/P					114	434	1137	
COLOR SAYBOLT & (ASTM)	Adim		+23	+22	+16	-10	L4,5		
ESTABILIDAD DEL COLOR (antes/después)	Adim(48h)			-2	L2,5	L5,0			
PUNTO DE ANILINA	° C			48,90	48,85	48,80	49,85		
NUMERO DE CETANO	Adim					34,1			
RESIDUOS DE MICROCARBON	% Peso	11,87					0,17	16,38	21,1
CENIZAS	% Peso	0,1132					<0,001	0,1213	0,154
VANADIO	ppm P/P	86					<0,1	124	174
NIQUEL	ppm P/P	46					<0,1	67	94
SODIO	ppm P/P	274					0,68	312	398
HIERRO	ppm P/P	8,49					1,80	8,9	18,3
SILICIO	ppm P/P	<10					<10	<10	<10
ALUMINIO	ppm P/P	<5					<10	<10	<10
PENETRACION A 25 ° C, 100 g, 5 s	1/10 mm							187	12
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	° C							40,6	62,2

Anexo 4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SECCIÓN 100.







Anexo 5. Caracterización de CNC. (Aguilar V, L et al, 2011) y otras.

Muestras de CNC	% Azufre	⁰ API
1	8.11	11.6
2	8.69	13.7
3	8.06	11.3
4	5.68	11.9
5	7.87	11.5
6	8.3	9.4
7	8.5	8.6
8	8.3	8.4
9	8.5	8.8
10	9.1	11.4
11	8.5	11
12	8.4	10.8
13	8.05	9.6
Bacuranao B-100(1)	7.02	8.6
Bacuranao B-100(2)	8.1	8.5
Cojimar C-100(1)	7	17.7
Cojimar C-100(2)	8.02	17.6
Habana del Este HE-100	7.9	14.6
Habana del Este HE-101	8.3	9.6
Promedio	8.02	11.3

Las muestras de la 1 a la 13 forman parte de los lotes recibidos en la Refinería Sergio Soto en Cabaiguan.