

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química.

Ingeniería Química



Tesis en Opción al Título de Ingeniero Químico

Título

Esquema de mezclado para la gasolina ante la parada de las unidades MHC+HCK del Proyecto Expansión de la refinería de petróleo "Camilo Cienfuegos"

Autora

Neilys Alicia Sust Cano

Tutora

Ing. Mayelín Gutiérrez Brunet

Colaborador

M. Sc. Fernando Piñón Yanes

Cienfuegos, 2015





Pensamiento

“En la Tierra hacen falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más, que esperen recibir menos y den más, que digan mejor ahora que mañana...”

Che



Agradecimientos

A mís padres por toda la confianza que siempre han depositado en mí, por su apoyo incondicional y dedicación, por su preocupación, por enseñarme siempre el camino correcto y por todo el amor que siempre me han dado.

A mí hermano por sus valiosos consejos y por apoyarme siempre en todos mis proyectos.

A Daniel, el hombre que amo, por siempre apoyarme para alcanzar mis sueños y estar ahí en todo momento. Gracias por entenderme y quererme aun cuando me ponía peleonera, por toda su paciencia y comprensión.

A mí familia, por darme el cariño y la fuerza para continuar en momentos en los que parecía imposible.

A los niños de mí vida, mis jímaguas, mi Yoyí y mi niña, por darme tanta alegría.

A mís suegros y mí cuñada que también me apoyaron cuando los necesité.

A Mayelín por su presteza a asistirme en todo momento, por brindarme su conocimiento y su tiempo.

A Yaní, Claudía Yoana y Dainery, mis amigas de siempre, compañeras de guerra, que a pesar de mí carácter siempre me han brindado su amistad y me han apoyado en todo momento.

A Claudía Alvarado, Luis Ernesto y Javier por ser mis incondicionales y al resto de mis compañeros de aula por compartir conmigo estos cinco maravillosos años.

A los trabajadores del Departamento de Procesos del Proyecto Expansión de la Refinería de Cienfuegos en especial a Piñón por colaborar conmigo con el desarrollo de este trabajo.

A cada persona que me apoyó en el transcurso de mis estudios universitarios, le doy
las gracias.



Dedicatoria

A mi Hija: Ana Isabella



Resumen

La gasolina vista como uno de los productos de mayor valor agregado en una refinería de petróleo, está compuesta por una mezcla de hidrocarburos, obtenidos de diversos procesos de refinación como destilación, craqueo, reformación catalítica, alquilación e isomerización. Cada una de estas corrientes con sus propiedades físico químicas contribuyen a lograr la calidad de la mezcla. La refinería Camilo Cienfuegos se encuentra inmersa en un proceso inversionista con el objetivo de elevar los índices de rentabilidad económica, para ello ha diseñado un esquema de refinación con conversión profunda, donde las corrientes componentes de la mezcla de gasolina a partir de los nuevos procesos implementados, aumentarán en cantidad y calidad. Es de vital importancia una vez diseñado el esquema de la mezcla de gasolina y su calidad, mantenerlo. Con el fin de garantizar la calidad de este producto, la logística operacional y con ello la economía del proceso ante la parada de las unidades de Hidrocraqueo y de Hidrocraqueo Moderado, este trabajo iniciará una investigación que permitirá determinar el esquema de mezclado óptimo. Para esto fue necesario realizar una revisión bibliográfica sobre los esquemas de refinación, del proceso de mezclado y de las corrientes que conforman la mezcla. Se empleó como herramienta matemática el Sistema de Modelación de Procesos Industriales: PIMS quien garantiza la factibilidad económica del proceso ante una parada de dichas unidades. El esquema de mezclado de gasolina resultante maximiza los ingresos de la Refinería ante el escenario de trabajo.



Tabla de Contenido



INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1.1. ORIGEN DEL PETRÓLEO.....	4
1.2. REFINACIÓN DEL PETRÓLEO.	4
1.3. ESQUEMAS DE REFINO.	5
1.3.1. <i>Topping</i>	5
1.3.2. <i>Hidroskimming</i>	6
1.3.3. <i>Conversión simple</i>	7
1.3.4. <i>Conversión profunda</i>	9
1.4. GASOLINA COMO PRODUCTO DE REFINACIÓN	10
1.4.1. <i>Características de las gasolinas</i>	10
1.5. PRINCIPIOS DE MEZCLADO DE GASOLINAS	14
1.5.1. <i>Tipos de mezclado de gasolina</i>	16
1.6. HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS DE PROGRAMACIÓN LINEAL.....	18
1.6.1. <i>LINDO</i>	20
1.6.2. <i>SOLVER</i>	20
1.6.3. <i>PIMS</i>	21
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.	26
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO EXPANSIÓN DE LA REFINERÍA DE PETRÓLEO “CAMILO CIENFUEGOS”	26
2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEZCLADO DE GASOLINA DE LA REFINERÍA DE CIENFUEGOS	26
2.2.1. <i>Variables que afectan el Proceso de Mezclado</i>	27
2.3. CORRIENTES QUE CONFORMAN LA MEZCLA	27
2.3.1. <i>Características de los componentes que intervienen en la preparación de gasolinas.</i>	28
2.4. ESPECIFICACIONES DE LA GASOLINA QUE SE DESEA PRODUCIR.....	35
2.5. PIMS: SISTEMA DE MODELACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES	36
2.5.1. <i>Funcionamiento del programa</i>	37
2.5.2. <i>Tablas del PIMS.</i>	39
2.6. PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO PIMS ANTE UN ESCENARIO DE PARADA DE PLANTA.	54
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	57
3.1. PRESENTACIÓN DEL CASO BASE	57
3.2. CASO SIN MHC+HCK	60

CONCLUSIONES	76
RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFÍA.....	80
ANEXOS.....	86



Introducción

INTRODUCCIÓN

Una de las premisas fundamentales adoptadas por el gobierno cubano, para lograr mejoras en el modelo económico, es expresada en el lineamiento 241 de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, donde se plantea la necesidad de “Elevar la capacidad de refinación de crudo, alcanzando volúmenes que permitan reducir la importación de productos derivados”. En este esfuerzo las nuevas inversiones en la refinería de petróleo “Camilo Cienfuegos” juegan un importante papel.

La actividad económica de una refinería tiene como prioridad generar un beneficio que debe permitir cubrir los gastos fijos, la amortización, la inversión en la propia estructura física para mantener y adaptar, en cada momento, su esquema de refinación a la demanda en cantidad y calidad de su mercado.

El esquema tecnológico actual de la Refinería es *Hydroskimming*, este es uno de los más sencillos, posee unidades de destilación atmosférica, hidrofinación y reformación catalítica para obtener los siguientes derivados: Gas Licuado del Petróleo (GLP), Gasolina, Jet Fuel, Diesel y Fuel Oil. Este esquema casi nunca logra una conversión de más del 50%, salvo el caso de las refinerías que usan de materia prima los crudos ligeros o medios-ligeros, de bajo nivel de azufre. Es por eso, que en la mayoría de los casos aproximadamente la mitad del crudo se convierte en Fuel Oil, lo cual no es conveniente por su bajo valor en el mercado debido a su carácter de combustible pesado, carente de un porcentaje importante de fracciones ligeras incluso bajo ciertas circunstancias es mejor disponer de crudo que de Fuel Oil. Lo expuesto anteriormente hace que opere cerca del punto de equilibrio o en negativo, con un margen de refino más bajo que los esquemas de Conversión simple y Conversión profunda.

Con el interés de mitigar esta situación la refinería de Cienfuegos se encuentra inmersa en un proceso inversionista que ha sido convenientemente concebido en etapas, en aras de alcanzar resultados económicos a corto plazo. Una de las ideas más atractivas, desde el punto de vista económico, es la implementación de un esquema de refinación con *Conversión Profunda*, el cual elevaría considerablemente los índices de rentabilidad económica. Además la Refinería estaría operando por encima del punto de equilibrio, obteniéndose márgenes de refino de valor suficientemente mayores a los actuales, también se reduciría el costo de la inversión inicial

Introducción

que facilitaría la gestión de préstamos. Con este nuevo esquema además de la destilación atmosférica se incorporarían procesos de vacío, craqueo en cualquiera de sus variantes, hidrocrqueo, una unidad de coquificación retardada, tratamiento de productos y almacenamiento asociado. La gasolina constituye uno de los productos de mayor valor agregado en una refinería pero su calidad depende de las corrientes que conformen la mezcla y de las propiedades resultantes de la misma.

Problema de Investigación

¿Cómo mantener la calidad de la gasolina ante una parada de las unidades de Hidrocrqueo (HCK) y de Hidrocrqueo Moderado (MHC) sin comprometer la factibilidad económica de la operación?

Hipótesis de la Investigación

Si se propone un esquema de mezclado ante la parada de las unidades de Hidrocrqueo (HCK) y de Hidrocrqueo Moderado (MHC) se podrá garantizar la calidad de la gasolina sin comprometer la factibilidad económica de la operación.

Objetivo General

Proponer el esquema de mezclado para los componentes de la gasolina de manera que se cumplan sus especificaciones de calidad ante una parada de las unidades de Hidrocrqueo (HCK) y de Hidrocrqueo Moderado (MHC).

Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre los esquemas de refinación, el proceso de mezclado y herramientas matemáticas de programación lineal para la obtención de un modelo óptimo de mezclado de la gasolina.
2. Caracterizar los componentes que intervienen en la preparación de gasolina para la conformación del esquema de mezclado.
3. Proponer el esquema de mezclado de gasolina ante la parada de las unidades MHC y HCK, utilizando el PIMS.
4. Analizar la calidad de la gasolina según el esquema de mezclado propuesto.



Capítulo I

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se realiza un estudio sobre los temas relacionados con los esquemas de refinación del petróleo y los productos de refinación, refiriendo en la gasolina las propiedades más importantes para lo cual se realiza una búsqueda bibliográfica referente a dichas temáticas. Además se identifican y describen algunas de las herramientas matemáticas que se emplean en el mundo para la conformación de modelos de mezcla de productos.

1.1. Origen del petróleo

El petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos que normalmente contiene cantidades significativas de azufre, nitrógeno y oxígeno, así como pequeñas concentraciones de níquel, vanadio y otros elementos. Atendiendo a la mayor proporción del tipo de hidrocarburos que conforman la mezcla se clasifican según su base: *parafínica*, *nafténica*, *asfáltica* y *mixta* (J. H. Gary & G.E. Handwerk, 2001).

- Base parafínica: Las parafinas livianas dan buenos aceites para usos domésticos, pues no producen humo al quemarse y además tienden a resistir el calor. Las más pesadas contienen cristales blancos y blandos que al ser aislados y refinados forman lo que se conoce como cera parafinada.
- Base nafténica: Generalmente contienen gran proporción de fracciones volátiles, es decir, componentes que se evaporan fácilmente.
- 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.
- Base mixta: Ningún crudo es netamente nafténico, asfáltico o parafínico en su composición química, sino que contienen proporciones de los otros tipos, caracterizándose por la predominancia del compuesto en mayoría. Sin embargo, ciertos crudos, tienen muy parejos estos contenidos, por lo que resulta imposible clasificarlos en una sola clase.

1.2. Refinación del Petróleo.

El crudo no tiene aplicaciones prácticas tal y como se obtiene del yacimiento, sin embargo, sometido a las operaciones básicas de la industria de refinación, da lugar a un conjunto de

productos de uso energético directo, y otros, que son materias primas de la industria petroquímica. De forma genérica pueden listarse los siguientes productos: GLP, Fuel Oil para hornos y calderas, gasolinas automotor y de aviación, disolventes, turbo combustible de aviación, diesel automotor, aceites lubricantes, gasóleos de calefacción, bunker para buques, coque combustible, betunes para la fabricación de asfaltos, azufre, extractos aromáticos y parafinas(J. Lluch Urpí, 2000). El rendimiento de cada producto de refinación dependerá del crudo procesado y del esquema de refinación utilizado.

1.3. Esquemas de Refino.

Se conoce como esquema de refinación, al conjunto de procesos que constituyen una refinería, básicamente pueden considerarse cuatro tipos:

- Topping o destilación atmosférica
- Hydroskimming que incluye hidrotratamiento
- Conversión simple, con transformación de destilados de vacío en ligeros
- Conversión Profunda, con transformación de residuos de vacío en destilados ligeros

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

1.3.1. Topping

Este esquema constituye la primera etapa del refino de un crudo, el objetivo es su vaporización parcial y separación por condensación a diferentes temperaturas. Se realiza en una columna de destilación o fraccionamiento en cuyo interior están dispuestas de forma ordenada una serie de “platos” en los que se recogen los líquidos condensados. Cada plato tiene una temperatura inferior a la del situado inmediatamente debajo por lo que esta es elevada en el fondo. La destilación se realiza a una presión ligeramente superior a la atmosférica.

Al no existir en este esquema procesos de refinación posteriores, la calidad de los productos obtenidos difícilmente cumplirá las exigencias del mercado. En el Anexo1 se muestra la forma

más común de este esquema. Dada la calidad de las fracciones de destilación directa, muy pocas refinerías tienen una estructura de este tipo, las que existen suelen responder a situaciones geográficas y de mercado muy específicas.

1.3.2. Hidroskimming

El esquema formado por la destilación atmosférica, una unidad de reformación y los hidrotratamientos se conoce como Hydroskimming. En la Tabla 1.1 se muestran los sistemas que se deben añadir a estas dos unidades principales.

Tabla 1.1: Sistemas que conforman el esquema Hidroskimming.

Unidades	Sistemas que se deben añadir			
Destilación Atmosférica	Estabilizadora	Concentración de gases	Fraccionamiento de GLP	
Reformación Catalítica	Hidrodesulfuración de nafta	Fraccionamiento de nafta reformada	Hidrogenación de reformado ligero para eliminar benceno	Endulzamiento o Merox de GLP y nafta

Por último hay que incluir también la unidad de aminas y la unidad de recuperación de azufre. En el Anexo 2 se representa de forma general este esquema.

El sistema de mezclado queda de la siguiente manera:

- Naftas: Normalmente estarán compuestas por nafta ligera y el excedente de nafta pesada que no haya alimentado a la unidad de reformación.
- Gasolinas: Estarán formuladas con la nafta reformada desbencenizada como componente básico y al que se le añadirá nafta ligera para ajustar densidad y butano para ajustar Presión de Vapor Reid (RVP). A medida que se ha ido endureciendo la calidad de las gasolinas y

disminuyendo el nivel permitido en benceno y aromáticos, la posibilidad de fabricar gasolina comercial con un sistema Hydroskimming es prácticamente nula. El nivel de aromáticos de una nafta reformada, situado en el intervalo 65 % – 70 % vol., limita la contribución de este componente en la mezcla de gasolinas a valores del orden del 50 %. El resto de componentes deben tener alto octano y nulo contenido en aromáticos. Componentes como el isomerizado, el alquilato y éteres permiten el cumplimiento de estas especificaciones.

- Keroseno de aviación: Está constituido únicamente por el excedente de 1ra extracción desulfurada que no haya entrado a formar parte del gasóleo de automoción.
- Gasóleo de automoción: Con las actuales especificaciones de azufre y a menos que se procesen crudos de muy bajo contenido del mismo, la formulación de gasóleo no suele permitir la utilización directa de extracciones laterales de keroseno y destilados medios (2da y 3ra extracción) de destilación directa, de modo que su principal componente serán los destilados medios hidrodesulfurados a los que se añadirá la 1ra extracción desulfurada, tanto para ajustar especificaciones (densidad, cetano y propiedades de frío) como para obtener un volumen mayor (según el precio del gasóleo y el keroseno de aviación).
- Fuel Oil: No se modifica la formulación respecto al esquema de Topping, será el residuo atmosférico fluidificado con 1ra extracción o con destilados medios. En ocasiones para ajustar el contenido de azufre pueden emplearse también los destilados medios hidrodesulfurados.

La inclusión de un proceso de reformación catalítica de naftas y la eliminación de azufre en los destilados medios, vía hidrodesulfuración, permite la obtención de productos terminados para la mayoría de los crudos.

1.3.3. Conversión simple

Si a un esquema de Hydroskimming se agrega una unidad de destilación al vacío y una unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) se dispone de una conversión simple.

Los resultados que podemos encontrar con respecto al Hydroskimming son los siguientes:

- Mayor producción de GLP al incorporarse las fracciones C₃ y C₄ olefínicas; en las refinerías integradas con un complejo petroquímico, el propileno puede recuperarse como tal.

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

- Mayor producción de gasolinas como consecuencia de la incorporación de la nafta de FCC, componente de un octano apreciable (93/91 RON/MON) pero con un elevado contenido de azufre (según el tipo de alimentación al FCC puede tener hasta 1000 ppm).
- Mayor producción de destilados medios, principalmente gasóleos, condicionada por la necesidad de fluidificación del residuo de vacío producido. El azufre y la viscosidad del residuo de vacío son muy superiores a las del residuo atmosférico y por lo tanto mayores las necesidades de fluidificación.

Con este esquema, el sistema de mezclado es el siguiente:

- Naftas: Como en el caso del Hydroskimming, estarán formadas por los excedentes de nafta ligera y pesada no utilizados en la formulación de gasolinas.
- Gasolinas: Se dispone de un componente nuevo: la nafta de FCC, junto con la nafta reformada constituirán los componentes básicos de la formulación de gasolinas, el resto de componentes se utilizarán para ajustar las especificaciones.
- Keroseno de aviación: Lo constituye el keroseno desulfurado excedente de la formulación de Gasoil auto.
- Gasóleo de automoción: También en este caso se dispone de un nuevo componente: el Aceite de Ciclo Ligero (LCO) de la unidad de FCC que previamente debe haber sido hidrotratado para ajustar su contenido en azufre y aumentar su índice de cetano. El resto de componentes serán el keroseno y el diesel desulfurado.
- Fuel Oil: Desaparece de la formulación el residuo atmosférico (aunque puede existir algún excedente de la destilación a vacío si la capacidad de esta unidad no estuviera ajustada a la producción de residuo atmosférico en el Topping) y en su lugar aparece el residuo de vacío. Este producto tendrá mayor contenido de azufre, viscosidad y metales, lo que provoca la necesidad de una mayor utilización de fluidificantes, normalmente se utiliza el LCO, keroseno o 1ª extracción y diesel o 2ª extracción en la formulación de este producto.

Para mejorar el rendimiento de los destilados medios frente a la nafta, una opción es trabajar a menor severidad en la operación pero ello conlleva a un menor grado de conversión con un incremento de aceite decantado. Otra opción en el mismo sentido es trabajar con catalizadores menos activos. Desde el punto de vista de mejora de las propiedades de los productos obtenidos en el FCC existen dos posibilidades, pretratar la alimentación o bien el

postratamiento de los productos. Con la incorporación de una unidad de FCC el esquema de conversión simple permite incrementar de manera apreciable los rendimientos en gasolinas y destilados a costa de los residuos.

1.3.4. Conversión profunda

Cuando a un esquema de conversión simple se le añade una unidad de Coquificación Retardada, se dispone de una conversión profunda, la cual tiene la ventaja añadida de eliminar la producción de Fuel Oil o reducirla al mínimo. En el Anexo 4 se muestra un ejemplo de este esquema. La calidad de los destilados de la coquificación es mejor que la de los de FCC en cuanto a su densidad y número de cetano mientras que el contenido de azufre dependerá de la alimentación. La nafta es de peor calidad, muy bajo número de octano y normalmente se hidrogena para enviarla a la mezcla de gasolina.

Con este esquema, el sistema de mezclado de productos finales es el siguiente:

- Naftas: Como en el caso de conversión simple, estarán formadas por los excedentes de nafta ligera y pesada que no han entrado a formar parte de la formulación de gasolinas, incrementadas en este caso por la nafta ligera de coquificación que, dado el carácter olefínico de la misma deberá ser hidrotratada previamente.
- Gasolinas: No varía respecto al esquema de FCC ya que el Coquizador no introduce nuevos componentes de mezcla.
- Gasóleo de Automoción: En este caso se dispone de un nuevo componente: el gasoil ligero de coque que previamente deberá hidrotratarse para ajustar su contenido de azufre. El resto de componentes serán el LCO de FCC, el keroseno y diesel desulfurados de crudo.
- Keroseno de aviación: Lo constituyen los excedentes del keroseno desulfurado no utilizado en la formulación de gasóleo de automoción.
- Fuel Oil: Desaparecen de la formulación los residuos atmosféricos y de vacío, siempre que la capacidad instalada de las unidades de destilación al vacío y del coquizador sea la adecuada. Los únicos componentes que forman la mezcla de fuel será el aceite decantado de FCC y el gasóleo pesado de coquificación.

1.4. Gasolina como producto de Refinación

Gasolina, también llamada fuel (Estados Unidos y Canadá), o petrol (Gran Bretaña) o benzine (Europa) es el resultado de una mezcla de distintos componentes obtenidos en los procesos de refinación, los cuales constituyen hidrocarburos desde 4 hasta 11 átomos de carbono, que destilan entre 25 - 220 °C y que caen dentro de tres tipos generales que son: parafinas, olefinas y aromáticos (G. Speight, 2006). Pueden contener además compuestos oxigenados como etanol en proporciones variables y un contenido muy bajo de azufre y nitrógeno, del orden de las partes por millón. Es normal que se le incorporen aditivos de estabilidad, antidetonantes, antihielo, detergentes, etc, pero para obtener un buen rendimiento en una gasolina se deben cumplir tres condiciones:

- Volatilidad adecuada para asegurar buena mezcla con el aire, es decir una adecuada presión de vapor (RVP) para facilitar el arranque del motor.
- Composición química adecuada para evitar la detonación del vapor de gasolina en el cilindro. La gasolina mientras mayor es el número de Octano mayor es la relación de compresión del motor. Tiempo atrás se empleaba el Tetraetilo de Plomo para incrementar el Octanaje, luego se utilizó el Metilterbutil éter (MTBE) y hoy en día alquilatos, metanol y etanol.
- La ausencia de compuestos de azufre en todas sus formas, ya que, constituyen sustancias corrosivas y negativos para el ambiente y la salud una vez que combustionan. Otros productos indeseables en las gasolinas son las poliolefinas que se convierten en polímeros gomosos (A. Vian Ortuño, 1997).

1.4.1. Características de las gasolinas.

Su principal especificación es el número de octano, existen otras, que se relacionan a continuación: azufre, Presión de Vapor de Reid (RVP), densidad, volatilidad y Período de Inducción.

- **Número de octano**

Es la medida de la resistencia de la gasolina a la detonación y es un factor determinante en la calidad del producto. Una gasolina con una calidad antidetonante inferior al requerimiento del vehículo provoca el pistoneo del motor, el cual lo afecta negativamente en términos de pérdida de potencia y posible daño al mismo. El octanaje se expresa en términos de RON, MON o DON, cuyos valores son indicativos de la calidad antidetonante del producto, relativos a combustibles de referencia. El análisis del RON (Research Octane Number/ Número de Octanos de Investigación) de una gasolina consiste en determinar el número de octano, en una prueba donde se hace pasar la muestra a través de una máquina de octanaje, sometida a condiciones de baja severidad, mientras que el análisis del MON (Motor Octane Number/ Número de Octanos del Motor) se realiza en condiciones de alta severidad. El DON (Road Octane Number/ Número de Octanos de Carretera) es el promedio del RON y el MON. Se concluye que mientras más alto es el RON, MON o DON llamado octanaje, mejor es la calidad de la gasolina y por ende se obtiene un mayor rendimiento en un motor de combustión (James Gary, 1979)

- **Volatilidad**

La volatilidad es el factor determinante para indicar la tendencia de un hidrocarburo a producir vapores potencialmente explosivos. Es de importancia crítica tanto para las gasolinas de motor como las de aviación, ya que afecta el encendido, el calentamiento y la tendencia al bloqueo de vapor en condiciones de operación a temperaturas altas, altitudes elevadas o en ambas. Esta propiedad debe ser cuidadosamente balanceada para garantizar un compromiso óptimo entre los diferentes aspectos y el funcionamiento de un motor (ASTM, 1997).

La volatilidad de la gasolina está relacionada con tres propiedades (CORPOVEN, 1999):

- ✓ Rango de Ebullición

Puesto que la gasolina es una mezcla de muchos hidrocarburos, ella no tiene un punto de ebullición simple, es más bien, de rango amplio. En el laboratorio se usa el método de Destilación para determinar el rango o amplitud de ebullición de los productos del petróleo. La tendencia a vaporizar está caracterizada por la determinación de una serie de temperaturas en

las cuales a determinado porcientos se evaporan, y se utilizan principalmente las temperaturas en las cuales ocurre el 10, 50 y 90 % de evaporación.

✓ RVP

Es la presión que alcanza un producto determinado en un volumen de aire cuatro veces superior al del líquido a 38 °C. La prueba RVP indica la tendencia lineal hacia la vaporización, mientras que la prueba de destilación proporciona una medida de la extensión que alcanzará la vaporización de un determinado conjunto de condiciones.

La RVP provee una aproximación de la presión de vapor absoluta de una muestra ligeramente vaporizada a 38 °C, sin embargo, no es equivalente a la presión de vapor real, ya que esta tiene una ligera evaporación de la muestra y la presencia de vapor de agua y aire en el espacio confinado. En general, las presiones de vapor real son mayores que los RVP.

✓ Índice de bloqueo de vapor (IVB)

Es una medida de la tendencia de una gasolina a generar excesivos vapores en una línea de combustible, causando desplazamientos del combustible líquido en sentido contrario al flujo y la subsiguiente interrupción de la operación normal del automóvil.

Relación entre volatilidad y rendimiento

En términos generales, aplican las siguientes relaciones entre volatilidad y rendimiento (CORPOVEN, 1999):

- Altas presiones de vapor y temperaturas bajas para el 10% evaporado, conducen a un arranque fácil en climas fríos. Al contrario en climas cálidos, esto conduce a bloqueo de vapor y a formación de mucho vapor en los tanques de combustible y en los carburadores. Aunque la presión de vapor es un factor importante en la formación de la cantidad de vapor, ella sola no es un buen índice. Un índice mejor para medir el rendimiento de bloqueo por vapor reactivo en los modelos de carros corrientes, es la temperatura a la cual se logra una relación vapor/líquido igual a 20, mientras menor sea la temperatura a la que esto se logra mayor será la tendencia al bloqueo por vapor.

- La temperatura a la cual se evapora el 50 %, es una indicación muy importante de facilidad de calentamiento y de buena aceleración, en condiciones de arranque en clima frío. En cuanto menor sea esta temperatura, mayor será el rendimiento obtenido.
- La temperatura a la cual se evapora el 90% y el punto final de ebullición, indican la cantidad de componentes de punto de ebullición relativamente alto en la gasolina. Una temperatura alta del 90% evaporado está usualmente asociada con componentes de densidad y número de octanos mayores, lo que redundaría en economía de combustible mejorada y en resistencia al golpeteo. Si las temperaturas del 90% evaporado y el punto final de ebullición son demasiado altas, ello puede causar distribución pobre de la mezcla en el múltiple de admisión y en las cámaras de combustión, también depósitos excesivos en esta última.

- **Gravedad °API**

"Gravedad" es un término utilizado para denotar la densidad de las gasolinas; hay dos métodos comúnmente utilizados para expresarla: la gravedad específica o densidad relativa que es la relación entre la masa de un volumen dado de gasolina a una temperatura determinada (usualmente 15,6 °C) y la masa del mismo volumen de agua a igual temperatura; y la gravedad API (Instituto Americano de Petróleo) que indica la relación correspondiente de peso específico y fluidez de la gasolina respecto al agua (ASTM, 1997).

Para los efectos del control de calidad de los derivados de petróleo en una refinería, se utilizan las siguientes correlaciones: A medida que aumenta la gravedad específica, el punto de ebullición se hace más alto y/o el producto se hace menos parafínicos (CORPOVEN, 1999).

En las gasolinas que tienen igual rango de ebullición, una gravedad API baja, con frecuencia está relacionada con un mayor número de octano. En las fracciones de petróleo que van a ser sometidas a procesos de desintegración, una gravedad API alta es indicio de una más fácil y eficiente operación para producir grandes cantidades de gasolina. Mientras más alta sea la gravedad API de un aceite combustible, más bajo será su poder calorífico.

- **Contenido de azufre**

El contenido de azufre total (expresado como porcentaje en peso) es indicativo de la posibilidad de formación de óxidos de azufre durante la combustión y a partir de los mismos

de ácido sulfúrico, que ataca u oxida a los elementos con los que entra en contacto. Existen diversos métodos de determinación, el más extendido es el de Espectrografía por Rayos-X. Las Normas ASTM D 1266 (Método lámpara), ASTM D 2622 (Método espectrografía por rayos-X), ASTM D3120 (Método Microcolumbométrico oxidativo), ASTM D 5453 (Método fluorescencia ultravioleta), permiten determinar esta característica.

La especificación permitió un contenido máximo en azufre de 150 ppm hasta el 2005 y a partir de entonces se restringió su contenido hasta 50 ppm, pero en muchos países debe coexistir en el mercado productos con 10 ppm. A medio plazo, este último valor parece que será el único aceptado. Desde el punto de vista de formulación, solamente hay dos componentes con valor de azufre superiores a 50 ppm, la Nafta de FCC y la Nafta Virgen Ligera.

- **Densidad**

La densidad es una propiedad que adquiere relevancia por su incidencia en varios aspectos, por ejemplo, en los modernos sistemas de inyección la masa de combustible inyectada en la cámara de combustión depende de esta propiedad, ya que pueden producirse variaciones de la relación aire/combustible que deben ser reguladas por un sistema de control adecuado; además es un indicativo del poder calórico y se utiliza como variable de control en los procesos de producción.

Puesto que la densidad de la gasolina se mide a 15,6 °C es un factor importante en las transacciones comerciales, se debe realizar la corrección necesaria de volumen en función de la temperatura en que se encuentra el producto a vender, normalmente a ambiente.

La especificación de densidad se sitúa entre un mínimo de 0,72 kg/m³ y un máximo de 0,77 kg/m³. El componente principal de la formulación de una gasolina es la nafta reformada, cuya densidad es del orden de 0,79 a 0,82 kg/m³. Para ajustar la densidad de la mezcla es necesaria su dilución con componentes más ligeros como nafta virgen ligera ~ 0,67 kg/m³, isomerizado ~ 0,70 kg/m³ y otros.

1.5. Principios de Mezclado de Gasolinas

La mezcla de productos, la operación en el proceso final de cada refinería(MathPro, 2011), consiste en una mezcla de las corrientes en diferentes proporciones para elaborar productos

terminados con especificaciones establecidas en normas vigentes, las cuales se corresponden a las propiedades físicas (densidad, volatilidad, punto de ebullición), químicas (contenido de azufre, de aromáticos, etc.) y a las características de funcionamiento (número de octano, punto de humo), todo lo anterior debe ajustarse a un costo mínimo para dar al producto terminado un mayor valor agregado.

Cada producto requiere de una mezcla de varios componentes debido a que las refinerías no producen el volumen suficiente de una única mezcla de componentes para cumplir la demanda de cualquiera de los principales productos de mezcla, como la gasolina, el combustible pesado y el combustible diesel (J. H. Gary & G.E. Handwerk, 2001).

El mezclado de gasolina es considerado el proceso de mezcla más complejo y altamente automatizado. En las refinerías modernas, estos sistemas miden y mezclan los componentes así como los diferentes aditivos que pueden ser empleados mientras que a cargo de la supervisión de las propiedades de la mezcla están análisis de las muestras en el laboratorio. El control computarizado y los modelos matemáticos establecen las fórmulas de mezcla que producen los volúmenes de productos requeridos y cumplen todas las especificaciones de mezcla.

Ciertas propiedades de mezcla pueden determinarse a partir de los componentes iniciales, promediándolas en forma ponderada, es decir, pueden mezclarse linealmente en peso o en volumen, de acuerdo a la ecuación siguiente: (PDVSA-INTERVEP, 1994)

$$P_s = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{P_i * m_i}{m_s} \quad (\text{Ec.1.1})$$

Donde:

P = Propiedad de la corriente

s = Corriente de mezcla

m = Flujo másico o volumétrico de acuerdo al modelo de mezcla (peso o volumen)

i = número de la corriente

Existen otras propiedades que se mezclan de forma no lineal, debido a que al tratar de estimarlas de forma lineal se generan diferencias significativas entre la propiedad estimada y la real. Uno de los métodos utilizados para estimar estas propiedades es emplear en lugar del valor real uno similar que presenta las características de mezclas lineales. Estas propiedades auxiliares se llaman factores o índices de mezclas, entre los cuales se pueden citar: índices de mezcla para determinar la RVP, el número de octanos, punto de humo, entre otros. Definir cada propiedad de los hidrocarburos y la descripción del tipo de mezcla que se aplica en cada caso resulta de gran importancia debido a que constituyen restricciones del modelo y que permitirán garantizar las calidades de los productos que se generan en una refinería.

1.5.1. Tipos de mezclado de gasolina

Aunque existen variantes en cada uno de ellos, los dos tipos esenciales de mezcla son:

- En línea
- Por carga

La mezcla en línea consiste esencialmente en realizar la mezcla de los componentes en una tubería, mientras son desplazados desde sus puntos de fabricación como materias primas hasta el punto de almacenamiento como producto acabado.

Este tipo de mezcla se realiza con un equipo que consiste en varios medidores en línea ya sean volumétricos o másicos (aunque éstos últimos son más fiables), generalmente comandados por un sistema informático, o también puede hacerse con un sistema electrónico, incluso mecánico, por los que se van incorporando los distintos componentes en la mezcla en las proporciones definidas. El producto debe ser sometido, previamente a su almacenamiento, a un proceso de homogenización. Los medidores volumétricos deben tener sistema de corrección por temperatura.

A continuación se enumeran las principales características que definen la utilización de este tipo de mezcla:

- Es un sistema indicado para lotes grandes de mezcla
- Solo se puede utilizar cuando las materias primas (bases y aditivos) están disponibles a granel

- El número de componentes a utilizar en la mezcla está limitado
- Siempre que se cuente con un buen equipo de mezcla, es un sistema muy fiable
- Los componentes deben ponerse en las condiciones físicas de mezcla antes de empezar el proceso

La mezcla por carga se realiza añadiendo en un depósito mezclador los componentes de la gasolina, medidos previamente y realizando la mezcla por agitación a la temperatura establecida. Una vez realizada la misma, el producto se transfiere a su lugar de almacenamiento como producto terminado.

Existen diferentes tipos de mezcla por carga en función de:

- La forma de medir sus componentes al incorporarlos al proceso
- El lugar donde se realiza la mezcla
- La forma de ordenar y controlar la incorporación de los componentes al proceso

Así, existen mezclas por carga en las que los componentes son incorporados mediante pesada manual o automática, a través de medidores volumétricos o máscicos o bien su control se realiza mediante pesada del propio reactor. Se puede mezclar en un mezclador definido al efecto o puede ser sobre un tanque de almacenamiento, provisto de elementos de calentamiento y agitación para realizar esta función. La mezcla puede ser ordenada de forma manual mediante accionamiento directo de las correspondientes válvulas y bombas, de forma semimanual, a través de autómatas programables que accionan estos elementos o de forma totalmente automática. En este último caso, la secuencia de fabricación es la siguiente:

- Se informa al sistema informático del producto que se desea fabricar y de la cantidad deseada,
- El sistema dispone de la información necesaria para realizar esta operación, es decir, de la receta de fabricación, de todas las incompatibilidades del producto solicitado con anteriores fabricaciones, de la disponibilidad de materias primas, de espacio para fabricar y, posteriormente, para almacenar el producto, etc.,
- El sistema informático propone la secuencia de fabricación,
- Se modifica o válida la propuesta realizada por el sistema,

- El sistema ejecuta la fabricación accionando los equipos necesarios para ello. Cuando la operación finaliza, informa de ello, así como de las incidencias,
- Por último, el sistema ordena la limpieza de los equipos utilizados y deja la instalación preparada para una nueva operación.

Realmente ha finalizado el proceso de mezcla en el momento que se extrae una muestra del producto acabado, se le realizan los correspondientes análisis con resultados satisfactorios y entonces es aceptado por el responsable del control de calidad.

1.6. Herramientas matemáticas de programación lineal

La programación lineal (PL) además de ser una técnica de optimización es un procedimiento matemático por el cual se puede resolver el problema de cómo distribuir recursos escasos, con medios limitados, de tal forma que se obtengan ganancias máximas al mismo tiempo que se cumplan con los requisitos exigidos. En términos matemáticos, un problema de programación lineal consiste simplemente en un sistema indeterminado de ecuaciones lineales simultáneas, el cual representa las condiciones del problema, y una función lineal que expresa el objetivo del problema. El sistema puede igualmente ser de inecuaciones; puede estar formado por igual o menor número de variables que de ecuaciones, si es linealmente dependiente (A. Pietri, 1970). El procedimiento empleado para resolver problemas de programación lineal consiste en un proceso iterativo, basado en un algoritmo pre-programado, examinando varias soluciones hasta seleccionar el conjunto de variables y sus valores positivos que lleven al máximo, o al mínimo si es el caso, el valor de la función objetivo. Debido a la complejidad del procedimiento, para la solución de problemas de programación lineal se hace indispensable el uso de computadores digitales.

Se debe enfatizar que la programación lineal es sólo un instrumento de ayuda, el cual, basándose en la información suministrada, puede determinar cuál es el mejor uso de los ingredientes y equipos disponibles para satisfacer las condiciones especificadas.

Mediante el uso de la programación lineal se facilita la toma de decisiones en aquellos problemas donde intervienen un gran número de variables, así como también permite analizar numerosos casos. Si los datos que conforman el problema de programación lineal poseen

alguna incertidumbre, no se debe pretender que la solución sea mejor que la información contenida en los datos del problema.

Para el caso específico de las gasolinas, objeto del presente estudio, los parámetros a optimizar para obtener modelos de mezclado más confiables son principalmente: RVP, concentración de azufre, contenido de aromáticos, olefinas, MON, RON y benceno.

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 cuanto al algoritmo de solución el más utilizado es el método Simplex, el cual permite ir mejorando la solución en cada paso. En una refinería un modelo (LP) representa la operación mediante ecuaciones lineales y restricciones del tipo $<$, $>$ ó $=$, 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.

$$F. O \left(\frac{\$}{\text{día}} \right) = \text{Ventas} \left(\frac{\$}{\text{día}} \right) - \text{Costos} \left(\frac{\$}{\text{día}} \right) \quad (\text{Ec. 1.2})$$

o lo que representa lo mismo:

$$F. O = \sum_{j=1} (m_j V_j) - \sum_{i=1} (m_i C_i) \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Dónde:

$F.O$: Ecuación de la función objetivo ($\$/día$)

m : Flujo de corrientes ($\frac{Tons}{día}$ o $\frac{Bbls}{día}$)

j : Productos de Refinación

V : Precios de venta ($\frac{\$}{Tons}$ o $\frac{\$}{Bbls}$)

i : Insumos

C : Costos de todos los insumos (materia prima y servicios) ($\frac{\$}{Tons}$ o $\frac{\$}{Bbls}$)

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: PIMS, SOLVER, LINDO, QSB, SIAN, entre otras. En los subepígrafos siguientes se explica de forma general las herramientas que, al juicio del autor, poseen mayor importancia.

1.6.1. 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 a 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.

1.6.2. 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 (C. Azofeifa, 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 Leon Lasdon, de la Universidad de Austin (Texas) y por Allan Waren, de la Universidad de Cleveland.

1.6.3. PIMS

El PIMS es un sistema computarizado para formular modelos individuales de refinerías, complejos petroquímicos y otras facilidades de la industria de procesos, mediante sistema de ecuaciones lineales. Este programa emplea la técnica de programación lineal para optimizar la operación y diseño de la industria de procesos a fin de maximizar ganancias o minimizar costos. PIMS es licenciado por la compañía ASPEN-PIMS, perteneciente a la tecnología ASPEN. Esta compañía ofrece una serie de paquetes de software que cubren una gran variedad de aplicaciones en el área de programación matemática para la industria petrolera (E. Verruschi, 2009).

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

Algunas de las aplicaciones del PIMS en las refinerías son las siguientes (Bechtel Corporation, 1994):

- Evaluación de crudos y otros insumos: ¿Qué crudo se debe comprar ya qué precio?
- Plan de operaciones - Procesando una dieta: ¿Qué productos se deben producir y cómo se mezclan para maximizar beneficios?
- Planes de inversión a mediano y/o largo plazo: Capacidad de la expansión o planta nueva. ¿Es rentable?
- Planificación de paradas de plantas: ¿Cuál es el impacto económico de una pareada de planta?, ¿Se debe programar?
- Impacto de nuevos mercados o restricciones ambientales: ¿Cuál oportunidad de mercado es más beneficiosa?
- Políticas de inventario.

La data introducida en el PIMS se encuentra en forma de tablas, agrupadas en seis renglones de acuerdo a la función que cumplen:

- Insumos/Productos
- Destilación de Crudos
- Unidades de Procesos/Mezclas
- Mezclas de Componentes
- Misceláneos
- Técnicas de Revisión.

En la Figura 2.2 se presentan los nombres de las tablas del PIMS para cada renglón.

Supply/Demand	Distillation	Blending	Recursion	Miscellaneous	Submodels
- <u>Buy</u>	- <u>Assays</u>	- <u>Blends</u>	- <u>Pguess</u>	- <u>Groups</u>	- <u>Caps</u>
- <u>Sell</u>	- <u>Crdcuts</u>	- <u>Blnmix</u>	- <u>Upool</u>	- <u>Rows</u>	- <u>Submods</u>
- <u>Utilbuy</u>	- <u>Crddistl</u>	- <u>Blnnaph</u>		- <u>Ratio</u>	- <u>SGSU</u>
- <u>Utilsell</u>		- <u>Blnrest</u>		- <u>Case</u>	- <u>SNH1</u>
		- <u>Blnspec</u>		- <u>Pcalc</u>	- <u>SNH2</u>
		- <u>Wspecs</u>			- <u>SREF</u>
					- <u>SCCR</u>

Figura 2.2: Clasificación de las tablas del PIMS. **Fuente:** Corpoven S.A., 1993

a) Insumos/Productos.

Este renglón es utilizado para indicar cuales componentes y servicios pueden ser comprados y vendidos por el modelo, el precio de venta y costos de dichos componentes, cualquier limitación en las cantidades a comprar o vender y a su vez indicar si los componentes son comprados o vendidos en base gravimétrica o volumétrica.

b) Destilación de Crudos

Este renglón solamente aplica a refinerías de petróleo. Las tablas que lo conforman son utilizadas por PIMS para simular automáticamente los rendimientos de las unidades de destilación atmosférica y/o al vacío a partir de los ensayos de cada uno de los crudos a procesar.

c) Procesos/Mezclas

Este renglón le brinda al usuario la oportunidad de construir las diferentes unidades de procesos que conforman una determinada industria. Así mismo, le permite simular las mezclas de productos intermedios que puedan tener lugar en un determinado tanque de almacenamiento. Estos submodelos normalmente incluyen balance de materiales, capacidades y consumo de servicios, pero también podría incluir balances por componentes así como una gran variedad de alimentaciones y condiciones de operación.

d) Mezcla de Componentes

Para la mezcla de componentes, PIMS ofrece dos métodos. En el primero el usuario establece la formulación de los productos y en el otro PIMS se encarga de determinar las formulaciones óptimas que mejor satisfagan las especificaciones a cumplir.

e) Misceláneos

Las tablas agrupadas en este renglón surgen como consecuencia de cierta información suministrada en los renglones anteriores. Dicha información podría ser unidades en las que se expresan las corrientes u opciones específicas de los modelos.

f) Técnicas de recursión.

Las tablas de este renglón controlan los procesos de recursión considerados por PIMS para solucionar modelos que involucren problemas no lineales, tales como: recursión distributiva de propiedades y recursión distributiva de la susceptibilidad del octanaje por incorporación de un aditivo.

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

Para la realización de este trabajo debido a que es un programa diseñado para la industria petrolera y en especial a la optimización de procesos de mezclado de productos, se decide trabajar el PIMS como herramienta matemática para conformar el esquema de mezclado de gasolina.



Capítulo II

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.

En este capítulo se realiza una presentación de la refinería de petróleo “Camilo Cienfuegos” específicamente de las pretensiones del Proyecto Expansión. Se describe el proceso de mezclado de la gasolina y se caracterizan las corrientes que integran la mezcla. Se detalla la estructura del programa empleado y de las tablas que deben ser modificadas. Se establece además una breve metodología para la conformación del modelo PIMS en el proceso de mezclado de gasolina ante la parada de las unidades MHC y HCK, modificando el Caso Base (todas las unidades operando).

2.1. Descripción general del Proyecto Expansión de la refinería de petróleo “Camilo Cienfuegos”.

La Expansión de la refinería “Camilo Cienfuegos” tiene el propósito de aumentar las capacidades actuales de procesamiento de petróleo crudo con procesos de conversión profunda, que incrementarán la eficiencia económica a través de la generación de productos de mayor valor comercial. De esta forma también se podrán satisfacer las necesidades del mercado nacional y se exportarán al mercado internacional los excedentes que se produzcan; con el fin de apoyar la política de integración energética de los países del ALBA.

2.2. Descripción del proceso de mezclado de gasolina de la refinería de Cienfuegos

El proceso de mezclado de gasolina de la Refinería toma las corrientes provenientes de diferentes unidades de proceso, con el objeto de mezclarlas en diferentes proporciones y obtener productos de mayor valor comercial con características y propiedades específicas exigidas por el mercado. Un esquema de dicho mezclado se muestra en el Anexo 5. Los componentes de la gasolina son mezclados en línea por control de relación de flujo, los mismos son tomados de los tanques intermedios para ser filtrados con el fin de separar agua y partículas de arrastre tanto de las tuberías como de los catalizadores empleados en el proceso. Para la mezcla se tiene en cuenta el plan de producción, el mercado para el que se va a producir y la disponibilidad de las unidades de proceso.

2.2.1. Variables que afectan el Proceso de Mezclado

Las instalaciones del sistema de mezclado de gasolinas están ampliamente distribuidas en la refinería, dado por la ubicación de las unidades de proceso, tanques intermedios y las líneas hasta los tanques de productos terminados.

Las variables principales que afectan el proceso de mezcla, y por lo tanto la operación del sistema de mezclado, son las siguientes:

- Flujo y volumen de componentes.
- Flujo y volumen de mezcla total.
- Especificaciones de calidad de los componentes a ser mezclados.

Estas variables deben mantenerse bajo control para garantizar la calidad de los productos deseados. Dado que los componentes de la mezcla están en control de relación de flujo, cualquier variación en este se ajusta automáticamente mediante cambios proporcionales en las otras corrientes de modo que el producto mantenga la especificación.

2.3. Corrientes que conforman la mezcla

En el proceso de mezclado de gasolina del Proyecto Expansión de la refinería de petróleo: “Camilo Cienfuegos” se tienen previstos los siguientes componentes:

- Nafta polimerizada
- Nafta Ligera y pesada hidrocraqueada.
- Nafta Craqueada
- Isomerizado
- Reformado pesado
- Nafta Liviana

2.3.1. Características de los componentes que intervienen en la preparación de gasolinas.

Las calidades de los componentes que conforman la mezcla de gasolina fueron tomadas de los reportes de las bases de diseños y libros de proceso de las unidades, emitidos por el licenciante de la unidad, con el objetivo de ingresarlas a la base de datos del simulador.

- **Reformado pesado**

Esta nafta procede de la unidad de Reformación Catalítica Continua (CCR) cuyo objetivo es incrementar el número de octano de los cortes de nafta para ajustarlos a la manufactura de gasolina. El CCR convierte las moléculas de naftenos, contenidas en la nafta, en aromáticos con mucho mayor número de octano (hasta RON 100 o aún mayor). La reacción se inicia por un catalizador bajo presión de alrededor de 20.4 kg/cm^2 y a una temperatura de alrededor de $520 \text{ }^\circ\text{C}$. La nafta hidrotratada libre de azufre se pasa a través de los reactores verticales en serie en los que tiene lugar la reacción. El reformado producido será el componente base del pool de gasolina.

Al convertir las especies de naftenos en aromáticos produce de 2 a 4 % en peso de hidrógeno. El último es un importante producto que es generalmente usado como reactivo en las unidades de hidrotratamiento de nafta e hidrodesulfuración de gasoil para cubrir las necesidades de hidrógeno. Esta unidad posee una tecnología regenerativa que no es más que la regeneración continua del catalizador, manteniéndolo a un nivel óptimo de actividad y selectividad.

Tabla 2.1: Especificaciones de la Nafta Reformada pesada. **Fuente:** Libro de procesos de la unidad Reformación Catalítica, 2011

Propiedad	Especificación
RON	101
MON	91
Benceno (% vol)	0.50
Aromáticos (% vol)	76.50
RVP, kg/cm2	< 0.10

- **Nafta polimerizada**

La reacción fundamental en el proceso de esta unidad es la oligomerización profunda (combinación de moléculas similares) de olefinas ligeras C_3/C_4 tratadas previamente en las secciones precedentes (Sección de Hidrotratamiento y Sección de Reacción). Esta reacción se lleva a cabo sobre un catalizador de tipo sílice-alúmina que permite una amplia flexibilidad hacia el punto de ebullición de los productos. La unidad funciona a alta temperatura y alta presión para obtener destilados de poligasolina (Gasolina), destilados medios (diesel), propeno y buteno refinado.

La mezcla del GLP dulce y el reciclo C_3/C_4 entra como alimentación al primer reactor de oligomerización donde intercambia calor con el efluente del último reactor mediante un intercambiador, luego con vapor a presión media y pasa entonces al 2do y 3er reactor. El efluente del primer reactor es enfriado para garantizar la temperatura de entrada al reactor, lo mismo para los efluentes del segundo reactor. El efluente del tercer reactor se dirige a la sección de destilación, donde son enfriados con el precalentamiento de la alimentación de oligomerización.

En esta sección los efluentes entran en el desbutanizador donde se separa el corte C_3/C_4 que no reaccionaron. El tope del desbutanizador es sub-enfriado a través del condensador de aire y por el enfriador con agua. El corte C_3/C_4 entra en el tambor de reflujo del desbutanizador y toma las siguientes direcciones: una corriente se dirige al tope de la columna para garantizar las condiciones de operación en esa zona, otra corriente va hacia el tambor de alimentación para diluir la carga de alimentación y la tercera corriente se dirige hacia la despropanizadora.

Los oligómeros son recuperados en el fondo del desbutanizador y son enviados al Splitter de gasolina, donde son separados los destilados medios y la poligasolina producidos por la reacción de oligomerización. Esta columna opera al vacío para limitar la temperatura en el fondo debido a la presencia de oligómeros. La poligasolina del fondo del tambor de reflujo se dirige una parte al tope de la columna y la otra después de añadir un agente anti-polimerizante es bombeado hacia almacenamiento.

Tabla 2.2: Especificaciones de la corriente de polinafta. **Fuente:** Libro de procesos de la unidad de Oligomerización, 2011.

Propiedad	Especificación
Azufre total: ppm en peso	10 máx
RVP: kg/cm²	0.30 máx
RON	98.3 mín
MON	83.8 mín
Aromáticos (% vol)	1 máx
Olefinas (% vol)	95 mín
Benceno (% vol)	0.1 máx

- **Nafta Craqueada**

El proceso de craqueo catalítico es otro proceso de conversión que intensifica la paridad de los productos mediante la transformación de las moléculas de alimentación pesada en más ligeras. El proceso fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial como una “Máquina de hacer gasolina” para motores militares. La producción de gasolina en la alimentación depende de las condiciones de operación y normalmente varía de 40 % a 50%.

La alimentación se contacta con el catalizador circulante a baja presión y alrededor de 500 °C, y el rango entre el catalizador circulante y la alimentación es alrededor de 5. Cuando la alimentación líquida se contacta con el catalizador caliente, este se calienta, vaporiza y craquea para producir gas, gases licuados líquidos, gasolina, aceite pesado de recicló, aceite ligero de recicló, arcillas y coque. El último (alrededor de 5% en la alimentación) se quema en la unidad propiamente dicha, proporcionando así el calor requerido para calentar, vaporizar y craquear la alimentación.

Las reacciones de calentamiento, evaporación y craqueo tienen lugar en el tanque del reactor donde el catalizador se cubre con el coque. El catalizador es entonces circulado hacia el tanque de regeneración, que opera a valores cercanos a los 700 °C, se inyecta aire al regenerador y se quema el coque para dejar un catalizador regenerado que es nuevamente adecuado para nuevas reacciones de craqueo. El catalizador se hace de silicio, partículas de alúmina, enriquecida con zeolita, con un tamaño de partícula promedio entre 25 y 100 µm.

Este se mantiene fluidizado o transportado por aire, vapor o hidrocarburos. Las especificaciones de calidad de esta corriente se muestran a continuación en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3: Especificaciones de calidad de la corriente Nafta Craqueada. **Fuente:** Libro de procesos de la unidad de Craqueo Catalítico, 2011.

Propiedad	Especificación
TBP rango de corte: °C	C ₅ -160
Azufre total: ppm en peso	10 máx
RON	91 mín
MON	80.5 mín
Aromáticos (% vol)	20 máx
Olefinas (% vol)	38.4

- **Nafta Ligera y pesada hidrocraqueada**

El hidrocrqueo es un proceso que combina el craqueo catalítico y la hidrogenación. Las alimentaciones más pesadas se craquean en presencia de hidrógeno para producir productos más deseables. El proceso tiene lugar a alta presión, un catalizador, e hidrógeno. El hidrocrqueo es utilizado para alimentaciones que son difíciles de procesar por craqueo catalítico, ya que estas se caracterizan normalmente por un alto contenido de aromático policíclico y/o altas concentraciones de azufre y compuestos de nitrógeno que son envenenadores del catalizador.

El proceso de hidrocrqueo depende en gran medida de la naturaleza de la alimentación y las proporciones relativas de las dos reacciones que competen: hidrogenación y craqueo. La alimentación pesada se convierte en productos más ligeros bajo un amplio rango de presiones muy altas. (81.58 a 183.50 kg/cm²) y temperaturas bastante altas (alrededor de 400 °C), en presencia de hidrógeno y catalizadores especiales. Comparando con el craqueo catalítico que opera alrededor de 500 °C, el hidrocrqueo trabaja a temperatura relativamente baja y alta presión parcial de hidrógeno. Esto limita los depósitos de carbono en el catalizador y

consecuentemente permite que sea usada una tecnología de lecho fijo con una corrida de circulación de uno a tres años. No solamente las moléculas pesadas son craqueadas en más pequeñas, sino además, el hidrógeno a un rango de carbono se aumenta en este proceso. Cuando la alimentación tiene un alto contenido de parafina, la primera función del hidrógeno es prevenir la formación de compuestos aromáticos policíclicos. Otro papel importante del hidrógeno en este proceso es reducir la formación de alquitrán y prevenir la formación de coque en el catalizador. La hidrogenación también sirve para convertir los compuestos de azufre y nitrógeno presentes en la alimentación en sulfito de hidrógeno y amonio.

En la primera etapa, la alimentación precalentada consistente en Gasóleo de Vacío (GOV) de la unidad de Destilación al Vacío (VDU) y el Gasóleo potencialmente pesado de la unidad de coquificación retardada (UCR), se mezcla con el hidrógeno recirculado y se envía al reactor de la primera etapa, donde el catalizador de hidrotratamiento convierte los componentes del azufre y nitrógeno en sulfito de hidrógeno y amonio. También ocurre un hidrocrqueo limitado. El efluente de esta etapa es enviado a la segunda etapa donde tiene lugar el hidrocrqueo. La parte de la nafta es primeramente separada para eliminar el H₂S, que más tarde será absorbido en el absorbedor de aminas, entonces estabilizada y separada en nafta ligera y nafta pesada. La sección de fraccionamiento es alimentada con nafta pesada, keroseno, diesel y aceite no convertido.

La operación del fraccionador es adaptada a los productos deseados (componentes de gasolina, jet fuel y gasóleo). Un material del rango del keroseno puede ser extraído como un producto colateral separado, incluido en el corte del fraccionador de gasóleo. La calidad de la nafta ligera se muestra en la Tabla 2.4 y la nafta pesada en la Tabla 2.5:

Tabla 2.4: Especificaciones de calidad de la nafta ligera. **Fuente:** Libro de procesos de la unidad de Hidrocrqueo, 2010.

Propiedad	Especificación	
TBP punto de corte: °C	SOR	EOR
	15-70	
Gravedad Específica	0.68	0.68

Contenido de Azufre (ppm en peso)	< 10	
PONA	89/0/10/1	
RON	79	
MON	77	
RVP(kg/cm²)	0.92	0.91

Tabla 2.5: Especificaciones de la nafta pesada. **Fuente:** Libro de procesos de la unidad de Hidrocraqueo, 2010.

Propiedad	Especificación	
	SOR	EOR
TBP punto de corte: °C	70-145	
Gravedad Específica	0.748	0.749
Contenido de Azufre (ppm en peso)	< 5	
PONA	43/0/51/6	
RON	60	
MON	58	

- **Isomerizado**

La isomerización es un proceso catalítico que convierte las n-parafinas contenidas en la nafta ligera en iso-parafinas con números de octano superiores. La reacción tiene lugar en presencia de hidrógeno, sobre un lecho de catalizador fijo y a condiciones de operación que promueven la isomerización y minimizan el hidrocraqueo. Las condiciones de operación no son severas, lo que se refleja por la presión de operación moderada, baja temperatura y requisitos de baja presión parcial de hidrógeno. El catalizador puede ser envenenado por las impurezas contenidas en la alimentación y especialmente por el agua por lo que esta necesita ser tratada a través de secadores para evitar este efecto contaminante.

Capítulo II: Materiales y métodos.

Un esquema de recirculación de flujo de baja intensidad capital se logra mediante la combinación de este proceso con una columna desisohexanizador DIH. Esta columna concentra las especies bajas de octano en el efluente del estabilizador de la corriente del corte lateral. La misma se recircula y combina con la alimentación antes de que entre en el reactor. La corriente superior de la columna de DIH se cubre con una mezcla de gasolina. La pequeña corriente del fondo puede ser usada como componente de gasolina o como alimentación al reformador.

La ventaja de este proceso es que, a pesar de un número de RON relativamente bajo, los productos tiene una baja sensibilidad, es decir, una pequeña diferencia entre el RON y el MON. Típicamente, la sensibilidad del isomerizado es de alrededor de 2 mientras que la sensibilidad del reformado es más cercana a 10. Otra ventaja puede estar en la baja densidad del isomerizado que contra balancea la alta densidad del reformado para cumplir la especificación de la gravedad específica de la gasolina. En esta Unidad se obtiene una nafta isomerizada cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Especificaciones del Isomerizado. **Fuente:** Libro de procesos de la unidad de Isomerización, 2011.

Propiedad	Especificación
RON	88
MON	85.60
DON	86.80
Olefinas (% vol)	0
Aromáticos	0
RVP (kg/cm ²)	0.90

Para este componente del pool el contenido de azufre, aromáticos y benceno no está especificado ya que debe ser reportado una vez terminado el proceso de isomerización.

- **Nafta liviana**

Esta corriente proviene de la unidad de destilación atmosférica cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Especificaciones de la nafta ligera. **Fuente:** Libro de procesos de la unidad de Destilación Atmosférica, 2011.

Propiedad	Especificación
RVP index	13.4
MON	69.9
DON	71.9
Aromáticos(% V)	4.18
Azufre (% W)	0.0006
Olefinas (% V)	1.0
RON Mín.	68.0
Gravedad específica	0.68

2.4. Especificaciones de la gasolina que se desea producir

El Proyecto Expansión de la refinería de petróleo Camilo Cienfuegos pretende producir combustibles de alta calidad para garantizarle tanto a la empresa como al país un beneficio económico. Uno de estos productos es la gasolina, la cual debe cumplir una serie de especificaciones según los tipos que se quieran producir. Para este trabajo se centrará la atención en la Gasolina DON 87, la cual será destinada a la exportación (fundamentalmente para el mercado europeo). La tabla 2.8 muestra las especificaciones de este tipo de gasolina que son establecidas por el mercado internacional.

Tabla 2.8: Especificaciones de la Gasolina DON 87.

Gasolina DON 87	Unidad	Límites
Azufre	ppm peso	25 máx.
MON		82 mín.
DON= (RON +MON)/2		87 mín.
RVP	kg/cm2	0.63 máx.
Olefinas	% vol.	30 máx.
Aromáticos	% vol.	29 máx.
Benceno	% vol.	0.62 máx.
Plomo		0

El RON no se especifica, más debe ser reportado una vez terminado el producto así como su gravedad específica.

2.5. PIMS: Sistema de Modelación de Procesos Industriales

El programa de optimización utilizado por PDVSA y sus filiales se conoce con el nombre de PIMS, el cual es un sistema computarizado que emplea la técnica de programación lineal para representar los procesos e implicaciones económicas de una refinería o cualquier otra industria en consideración. 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

Capítulo II: Materiales y métodos.

Los modelos de PL construidos por PIMS, son modelos diseñados para evaluar situaciones dentro de un período de tiempo definido (un día, una semana, mes o año) referidas a una industria en particular (CORPOVEN, 1999).

2.5.1. Funcionamiento del programa

PIMS permite al usuario crear e independientemente mantener un número de modelos en el mismo computador, éstos pueden variar o ser opciones alternas para la misma situación, o podrían ser representativos de la totalidad de las diferentes plantas o procesos.

El ícono para acceder al programa



Luego aparece un cuadro de diálogo similar al que se muestra a continuación:

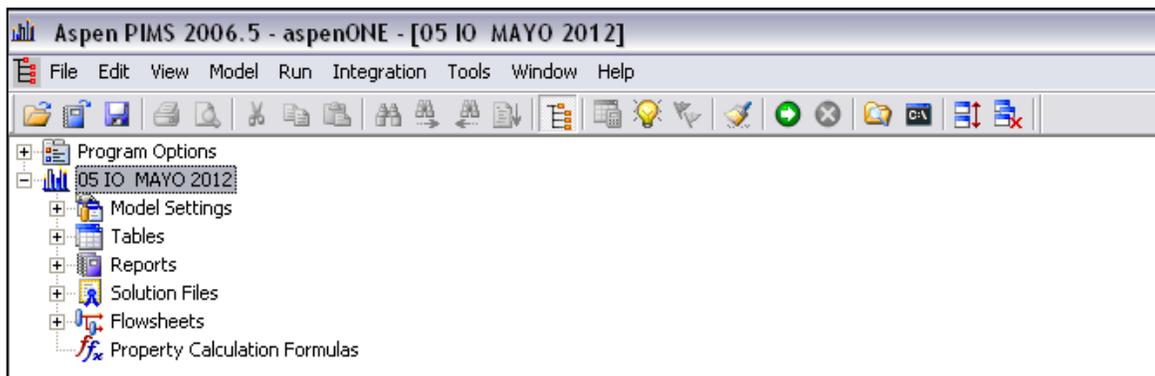


Y por último se muestra la portada del programa donde se especifica la versión y el licenciente:



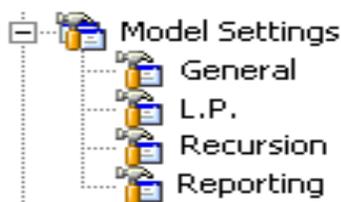
Capítulo II: Materiales y métodos.

Una vez accedido al programa aparece la página principal del mismo

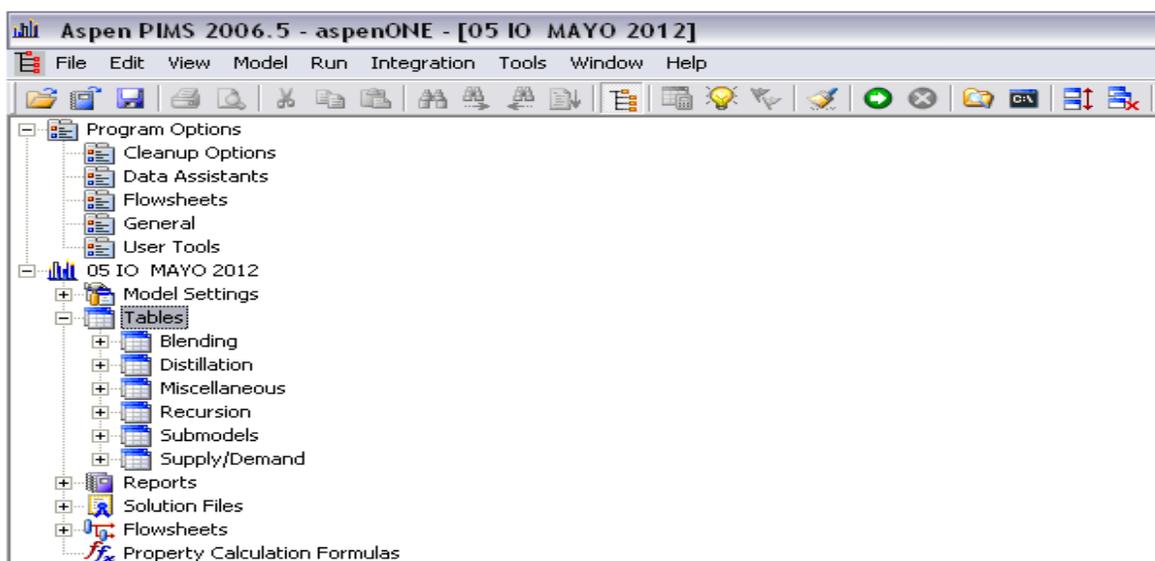


Las opciones de interés para este trabajo son:

- La opción Model Settings se usa para establecer la configuración de un modelo individual, donde cada uno puede tener su propio conjunto de ajustes a partir del modelo general.



- La opción Tables 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.



Capítulo II: Materiales y métodos.

Estas tablas pueden modificarse y actualizarse por el usuario antes de la corrida del modelo. La elaboración de las mismas se rige por la codificación que se muestra a continuación:

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.

En el Anexo 6 se exponen los códigos utilizados en el modelo del Proyecto Expansión de la refinería Camilo Cienfuegos.

2.5.2. Tablas del PIMS.

Las tablas Excel que conforman el modelo contienen un grupo de filas y columnas con entradas numéricas o texto (CORPOVEN, 1999). En la Tabla 2.9 se ejemplifican las características principales de las tablas del modelador de procesos PIMS.

Tabla 2.9: Formato estándar de una tabla PIMS. **Fuente:** CORPOVEN, 1999

	A	B	C	D	...
1	*				
2	*				
3	*	FILAS	DE	COMENTARIOS	
4		FILA DE NOMBRES DE COLUMNAS			
5					
6		COLUMNA			
7		DE			
8		NOMBRES	CUERPO	DE	LAS
9		DE	TABLAS	PIMS	
10		FILAS			
11					
...					

Cualquier fila que tenga (*) en la primera posición es considerada como fila de comentarios y es ignorada por el PIMS siendo igual para aquella columna que tenga (!) en la primera posición.

Capítulo II: Materiales y métodos.

A continuación se describe la estructura de algunas tablas de interés contenidas en cada uno de los renglones:

Insumos/Productos.

- Tabla BUY

Un ejemplo de esta tabla se muestra en la Tabla 2.10, esta lista 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: Modelo de Tabla BUY del PIMS.

	TEXT	MIN	MAX	FIX	COST
*		(MBD)	(MBD)	(MBD)	\$/Bbl
*					
*					
*	CRUDE OIL PURCHASES:				
MES	MESA 30 (CFG)				
MEY	MEREY 16 (CFG)				
CNC	CRUDO NACIONAL CUBANO				
D32	DECOM 32				
D28	DECOM 28				
D26	DECOM 26				
D22	DECOM 22				
D16	DECOM 16				
CRD	Total Crude				
FCK	FRCCG ISLA				

- Tabla SELL

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”.

Procesos/Mezclas

- Tabla SUBMODS

Como se muestra en la Tabla 2.11 esta 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.

Tabla 2.11: Modelo de Tabla SUBMODS del PIMS.

	TEXT	REPORT	SUL
*			
SCD1	CDU1, Mode 1		
SCD2	CDU2, Mode 2		
*			
SGSU	Gas Sweeting Unit		
SNH1	Naphtha Hydrotreater 1		
SNH2	Naphtha Hydrotreater 2		
SREF	HN Reformer 1		

SCCR	HN Reformer 2
SRSP	Reformate Splitter
SRFT	Heavy Reformate Pool
SRFL	Ligth reformate Pool
SISO	LN Isomerization
SPNU	PolyNaphtha
SHYD	Hydrogen Plant CCR
SSGU	Sat Gas Plant
S2KO	HKT
SGH1	HDT -1
SGH2	HDT-2
SCFP	Cat feed pool
SCCU	Cat Cracking Unit
SDCU	Delayed Coker
*SVRP	Feed VB & AQC
SVBU	Visbreaker
*SAQC	Aquaconversion
SHCK	Hydrocracker
SMHC	Mild Hydrocracker
SSRU	Sulfur Recovery Unit
SPFS	Plant Fuel System
SWTV	Weight to Volume
SVTW	Volume to Weight

Capítulo II: Materiales y métodos.

- Tabla CAPS

Como se muestra en la Tabla 2.12 esta tabla permite al usuario definir las limitaciones en capacidad de carga de cada una de las unidades de proceso. Los nombres de las filas son de la forma CXXX donde el carácter C significa capacidad y XXX se refieren a cada uno de los procesos y deben coincidir con los definidos en la tabla SUBMODS. La columna TEXT se emplea para describir cada una de las filas, MIN/MAX indican los valores máximos y mínimos que pueden alcanzar la planta y PENALTY representa la penalización que se suma a la función objetivo de la corrida si la capacidad de cada unidad se sale del rango fijado en min y máx.

Tabla 2.12: Modelo de Tabla CAPS del PIMS.

	TEXT	MIN	MAX	PENALTY	REPORT
*					
CR01	Crude Section				
CR02	=====				
CAT1	Crude Unit #1 T/D (BLD)				
CAT2	Crude Unit #2 T/D (CNC)				
CVT1	Vac Unit #1 TPD (BLD)				
CVT2	Vac Unit #2 TPD (CNC)				
CR03	Naphtha Processing				
CR04	=====				
CPNU	PolyNaphtha Unit TPD				
CNH1	Naph Hydrotrt 1 TPD				
CNH2	Naph Hydrotrt 2 TPD				
CCCR	Continuous Catalytic Reformer TPD				
CREF	Low Press Reformer TPD				
CRSP	Reformate Splitter				
CISO	Isom TPD				
CR05	Distillate Processing				

CR06	=====
CSWT	Sweet Kero TPD
C2KO	Hydrotrtr Kero TPD
CGH1	GO Hydrotrtr 1 TPD
CGH2	GO Hydrotrtr 2 TPD
CR07	Cracking
CR08	=====
CHCK	Hydro Cracker TPD
CMHC	Mild Hydro Cracker TPD
CCFP	Cat feed pool
CCCU	Cat Cracker TPD
CR09	Other Processing
CR10	=====
CDCU	Delayed Coker TPD
*CVRP	Feed VB & AQC
CVBU	Visbreaker
*CAQC	Aquaconversion
CHYD	H2 Plant CCR TPD
CSRU	Sulfur Plt TPD
CSGP	Saturated Gas Plant TPD
CGSU	Amine Gas Unit TPD

Mezcla de Componentes

- Tabla BLENDS

En esta tabla se listan todos los productos a ser obtenidos a partir de la mezcla de componentes, indicando a su vez si la formulación va a ser dada por el usuario o determinada por PIMS. Los nombres de las filas son los tres caracteres que define el usuario en la columna

Capítulo II: Materiales y métodos.

TEXT para identificar los productos a ser formulados. Las entradas en las columnas SPEC o FORM deben ser valores iguales a 1, donde una entrada en la columna SPEC indica que el producto es formulado por PIMS, y una entrada en la columna FORM indica que el producto es creado a partir de una formulación dada por el usuario. Un ejemplo de esta se muestra en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13: Modelo de la Tabla BLENDS del PIMS.

	TEXT	SPEC	FORM
*			
*	LPG		
LPG	LPG		
*			
*	MOGAS		
M87	DON 87 to Export		
M90	Local Gasoline		
*			
*	JET		
JEX	Kero/Jet		
*			
*	GASOIL		
DSX	Diesel Export		
DSL	Local Diesel		
*			
*	FUEL OIL		
HSF	FO 1200		
LSF	FO 450		
*			
*	OTROS PRODUCTOS		

BTM	Bitumen
*	CONSUMO PROPIO
CGF	COMB. GAS
LNX	Nafta Liviana

- Tabla BLNSPECS

En la Tabla 2.14 se muestra un ejemplo de la Tabla BLNSPECS, la cual contiene las especificaciones a ser cumplidas por los productos obtenidos a partir de la mezcla de componentes. Los nombres de las filas de la forma NSSS o XSSS, donde SSS son los códigos que definen la propiedad y “N” y “X” indican si la especificación a cumplir es mínima o máxima respectivamente. Los nombres de las columnas deben corresponder solo con el código de los productos cuya formulación sea determinada por especificación mediante el simulador, obviando aquellos cuya formulación es dada directamente por el usuario.

Tabla 2.14: Modelo de Tabla BLNSPECS del PIMS.

	TEXT	LPG	M87	M90	JEX	DSX	DSL	HSF	LSF	LNX
*										
*	RVP Max Spec, PSI									
XRVI	RVP Index									
NMON	MON min									
NRON	RON min									
NDON	DON (RON+MON)/2 min									
XARO	Aromatics, LV%									
XBEN	Benzenes, LV%									
XSUL	Sulfur, WT%									
XOLF	Olefins, LV%									
NSPG	Specific Gravity									
XSPG	Specific Gravity									

Capítulo II: Materiales y métodos.

XFRI	FREEZING POINT INDEX
*	FREEZING POINT °F
XFLI	FLASH INDEX
*	MIN.FLASH POINT°F
NSMK	SMOKE POINT NUMBER
*	SMOKE POINT INDEX
XCLI	IND.PTO.NUBE
*	PTO.NUBE °C
NCTN	Cetane Number
XVBI	Viscosity index max @ 50°C - 122°F (cSt)
*	Viscosity @ 50°C - 122°F (cSt)
NVBI	Viscosity index max @ 50°C - 122°F (cSt)
*	Viscosity @ 50°C - 122°F (cSt)
XVAN	Vanadium, Wgt (ppm)
XHN1	Max % vol NH1
*	REPORTING ROWS
*	
PRON	RON
PMON	MON
PDON	DON (RON+RON)/2
PSUL	Sulphur content (% Wt)
PRVI	RVP Index
PBEN	Benzene content (% Vol)
PARO	Aromatic content (% Vol)
POLF	Olefin content (% Vol)
PSPG	Density

Capítulo II: Materiales y métodos.

PFRI	Freeze point index(°F)
PFLI	Flash point index (°F)
PSMK	Smoke Point index
PCTN	Cetane number
PCLI	Cloud point Index (°C)
PVBI	Viscosity Index @ 50°C - 122°F (cSt)

- Tabla BLNMIX

Esta tabla indica los compuestos que pueden formar parte de los productos que serán formulados por especificación, así como aquellos cuya formulación es dada por el usuario. Las filas identifican los compuestos a ser mezclados y las columnas los de los productos finales que se encuentran en BLENDS. En la Tabla 2.15 se muestra un ejemplo de esta tabla. Las intersecciones de las filas con las columnas deberán ser iguales a uno para aquellos productos a ser formulados por el PIMS. Para los productos creados por el usuario la entrada será la fracción volumétrica o en peso de cada uno de los componentes que van a formar parte del producto; las unidades dependen si el producto será vendido en peso o volumen.

Tabla 2.15: Modelo de Tabla BLNMIX del PIMS.

TEXT	LPG	M87	M90	JEX	DSX	DSL	HSF	LSF	BTM	CGF	LNK
*											
*	LPG										
*											
NC3	Propane										
NC4	N-Butane										
IC4	I-Butane										
P3n	Propane from PNU										
P3=	Propylene from PNU										
B4i	iButane from PNU										

Capítulo II: Materiales y métodos.

B4n	nButane from PNU
B4=	Butylene from PNU
PNF	
K4n	
K4t	
*	
*	
*	Mogas Pool
*	
CNT	Cracked Naphta from ccu
ISS	Isomerate
LNH	HCK LIGTH NAPHTHA
HRF	Hvy Reformate
R94	Reformate 94
PGA	Polynaphtha Gasoline
LN1	Nafta Liviana
fck	FRCCG ISLA
r98	REFORMADO EXISLA
HC4	HCK N-Butane
*	
*	Distillate Pool
*	
GO1	DIESEL
HN1	Heavy Naphta

Capítulo II: Materiales y métodos.

LK1	Light Kero AT1
HK1	Heavy Kero AT1
KH1	Kero Hidrotratado
LK2	Light Kero AT2
HK2	Heavy Kero AT2
*KER	Sweet Kero
KEH	HCK Kerosene
DLH	HCK Diesel
HT1	GH1 Gasoil
HT2	GH2 Gasoil
LL1	LLVGO AT1
LL2	LLVGO AT2
LCO	LCO from ccu
*	
*	Fuel Pool
*	
VBG	Visbreaker Gasoil
AR1	Atmos Residue AT1
VR1	Vacuum Residue VT1
HCO	HCO from ccu
VBR	Visbreaker Residue
*AQR	AQC Residue
VR2	Vacuum Residue VT2
HV2	High vacumm Gasoil VT2
LV2	

PFG	Gas Combustible
GOH	HCK UNCONVERTED OIL

- Tabla BLNNAPH

En esta tabla se identifican las propiedades de los componentes de mezcla de la gasolina. Los nombres de las filas son los tres códigos que refieren a los componentes de mezcla y los nombres de las columnas son los códigos que definen cada propiedad. La columna TEXT también puede ser incluida para identificar a cada uno de los componentes. Los valores de las propiedades pueden ser suministrados en peso o en volumen, dependiendo de cómo se mezclan linealmente. Es importante destacar que para las propiedades no lineales debe suministrarse el índice de mezcla correspondiente en lugar del valor real de la propiedad y aquellas propiedades suministradas en peso deben ser remitidas a la tabla WSPECS.

Debido a que el simulador realiza el cálculo de las propiedades con la premisa de que éstas son lineales en volumen, es necesario suministrarle al mismo la gravedad API o específica de cada uno de los componentes de modo que pueda hacer las conversiones necesarias a los valores de las propiedades que son introducidas en unidades de masa. Un ejemplo de la tabla antes mencionada se muestra en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16: Modelo de Tabla BLNNAPH del PIMS.

	TEXT	SPG	RON	MON	DON	RVI	!RVP	SUL	OLF	ARO	BEN
*											
*	Mogas Pool										
*											
HC4											
NC3	Propane										
NC4	N-Butane										
IC4	I-Butane										

Capítulo II: Materiales y métodos.

PNF	
P3n	Propane from PNU
P3=	Propylene from PNU
B4i	iButane from PNU
B4n	nButane from PNU
B4=	Butylene from PNU
CNT	CCU TCN
FCK	FRCCG ISLA
fck	FRCCG ISLA
R98	REFORMADO EXISLA
r98	REFORMADO EXISLA
ISS	Isomerase
*R90	90R REFORMATE
*R92	92R REFORMATE
HR4	94R REFORMATE
*R95	95R REFORMATE
HR8	98R REFORMATE
HR0	100R REFORMATE
HR2	102R REFORMATE
HRF	Heavy Reformate
R94	Reformate 94
PGA	Polynaphtha Gasoline from PNU
PFG	Plant Fuel
*	
K4n	C4H8

Capítulo II: Materiales y métodos.

K4t	DCU NAPHTHA
LNH	HCK LIGTH NAPHTHA
HNH	HCK HEAVY NAPHTHA
WN1	Wild Naphta Product
AQN	
*	Reference density
*	
*NC1	METHANE
*NC2	ETHANE
*NC3	Propane APS1
*IC4	Iso-Butane APS1
*NC4	N-Butane APS1
*C4=	Butylene
*C4n	Butane
*H2S	H2 Sulfide
*RFG	Fuel Gas
*RSV	Fuel Gas
*K3=	Propylene
*K3n	Propane
*K4=	Butylene
*K4i	iButane
*K4n	nButane
*CLN	Coker LNaph.
*CHN	Coker HNaph.
*PH2	High-Purity H2
*C3n	Propane

*LH2	Low-Purity H2
*C4i	iButane
*KN1	KE HDT Naph.1
*NOG	N&O Nat. Gas
*IF1	Iso. Feed
*HBZ	Benzene hydro feed
*RF1	Ref. Feed
*HHN	Hydrotreated HCK Naphtha
*LR6	Lgt Reformate RON 96
*LR8	Lgt Reformate RON 98
*LR0	Lgt Reformate RON 100
*GLN	GOHDT L.Naph
*GHN	GOHDT H.Naph
*HLN	VGO HDT LN cas coker
*PEN	Propane
*LNA	Imported HDT Light Naphtha
LN1	Light Naphtha
*	

2.6. Procedimiento para la elaboración del modelo PIMS ante un escenario de parada de planta.

Para llevar a cabo este objetivo se debe establecer el escenario a considerar:

- Fuera de servicio la unidad de Hidrocrqueo (HCK) y la de Hidrocrqueo Moderado (MHC).

El procedimiento para la obtención del esquema de mezclado de gasolina ante el escenario planteado parte de realizar modificaciones al CASO BASE (condiciones normales de operación), (Mayelín Gutiérrez, 2015)

Acciones a realizar:

1. Eliminar del modelo las unidades que entran en parada y modificar las capacidades de las unidades que se vean afectadas.
 - 1.1. Modificar la Tabla CAPS para garantizar que el modelo no incluya las unidades MHC+HCK.
 - Colocar un cero en la capacidad MAX de estas unidades.
 - Reducir la capacidad del CCU en un 30 % ya que, teniendo en cuenta las especificaciones del licenciante, ante cambios en la materia prima solo se garantiza la operación de CCU a un 70 % de su capacidad.
 2. Reubicar las corrientes que alimentan las unidades que entran en parada.
 - 2.1. Modificar la tabla SUBMODS específicamente el submodelo CFP (Corriente de alimentación al pool)
 - Activar como posibles alimentaciones las corrientes LV_1 (Corte ligero del vacío 1), HV_1 (Corte pesado del vacío 1) y HV_2 (Corte pesado del vacío 2) que van a pasar directamente de la destilación al craqueo.
3. Correr el modelo, eliminando posibles errores e inconsistencias hasta lograr la convergencia del mismo.
4. Analizar el cumplimiento de los requisitos de calidad y la variación con respecto al Caso Base.



Capítulo III

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se realiza una presentación del Caso Base que es donde se encuentran operando todas las unidades de proceso y sobre la base del cual se realizan las modificaciones, para lograr el esquema óptimo de mezclado de gasolina ante la parada de las unidades MHC+HCK. Además de lograr dicho esquema, objetivo principal de este trabajo, se realiza un análisis de los barriles de gasolina que se dejan de producir diariamente ante este escenario.

3.1. Presentación del Caso Base

Para el caso base donde se encuentran en operación todas las unidades de proceso, la cartera de productos para la venta se completa de una forma óptima, obteniéndose una función objetivo (Obj Fn) de 2 315 280 USD/ día como se muestra en la Fig 3.1.

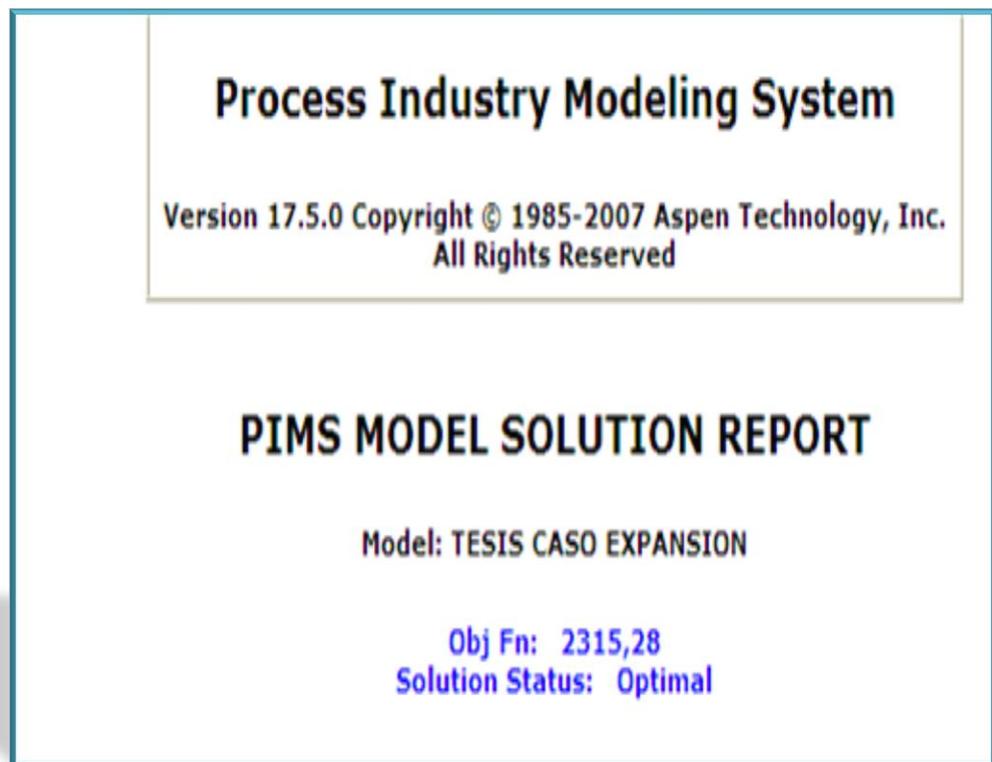


Fig. 3.1: Reporte del modelo Caso Base. **Fuente:** Mayelín Gutiérrez Brunet, 2015

Esta función incluye todos los gastos, sean operacionales, fijos o de mantenimiento por lo cual representa la ganancia. Este resultado aparece en el Reporte que ofrece el PIMS luego de realizar una corrida, el índice de dichos resultados se muestra en la Fig 3.2.

Table of Contents	
Material Purchases	3
Group Purchases	4
Material Sales	5
Group Sales	6
Utility Purchases	7
Utility Sales	8
Penalty Report	9
Economic Summary Analysis	10
Bounded Variable Status	11
Capacity Utilization Summary	12
Process Limit Summary	13
Recursion Log Report	14
Specification Blend	21
Stream Property Report	30
Stream Disposition Map	42
Stream Disposition Summary	58
Utility Disposition Map	62
Process Submodel Summary	63

Fig. 3.1: Tabla de contenidos de reporte del PIM del Caso Base. **Fuente:** Mayelín Gutiérrez Brunet, 2015.

Los resultados del esquema de mezclado de la gasolina para este caso se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Esquema de mezclado óptimo para el Caso Base. **Fuente:** Mayelín Gutiérrez Brunet, 2015.

Especificaciones	CASO BASE						PRODUCTO FINAL		
	Nafta liviana	Nafta ligera de HCK	Reformado Pesado	Isomerizado	n-Butano de PNU	Gasolina Polinafta	Nafta craqueada	Especificaciones Mezcla	Especificaciones DON 87*
RVP index	13.4	17.8	10.17	24.70	139.60	6.10	10.4	15.2	15.2 máx.
MON	69.9	77	81	85.60	89.10	83.80	80.6	82.45	82 mín.
DON	71.9	78	87.5	86.80	91.55	91.50	85.7	87.01	87 mín.
ARO(% V)	4.18	1	55	0	0	1.00	18.3	28,9	29.00 máx.
BEN(% V)		0	0.2	0	0	0.1	1.09	0.5475	0.62 máx.
SUL(% w)	0.0006	0.001	0	0	0	0	0.001	0.0005	0.001 máx.
OLF(% V)	1.0	0	0.1	0	0	95	33.9	12.8984	30 máx.
RON(mín)	68.0	79	94	88	94	98	90.8	91.5335	report
SPG	0.68	0.68	0.77	0.66	0.58	0.74	0.72	0.7358	report
(% V)	3.97	6.60	42.30	17.14	1.56	4.63	23.86	100	

(*) Estas especificaciones se establecen en los catálogos de ventas de Cupet.

Como se puede apreciar la gasolina cumple con las especificaciones de calidad máximas/mínimas establecidas, además el esquema de mezclado resultante logra incorporar todas las corrientes que según el diseño conforman el pool. Los mayores aportes a la mezcla están dados por el reformado pesado, el isomerizado y la nafta craqueada con 42.30, 17.14 y 23.86 % respectivamente.

En el epígrafe siguiente se ofrecen los resultados del programa para el escenario planteado anteriormente.

3.2. Caso sin MHC+HCK

Siguiendo la metodología establecida en el capítulo anterior para el caso de parada de planta de las unidades MHC+HCK se procede a correr el modelo en el PIMS. Los resultados obtenidos serán comparados con el Caso Base.

La primera modificación realizada al Caso Base se produjo en la Tabla CAPS, el resultado se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Modificación a la Tabla CAPS del PIMS. **Fuente:** PIMS

	Text	Mín	Máx	Penalty	Report
CR01	Crude Section				
CAT1	Crude Unit #1 T/D (BLD)	0,000	Diseño		
CAT2	Crude Unit #2 T/D (CNC)	0,00	Diseño		
CVT1	Vac Unit #1 TPD (BLD)	0,00	Diseño		
CVT2	Vac Unit #2 TPD (CNC)	0,00	Diseño		
CR03	Naphtha Processing				
CPNU	PolyNaphtha Unit TPD	0,00	Diseño		
CNH1	Naph Hydrotrt 1 TPD	Diseño	Diseño		

CNH2	Naph Hydrotrtr 2 TPD	0,00	Diseño	
CCCR	Continuous Catalytic Reformer TPD	0,00	Diseño	
CREF	Low Press Reformer TPD	0,00	Diseño	
CRSP	Reformate Splitter	0,00	Diseño	
CISO	Isom TPD	0,00	Diseño	
CR05	Distillate Processing			
CSWT	Sweet Kero TPD	0,00	Diseño	
C2KO	Hydrotrtr Kero TPD	0,00	Diseño	
CGH1	GO Hydrotrtr 1 TPD	0,00	Diseño	
CGH2	GO Hydrotrtr 2 TPD	0,00	Diseño	
CR07	Cracking			
CHCK	Hydro Cracker TPD	0,00	0,00	
CMHC	Mild Hydro Cracker TPD	0,00	0,00	
CCFP	Cat feed pool	0,00	0.7*Diseño	
CCCU	Cat Cracker TPD	0,00	0.7*Diseño	
CR09	Other Processing			
CDCU	Delayed Coker TPD	0,00	Diseño	

A continuación se muestra la modificación realizada a la alimentación del CFP para lograr que algunas corrientes pasen directo al CCU ya que están en parada las unidades MHC y HCK.

Tabla 3.3: Modificación al submodelo CFP del PIMS. **Fuente:** PIMS.

	Text	!GOH	!MUC	LV1	LV2	HV1	HV2	CFP
*								
*WBALGOH	Unconverted from HCK	1						
*WBALMUC	Unconverted from MHC		1					
WBALLV1	LVGO			1				
WBALLV2	LVGO				1			
WBALHV1	HVGO					1		
WBALHV2	HVGO						1	
*								
WBALCFP	Cat Feed Pool	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
*								

Como resultado de la corrida del programa, con las modificaciones realizadas al Caso Base, se obtuvo el siguiente reporte:

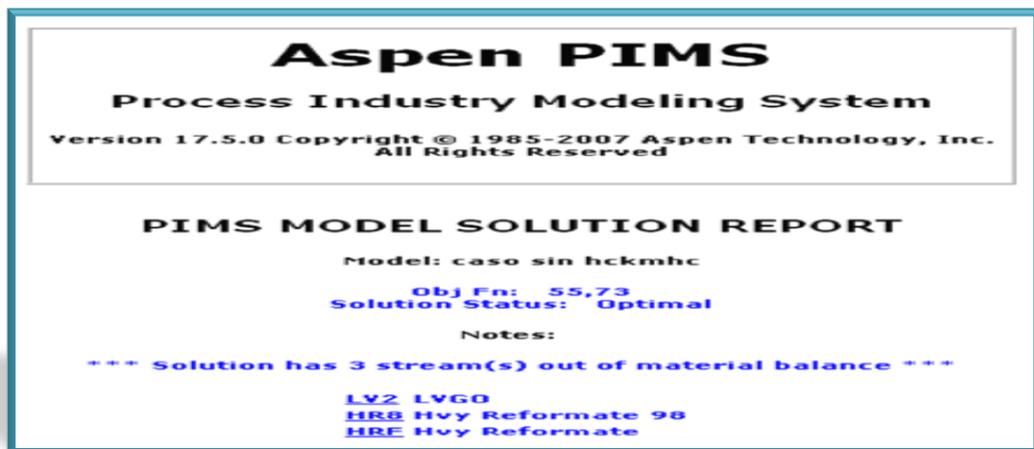


Figura 3.2: Reporte del modelo sin MHC+HCK. **Fuente:** Reporte del PIMS.

En este caso la función objetivo disminuyó su valor considerablemente en 2 259 550 USD/día con respecto al Caso Base, además aparecen 3 corrientes fuera de balance (LV2: Corte ligero del vacío 2, HR8: Reformado pesado 98 y HRF: Reformado pesado) ya que no cumplen con las especificaciones. Para revertir esta situación será necesario realizar algunos cambios a las restricciones del proceso y así mejorar la rentabilidad económica del mismo.

En la Tabla 3.4 se muestra que los valores especificados del contenido de benceno y aromáticos en la gasolina se encuentran en el máximo permisible por lo que se decide mover estas restricciones a valores superiores para así poder incorporar al proceso de mezclado las corrientes que quedan fuera de balance, teniendo en cuenta que para comercializar la gasolina en el mercado local no existe restricción para estos parámetros.

Tabla 3.4: Calidad de los productos establecidas en Especificaciones del mezclado. **Fuente:** Reporte del PIMS.

Product Qualities		Minimum	Product	Maximum
RVI	RVP Index		15,1997	15,1997
MON	MON min	82,0000	82,2113	
DON	DON (RON+MON)/2 min	87,0000	87,2372	
ARO	Aromatics, LV%		29,0000	29,0000
BEN	Benzenes, LV%		0,6200	0,6200
SUL+	Sulfur, WT%		0,0005	0,0010
OLF	Olefins, LV%		22,8223	30,0000
RON	RON min		92,2630	
SPG	Specific Gravity		0,7316	

Para ello en la Tabla Blnspec se modifica la restricción del contenido de benceno y de aromático moviendo sus valores desde 0.62 hasta 0.8 % vol. y de 29 a 32 % vol. respectivamente.

Tabla 3.5: Modificación de la Tabla Blnspec del PIMS. **Fuente:** PIMS

Text	LPG	M87	M90	JEX	DSX	DSL	HSF	LSF	LNx
*									
*	RVP Max Spec, PSI	142.20	8.80	9.70					

XRVI	RVP Index	491.20	15.20	17.10					
NMON	MON min		82.00						
NRON	RON min			90.00					
NDON	DON (RON+MON)/2 min		87.00						
XARO	Aromatics, LV%		32.00		25.00				
XBEN	Benzenes, LV%		0.80						
XSUL	Sulfur, WT%		0.001	0.10	0.30	1.00×10^{-3}	0.90	5.00	3.50
XOLF	Olefins, LV%		30.0						
NSPG	Specific Gravity				0.77		0.81		
XSPG	Specific Gravity				0.84	0.84	0.86	0.99	0.99
XFRI	FREEZING POINT INDEX				0.21				
*	FREEZING POINT °F				-52.60				
XFLI	FLASH INDEX				698.64	508.51	508.51	241.83	241.83
*	MIN.FLASH POINT°F				100.00	113.00	113.00	144.00	144.00
NSMK	SMOKE POINT NUMBER				19.00				
XCLI	IND.PTO.NUBE					240.77			
NCTN	Cetane Number					51.00	46.00		
XVBI	Viscosity index max								23.75

	@ 50°C - 122°F (cSt)								
*	Viscosity @ 50°C - 122°F (cSt)							180.00	
NVBI	Viscosity index max @ 50°C - 122°F (cSt)						17.13	20.30	
*	Viscosity @ 50°C - 122°F (cSt)						1200.00	450.00	
XVAN	Vanadium, Wgt (ppm)						400.00	400.00	
XHN1	Max % vol NH1			16.00		2.00	2.00	2.00	
*	REPORTING ROWS								
PRON	RON		1.00	1.00					1.00
PMON	MON		1.00						1.00
PDON	DON (RON+RON)/2		1.00	1.00					1.00
PSUL	Sulphur content (%Wt)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PRVI	RVP Index	1.00	1.00	1.00					1.00
PBEN	Benzene content (% Vol)		1.00	1.00					1.00
PARO	Aromatic content (% Vol)		1.00	1.00	1.00				1.00

POLF	Olefin content (% Vol)		1.00						1.00
PSPG	Density		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PFRI	Freeze point index(°F)				1.00				
PFLI	Flash point index (°F)				1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PSMK	Smoke Point index				1.00				
PCTN	Cetane number					1.00	1.00		
PCLI	Cloud point Index (°C)					1.00			
PVBI	Viscosity Index @ 50°C - 122°F (cSt)							1.00	1.00

Además se decide destinar el LVGO a la mezcla de fuel, ya que también queda fuera del balance. Anteriormente esta fracción pesada formaba parte de la alimentación al HCK y al entrar en parada dicha unidad es enviado directamente al CCU (Tabla 3.3) quien estará operando a menor capacidad, lo que provoca que esta corriente no tenga ningún destino. Este corte no puede ser enviado a la mezcla de productos ligeros por especificaciones de calidad, entre las cuales se puede referir que no entra en los rangos de destilación, no cumple el punto de cetano para el caso del diesel y para el turbo el punto de humo. Además enviando este corte a fuel se logra disminuir la viscosidad del mismo y se evita el empleo de productos finales para este fin.

Para realizar esta modificación, en la Tabla Blnmix se agrega dicha corriente a la mezcla de fuel.

Tabla 3.5: Modificación de la Tabla Blnmix del PIMS.

* TABLE BLNMIX												
	TEXT	LPG	M87	M90	JEX	DSX	DSL	HSF	LSF	BTM	CGF	LNX
*	LPG											
NC3	Propane	1,000										
NC4	N-Butane	1,000										
IC4	I-Butane	1,000										
P3n	Propane from PNU	1,000										
P3=	Propylene from PNU	1,000										
B4i	iButane from PNU	1,000	1,000									
B4n	nButane from PNU	1,000	1,000									
B4=	Butylene from PNU	1,000										
PNF		1,000										
K4n		1,000	1,000	1,000								

K4t		1,000	1,000	1,000						
*	Mogas Pool									
CNT	Cracked Naphta from ccu		1,000	1,000						
ISS	Isomerate		1,000							
LNH	HCK LIGTH NAPHTHA		1,000	1,000						
HRF	Hvy Reformate		1,000	1,000						
R94	Reformate 94		1,000	1,000						
PGA	Polynaphtha Gasoline		1,000							
LN1	Nafta Liviana		1,000	1,000						1,000
Fck	FRCCG ISLA		1,000	1,000						
r98	REFORMADO EXISLA		1,000	1,000						
HC4	HCK N-Butane			1,000						
*	Distillate Pool									
GO1	DIESEL					1,000	1,000	1,000		

HN1	Heavy Naphta			1,000		1,000	1,000	1,000		
LK1	Light Kero AT1			1,000						
HK1	Heavy Kero AT1					1,000	1,000	1,000		
KH1	Kero Hidrotratado			1,000						
LK2	Light Kero AT2			1,000		1,000				
HK2	Heavy Kero AT2					1,000				
*KER	Sweet Kero			1,000						
KEH	HCK Kerosene			1,000	1,000	1,000				
DLH	HCK Diesel				1,000	1,000				
HT1	GH1 Gasoil					1,000				
HT2	GH2 Gasoil				1,000					
LL1	LLVGO AT1						1,000	1,000		
LL2	LLVGO AT2						1,000	1,000		
LCO	LCO from ccu						1,000	1,000		

* Fuel Pool									
VBG	Visbreaker Gasoil				1,000	1,000			
AR1	Atmos Residue AT1				1,000	1,000			
VR1	Vacuum Residue VT1				1,000	1,000			
HCO	HCO from ccu				1,000	1,000			
VBR	Visbreaker Residue				1,000	1,000			
*AQR	AQC Residue				1,000	1,000			
VR2	Vacuum Residue VT2						1,000		
HV2	High vacuum Gasoil VT2						1,000		
LV2	LVGO						1,000		
PFG	Gas Combustible							1,000	
GOH	HCK UNCONVERTED OIL				1,000	1,000			

En este caso lo que se hizo fue colocar un 1 a la corriente LVGO (LV2) en la columna de la producción de bitumen para que el programa la tenga en cuenta en este proceso de mezclado.

Como resultado se obtuvo la siguiente función objetivo:

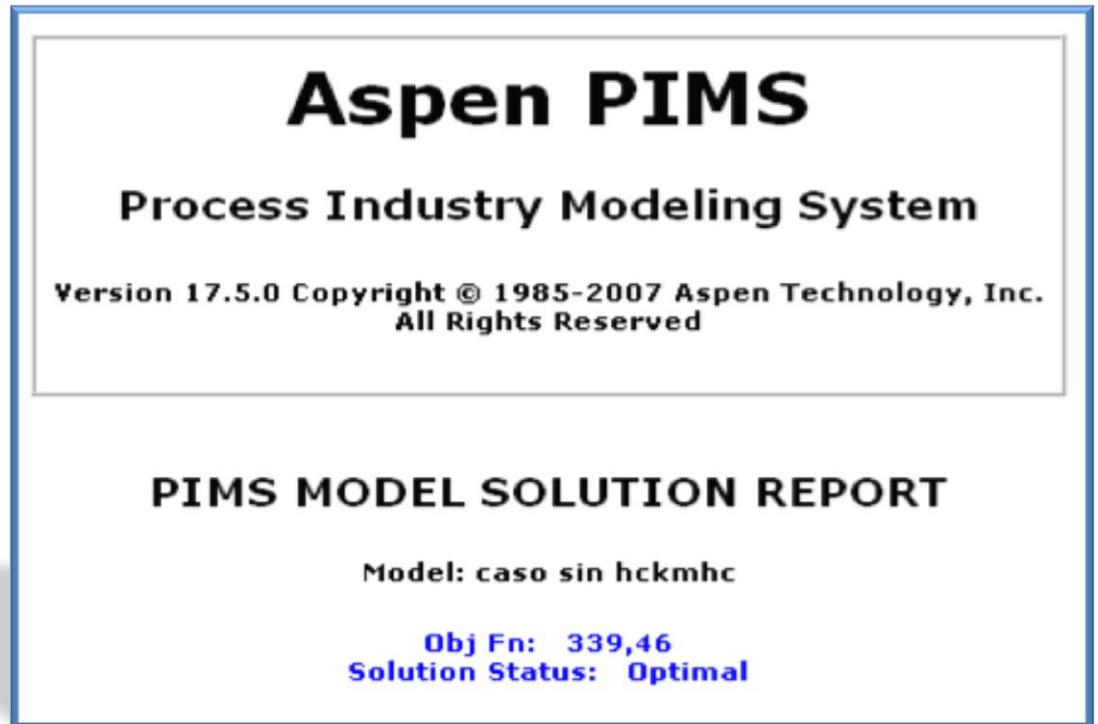


Figura 3.2: Reporte de la segunda corrida del modelo sin MHC+HCK. **Fuente:** Reporte del PIMS.

La función objetivo de esta corrida queda muy por debajo del Caso Base (339 460 USD/día) pero aun así para el escenario de parada por emergencia de estas unidades representa el valor óptimo y todas las corrientes fueron incluidas en el balance.

Los resultados de la mezcla de gasolina se muestran en la tabla que a continuación se presenta.

Tabla 3.6: Esquema de mezclado óptimo para el Caso sin MHC+HCK.

	CASO sin MHC+ HCK								PRODUCTO FINAL	
	Nafta liviana	Nafta ligera de HCK	i-Butano de PNU	Reformado Pesado	Isomerizado	n-Butano de PNU	Gasolina Polinafta	Nafta craqueada	Especificaciones Mezcla	Especificaciones Mogas 87
RVP index	13.4	0	206.1	10.17	24.7	139.6	6.1	10.4	15.2	15.2máx.
MON	69.9	0	89.1	81	85.6	89.1	83.8	80.6	82	82 mín.
DON	71.9	0	91.55	87.5	86.8	91.55	91.5	85.7	87	87 mín.
ARO(% V)	4.18	0	0	55	0	0	1	18.3	30	32.00 máx.
BEN(% V)		0	0	0.2	0	0	0.1	1.09	0.72	0.8 máx.
SUL(% w)	0.0006	0	0	0	0	0	0	0.001	0.0005	0.001 máx.
OLF(% V)	1.0	0	0	0.1	0	0	95	33.9	21.34	30 máx.
RON(mín.)	68.0	0	94	94	88	94	98	90.8	92.1	report
SPG	0.68	0	0.55	0.77	0.66	0.59	0.74	0.72	0.7342	report
(% V)	2.94	0	0.35	36.94	5.11	2.80	5.97	45.88	100	

Al estar fuera de operación las unidades MHC+HCK el PIMS establece un nuevo esquema de mezclado para la gasolina garantizando maximizar, en lo posible, la función objetivo. Este esquema, siendo comparado con el Caso Base, incrementa la proporción de nafta craqueada a un 45.88 % y disminuye el reformado pesado a 36.94 % y el isomerizado a un 5.11 %. Se redujo también la cantidad de nafta ligera debido a su bajo RON, MON y DON. Además para ajustar las propiedades y así cumplir con las especificaciones incorpora un 0.35 % de i- butano de PNU y se aumenta a un 2.80% el n- butano. Otro resultado que ofrece el reporte del PIMS es el de las ganancias debido a la venta de productos. En la Tabla 3.7 se expone la variación de estas ventas respecto al Caso Base (CB).

Tabla 3.7: Variación de las ventas de productos con respecto al Caso Base.

Productos	Caso: Sin MHC+HCK
Jet A1(BPD)	CB - 5 411
Total de Jet A1 (BPD)	CB - 5 411
DON 87(BPD)	CB - 23 896
Gasolina local (BPD)	= CB
Nafta liviana (BPD)	= CB
Total de gasolina(BPD)	CB - 23 896
Diesel de exportación (BPD)	CB - 33 554
Diesel Local (BPD)	CB - 25 604
Total de Diesel (BPD)	CB - 59 158
Fuel 1200 (BPD)	= CB
Fuel 450 (BPD)	CB + 10 678
Total de Fuel (BPD)	CB + 10 678

Ante la parada de planta de las unidades MHC+HCK se dejaría de producir 23 896 Bbs/ día de gasolina lo cual equivale a 3 214 728 880 USD/ día (Reporte del PIMS). Se debe resaltar que esta disminución de la producción de gasolina también se vio influenciada por la reducción de la capacidad del CCU ante el cambio en la alimentación.

Por concepto de calidad de la gasolina DON 87 no se cumple con las especificaciones de contenido de aromáticos y de benceno por lo que no puede ser exportada aunque se puede comercializar como Gasolina Motor 90 octanos, clasificación establecida en el catálogo de especificaciones de Cupet, para el mercado local.



Conclusiones

CONCLUSIONES

- Con la implementación de un esquema de refinación con Conversión Profunda se logran índices de rentabilidad económica superiores a los actuales en la refinería Camilo Cienfuegos.
- El Sistema de Modelación de Procesos Industriales (PIMS) fue la herramienta de trabajo utilizada para la obtención del esquema de mezclado óptimo de la gasolina en la refinería Camilo Cienfuegos, ante un escenario de parada de planta.
- Ante la parada de las unidades MHC+HCK el esquema de mezclado óptimo de la gasolina es: 2.80% de n- butano de PNU, 45.88% de nafta craqueada, 36.94 % de reformado pesado, 5.11 % de isomerizado, 2.94 % de nafta liviana, 5.97 % de gasolina polimerizada y se incorpora un 0.35 % de i- butano de PNU.
- Ante el escenario de parada de las unidades MHC+HCK y para un esquema de mezclado óptimo es imposible cumplir con los requerimientos del contenido de aromáticos y benceno especificados para la calidad de la gasolina DON 87.
- El esquema de mezclado propuesto para la gasolina, ante la parada por emergencia de las unidades MHC+HCK, cumple con las especificaciones de la Gasolina Motor 90 octanos destinada al mercado local.



Recomendaciones

RECOMENDACIONES

- Aplicar, dado el caso, el esquema de mezclado de gasolina propuesto para el escenario de parada de planta de las unidades MHC+HCK.
- Realizar el análisis del comportamiento de la calidad de todos los productos de refinación ante este y otros escenarios de parada de plantas.
- Desarrollar un análisis de factibilidad para determinar las pérdidas económicas ocasionadas por la disminución tanto del volumen como de la calidad de la gasolina producida.



Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah M. Aitani, G. J. A. (2004). *Catalytic naphtha reforming*. CRC Press.
- A.J. Gruia, J. S. (1996). *Science and Technology*. Marce Decker Inc.
- Akzo Nobel. (2000). *Hydroprocessing Course*.
- Alberto Quiros Corradi. (1997, junio 15). Las finanzas del petróleo (II), (El Nacional).
- American Society for Testing and Materials. ASTM D5134 Standard Test Method for Detailed Analysis of Petroleum Naphthas through n-Nonane by Capillary Gas Chromatography (1997).
- Anne K Rhodes. (1996, marzo 18). Venezuelan refiner completes \$2.5-billion refinery expansion, (Oil and Gas Journal Special).
- A. Pietri. (1970). *Representación de mezclas de gasolina en un modelo lineal*. Caracas, Venezuela: U.C.V. – E.I.Q.
- Arno de Klerk. (2008). *Fisher-tropsch refining* (Doctoral). University of Pretoria.
- A. Taha. (2014). *Investigación de Operaciones* (7ma Edición.). México: Prentice Hall.
- A. Vian Ortuño. (1997). *Introducción a la Química Industrial* (Segunda.). Madrid: Reverte, S.A.
- Axens. (2011). *Process Data Book Isomerization unit* (Volume 1). Expansion of Camilo Cienfuegos Refinery.
- Axens. (2011). *Process Data Book Catalytic Reformation unit* (Volume 1). Camilo Cienfuegos Refinery.
- Axens. (2011). *Process Data Book Polynaphtha unit* (Volume 1). Expansion of Camilo Cienfuegos Refinery.

- Axens. (2011). *Process Data Book Catalytic Cracking unit* (Volume 1). Expansion of Camilo Cienfuegos Refinery.
- Axens. (2010). *Process Data Book Hydrocracking unit* (Volume 1). Expansion of Camilo Cienfuegos Refinery.
- Bechtel Corporation. (1994). *PIMS USER'S MANUAL Versión 7.00*. U.S.A.
- C. Azofeifa. (2003). Aplicación de Excel en la Investigación de Operaciones. Recuperado a partir de <http://www.una.ac.cr/mate/publicac/excel.htm>
- CEPET. (1992). *Procesos de refinación*. Caracas, Venezuela.
- CORPOVEN. (1999). Documento Técnico: Pasantía Regalías El Palito.
- Eiman Ali. (2008). *Improvement of Gasoline Octane Number by Blending Gasoline with Selective Components*. (Degree of Master of Science in Chemical Engineering/Oil Refinery & Petrochemical Industry.). University Of Technology, Bagdad.
- Ernest E. Ludwig. (1999). *Applied process design for chemical and petrochemical plants*. (3ra ed.). Houston, TX: Gulf Publishing Company.
- E. Tarifa. (2001). *Optimización y Simulación de Procesos*. Universidad Nacional de Jujuy. Argentina.
- E. Verruschi et al. (2009). Cómo planificar optimamente la cadena de suministros de una Refinería de Petróleos. *53, 13*.
- F. Quintana. (s. f.). *Síntesis de procesos: Optimización Del Diseño De Plantas Química*. Departamento de Ingeniería Química Industrial y Medio Ambiente. Madrid. España.: Universidad Politécnica de Madrid.
- G. J. Antos. (1995). *Catalytic Naphtha Reforming*. Marcel Dekker.

- G. Speight. (2006). *The Chemistry and Technology of Petroleum* (Fourth.). New York: Taylor & Francis Group.
- James Gary. (1979). *Petroleum Refinery Destillation*. Houston Texas: Gulf Publishing Company.
- J.F. Le Page. (1987). *Applied Heterogeneous Catalysis*. Technip.
- J. H. Gary, & G.E. Handwerk. (2001). *Petroleum Refining: Technology and Economics* (4ta ed.). New York: Basel: Marcel Dekker, Inc.
- J. Lluch Urpí. (2000). *Tecnología y Margen del Refino*.
- J. Marín. (2006). *Solver: La Navaja Suiza de la Programación Lineal*. Recuperado a partir de <http://jmingenieria.com/index.html?tabladecontenido.htm>
- J.P. Favennec. (2001). *Refinery operation and management* (Technip., Vol. 5). París.
- J.P. Wauquier. (2000). *Petroleum refining*. (Technip., Vol. 2). París.
- J.P. Wauquier. (s. f.). *Crude oil petroleum products process flowsheets*. (Technip.). París: Instituto Francés del Petróleo.
- LAGOVEN. (1996, octubre). Guía de Especificaciones de Calidad de Productos LAGOVEN.
- L. ARTEAGA, & J. CHÁVEZ. (2000, noviembre). Optimización de mezclas en la preparación de gasolinas terminadas. PEMEX-Refinación.
- L. VALERA, & R. HOLER. (1988). *Manual de Naftas y Gasolinas de la Refinería de Amuay*. LAGOVEN, Ingeniería de Procesos.
- Manual de Operaciones. (1992). *Mezclador de gasolina*. Refinería Amuay.
- M. A. Ramos Carpio. (1997). *Refino de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica*. Madrid, España: Fundación Fomento Innovación Industrial.
- Mark P. Lapinski. (2008). Increasing catalytic reforming yields. *Catalysis*.

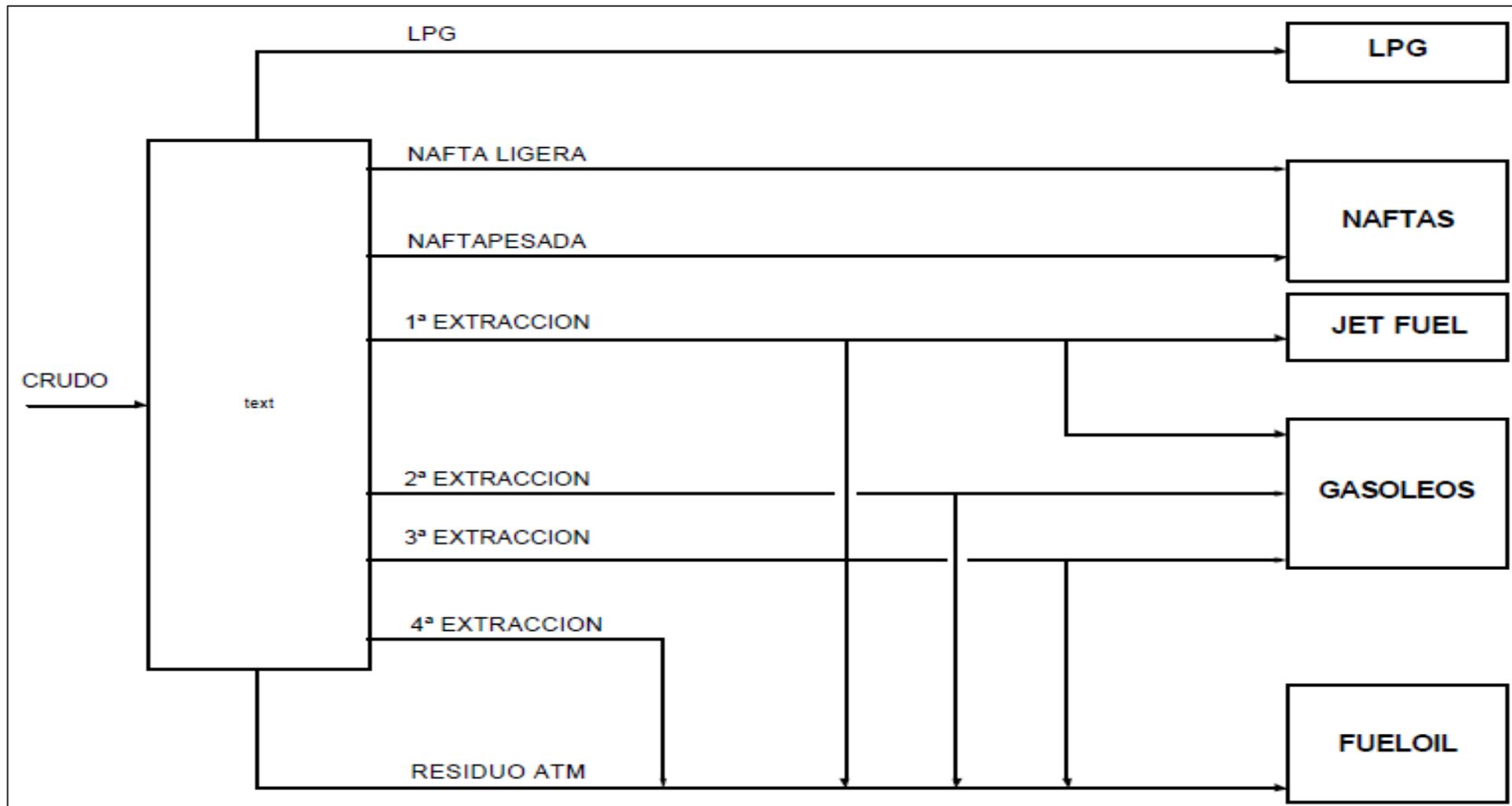
- MathPro. (2011, octubre 24). Economía de la Energía: Optimización Aplicada. Recuperado a partir de www.mathproinc.com
- Mayelín Gutiérrez Brunet. (2015). *Esquemas de mezclado para la gasolina ante diferentes escenarios de paradas de planta en el Proyecto expansión de la Refinería de Petróleo Camilo Cienfuegos*. UNIVERSIDAD DE MATANZAS «CAMILO CIENFUEGOS», Matanzas.
- M. Sahdev, Srivastava, & K. Jain. (2004). *Petroleum Refinery Planning and Optimization Using Linear Programming*. Recuperado a partir de http://www.cheresources.com/refinery_planning_optimization.shtml.
- Muñecas Vidal M. Á. (2005). *Caracterización y tratamiento del crudo de petróleo*.
- N. Pasadakis, Ch. Foteinopoulos, & V. Gaganis. (2006). Octane number prediction for gasoline blends, (Fuel Processing Technology).
- Paul Geladi, & B. Kowalski. (1985). *Partial Least Squares Regression: A Tutorial*. Laboratory for Chemometrics and Center for Process Analytical Chemistry: University of Washington.
- PDVSA. (2003). *Introducción a los procesos de refinación. Refinería El Palito*. Venezuela.
- PDVSA-INTERVEP. (1994). Manual de Documentación Técnica del Modelo VTE.
- Pierre Leprince. (2001). *Conversion Processes* (Technip., Vol. 3). París: Instituto Francés del petróleo.
- P Leprince. (1995). *Petroleum Refining: Conversión Procceses* (Vol. Tomo 3). Paris, Francia: Institut Français du Pétrole Publications.
- P. R Pujado, D. S. J. J. (2006). *Handbook of petroleum processing*. Springer.

- R.A. Van. (2001, agosto). La gasolina y el gasóleo diesel a partir del 2005, (Ingeniería Química).
- Reza Khavari Kohnehshahri. (2011). Modeling and Numerical Simulation of Catalytic Reforming Reactors, *1*, 7.
- Ronald H. Fischer. (1987, junio 30). Production of high octane gasoline.
- Steven M. Maggard. (1990, octubre 16). Octane measuring process and device.
- Tom Darin Liskey. (1997, marzo 6). Marginal field crude production up, (The Daily Journal).
- Unión Cuba Petróleos. (2008, diciembre). Catálogo de especificaciones de Cupet.
- William Luyben. (1992). Process modeling simulation and control for Chemical Engineers. *Nueva York*.

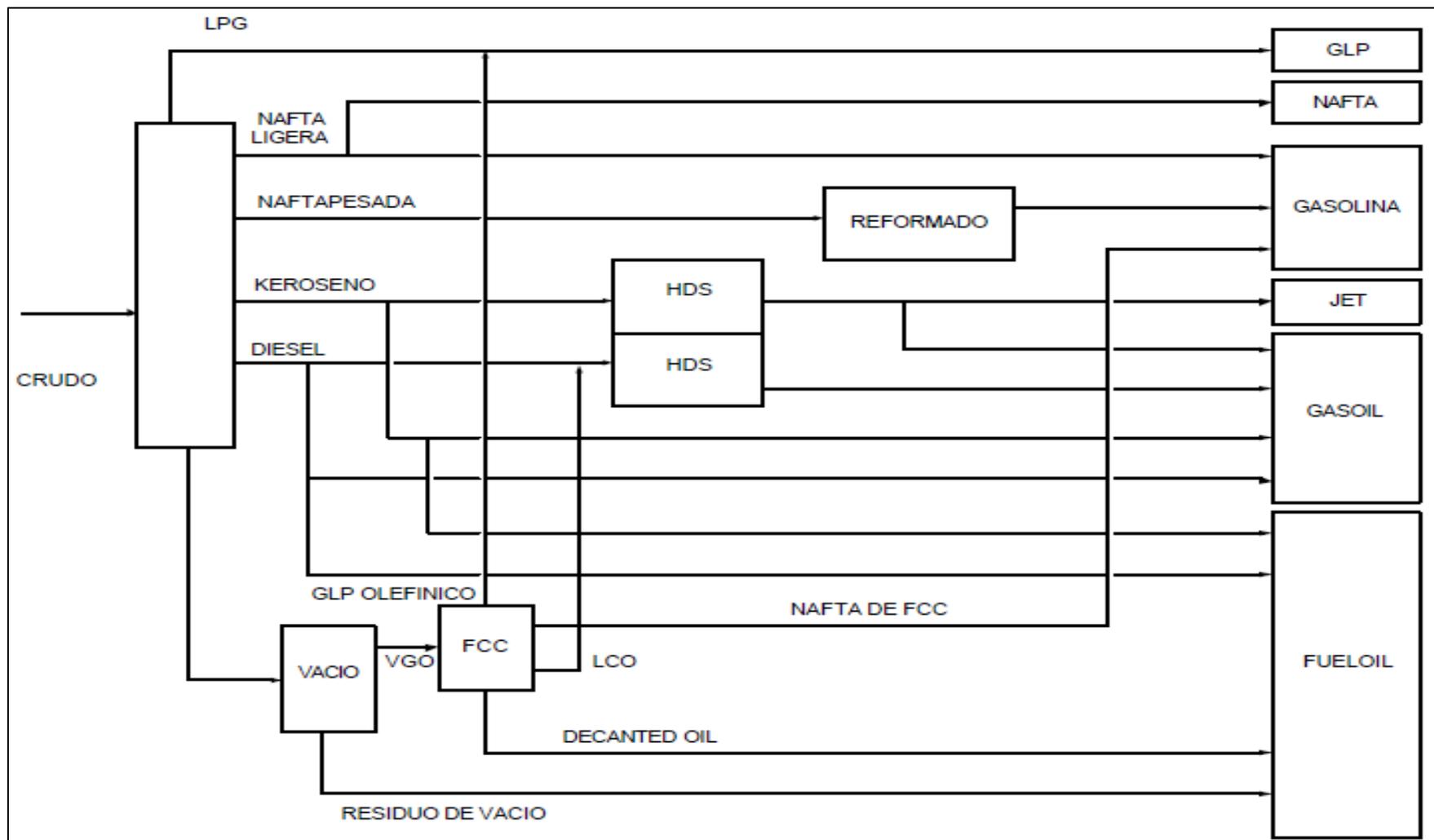


Anexos

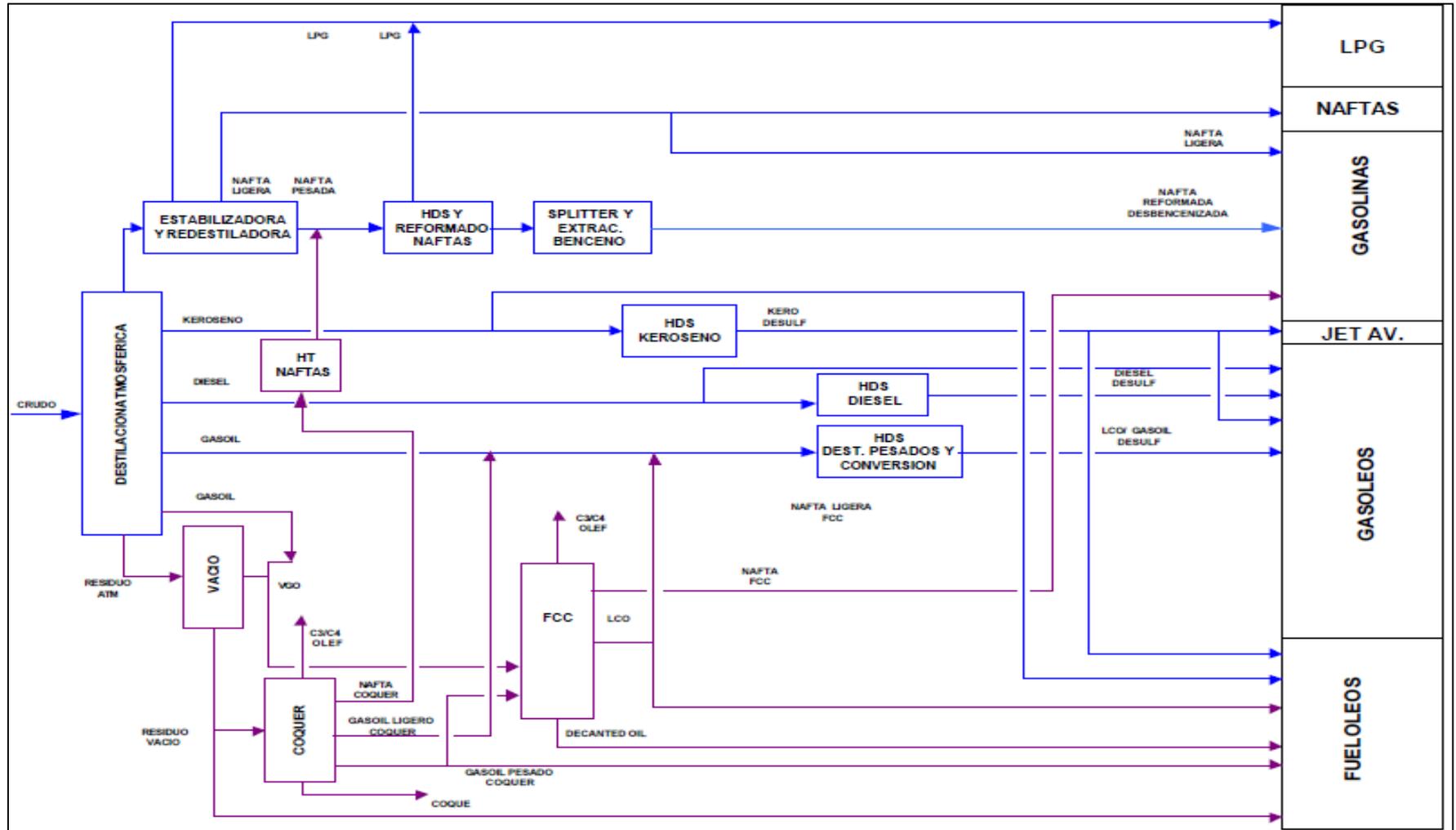
Anexo 1: Esquema representativo del Sistema de Topping. Fuente: Urpí, 2008.



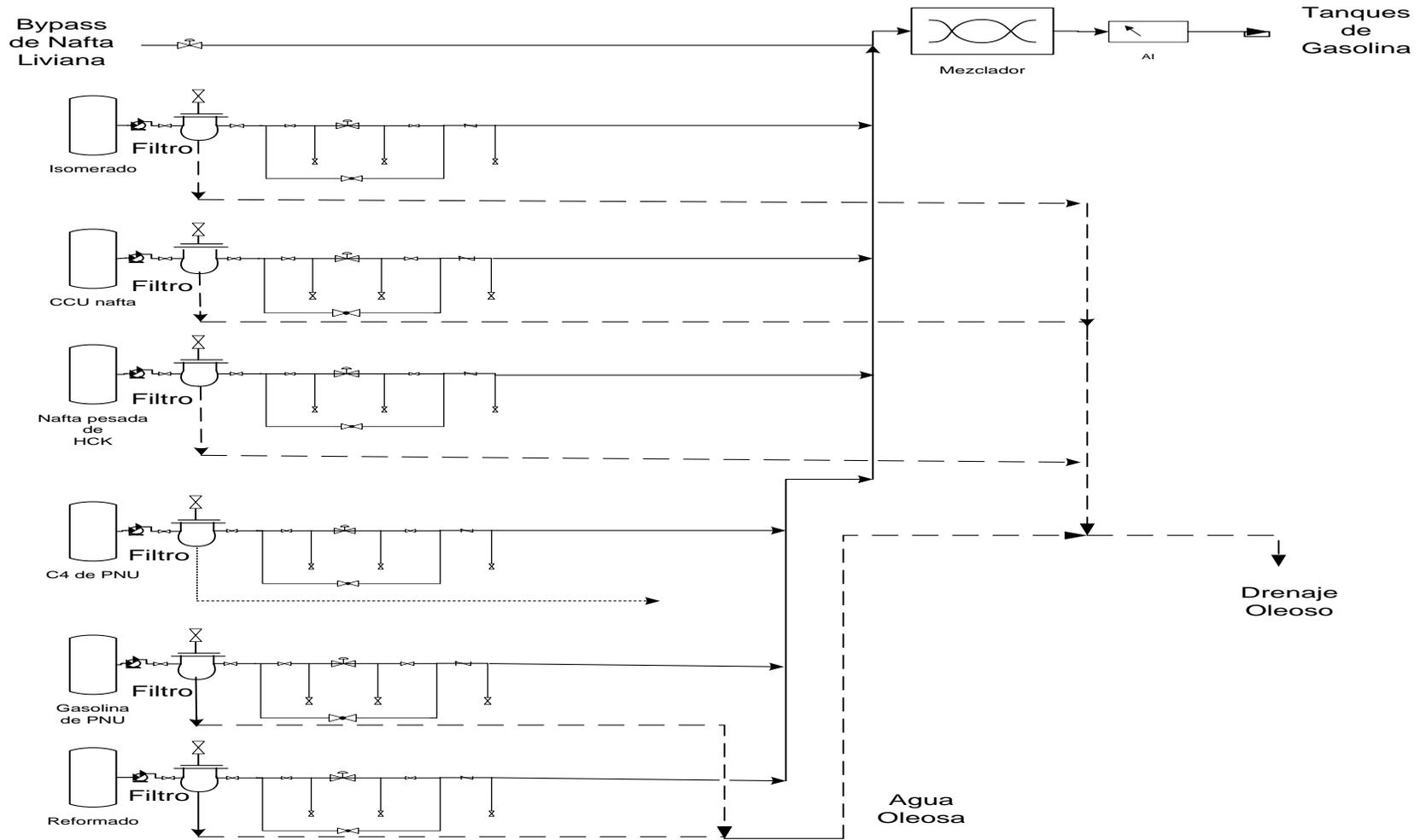
Anexo 3: Esquema representativo del Sistema de Conversión simple. Fuente: Urpí, 2008.



Anexo 4: Esquema representativo del Sistema de Conversión profunda. Fuente: Urpí, 2008.



Anexo 5: Representación gráfica del proceso de mezclado de la gasolina en la refinería de petróleos: Camilo Cienfuegos.



Anexo 6: Nomenclatura empleada por el PIMS.

Unidades:

GSU: Unidad de Endulzamiento de Gas

NH1: Hidrotratador de nafta 1

NH2: Hidrotratador de nafta 2

REF: Reformador existente

CCR: Reformación Catalítica Continua

RSP: Splitter de Reformación

RFT: Pool del reformado pesado

RFL: Pool del reformado ligero

ISO: Isomerización

PNU: Unidad de Polinafta

HYD: Planta de Hidrógeno

SGU: Planta de Gas Saturado

2KO: HKT

GH1: HDT-1

GH2: HDT-2

CFP: Corriente de Alimentación al pool

CCU: Unidad de Craqueo Catalítico

DCU: Unidad de Delayed (Retardado) Coque

VRP: Alimentación a visbreaker y conversión de agua

VBU: Unidad de Visbreaker

AQC: Conversión de Agua

HCK: Hidrocraqueo Catalítico

Anexos

MHC: Hidrocraqueo Catalítico

SRU: Unidad de Recuperación de azufre

PFS: Sistema de Fuel

WTV: Peso a Volumen

VTW: Volumen a Peso

Productos:

LPG: Gas Licuado del Petróleo

M87: DON 87 para exportación

M90: Gasolina Local

LNx: Nafta Liviana

JEX: Jet A1

DSX: Diesel de Exportación

DSL: Diesel Local

HSF: Fuel Oil 1200

LSF: Fuel Oil 450

BTM: Bitumen

COQ: Coque

SU1: Azufre

Componentes del GLP:

NC3: Propano

NC4: n- butano

IC4: i- butano

P3n: Propano de PNU

P3=: Propileno de PNU

Anexos

B4i: i-butano de PNU

B4n: n- butano de PNU

B4=: Butileno de PNU

Componentes del Mogas:

CNT: Nafta Craqueada de CCU

ISS: Isomerizado

LNH: Nafta ligera de HCK

HRF: Reformado pesado

R94: Reformado 94

PGA: Gasolina de Polinafta

LN1: Nafta liviana

HC4: n-butano

Componentes de los destilados:

GO1: Diesel

HN1: Nafta pesada

LK1: Kero ligero AT1

HK1: Kero pesado AT1

KH1: Kero Hidrotratado

LK2: Kero ligero AT2

HK2: Kero pesado AT2

KEH: Keroseno de HCK

DLH: Diesel de HCK

HT1: Gasoil de GH1

HT2: Gasoil de GH2

Anexos

LCO: Aceite Ligero de Reciclo de CCU

Componentes del Fuel:

VBG: Visbreaker Gasoil

AR1: Atmos Residue AT1

VR1: Vacuum Residue AT1

HCO: HCO from ccu

VBR: Visbreaker Residue

AQR: Residuo AQC

VR2: Vacuum Residue VT2

HV2: High vacuum Gasoil VT2

LV2: Gasoil de vacío ligero 2

PFG: Gas Combustible

GOH: HCK UNCONVERTED OIL

NC3: Propano

IC4: iso- butano

NC4: Butano

LN1: Nafta ligera

MN1: M Nafta

HN1: Nafta Pesada

LK1: Kero ligero

Anexos

HK1: Kero pesado

GO1: Gasoil

AR1: Residuo Atmosférico

LL1: Gasoil de vacío muy ligero (LLVGO)

LV1: Gasoil de vacío ligero 1 (LVGO)

HV1: HVGO

VR1: Residuo de vacío

Anexo 7: Especificaciones de la gasolina comercial. Fuente: Catálogo de ventas de Cupet.

UNION
CubaPetróleo
Gestión de la Calidad

Código	Versión	Páginas			
OC-GC/C 0614	02	14 de 81			
PRODUCTO: GASOLINA MOTOR SIN PLOMO 83 OCTANOS GASOLINA MOTOR SIN PLOMO 90 OCTANOS GASOLINA MOTOR SIN PLOMO 94 OCTANOS		CODIGOS: 2253010002 2253010004 2253010006			
EMPRESAS PRODUCTORAS: REFINERÍA "NIKO LÓPEZ" REFINERÍA "HERMANOS DÍAZ" REFINERÍA "SERGIO SOTO" PRODUCTO IMPORTADO		PRINCIPALES CONSUMIDORES: MERCADO NACIONAL			
DESCRIPCION DEL PRODUCTO:	LIQUIDO CLARO, TRANSPARENTE Y VOLÁTIL, OBTENIDO EN LA REFINACIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO, MEDIANTE MEZCLAS DE DIFERENTES COMPONENTES.				
ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO					
INDICES DE CALIDAD	U/M	METODO DE ENSAYO	VALOR ESPECIFICADO		
			RON 83	RON 90	RON 94
1- No. DE OCTANO: INVESTIGATIVO (RON) MOTOR (MON)	-	ASTM D 2699 ASTM D 2700	83 min Reportar	90 min Reportar	94 min Reportar
2- PLOMO	g Pb/L	ASTM-D 3237, D 5059, IP 224		0.013 máx	
3- DESTILACION: INICIAL	°C	NC ASTM D 86		35 min	
10 % EVAP.	°C			70 máx	
50 % EVAP.	°C			77 - 125	
90 % EVAP.	°C			190 máx	
FINAL	°C			225 máx	
RESIDUO	% w/v			2.0 máx	
RECOBRADO	% w/v			95 min	
4- PRESION DE VAPOR A 37.8 °C	kPa (kgf/cm ²)	ASTM D 323, D 5190, D 5191		68 máx. (0.70 máx.)	
6- CORROSION AL Cu, 3h A 50 °C	-	NC ASTM D 130		1 máx	
7- GOMA EXISTENTE	mg/100 mL	NC ASTM D 381		5 máx	
8- PERIODO DE INDUCCION	min	ASTM D 525		240 min (1)	
9- AZUFRE TOTAL	% m/m	NC ASTM D 1266, 4294		0.10 máx	
10- DENSIDAD A 15 °C	g/cm ³	NC ASTM-D 1298, 4052		Reportar	
11- APARIENCIA	-	VISUAL		(2)	
12- BENCENO	% w/v	ASTM D 3606		Reportar	
13- COMPOSICION: OLEFINAS	% w/v	REPORTAR		(3)	
AROMATICOS	% w/v			(3)	
SATURADOS	% w/v			(3)	