



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO



**METODOLOGÍA ESTÁNDAR PARA ESTIMAR LOS
PUNTOS DE CORTE Y RENDIMIENTOS EN LAS UNIDADES
DE DESTILACIÓN DEL CIRCUITO REFINADOR
VENEZOLANO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Hinda Elman

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Elías Harraka

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero Químico
Por el Br. Ruiz C., Luis Alfredo

Caracas, 31 de Enero de 2002

Caracas, 31 de Enero de 2002

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Luis Alfredo Ruiz, titulado:

**“METODOLOGÍA ESTÁNDAR PARA ESTIMAR LOS PUNTOS
DE CORTE Y RENDIMIENTOS EN LAS UNIDADES DE
DESTILACIÓN DEL CIRCUITO REFINADOR VENEZOLANO”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Samir Marzuka
Jurado

Prof. Cesar Pérez
Jurado

Prof. Hinda Elman
Tutor Académico

Ing. Elías Harraka
Tutor Industrial

DEDICATORIA

A Dios por sobre todas las cosas. A mi madre, tu apoyo y tu constancia por sacarnos adelante, siempre han sido mi ejemplo a seguir.

A mi padre por enseñarme los valores y la libertad para escoger el camino...son y serán siempre los pilares más importantes de mi vida.

A mis hermanos Fabián y Rosa sus gritos, sus risas.....y sus “ya deja de estudiar” y “aun sigues sentado allí”, esto es el fruto de todos esos días...los quiero.

A Armando y Andrés, amigos se me fueron, aquí esta mi tesis de grado donde quiera que estén.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este Trabajo Especial de Grado fue posible gracias a la ayuda incondicional y colaboración prestada por numerosas personas. En primer lugar quisiera agradecer a mis tutores, Hinda Elman y Elías Harraka, gracias por el tiempo prestado, la paciencia y la confianza depositada en mi para la realización de este trabajo, de verdad muchas gracias!

A Marinelly Alvarez y Gladis Rincón por haber creído en mi y haberme dado la oportunidad de conocer esta área.

A todo el grupo de Modelos, en especial a Luis Sanoja, Ana Judith Peña, Jhoel Pérez, Maria Alejandra Medina, Jeanette Mestre, Nereyda Quevedo, Bernabé Duarte, los muchachos: Yira y Héctor y a Beatriz Zavarce. Gracias por el apoyo prestado y su indiscutible participación en mi desarrollo personal y profesional.

A Manuel González, Oswaldo Díaz, Alain Bellet y las personas de Ingeniería de Procesos Cardón por la ayuda técnica prestada.

A la Sra. María Dolores Rodríguez, por poner a mi disposición todos los libros que necesité en mi carrera.

A ti Ana, por tu paciencia, disposición y tu apoyo. Gracias por confiar en mi más que yo mismo, motivarme y compartir conmigo estos momentos.

A mis amigos: Armando, Víctor, Beverly, Daniel, Eduardo, Jennifer, Augusto, Juan José, Alberto, Naky, Carlos, Isabel, Cleiber, Anndy, Elisabel, Francisco, Hugo, Miguel, Tahnee y Jean Carlos... por las lecciones, el apoyo....la confianza....por formar parte de este camino juntos.

A mi mamá y mi papá...mis hermanos del alma...mi familia..mi tía Auxiliadora y mi tía Nena.....Gracias por estar conmigo...les debo donde estoy.

A todas aquellas personas que de una u otra forman me han dado algo que aprender.... con buenos y malos ratos...pero con una lección que no tiene precio...hay que aprender a vivir!.

Ruiz C. Luis A.

METODOLOGÍA ESTÁNDAR PARA ESTIMAR LOS PUNTOS DE CORTE Y RENDIMIENTOS EN LAS UNIDADES DE DESTILACIÓN DEL CIRCUITO REFINADOR VENEZOLANO

Tutor Académico: Prof. Hinda Elman. Tutor Industrial: Ing. Elías Harraka.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.
Año 2002, 153 p.

Palabras Claves: Punto de Corte, Destilación, Swing Cut, Rendimientos.

Resumen. En el presente Trabajo Especial de Grado se desarrolló una metodología para estimar puntos corte comerciales en las unidades de destilación del Circuito PDVSA. El estudio fue realizado para la unidad atmosférica 4 (CD4) de la Refinería de Cardón en el Circuito Refinador Paraguaná.

La necesidad de determinar nuevos puntos de corte, obedece a las diferencias que se observan entre los rendimientos presentados en los Modelos Operacionales de las refinerías del circuito, el Modelo Nacional de Operación (MNO) y la realidad. El desarrollo de nuevos puntos de corte permitirá actualizar los ensayos de crudos en los modelos de Programación Lineal de la refinería, Mejorando la programación mensual, reduciendo los ajustes que deben realizarse en el modelo y aprovechando el costo de oportunidad asociado al desempeño de la refinería.

Los puntos de corte de esta unidad fueron desarrollados a partir de rendimientos reales de la unidad en el período comprendido entre Julio y Agosto del año 2001. Con estos rendimientos, conocimiento de la alimentación y el uso del sistema PAssMan Ver. 4.0 se estimaron puntos de corte que reprodujeran la realidad operacional basándose en promedios diarios de los rendimientos a la salida de la unidad. Adicionalmente como una vía alternativa, se estimaron factores de ajuste de calidad de fraccionamiento que están incluidos en las nuevas facilidades del sistema PAssMan para el fraccionamiento comercial.

El cálculo de estos puntos de corte día a día, permitió generar data histórica de los mismos, evaluando su comportamiento para un período representativo de operación de la unidad y dando como resultado un set de puntos de corte que permitieron calcular cortes ficticios ó *Swing Cut*, entre los cortes actuales y de esta manera lograr una mejor simulación de los rendimientos de la unidad.

La base del uso de los *Swing Cut*, es proveer un método conveniente para indicar que un corte o partes de un corte (que no se obtiene físicamente en la unidad, en este caso el *Swing*) sea combinado con otro corte liviano o pesado adyacente. La

ventaja de que el corte *Swing* sea repartido entre las dos fracciones permite ajustar los rendimientos por adición de masa o volumen.

Los factores de ajuste de calidad de fraccionamiento LFQ y HFQ, fueron calculados en base a los puntos de corte actuales de la unidad, e igualmente sobre la base de rendimientos diarios. Estos factores de ajuste tratan de simular la ineficiencia de la columna en su operación, en este sentido fueron calculados por ensayo y error ajustando los rendimientos a la realidad operacional simulando el solapamiento entre los mismos.

Los *Swing Cut* desarrollados permitieron ajustar los rendimientos obtenidos a la salida de PAssMan con los rendimientos reales en la planta; presentando desviaciones menores al 10% en la mayoría de los casos. Las desviaciones encontradas para algunas de las fracciones durante la validación responden a la intervención de varios factores.

En primer lugar, el crudo procesado, L26, es una mezcla compuesta por 8 crudos y no se conocía con exactitud la formulación, en este caso se asumió una formulación que reprodujera la gravedad API real.

Además existe una alta variabilidad de la alimentación a esta unidad, lo que impacta directamente sobre los rendimientos y en tercer lugar existen factores que tienen que ver con la logística de operación y la misma formulación del crudo, factores que no pudieron ser cuantificados en este estudio.

Para el caso de los factores de calidad de fraccionamiento, los resultados obtenidos mostraron desviaciones mayores que las reportadas con el uso de la metodología anterior y poca correlación entre las desviaciones. Estas diferencias se deben principalmente a que estos factores son sensibles a los puntos de corte utilizados y a los cambios frecuentes en la alimentación.

En base a este estudio los *Swing Cuts* proporcionan una metodología para la estimación de puntos de corte comerciales que aporta flexibilidad en función de los cambios de alimentación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
SUMARIO	vi
INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE TABLAS	xii
GLOSARIO	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2. OBJETIVOS	5
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1. QUÍMICA DEL PETRÓLEO	6
3.1.1. DEFINICIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO	6
3.1.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL PETRÓLEO	7
3.1.2.1. HIDROCARBUROS SATURADOS	7
3.1.2.1.1. PARAFINAS	8
3.1.2.1.2. NAFTENOS	8
3.1.2.2. HIDROCARBUROS INSATURADOS	9
3.1.2.2.1. AROMÁTICOS	9
3.1.2.2.2. OLEFINAS	9
3.1.2.2.3. MOLÉCULAS COMBINADAS	9
3.1.2.3. DERIVADOS DE LOS HIDROCARBUROS	10
3.1.2.3.1. COMPUESTOS DE AZUFRE	10
3.1.2.3.2. COMPUESTOS DE NITRÓGENO	11
3.1.2.3.3. COMPUESTOS DE OXÍGENO	11
3.1.2.3.4. COMPUESTOS METÁLICOS	11
3.2. CARACTERIZACIÓN DE CORTES DE HIDROCARBUROS	13
3.3. EVALUACIONES DE CRUDOS	15
3.3.1. INFORMACIÓN CONTENIDA EN LOS ENSAYOS DE CRUDO	17
3.3.2. TIPO DE EVALUACIONES DE CRUDO	18
3.3.2.1. EVALUACIONES DE PRIMER NIVEL	18

3.3.2.2. EVALUACIONES DE SEGUNDO NIVEL	19
3.3.2.3. EVALUACIONES DE TERCER NIVEL	19
3.3.3. APLICACIONES DEL ENSAYO DE CRUDO	20
3.3.4. PROPIEDADES UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN DE CRUDOS, CALIDAD DE LOS PRODUCTOS	21
3.3.4.1. PRINCIPIOS DE MEZCLA	22
3.3.4.2. MODELOS DE MEZCLAS LINEALES	23
3.3.4.3. ÍNDICES DE MEZCLA	24
3.3.4.4. BONOS	25
3.3.4.5. PROPIEDADES MÁS IMPORTANTES EN LA EVALUACIÓN DE CRUDOS Y MÉTODOS DE MEZCLA	26
3.4. PROCESOS DE DESTILACIÓN	39
3.4.1. DESTILACIÓN DEL CRUDO	42
3.4.1.1. DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA	45
3.4.1.2. DESTILACIÓN AL VACÍO	47
3.5. PRODUCTOS DE LA DESTILACIÓN	50
3.5.1. DESTILADOS LIVIANOS	51
3.5.2. DESTILADOS INTERMEDIOS	52
3.5.3. RESIDUOS	52
3.5.4. FRACCIONES DE LA DESTILACIÓN AL VACÍO	53
3.6. CALIDAD DE FRACCIONAMIENTO, PUNTOS DE CORTE	55
3.6.1. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR PUNTOS DE CORTE EN UNIDADES DE DESTILACIÓN	61
3.7. ¿QUÉ ES PAssMan?	67
3.7.1. NUEVAS FACILIDADES DE LA VERSIÓN 4.0 DE PAssMan.	69
3.7.1.1. TBP RECUT	69
3.7.1.2. CCU RECUT OPTION	71

3.8. SWING CUT	72
3.9. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	74
3.9.1. UNIDAD DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA 4 (CD-4)	74
4. METODOLOGÍA	79
4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	79
4.2. SIMULACIÓN DE CORTES DE CRUDO USANDO EL SISTEMA PAssMan VER. 4.0	79
4.3. REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS EN PAssMan VER. 4.0	83
4.4. RECOPIACIÓN DE DATA PARA ESTUDIO DE PUNTOS DE CORTE	84
4.5. DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE PUNTOS DE CORTE Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS	86
4.6. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS	91
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	95
5.1. BASE DE DATOS PAssMan ver. 4.0	95
5.2. VALIDACIÓN DE PUNTOS DE CORTE ACTUALES DE LA UNIDAD CD4	96
5.3. DESARROLLO DE PUNTOS DE CORTE	99
5.4. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS	105
5.4.1. VALIDACIÓN EMPLEANDO SWING CUT	105
5.4.2. VALIDACIÓN EMPLEANDO LOS FACTORES DE AJUSTE DE CALIDAD DE FRACCIONAMIENTO	115
6. CONCLUSIONES	118
7. RECOMENDACIONES	119
8. BIBLIOGRAFÍA	121
9. APENDICES	123
10. ANEXOS	129

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva de Destilación TBP típica de un crudo	16
Figura 2. Diagrama de Flujo de una Refinería	41
Figura 3. Destilación del Crudo	42
Figura 4. Destilación al vacío	48
Figura 5. Representación gráfica del término GAP	56
Figura 6. Representación gráfica del término Overlap	57
Figura 7. Cálculo del Punto de Corte	61
Figura 8. Esquema de swing Cut	72
Figura 9. Esquema de Proceso Unidad Atmosférica CD-4	76
Figura 10. Rendimiento de nafta real que sale de la CD4	77
Figura 11. Esquema para el cálculo de puntos de corte	92
Figura 12. Puntos de Corte Estimados en la Fracción de Gases C4-	100
Figura 13. Puntos de Corte Estimados en la Nafta Tops	101
Figura 14. Puntos de Corte estimados para la Nafta Cor	102
Figura 15. Puntos de Corte estimados para el Kerosén	103
Figura 16. Puntos de Corte estimados para el Gasóleo Liviano	104
Figura 17. Puntos de Corte estimados para el Gasóleo Pesado	105
Figura 18. Rendimientos Reales para la Fracción de Residuo Largo	106
Figura 19. Esquema de Corte para CD4 con el uso de Swing Cut	108
Figura 20. Curva True Boiling Point del crudo L26	125
Figura 21. Curva ASTM D-1160 para las Fracciones Pesadas	127

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla N° 1. Ventajas y desventajas entre los Índices y Bonos	25
Tabla N° 2. Intervalos de ebullición de fracciones características del petróleo crudo	43
Tabla N° 3. Puntos de corte TBP para varias fracciones de crudo de petróleo	44
Tabla N° 4. Puntos de corte de las fracciones típicas	50
Tabla N° 5. Composición del Crudo L26	88
Tabla N° 6. Comparación de los rendimientos obtenidos en la Unidad CD4 utilizando puntos de corte actuales	97
Tabla N° 7. Puntos de Corte que reproducen la Operación real	98
Tabla N° 8. Rendimientos de la unidad estimados por PAssMan	98
Tabla N° 9. Puntos de corte estimados para la Unidad Atmosférica 4	106
Tabla N° 10. Composición del Crudo L26 para el día de operación n° 1	107
Tabla N° 11. Reproducibilidad de la operación real usando Swing Cut día 1	109
Tabla N° 12. Composición del Crudo L26 para el día de operación n° 2	110
Tabla N° 13. Reproducibilidad de la operación real usando Swing Cut día 2	110
Tabla N° 14. Composición del Crudo L26 para el día de operación n° 3	111
Tabla N° 15. Reproducibilidad de la operación real usando Swing Cut día 3	112
Tabla N° 16. Composición del Crudo L26 para el día de operación n° 4	113
Tabla N° 17. Reproducibilidad de la operación real usando Swing Cut día 4	113
Tabla N° 18. Resumen de los resultados obtenidos con el uso de <i>Swing Cut</i>	115
Tabla N° 19. Factores de calidad de Fraccionamiento	115
Tabla N° 20. Desviaciones obtenidas respecto a la Data Real usando los Factores de Calidad de Fraccionamiento de PAssMan	116
Tabla N° 21. Resumen de los resultados obtenidos usando los Factores de Calidad de Fraccionamiento	117
Tabla N° A-1. Mapa de Cortes	130
Tabla N° A-2. Actualización de Propiedades Librería de Crudos PAssMan VER. 4.0	131

Tabla N° A-3. Comparación de Puntos de Corte para la Unidad CD4	136
Tabla N° A-4. Comparación de Crudos Procesados en la Refinería de Cardón	137
Tabla N° A-5. Análisis Rutinarios para las Corrientes en la Unidad CD4	138
Tabla N° A-6. Mapa de Cortes incluyendo los Swing Cut	139
Tabla N° A-7. Mapa de Cortes Incluyendo los Factores de Calidad de Fraccionamiento	140

GLOSARIO GENERAL

160:	Identificación de la calidad que indica el cálculo del DBV a 160°F.
210:	Identificación de la calidad que indica el cálculo del DBV a 200°F.
ABP:	Identificación de la calidad, Punto Medio de Ebullición.
Assay:	Evaluación de Crudo, generalmente en formato electrónico.
Assay-in:	Archivo de Microsoft Excel de entrada al sistema PAssMan.
Assay-out:	Archivo de Microsoft Excel de salida del sistema PAssMan.
BCN:	Crudo Boscan.
Blend:	Opción del sistema PAssMan que permite mezclar crudos cargados en la base de datos.
CRP:	Complejo Refinador Paraguaná
CUC:	Crude Unit Characterization.
CutMap:	Mapa de cortes.
FBP:	Temperatura final de ebullición.
GOL:	Gasóleo Liviano.
GOP:	Gasóleo Pesado.
Graphical:	Opción del sistema PAssMan que permite visualizar la curva TBP de un crudo y ajustar los rendimientos en base a una especificación.
HFQ:	Factor de calidad de fraccionamiento superior.
Import:	Opción del sistema PAssMan que permite importar un ensayo de crudo a la base de datos.
IBP:	Temperatura inicial de ebullición.
L26:	Crudo Lagotreco 26.
LFQ:	Factor de calidad de fraccionamiento inferior.
Load:	Opción del sistema PAssMan que permite cargar el mapa de cortes.
LP:	Programación Lineal.
LTC:	Crudo Lagotreco Liviano.
LTM:	Crudo Lagotreco Mediano.
MNO:	Modelo Nacional de Operación.

MO:	Modelo Operacional.
Nafta Cor:	Nafta Pesada que se obtiene de la unidad CD4.
Nafta Tops:	Nafta Liviana que se obtiene de la unidad CD4.
PESP:	Procesamiento de ensayos de salida de PAssMan.
PIMS:	Process Industries Modeling System.
R.L.:	Residuo Largo.
Recut:	Opción del sistema PAssMan que permite simular los rendimientos y calidades de un crudo en una unidad de destilación.
RON:	Identificación de la propiedad, Número Octano de Investigación.
RVP:	Identificación de la propiedad, Presión de Vapor Reid.
SaveMap:	Opción del sistema PAssMan que permite guardar el Mapa de Cortes.
SPG:	Identificación de la propiedad, Gravedad Específica.
SUL:	Identificación de la propiedad, contenido de Azufre.
TAG:	Identificación para una calidad, corte o crudo que consta de tres caracteres que pueden ser alfanuméricos.
TBP:	True Boiling Point, Temperatura de Ebullición Verdadera.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Venezuela, como país productor y exportador de petróleo, tiene amplias posibilidades de procesar en su circuito refinador Venezuela-Isla diferentes tipos de crudo. Bajo este circuito integrado, la oportunidad de procesar o no algún crudo, obedece a una decisión de tipo económico y a compromisos adquiridos por la corporación con sus clientes.

Bajo este esquema, es de suma importancia conocer como se comportan los diferentes crudos en cada una de las unidades de destilación existentes en las refinerías.

PDVSA dispone a través de la Gerencia de Refinación y Comercio de PDVSA-Intevep del grupo de Modelos de Planificación en Refinación y Petroquímica, el cual se encarga de la aplicación de técnicas y herramientas para el desarrollo, automatización y/o manejo de los modelos matemáticos de esquemas de refinación y petroquímica englobados dentro del MNO y el MNP.

El MNO (Modelo Nacional de Operaciones), es un modelo que utiliza técnicas de Programación Lineal y simula la operación de las Refinerías del Circuito PDVSA (Amuay, Cardón, El Palito, Puerto la Cruz e Isla). Es utilizado para ejercicios de planificación a corto y mediano plazo, entre los que se pueden mencionar: planificación operacional (mensual, trimestral y semestral), definición de presupuesto operacional y plan comercial.

El MNP (Modelo Nacional de Planificación), esta basado en el mismo concepto que el MNO y contiene adicionalmente simuladas las unidades de proceso a ser incorporadas en el Circuito de Refinación de PDVSA. Este modelo es utilizado para la definición del plan de inversiones en refinación en un período de cinco años.

La representación de las unidades de destilación dentro de los modelos de Programación Lineal se hace a través de los ensayos de crudo. Esta representación junto con las tablas que simulan los demás procesos de refinación permiten obtener los Modelos Operacionales Locales para cada refinería y a partir de estos se generan los modelos globales MNO y MNP antes mencionados.

Con el objetivo de disminuir las diferencias entre los modelos locales y la operación real de la refinería de Cardón, perteneciente al Complejo Refinador Paraguaná, se planteó la necesidad de estimar nuevos puntos de corte para las unidades de destilación utilizando fraccionamiento comercial, lo que permitirá actualizar los ensayos de crudos en los modelos LP de la refinería, mejorando la programación mensual, reduciendo los ajustes que deben realizarse en el modelo y aprovechando el costo de oportunidad asociado al desempeño de la refinería.

2 OBJETIVOS

Para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, se cumplirán los siguientes objetivos:

General:

Desarrollar una metodología estándar para estimar puntos de corte y rendimientos de crudos en las unidades de destilación, usando fraccionamiento comercial.

Específicos:

- Completar la Base de Datos de Crudos del Sistema Venezuela, incorporando los crudos foráneos.
- Incorporar a la Base de Datos las nuevas calidades exigidas por las regulaciones futuras de calidad, tales como T 90% de recuperación en gasolina y destilados.
- Establecer la metodología para determinar los puntos de corte de las Unidades de Destilación.
- Realizar la estimación de los puntos de corte comerciales de una Unidad de Destilación Atmosférica, tomando como caso piloto una unidad del Circuito Refinador de Venezuela.
- Simular los rendimientos de los crudos en las unidades de destilación seleccionadas utilizando el sistema PAssMan y validar los resultados.
- Evaluar las nuevas facilidades del Sistema PAssMan para el fraccionamiento comercial.
- Establecer la metodología y determinar los factores de ajustes para fraccionamiento comercial usados en el Sistema PAssMan.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 QUÍMICA DEL PETRÓLEO

3.1.1 DEFINICIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO

El petróleo se puede definir como una mezcla de hidrocarburos e impurezas, los hidrocarburos que forman parte del crudo, son hidrocarburos compuestos, es decir conformados únicamente por átomos de carbono y de hidrógeno, mientras que las impurezas más comunes están constituidas por compuestos orgánicos de azufre, nitrógeno, oxígeno y metales⁽¹⁾.

En cuanto a su aspecto, el petróleo crudo puede variar desde un líquido movable, de color amarillo o verde, hasta fluidos más oscuros y con frecuencia casi negros, muy viscosos que a veces se solidifican en una pasta negra⁽²⁾.

La mayoría de los crudos muestran la siguiente composición desde el punto de vista elemental⁽¹⁾:

Carbono:	82.0 - 87.0 %
Hidrógeno:	11.4 - 15.0 %
Azufre	6 %
Nitrógeno	2 %
Oxígeno	1.5 %

Adicionalmente se encuentran presentes algunos metales como níquel, vanadio y calcio en partes por millón y algunos otros metales en menores cantidades.

3.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL PETRÓLEO

El petróleo crudo y las fracciones que de él provienen, están compuestos esencialmente de moléculas llamadas hidrocarburos y formadas por combinación de átomos de carbono tetravalentes con átomos de hidrógeno monovalentes. No obstante, en el petróleo crudo no existe cierto tipo de estructuras moleculares, tales como las formas olefínicas inestables, estas se han transformado lenta y totalmente en moléculas estables. Efectuando diferentes tratamientos sobre el crudo, el refinador puede hacer reaparecer estas combinaciones moleculares inexistentes, pero interesantes por sus propiedades. La refinación modifica igualmente la distribución de los diferentes tipos de moléculas para crear un producto que responda a las especificaciones que se le exigen⁽¹⁾.

Por otra parte el petróleo crudo contiene igualmente azufre, oxígeno y nitrógeno. Los compuestos sulfurados son los más molestos por su corrosividad, mal olor y envenenamiento de los catalizadores. Finalmente, y a pesar de la decantación prolongada, siempre existen en el petróleo crudo sedimento y agua salada, procedentes del yacimiento.

Las estructuras moleculares típicamente encontradas en el petróleo crudo son básicamente hidrocarburos saturados: parafinas y naftenos, e hidrocarburos insaturados: olefinas y aromáticos.

3.1.2.1 HIDROCARBUROS SATURADOS

Todos los tipos de hidrocarburos saturados se encuentran presentes en el petróleo crudo. Los hidrocarburos saturados se clasifican en parafinas y naftenos⁽¹⁾.

3.1.2.1.1 PARAFINAS

Las parafinas o alcanos, presentan la siguiente fórmula general $C_n H_{2n+2}$ y se clasifican en normal parafinas e isoparafinas. Las normal parafinas, son los hidrocarburos de cadena lineal. Todas las n-parafinas se encuentran presentes en el petróleo crudo hasta cerca de C100. Su contenido está en el rango de 15-20 %. El metano, CH_4 primero de la serie, el etano, propano y el n-butano son gaseosos a temperatura ambiente, del n-pentano al n-cetano y C16 son líquidos. Las moléculas parafínicas de peso molecular superior son sólidas a temperatura ambiente y constituyen las ceras parafínicas. Las parafinas son responsables de características importantes como buena combustión, alto punto de fluidez, baja viscosidad y muy bajo número de octano⁽¹⁾.

La isoparafinas conocidas también como parafinas ramificadas, son isómeros de los hidrocarburos parafínicos normales, cuanto mayor es el número de átomos de carbono mayor es el de los isómeros posibles, la concentración de estas moléculas en el crudo es ligeramente menor que la de las n-parafinas. Las isoparafinas presentan buena combustión, bajo punto de fluidez, baja viscosidad y alto número de octano.

3.1.2.1.2 NAFTENOS

Conocidos también como cicloalcanos o cicloparafinas, presentan fórmula general $C_n H_{2n}$. Los cicloalcanos monocíclicos más estables son los ciclopentanos (C5) y los ciclohexanos (C6), estos compuestos constituyen una clase importante en el petróleo ya que su contenido es aproximadamente igual a la suma de los dos hidrocarburos parafínicos y además presentan características como buena combustión, bajo punto de fluidez y buena viscosidad⁽¹⁾.

3.1.2.2 HIDROCARBUROS INSATURADOS

3.1.2.2.1 AROMÁTICOS

Conocidos también como arenos, son aquellos hidrocarburos en los cuales está presente al menos un anillo bencénico. Por regla general, los hidrocarburos aromáticos están presentes en el petróleo crudo en cantidades menores en comparación que las parafinas y naftenos. El contenido total en diferentes crudos oscila entre 10-35%. Habitualmente, la cantidad de tolueno en los crudos es mayor que la de benceno, etilbenceno y cada uno de los isómeros del xileno. En las fracciones de gasolina, se han identificado todos los alquilbenceno posibles hasta C₉. En las fracciones de kerosene y gasoil, además de los hidrocarburos de la serie del benceno se han identificado homólogos del naftaleno y del difenilo. En las fracciones pesadas de gasoil de aceites lubricantes y en las fracciones superiores de los crudos se han encontrado compuestos policíclicos, fenantreno, antraceno, criseno, pireno, entre otros y en los destilados pesados se han detectado aromáticos hasta de 7 anillos⁽¹⁾.

3.1.2.2.2 OLEFINAS

Las olefinas en particular, no existen en forma natural en el crudo, estas se forman durante el procesamiento del mismo. Son similares en estructura a las parafinas pero dos de sus átomos de carbono están unidos por dobles enlaces, su fórmula general es C_nH_{2n}. Las olefinas son indeseables en los productos acabados debido a que los dobles enlaces son reactivos y los compuestos se oxidan y polimerizan más fácilmente⁽²⁾.

3.1.2.2.3 MOLÉCULAS COMBINADAS

Cuando la masa molecular de los hidrocarburos aumenta, la estructura de las moléculas no contiene un solo tipo de hidrocarburos, de forma que es común

encontrar moléculas del tipo naftenos-aromáticos. Estas moléculas tienen características complejas y es difícil colocarlas en una clase definida; el análisis y la separación de estas moléculas no es sencillo⁽¹⁾.

3.1.2.3 DERIVADOS DE LOS HIDROCARBUROS

Todos los crudos además de hidrocarburos contienen un número considerable de compuestos que incluyen los heteroátomos como azufre, oxígeno, nitrógeno y metales. Todos los compuestos que contienen estos elementos son indeseables, debido a que son contaminantes y generan mal olor y color, inestabilidad de los productos y envenenan los catalizadores⁽¹⁾.

3.1.2.3.1 COMPUESTOS DE AZUFRE

Los compuestos de azufre están presentes en todos los crudos y como regla general a mayor densidad del crudo, mayor es el contenido de azufre.

En el crudo podemos encontrar diferentes tipos de compuestos de azufre tales como:

- Sulfuro de hidrógeno (H_2S)
- Mercaptanos (RSH)
- Sulfuros ($R.S.R'$)
- Disulfuro ($R.S.S.R'$)
- Sulfuros Cíclicos
- Tiofenos

3.1.2.3.2 COMPUESTOS DE NITRÓGENO

Al igual que otros compuestos heteroátomos, los compuestos de nitrógeno se distribuyen irregularmente por las fracciones. En el rango de ppm en las fracciones livianas a más de 1 % en peso en los residuos. Generalmente más de la mitad de los compuestos de nitrógeno se concentra en la parte reseno-asfáltica⁽¹⁾.

Comúnmente, la cantidad de nitrógeno en el crudo es alta cuando la densidad y el contenido de asfalto son altos.

3.1.2.3.3 COMPUESTOS DE OXÍGENO

Estos componentes están representados por ácidos, fenoles, cetonas y éteres, con mayor frecuencia aparecen en forma de lactonas, anhídridos y compuestos de furano. La parte fundamental de los compuestos oxigenados viene concentrada en las fracciones superiores al kerosene.

3.1.2.3.4 COMPUESTOS METÁLICOS

Pertenecen a estos compuestos las sales formadas por metales y ácidos, complejos de metales y sustancias minerales en estado de dispersión coloidal. El contenido total se encuentra al nivel de ppm⁽¹⁾.

Dos grupos de elementos metálicos aparecen en concentraciones significativas:

- Zinc, Titanio, Calcio y Magnesio aparecen en la forma de jabones órgano metálicos adsorbidos en las interfaces agua-aceite y actúan como estabilizadores de emulsión.

- Vanadio, Níquel, Hierro y Cobre están presentes como compuestos solubles en aceite. La mayoría de estos metales son complejos órgano metálicos.

Tomando en cuenta los tipos de hidrocarburos presentes en el crudo, se ha encontrado que los crudos pueden presentar en su composición predominantemente alguno de estos tres grupos: parafinas, naftenos o aromáticos, encontrando así que un crudo puede ser, por ejemplo, de carácter más nafténico que aromático, de acuerdo a esto el crudo podrá denominarse: nafténico, parafínico o aromático.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE CORTES DE HIDROCARBUROS

La forma convencional de representar el equilibrio de la destilación es mediante las curvas líquido-vapor. En este tipo de curvas se presenta normalmente el contenido de uno de los componentes de la fase líquida para las diferentes temperaturas del proceso, en función del contenido del mismo componente en la fase vapor. Estos contenidos se presentan casi siempre en fracciones molares⁽³⁾.

En la práctica es muy difícil representar el equilibrio líquido-vapor de la destilación de un crudo, debido a la gran variedad de componentes diferentes, ello ha ocasionado que en la destilación del petróleo se presenten formas especiales de representar el proceso. La más aceptada mundialmente es la que relaciona la temperatura de ebullición con el porcentaje de crudo vaporizado. En este caso no se identifican directamente componentes químicos con su temperatura de ebullición, sino más bien conjuntos de componentes con rangos de ebullición similares⁽³⁾.

Las curvas de destilación de un crudo se obtienen a escala de laboratorio, utilizando equipos normalizados, cuyos resultados son aceptados mundialmente. La gran mayoría de los métodos normalizados que se utilizan en la industria petrolera han sido desarrollado o adaptados por la A.S.T.M. (American Standard Testing Methods). El comité de la A.S.T.M. que se ocupa de lo concerniente del petróleo, se identifica con la letra D, y así los métodos ASTM que se refieren al petróleo se designan de la siguiente manera⁽¹⁾: primero la letra D, luego el número consecutivo correspondiente al método, y por último, las dos ultimas cifras del año en que el método fue revisado por última vez.

En el proceso de evaluación de crudos, se aplican usualmente los siguientes métodos normalizados ASTM:

- Método Estándar para la Destilación del Petróleo Crudo (Columna de 15 Platos Teóricos) - ASTM D-2892.
- Método Estándar para la Destilación de Productos del Petróleo - ASTM D-86.
- Método Estándar para la Destilación de Productos del Petróleo a Presiones Reducidas - ASTM D-1160.
- Destilación Simulada - ASTM D-5307/2887

Las destilaciones analíticas ASTM D-86, ASTM D-1160, ASTM D-2887 y ASTM D-2892 (TBP) son utilizadas para definir las características de volatilidad de fracciones de petróleo y otras mezclas complejas. Ambas son destilaciones por carga que difieren significativamente en el grado de fraccionamiento obtenido durante la destilación.

Las destilaciones atmosféricas ASTM se ejecutan en un balón de vidrio. El reflujo resulta sólo de la pérdida de calor a través del cuello del balón. Las destilaciones ASTM son más ampliamente utilizadas que las destilaciones TBP porque el procedimiento es más simple. Son más económicas, requieren menos cantidad de muestra y requieren aproximadamente, sólo una décima del tiempo que se invierte en realizar una destilación TBP. Una descripción más detallada de los métodos presentados anteriormente se presenta en el *Apéndice I*.

3.3 EVALUACIONES DE CRUDOS

El crudo procedente de un campo de producción, posee un conjunto de propiedades que le imparten características muy específicas. La determinación de estas propiedades permite establecer la calidad básica del crudo y detectar variaciones de calidad, a través de su explotación⁽¹⁾.

La evaluación o ensayo de crudo es una descripción detallada de las propiedades físicas y químicas del petróleo, sumándose a estas los rendimientos y características de las fracciones de interés para ser procesados en una refinería. Después de realizar una caracterización primaria, el ensayo de crudo es la herramienta más importante que permite medir las potencialidades del crudo.

Las fracciones normalmente obtenidas son: gas, naftas, kerosenes, gasóleos y residuos. Por lo general, los cortes típicos de las destilaciones del crudo son similares a los de la *Figura 1*, lo que variará entre los crudos, serán los rendimientos de dichos cortes.

Las evaluaciones de crudo tienen muchas aplicaciones, entre las cuales se destacan las siguientes⁽³⁾:

- Determinación de las características y propiedades obtenidas de los cortes del crudo para determinar el precio de comercialización.
- Determinación de los productos blancos (livianos) y negros (pesados) que se pueden obtener de un crudo al ser procesado en una refinería.
- Determinación de procedimientos para el procesamiento del crudo y establecer los tratamientos requeridos.

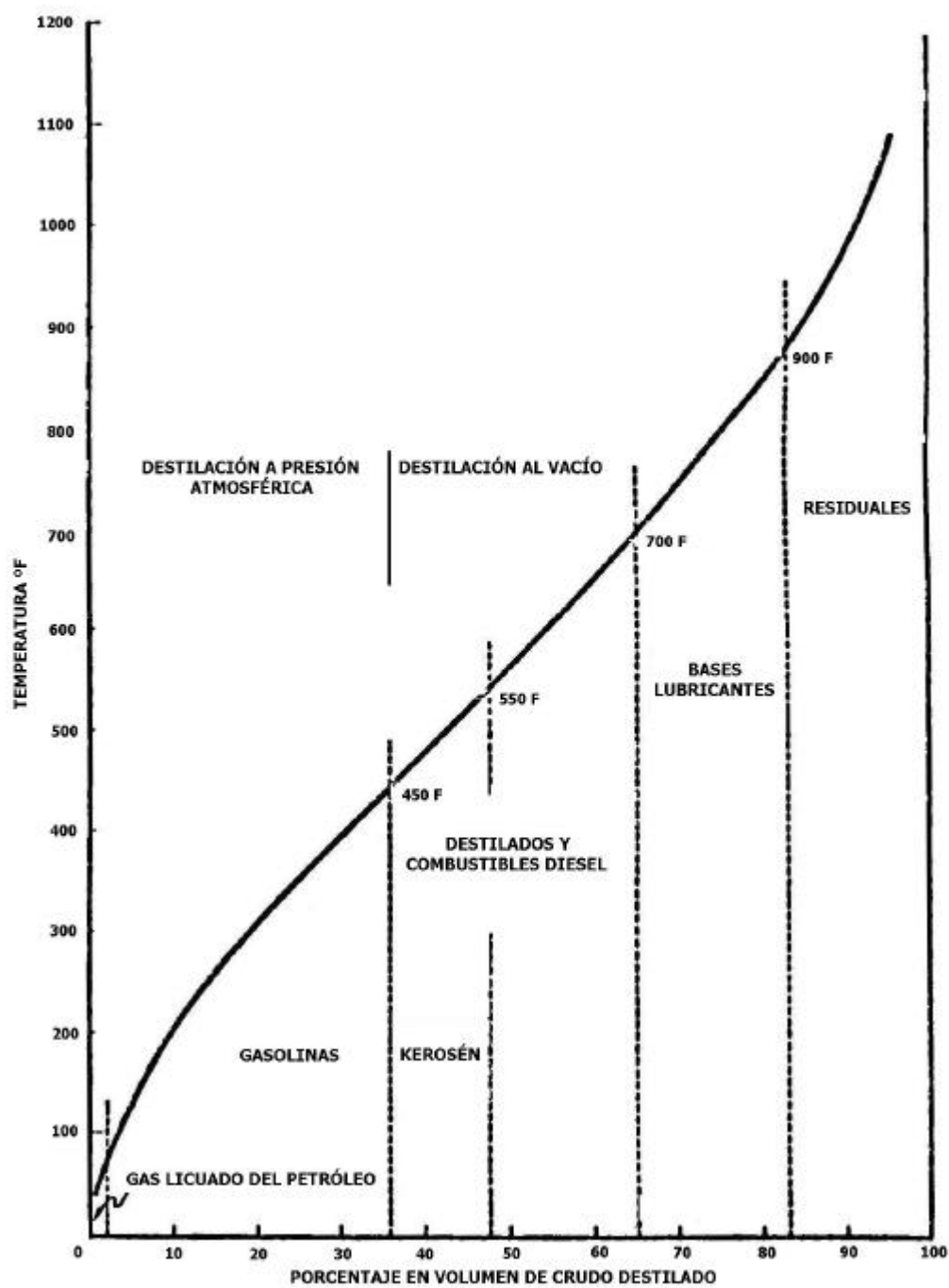


Figura 1

Curva de Destilación TBP Típica de un Crudo⁽²⁾

- Realización de cálculos de ingeniería, estudios de diseño y simulación en procesos de refinación.

3.3.1 INFORMACIÓN CONTENIDA EN LOS ENSAYOS DE CRUDO

Las informaciones contenidas en las evaluaciones de crudos se pueden clasificar en tres categorías⁽¹⁾:

Observaciones o Mediciones Directas: Son aquellas variables que se miden en el laboratorio durante la separación de las fracciones de crudo. Estas variables corresponden a las temperaturas, presiones, relación de flujos, volúmenes y/o peso de los cortes, así como también la mayoría de los resultados de las pruebas realizadas a dichos cortes y mezclas.

Datos Calculados: Estos son los datos que se derivan de cálculos como: porcentajes de rendimiento de los cortes, el volumen o peso de cada corte que debe incluirse en las mezclas, las comprobaciones que se realizan para determinar los contenidos de azufre, carbón residual, metales, nitrógeno, de cada corte en relación a esos mismos parámetros en el crudo y en las mezclas de los productos. Estos cálculos de comprobación raramente se incluyen en el informe final, pero son de gran valor para juzgar la exactitud de los datos que se analizan.

Informaciones Gráficas: Estas informaciones se presentan en forma de gráficos y permiten que la evaluación del crudo se pueda utilizar para estimar datos que no aparecen directamente en forma numérica en el informe final correspondiente. Dentro de la informaciones gráficas que contiene la evaluación de crudo, se encuentran los siguientes tipos de curvas:

- Curvas Incrementales.

- Curvas de Punto Medio o Temperatura Media.
- Curvas de Rendimiento.

3.3.2 TIPO DE EVALUACIONES DE CRUDO

Las evaluaciones de crudo varían dependiendo del propósito, de los cortes de destilación obtenidos y de los análisis realizados a dichos cortes. En términos generales se pueden clasificar en⁽¹⁾:

- Evaluaciones de Primer Nivel
- Evaluaciones de Segundo Nivel
- Evaluaciones de Tercer Nivel

3.3.2.1 EVALUACIONES DE PRIMER NIVEL

Estas evaluaciones también son conocidas como evaluaciones básicas o simples. Consisten en determinar todas las propiedades del crudo, como por ejemplo:

- Gravedad API
- Gravedad Específica
- Azufre
- Punto de Ecurrimiento
- Nitrógeno
- Agua y Sedimento
- Contenido de Sal
- Presión de Vapor REID
- H₂S (disuelto)
- Número de Neutralización.
- Viscosidad

- Contenido de Metales (Hierro, Níquel y Vanadio)
- Hidrocarburos Livianos

Las evaluaciones de primer nivel son de gran utilidad para determinar las propiedades de un crudo procedente de pozos exploratorios, y se obtienen en un breve período (aproximadamente una semana). Estas permiten detectar posibles problemas de manejo y transporte de crudo, como así mismo pueden indicar cambios significativos en las características de un crudo durante la explotación.

En estas evaluaciones se realiza una destilación simulada (A.S.T.M. D-5307,92) que indica una tendencia a los rendimientos del crudo, porcentajes de gasolinas, destilados y residual. No se determinan los cortes del crudo y sus propiedades.

3.3.2.2 EVALUACIONES DE SEGUNDO NIVEL

Se conocen también como evaluaciones abreviadas. En ellas se determina la destilación TBP del crudo, con la cual se obtienen los rendimientos de los cortes de interés comercial del crudo (*Figura 1*), y se determina la potencialidad del mismo como productor de gasolina, destilados o combustible residual, basándose en los rendimientos obtenidos en el ensayo.

En las evaluaciones de segundo nivel no se determinan las propiedades de los cortes del crudo, a excepción de la gravedad API y el contenido de azufre.

3.3.2.3 EVALUACIONES DE TERCER NIVEL

Estas son las evaluaciones más completas del crudo, donde se determinan las propiedades relevantes de cada uno de los cortes obtenidos. Las propiedades a determinar por corte se establecen con anterioridad antes de realizar la evaluación del

crudo, y dependen del uso que se le va a dar a ésta, aunque existen una serie de propiedades comunes que se determinan independientemente del tipo de evaluación.

El grupo interfiliar de PDVSA para evaluaciones de crudo ha creado un formato estándar para este nivel de evaluación, con el fin de generar todos los datos necesarios para trabajos posteriores.

Las evaluaciones de tercer nivel son bastante completas e indican la tendencia que tiene el crudo a producir un tipo de producto de buena calidad, lo cual se verifica en evaluaciones específicas por tipo de producto. En este nivel se establece la potencialidad del crudo como productor de bases asfálticas, lubricantes o de combustible y, dependiendo de los requerimientos de la entidad que solicita la evaluación de un crudo, se determina si se prosigue a la evaluación de especialidades como: Evaluación para Combustible, Evaluación tipo Asfalto y Evaluación tipo Lubricantes.

3.3.3 APLICACIONES DEL ENSAYO DE CRUDO

Tal como se mencionó al inicio de este capítulo, la información actualizada contenida en un ensayo de crudo es sumamente valiosa para⁽¹⁾:

- Estimar rendimientos de productos blancos y negros
- Simular procesos de Refinación
- Fijar procesos de tratamiento
- Fijar precios de comercialización del crudo

En este sentido es importante señalar que un ensayo de crudo se considera vigente por un período aproximado de tres (3) años. Esta vigencia dependerá de los cambios que se tengan a nivel de producción del crudo, si se han modificado

significativamente las zonas de los pozos explotados, y si se observan variaciones significativas en la calidad del crudo durante su explotación.

3.3.4 PROPIEDADES UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN DE CRUDOS, CALIDAD DE LOS PRODUCTOS

La mayoría de los productos terminados de una refinería son resultantes de la mezcla de componentes producidos en las unidades de procesos, de tal manera que se cumplan las demandas y especificaciones al menor costo posible, siendo las especificaciones, los valores o restricciones máximos y mínimos de las calidades más importantes que deben cumplir los productos finales para ser aceptados por el cliente⁽¹⁾.

Para la evaluación de crudos, la calidad de los productos se define en base a sus especificaciones y se determina a través del análisis de laboratorio. Los niveles de calidad de cada tipo de producto están generalmente normalizados a nivel internacional. Sin embargo, en cada refinería, las calidades que se pueden ofrecer dependerán de los crudos e insumos alimentados y de las unidades de proceso y de no-proceso disponibles⁽¹⁾.

Todas las especificaciones de un producto son importantes, no obstante, no todas se pueden ajustar simultáneamente a través del mezclado, ya que algunas se convierten en especificaciones “*críticas*”, y son estas las que generan al refinador costos de operación e inversión, por ejemplo, se tiene que:

En las gasolinas: Se tiene el octanaje, volatilidad, destilación, contenido de azufre y tetraetilo de plomo.

En los destilados: Se tiene el punto de fluidez, el contenido de azufre, la curva de destilación y el número de Cetano.

En los Combustibles Residuales: Mayoritariamente se controlan viscosidad, el contenido de azufre y la Gravedad API.

Debido a la inexactitud de predecir las calidades de mezcla y a limitaciones en la precisión de los resultados de las pruebas de laboratorio, como medida práctica las refinerías mezclan cumpliendo calidades metas, más exigentes que las especificaciones normales. Se logra con esto cubrir el margen de error de los métodos, conocido como “tolerancia”, que es la diferencia entre la meta y la especificación.

Los métodos de prueba de los productos están normalizados y generalmente corresponden a las normas internacionales A.S.T.M. El manual “Procedimientos Analíticos para la Industria Petrolera y Petroquímica” editado por COVENIN, cubre la mayor parte de las pruebas utilizadas en el control de calidad de productos. Para los productos de exportación se tienen normas según la zona donde se comercialice. El mayor mercado comercializado por Venezuela es la Costa Este de Estados Unidos, el cual tiene la norma Colonial Pipeline C. Sin embargo, existen otras normas en USA, como la Explorer Pipeline C., y la Easter Products Pipeline C, entre otras.

3.3.4.1 PRINCIPIOS DE MEZCLA

El proceso de mezclado es relativamente simple y se puede realizar de diferentes formas, por ejemplo, mediante mezcla de los componentes de un tanque de almacenamiento con agitación, o por mezcla en línea de los básicos en forma continua para asegurar que los productos mezclados cumplan las especificaciones deseadas. En este caso, la instalación de analizadores en línea proveen el control de aditivos y de los básicos de la mezcla⁽¹⁾.

La determinación de las proporciones de mezcla es más difícil. La selección de los componentes de mezcla y sus proporciones en el producto final, es uno de los

problemas más complejos para el refinador. Las corrientes producidas en la destilación del crudo y de los otros procesos tales como craqueo catalítico, reformación catalítica y alquilación, deben ser mezcladas para cumplir las especificaciones de la forma más económica. Los inventarios de los básicos, sus costos y las propiedades físicas, deben ser considerados de forma tal de cumplir las especificaciones críticas al menor costo.

Debido a que las operaciones de mezcla ofrecen un enorme número de opciones muchos refinadores utilizan Modelos de Programación Lineal (LP) como ayuda en la toma de decisiones⁽⁴⁾.

Las operaciones de mezcla pueden ser modeladas en dos métodos. El método más simple consiste en desarrollar un número de “recetas” o mezclas factibles preestablecidas, que cumplen con las especificaciones del producto, de esta manera el modelo LP selecciona la combinación de recetas a fin de cumplir la demanda del producto. Este método tiene la desventaja de que requiere una gran cantidad de recetas para representar la flexibilidad de las operaciones de mezcla y necesita continuas actualizaciones.

En el segundo método “Mezclas”, son modelos de mezcla que utilizan directamente las calidades de los componentes y las especificaciones de los productos finales, a fin de que el modelo LP seleccione la composición óptima de componentes que cumplen con las especificaciones. Este método es el más flexible, pero requiere de gran habilidad para preparar la información y estructurar un modelo que permita mezclas lineales.

3.3.4.2 MODELOS DE MEZCLAS LINEALES

Una propiedad es aditiva, es decir, mezcla linealmente, cuando la calidad del producto final es un promedio ponderado de la calidad de cada uno de sus

componentes. En otras palabras, alguna de las siguientes ecuaciones deber ser satisfecha⁽⁴⁾:

$$P_m = \sum W_i * P_i$$

$$P_m = \sum V_i * P_i$$

$$P_m = \sum X_i * P_i$$

Donde:

P_m = Propiedad de la mezcla

P_i = Propiedad del componente i

W_i = Fracción en peso del componente i

V_i = Fracción en volumen del componente i

X_i = Fracción molar del componente i

Algunas propiedades son aditivas en volumen, peso o en una base molar, como por ejemplo la gravedad específica, el contenido de azufre o la presión de vapor, respectivamente. Por otra parte, propiedades como la viscosidad no mezclan linealmente en ninguna base.

3.3.4.3 ÍNDICES DE MEZCLA

Para manejar propiedades que no son aditivas, en forma lineal se pueden desarrollar ecuaciones para convertirlas en propiedades empíricas que se comportan en forma lineal. Estas propiedades empíricas se conocen como números, índices o factores de mezclas, las cuales deben satisfacer las siguientes ecuaciones⁽⁴⁾:

$$I_m = \sum W_i * I_i$$

$$I_m = \sum V_i * I_i$$

$$I_m = \sum X_i * I_i$$

Donde:

I_m = Índice de mezcla del producto final

I_i = Índice de mezcla del componente i

3.3.4.4 BONOS

Otro enfoque para manejar propiedades no aditivas es el uso de “Bonos”. En este caso, a la propiedad que exhibe un comportamiento no lineal, se le suma un “Bono” de manera que el número de la propiedad resultante es aditivo. El “Bono” se define como la diferencia entre el número de mezcla de la propiedad y la propiedad del componente individual, siendo el número de mezcla, el valor de la propiedad que el componente presenta cuando se mezcla con otros componentes. Este valor puede ser mayor o menor a la propiedad del componente individual⁽⁴⁾.

En la siguiente tabla se exponen las ventajas y desventajas de los dos enfoques presentados, para mezclas no lineales.

Tabla 1

Ventajas y desventajas entre los Índices y Bonos

Enfoque	Ventajas	Desventajas
Índices	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil implantación. 	<ul style="list-style-type: none"> • No siempre presentan una precisión aceptable.
Bonos	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil implantación para operaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo • Difíciles de mantener. • Precisión aceptable en recetas más o menos constantes.

3.3.4.5 PROPIEDADES MÁS IMPORTANTES EN LA EVALUACIÓN DE CRUDOS Y MÉTODOS DE MEZCLA^(1,2,5)

GRAVEDAD ESPECÍFICA (SPG)

La gravedad específica o densidad relativa de una sustancia es la relación entre la masa de un volumen dado de líquido a 15,6° C (60°F) y la masa de un volumen igual de agua pura a la misma temperatura. Partiendo de esta definición, se puede deducir que la gravedad específica de las sustancias que pesan menos que el agua, es menor que uno. Con la excepción de algunas fracciones asfálticas muy pesadas, el petróleo y sus productos tienen una gravedad específica menor a uno.

En vista de que la gravedad varía con la temperatura, y siendo deseable referirla a una temperatura uniforme, la gravedad se corrige siempre para una temperatura fija equivalente a 15,6°C, para lo cual se emplean tablas oficiales de corrección. Los productos de petróleo se venden por volumen en base al volumen corregido, estas correcciones de volumen se hacen empleando tablas que han sido elaboradas en función directa de la gravedad específica del producto, sea cual fuere su origen o carácter. Por lo tanto, siempre que sea necesario hacer una corrección de volumen por efecto de un cambio de temperatura, tiene antes que conocerse la gravedad específica.

La gravedad específica presenta un comportamiento ascendente a medida que aumenta la temperatura de corte del crudo, es decir, aumenta hacia los cortes más pesados, además es una propiedad que aplica a todos los cortes de crudo. Para efectos del control de calidad de los derivados del petróleo en una refinería, se utiliza la siguiente correlación: A medida que aumenta la gravedad específica, el punto de ebullición se hace más alto y/o el producto se hace menos parafínico.

Para medir la gravedad del petróleo y de sus productos, generalmente se utiliza una escala de gravedad arbitraria denominada Gravedad API (American Petroleum Institute), en lugar de la gravedad específica. La gravedad API se determina utilizando el método COVENIN 1143-80 (A.S.T.M. D-1298).

La relación entre las dos es la siguiente:

$$API = (141,5/SPG) - 131,5$$

Así mismo, a efectos de control de calidad, para la Gravedad API se utilizan las siguientes correlaciones:

- En gasolinas que tienen igual margen de ebullición, una gravedad API baja con frecuencia es relacionada con un mayor número de octano. El número de octano indica las propiedades antidetonantes de una gasolina.
- En el Kerosén, una gravedad API alta indica que el producto quemará mejor, o sea, con menos humo.
- En los combustibles Diesel, una Gravedad API alta indica que el producto posee buenas características de ignición.
- 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 alto será su poder calorífico.

La Gravedad Específica mezcla linealmente en volumen. En cambio, esto no sucede con la Gravedad API, la cual debe convertirse a Gravedad Específica para efectuar la mezcla y luego convertirla de nuevo a Gravedad API.

CONTENIDO DE AZUFRE (SUL)

El control del azufre es importante debido a que el azufre puede causar corrosión a las partes metálicas de un motor diesel y contaminación ambiental, además tiene un efecto indeseable sobre la estabilidad del color en los productos de petróleo.

La presencia de los compuestos de azufre reduce también la susceptibilidad del plomo en las gasolinas, de tal forma que sólo eliminando completamente los compuestos activos de azufre, puede aumentarse materialmente el número de octanos obtenidos por adición de una cierta cantidad de tetraetilo de plomo.

Existen muchos métodos para determinar el contenido de azufre en los productos de petróleo y entre ellos se encuentran el Método de la Lámpara (A.S.T.M. D-1266) y el Método de Temperatura Alta (COVENIN 1133-82/ A.S.T.M. D-1552).

El contenido de azufre aumenta hacia los cortes más pesados del crudo, concentrándose generalmente en el último y es una propiedad que mezcla linealmente en peso. Esta propiedad aplica a todos los cortes del crudo debido a que la presencia de azufre es un factor importante al momento de medir la complejidad y los costos del proceso de refinación.

PUNTO MEDIO DE EBULLICIÓN (ABP)

Se define como la temperatura, basada normalmente en una destilación de ensayo de crudo, a la que la mitad del material de un corte se ha evaporado.

Este ensayo mezcla lineal en volumen y se determina para todos los cortes del crudo.

FACTOR DE CARACTERIZACIÓN Kuop (KFC)

Este factor adimensional es utilizado para correlacionar datos basados en propiedades físicas y para obtener una clasificación del crudo en base a su naturaleza. No tiene una tendencia bien definida, pero generalmente presenta un comportamiento similar al de una parábola, aplica principalmente a los gasóleos de vacío y mezcla lineal en volumen.

NÚMERO OCTANO DE INVESTIGACIÓN (RON)

El número octano de investigación se define como el porcentaje en volumen de isooctano en una mezcla de isooctano y n-heptano, que detona a la misma intensidad que el combustible que se está ensayando. Para esta prueba se utiliza un motor de ensayo estandarizado que opera bajo condiciones estandarizadas (600 r.p.m.), los resultados son comparables a aquellos obtenidos en un motor de automóvil que trabaja a baja velocidad (A.S.T.M. D-2722).

Para la realización de esta prueba, al isooctano puro se le ha asignado un octanaje de 100, porque no produce detonación en la mayoría de los motores. Al heptano normal de similar pureza, se le ha dado una relación normal de detonación igual a cero, porque produce detonación en casi todos los motores. Mezclando diferentes porcentajes de estos hidrocarburos, se obtiene una mezcla que produce el mismo comportamiento o intensidad de detonación que el combustible que se analiza. En este caso se dice que el octanaje de la muestra en cuestión es igual al porcentaje de isooctano de la mezcla usada como referencia. En otras palabras, el número de octano de un combustible es igual al porcentaje de isooctano del combustible de

referencia, cuyas características de detonación son iguales a las muestras que se analizan.

Este ensayo aplica sólo para las naftas y el número octano de investigación disminuye hacia las fracciones más pesadas del crudo. El número octano de investigación no mezcla linealmente, aunque la mayoría de las veces se asume que si, es recomendado el uso de “Bonos” para realizar las mezclas. Existe una variación de este ensayo denominado R30, el cual es el mismo RON adicionándole 3 cc de tetraetilo de plomo por galón.

NÚMERO OCTANO PARA MOTOR (MON)

Porcentaje en volumen de isooctano en una mezcla de isooctano y heptano normal, que detona con la misma intensidad que el combustible que se está ensayando. Se utiliza un motor de ensayo estandarizado, que opera bajo condiciones estandarizadas (900 r.p.m.), este ensayo se aproxima a las condiciones de velocidad de crucero de un automóvil.

Este ensayo aplica sólo para las naftas y de igual manera que el número octano de investigación disminuye hacia las fracciones más pesadas del crudo, presentando también una variación del ensayo denominada M30, el cual es el mismo MON adicionándole 3 cc de tetraetilo de plomo por galón.

PRESIÓN DE VAPOR REID (RVP)

Este ensayo refleja la presión de vapor de un producto determinado en un volumen de aire cuatro veces superior al volumen del líquido a 100°F. La presión de vapor REID, es una indicación de la tendencia a la vaporización de una gasolina de motor, así como de los peligros de explosión, evaporación y transporte (ASTM D-323).

El método también es utilizado para determinar la presión de vapor de productos del petróleo volátiles y no viscosos. Esta propiedad no mezcla lineal en peso, pero en volumen se obtiene buenas aproximaciones, debido a esto se recomienda el uso de un Índice de Mezcla (RVI).

La presión de vapor Reid, disminuye hacia las fracciones más pesadas del crudo y aplica a los componentes más livianos, como las naftas.

PUNTO DE ANILINA (ANI)

El punto de anilina se define como la temperatura mínima para la miscibilidad completa de volúmenes iguales de anilina y de la muestra de ensayo. El ensayo se considera una indicación de la parafinidad de la muestra tomando en cuenta cuales tipos de hidrocarburos predominan en los productos.

Esta prueba es muy útil en la evaluación del poder de solvencia de las naftas de petróleo y se utiliza junto con la gravedad API en el cálculo del índice Diesel. Este índice permite conocer el poder de ignición del combustible, aun cuando es menos seguro que el número de cetano. El punto de anilina se determina mediante el método COVENIN 1090-3 (A.S.T.M. D-611).

El punto de anilina mezcla linealmente en peso y linealmente en volumen utilizando los índices de mezcla (ANB). Tiene un comportamiento ascendente a medida que las fracciones son más pesadas y el ensayo aplica desde la nafta pesada hasta el residuo.

PUNTO DE INFLAMACIÓN O VAPORIZACIÓN (FLS)

Es la mínima temperatura a la que debe calentarse un producto bajo condiciones específicas para producir suficiente vapor que forme con el aire una mezcla que

puede entrar fácilmente en ignición. El punto de inflamación o vaporización (Flash Point) se utiliza generalmente como una indicación del potencial ígneo y de explosión de un producto (A.S.T.M. D-56, D-92, D93, E-134, D-1310).

La especificación de mínimo punto de Inflamación, indica la máxima temperatura a la cual un producto de petróleo puede ser almacenado y manejado, sin peligro de incendio o explosión. Para los destilados, una especificación de máximo punto de inflamación es impuesta generalmente para asegurar una fácil ignición en quemadores. Sin embargo, para gran número de derivados del petróleo, especialmente en los aceites lubricantes, se establece el punto de inflamación no como una indicación de la facilidad que posee el producto para encenderse, sino que se utiliza para facilitar su identificación y clasificación y para detectar contaminaciones con productos livianos.

El punto de inflamación no posee una mezcla lineal, para este caso se calcula el índice de mezcla y luego se mezcla linealmente el índice en función del método utilizado. En los derivados del petróleo esta propiedad varía considerablemente, los productos volátiles tienen un punto de inflamación bajo y aumenta conforme la fracción se hace mas pesada. Este ensayo aplica desde la nafta pesada hasta el residuo.

PUNTO DE HUMO (SMK)

Ensayo que mide la calidad de combustión de combustibles para motores de reacción, kerosene y aceites de iluminación. La prueba consiste en medir la altura de la llama que produce un combustible, sin despedir humo (COVENIN 895-82/ASTM D-13322).

La prueba de punto de humo indica la calidad de quemado de los kerosenes, a mayor punto de humo se obtiene una mejor calidad de combustión; los hidrocarburos

Parafínicos generalmente dan un punto de humo más alto que el correspondiente a los hidrocarburos aromáticos.

El punto de humo no mezcla linealmente en peso ni en volumen, para hacerlo es necesario el uso del índice de mezcla SMI, que mezcla linealmente en volumen. Otra opción de mezcla es convertir el punto de humo a número luminómetro, mezclar linealmente en peso y convertir el número luminómetro a punto de humo.

El comportamiento de esta propiedad depende de la naturaleza del crudo y esta aplica primordialmente a la nafta pesada y kerosene.

PUNTO DE CONGELAMIENTO (FRZ)

El punto de congelamiento (Freezing Point), es la temperatura a la cual se solidifica un producto. El método consiste en enfriar la muestra, agitándola. Al observar una turbidez en la muestra, se deja de agitar y al desaparecer la turbidez se mide la temperatura de congelamiento.

El punto de congelamiento máximo se especifica para todos los turbocombustibles y Jet de aviación, como una medida de la temperatura mínima a la cual el combustible puede ser usado sin riesgos de solidificación de hidrocarburos, los cuales pueden taponar líneas y depositarse en los tanques de combustible.

El punto de congelamiento no mezcla linealmente, para ello se calcula el índice de mezcla FRI y se mezcla linealmente en volumen; esta propiedad aumenta hacia las fracciones mas pesadas del crudo y aplica específicamente a la nafta pesada y kerosene.

PUNTO DE FLUIDEZ (POR)

Temperatura mínima a la que un aceite de petróleo (destilado o gasóleo de vacío) fluirá cuando se enfría, sin perturbaciones a un caudal estándar. El punto de fluidez es una especificación crítica de los productos destilados medios y residuos utilizados en climas fríos (A.S.T.M. D-99).

Esta propiedad no mezcla linealmente. Es necesario el uso de un índice de mezcla (PPI) y luego mezclar en función del método utilizado, esta propiedad presenta la tendencia de ir aumentado hacia los cortes más pesados.

NÚMERO DE CETANO (CBN) / ÍNDICE DE CETANO (CTI)

El número de cetano es el porcentaje de cetano puro, en una mezcla de cetano y alfa-metil naftaleno, que tiene la misma calidad de ignición que una muestra de combustible diesel. Esta calidad se especifica para los destilados medios y es análoga al número de octano de la gasolina.

El índice de cetano, no es un índice de mezcla. Cuando no es factible determinar el número de cetano a través de la prueba de laboratorio correspondiente (no se dispone de la cantidad de muestra requerida, por ejemplo), es posible estimar la calidad del producto a través del índice de cetano por el método A.S.T.M. D-976, utilizando una gráfica que presenta ciertas restricciones. Este índice no puede utilizarse para combustibles diesel que contengan material sintético, componentes craqueados o con puntos finales de ebullición inferiores a 500 °F. Tampoco es recomendable para mezclas que contengan aditivos mejoradores.

Esta propiedad mezcla lineal en volumen, y no presenta una tendencia definida.

VISCOSIDAD (VBI)

La viscosidad es la propiedad que mide la fricción interna o la resistencia de un líquido para fluir. Se mide generalmente en términos del tiempo requerido para que una muestra fluya a una temperatura definida a través de un tubo estándar. Las escalas comúnmente utilizadas para la medición de la viscosidad son Saybolt Universal (seg.), Saybolt Furol (seg.) y Cinemática (cSt). Las conversiones entre estas medidas de viscosidad están estandarizadas por la ASTM en el método D-2161.

La viscosidad de un líquido es menor a medida que se incrementa la temperatura, por lo tanto la temperatura a la cual se realiza la medida de viscosidad debe ser también incluida cuando se reporta esta propiedad. La técnica más común para calcular la viscosidad de un producto a diferentes temperaturas son las gráficas estándares de viscosidad-temperatura de hidrocarburos líquidos contempladas en las normas A.S.T.M. D-341.

La viscosidad no mezcla linealmente. El enfoque más común es el uso de índices de mezcla (VBI), los cuales mezclan linealmente en volumen o peso dependiendo del método seleccionado. Debe destacarse que la viscosidad de todos los componentes de la mezcla debe ser a la misma temperatura de medición ya que los índices de mezcla calculados, únicamente mezclan linealmente a una temperatura constante.

El valor de esta propiedad aumenta hacia las fracciones más pesadas del crudo y aplica generalmente desde la nafta pesada hasta el residuo.

METALES

En este grupo se incluyen el ensayo de Níquel (NIK) y Vanadio (VAN). El níquel es un contaminante de los productos del petróleo, mientras que el vanadio

puede causar ataques severos de corrosión, por este motivo se limita a una concentración de 2 ppm.

Estos ensayos mezclan en peso y ambos se concentran en las fracciones más pesadas del crudo, los ensayos aplican a los gasóleos de vacío y residuo.

NITROGENO (NIT) / NITROGENO TOTAL (TNT)

Se conoce por corrosiva el efecto nocivo que sobre los metales ejercen ciertas sustancias químicamente activas. Los hidrocarburos son sustancias inertes frente a los metales, no obstante, cuando los hidrocarburos se combinan con el azufre, oxígeno y nitrógeno, se vuelven químicamente activos frente a muchos metales de los cuales están fabricados los equipos donde se refina o utilizan esos crudos y productos.

Por esta razón la presencia de nitrógeno se considera un contaminante de los productos provenientes del petróleo, resultando conveniente para su estudio estos dos ensayos, nitrógeno total (TNT) o nitrógeno básico (NIT). Estos ensayos se determinan a los cortes de kerosene, gasóleos de vacío y residuo; concentrándose el nitrógeno principalmente en el último corte y presentando una mezcla lineal en peso.

CARBÓN CONRADSON (CON)

El contenido de carbón residual de los combustibles se determina mediante dos métodos de prueba convencionales: del método Conradson (ASTM D189) y el método Ramsbottom. El término carbón residual se utiliza para designar el material sólido carbonoso que queda después que el combustible ha sido sometido en evaporación completa seguida de un proceso moderado de pirólisis o quemado.

El método Conradson se utiliza para determinar la cantidad de residuos de carbón que deja un aceite bajo ciertas condiciones específicas y se interpreta como el

resultado de la tendencia relativa a la formación de carbón de dicho aceite. Por lo tanto, los resultados de ella deben ser analizados en conexión con otras pruebas para obtener conclusiones más valederas. Esta prueba, sin embargo, suministra apropiada información referente a lubricantes para motores de combustión interna, aceites combustibles para uso doméstico y aceites para la fabricación de gas.

En los últimos años este ensayo se ha sustituido por el ensayo de Microcarbón, ya que este último presenta mayor rapidez, necesita menor cantidad de muestra y resulta más versátil.

El carbón conradson mezcla lineal en peso, y se determina a los gasóleos de vacío y el residuo, presentando un comportamiento ascendente hacia los cortes más pesados.

ASFÁLTENOS (ASP)

Cantidades pequeñas de material no quemable se encuentran en el crudo en dos formas: (1) como partículas sólidas y (2) como componentes metálicos solubles en agua. La determinación del ASP, se realiza mediante A.S.T.M. D-482/IP 4. En este ensayo, una pequeña cantidad de combustible es quemada en un contenedor hasta que todo el combustible se ha consumido. La cantidad de residuo no quemado, es el contenido de ASP, y es reportado como porcentaje en peso del crudo.

Esta propiedad mezcla linealmente en peso, y aumenta hacia las fracciones más pesadas del crudo, concentrándose en el residuo.

NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN (ACD)

Cantidad de ácido o base que se necesita para neutralizar todos los componentes básicos o ácidos presentes en una cantidad específica de muestra. Es una medida del

grado de oxidación de un producto en almacenamiento o en servicio (A.S.T.M. D-664, D-974).

Se mide en KOH/mg, y aumenta hacia las fracciones más pesadas del crudo. Esta propiedad presenta una mezcla lineal en peso.

DISTILLATION BLENDING VALUE (DBV)

En vista de que la mayoría de los modelos de programación lineal (Modelos PIMS), asumían mezcla lineal de las temperaturas de recuperación para el modelaje de las propiedades de mezcla de gasolinas y destilados, se diseñaron mezclas en volumen para cada una de las refinerías.

La mezcla en volumen consiste en convertir la curva de destilación D86 de temperaturas a volumen, de acuerdo a la especificación que se quiere alcanzar, mediante el uso de la ecuación de Decker, Jackman y Schneider^(*). Por ejemplo si la especificación T90 es 360°C se estima para cada componente el volumen recuperado a esa temperatura.

En líneas generales, los componentes con intervalos estrechos de ebullición tienden a mezclar a porcentajes negativos de recuperación a ciertas temperaturas o a más de 100% en otras. Para estos componentes, generalmente la diferencia de temperatura entre la mayor/menor volatilidad y la VABP es \pm °F.

** Correlación disponible en PDVSA-Intevep.*

3.4 PROCESOS DE DESTILACIÓN

El propósito de esta sección es presentar los procesos de refinación en el mismo orden en el cual el crudo fluye a través de la refinería para mostrar los fines y las interrelaciones de las unidades.

La *Figura 2* muestra la secuencia típica de los procesos en una refinería moderna con indicación de los principales flujos entre las operaciones.

El crudo se calienta en un horno y se carga a una columna de destilación que opera a presión atmosférica donde se separa en butanos y gas húmedo más ligero, todo el intervalo de gasolinas no estabilizadas, nafta pesada, kerosene, gasoil pesado y residual largo. El residual largo se envía a la torre de vacío y se separa en una corriente superior de gasoil de vacío y de una cola de crudo reducido⁽¹⁾.

En muchas refinerías de conversión profunda las colas de crudo reducido procedentes de la columna de vacío se craquean térmicamente en un coquizador para producir gas húmedo, gasolinas de coquización, gasóleos y coque⁽⁵⁾.

Los gasóleos procedentes de las unidades de destilación atmosférica y vacío, así como el gasóleo procedente del coquizador, pueden utilizarse como alimentaciones para las unidades de craqueo catalítico o de craqueo con hidrógeno (hidrocraqueo). Estas unidades rompen las moléculas pesadas en compuestos que ebulen en el intervalo de la gasolina y del destilado combustible. Los productos procedentes del craqueo con hidrógeno son saturados. Por su parte, los productos insaturados procedentes del craqueo catalítico se mejoran mediante reformado catalítico o hidrogenación.

Los destilados medios de la unidad del crudo, del coquizador y de las unidades de craqueo se mezclan como combustibles diesel, combustibles para reactores y combustibles para calefacción.

Las corrientes de gasolina de la torre de crudo, del coquizador y de las unidades de craqueo pueden alimentarse (después de ser hidrotratadas) a un reformador catalítico para mejorar sus números de octano. Los productos del reformador catalítico se mezclan para formar gasolinas normales y especiales para la venta.

Las corrientes de gas húmedo de las unidades de crudo del coquizador y de las unidades de craqueo se recuperan y se fraccionan en la sección de concentración de gases en gas combustible, gas licuado del petróleo (LPG) hidrocarburos insaturados (propilenos, butilenos y pentenos) incluyendo normal butano e isobutano. El gas combustible se quema en los hornos de la refinería. Los hidrocarburos insaturados y el isobutano se mandan a las unidades de alquilación para su procesamiento.

La unidad de alquilación utiliza ácido sulfúrico o fluorhídrico como catalizador de la reacción de las olefinas con isobutano para formar parafinas que hierven en el intervalo de la gasolina. El producto, denominado alquilato, con un alto octanaje se mezcla con las gasolinas especiales para automóviles y gasolinas de aviación.

En algunas refinerías, el gasóleo pesado de vacío y el residuo largo procedente del crudo de base nafténica o parafínica se procesan para la obtención de aceites lubricantes. Después de eliminados los asfáltenos en el desasfaltador con propano, las colas de crudo reducido se procesan con los gasóleos pesados de vacío en una operación por etapas para producir materias primas para aceites lubricantes⁽⁵⁾.



3.4.1 DESTILACIÓN DEL CRUDO

La destilación se utiliza para separar el crudo del petróleo en fracciones de acuerdo con su punto de ebullición⁽⁵⁾, para que cada una de las siguientes unidades del proceso tenga materias primas que satisfagan sus especificaciones particulares. Se consiguen las mayores eficacias y los costos más bajos si la separación del crudo tiene lugar en dos etapas, primero fraccionando la totalidad del crudo esencialmente a la presión atmosférica, luego alimentando la fracción de los residuos de punto de ebullición más alto (crudo reducido) de la columna a presión atmosférica a un segundo fraccionador operando a alto vacío. La *Figura 3* presenta el esquema de destilación del crudo.

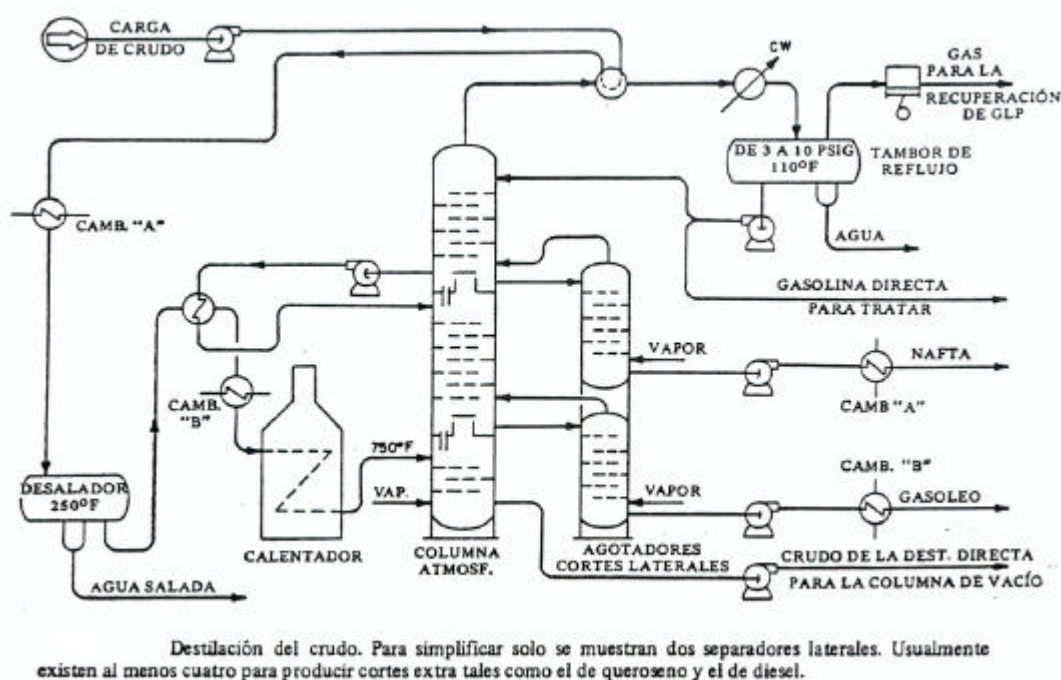


Figura 3

Destilación del Crudo⁽¹⁾

La columna de vacío se emplea para separar la porción más pesada del crudo de petróleo en fracciones, ya que las altas temperaturas necesarias para vaporizar el crudo reducido a la presión atmosférica darían lugar a desintegración térmica con la consiguiente pérdida por gas seco, coloración excesiva del producto y ensuciamiento del equipo debido a la formación de coque.

La *Tabla 2* y la *Tabla 3* muestran puntos de corte característicos de las fracciones a intervalos de ebullición para las fracciones de las columnas atmosféricas y de vacío.

Tabla 2

Intervalos de ebullición de fracciones características del petróleo crudo

Intervalos de Ebullición		
Fracción	ASTM (°F)	TBP (°F)
Butanos y más ligeros	< 90	< 90
Gasolina ligera (LSR)	90-220	90-190
Nafta (gasolina pesada directa)	180-400	190-380
Kerosén	330-540	380-520
Gasóleo ligero (LGO)	420-640	520-610
Gasóleo Atmosférico	550-830	610-800
Gasóleo de vacío (VGO)	750-1050	800-1050
Residuo de Vacío	1000+	1000+

Tabla 3Puntos de corte TBP para varias fracciones de crudo de petróleo⁽⁵⁾

Corte	PEI (°F)	PF (°F)	Utilización en Proceso
Gasolina LSR	90	180	Corte Min. Gasolina ligera
	90	190	Corte normal LSR
	80	220	Corte máximo LSR
Gasolina HSR (nafta)	180	330	Corte de reformado máximo
	190	330	Corte máximo de combustible para aviones a reacción.
	220	330	Corte de reformado mínimo.
Kerosén	330	520	Corte máximo de kerosén.
	330	480	Corte máximo de jet
	380	520	Corte para máxima gasolina
Gasóleo ligero (LGO)	420	610	Combustible diesel máximo
	480	610	Máximo combustible para aviones a reacción
	520	610	Kerosén máximo
Gasóleo pesado (HGO)	610	800	Alimentación desintegrador catalítico

Si el contenido en sal del crudo de petróleo es superior a 10 lb/1000 barriles (expresado como NaCl) el crudo precisa ser desalado para minimizar el ensuciamiento y la corrosión debidas al depósito de sales sobre las superficies de transmisión de calor y los ácidos formados por la descomposición de los cloruros. Además, en el proceso de desalado se eliminan parcialmente algunos metales que pueden dar lugar a la desactivación de catalizadores en las unidades de proceso catalítico.

El desalado se lleva a cabo por emulsionado del crudo con agua a unos 250°F y bajo una suficiente presión para prevenir la vaporización de los hidrocarburos o del agua. Las sales se disuelven en el agua y las fases acuosa y orgánica se separan utilizando productos químicos para romper la emulsión y/o mediante el desarrollo de un campo eléctrico de potencial elevado a través del recipiente de sedimentación para juntar las gotas de agua salada más rápidamente. Se utilizan potenciales eléctricos desde 16.000 a 35.000 voltios para provocar la unión.

El contenido de sal del crudo se reduce normalmente a un 90% o más en una operación de una etapa. Se pueden utilizar etapas adicionales en serie para reducir el contenido de sal si solo una etapa del desarrollo es insuficiente.

3.4.1.1 DESTILACIÓN ATMÓSFERICA

Después del desalado, el crudo se bombea a través de una serie de intercambiadores de calor elevándose su temperatura hasta alrededor de 550°F por intercambio de calor con las corrientes de producto y de reflujo. Posteriormente se calienta hasta alrededor de 750°F en un horno (de calefacción directa o tubos) y se carga a la zona de alimentación de las columnas de fraccionamiento atmosféricas. La temperatura de descarga del horno es suficientemente elevada (de 660° a 750°F) para vaporizar aprox. 20 % de todos los productos de cola. Este 20% de incremento permite que exista cierto fraccionamiento en los platos superiores a la zona de alimentación proporcionando un reflujo interno en exceso sobre las corrientes laterales extraídas⁽¹⁾.

El reflujo se proporciona condensando los vapores de la parte superior de la columna, disolviendo una porción de líquido a la cabeza de la columna y bombeando para extraer y devolver corrientes a zonas más bajas en la columna. Cada uno de los productos de las corrientes laterales eliminados de la columna rebaja la cantidad de reflujo por debajo del punto de extracción. Se obtiene un máximo de reflujo y de

fraccionamiento eliminando todo el calor en la cabeza de la columna pero para esto se requeriría diámetro muy grande en la cabeza de la columna. Para reducir el diámetro en la cabeza de la columna y también la carga del líquido a lo largo de la misma se utilizan corrientes intermedias de eliminación de calor que generan reflujo por debajo de los puntos de extracción de dichas corrientes laterales. Para conseguirlo el líquido se extrae de la columna, se enfría mediante un intercambiador de calor y se devuelve a la columna o alternatively una porción de la corriente enfriada puede devolverse a la columna. Esta corriente fría condensa gran cantidad del vapor que asciende por la columna incrementando por consiguiente el reflujo por debajo de este punto⁽¹⁾.

Aunque normalmente las columnas de crudo no utilizan hervidores generalmente se incorporan varios platos por debajo de la zona de alimentación introduciéndose vapor por debajo del plato de cola para separar cualquier gasóleo residual del líquido en la zona de alimentación y dar lugar a residuos con un alto punto de inflamación. El vapor reduce la presión parcial de los hidrocarburos rebajando así la temperatura requerida para la vaporización.

Normalmente la columna de fraccionamiento a presión atmosférica contiene de 30 a 50 platos de fraccionamiento. La separación de mezclas complejas en el crudo de petróleo es relativamente fácil y generalmente se necesitan de cinco a ocho platos de cada producto de la corriente lateral más el mismo número por encima y por debajo del plato de alimentación. De esta forma una columna de fraccionamiento a la presión atmosférica con cuatro extracciones de corrientes laterales líquidas requerirá de 30 a 42 platos.

La corriente lateral líquida extraída contendrá componentes de bajo punto de ebullición que rebajan el punto de inflamación debido a que los productos más ligeros pasan a través de los productos más pesados y están con ellos en equilibrio en cada plato. Estas “colas ligeras” se separan de cada corriente lateral en una pequeña

columna de separación individual (despojadora) que contiene de cuatro a diez platos con vapor introducido debajo del plato de cola. El vapor y las colas ligeras separadas se descargan de nuevo en la zona de vapor de la columna de fraccionamiento a presión atmosférica, encima del correspondiente plato de extracción lateral.

El condensador de la columna a presión atmosférica condensa la fracción de pentano y más pesados, de los vapores que salen de la cabeza de la columna. Esto constituye la porción de gasolina ligera de tope que contiene algunos butanos y propano y esencialmente todos los componentes de mayor punto de ebullición del vapor de tope de la columna. Parte de este condensado se devuelve al tope de la columna como reflujo y el restante se envía a la sección de estabilización de la planta de gas de la refinería donde los butanos y el propano se separan de la gasolina ligera C5-180.

3.4.1.2 DESTILACIÓN AL VACÍO

Las temperaturas requeridas de salida del horno para la destilación a presión atmosférica de las fracciones más pesadas del crudo serían tan altas que podrían dar lugar a la desintegración térmica. Por esto la destilación de las fracciones pesadas se lleva a cabo con presiones absolutas en la zona de alimentación de la columna de 25 a 40 mm de Hg (*Figura 4*)⁽¹⁾.

Para mejorar la vaporización se rebaja aún más la presión efectiva (a 10 mm Hg o menos) mediante la adición de vapor a la entrada del horno y a la base de la columna de vacío. La adición de vapor a la entrada del horno incrementa la velocidad en los tubos del horno y minimiza la formación de coque en el mismo así como también disminuye la presión parcial de la totalidad de los hidrocarburos en la columna de vacío. La cantidad de vapor de despojamiento utilizado es una función del intervalo de ebullición del alimento y de la fracción vaporizada pero generalmente varía de 10 a 50 lb/bl de alimentación⁽¹⁾.

Las temperaturas de salida del horno son también función del intervalo de ebullición de la alimentación y de la fracción vaporizada así como también de las características de coquificación de la alimentación. Velocidades altas en los tubos y la adición de vapor minimizan la formación de coque utilizándose temperaturas en el intervalo de 730 ó 850°F generalmente.

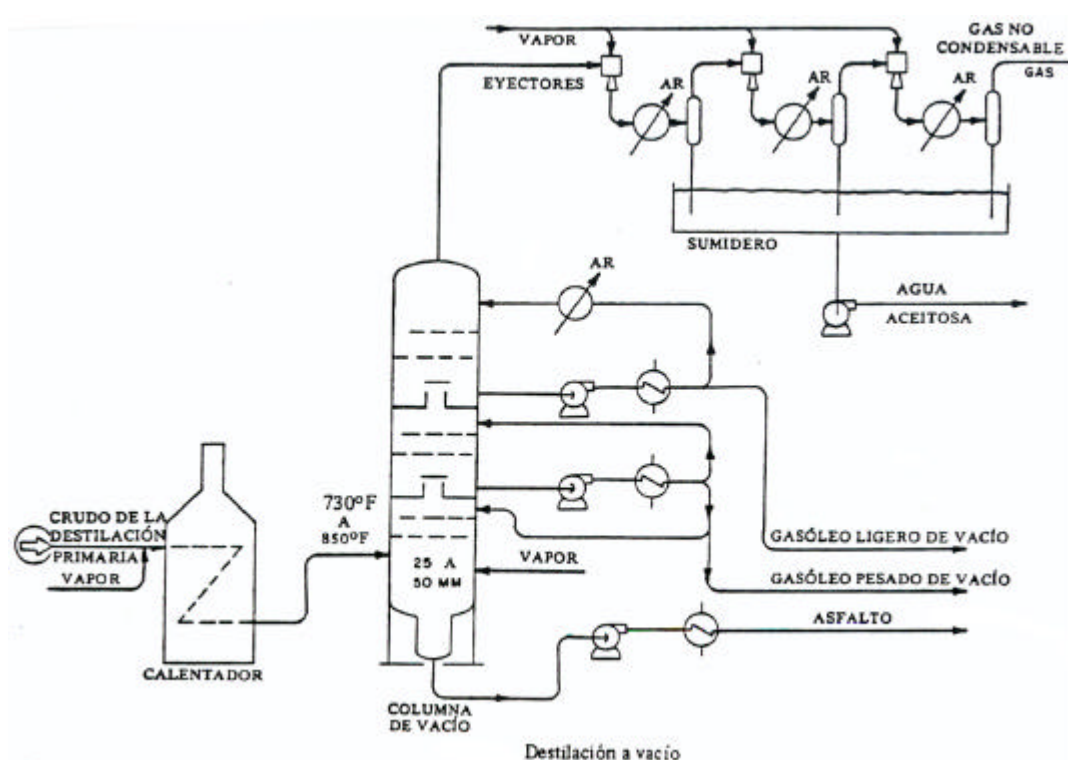


Figura 4

Destilación al Vacío⁽¹⁾

La presión efectiva (presión total absoluta - presión parcial de vapor) en la zona de alimentación determina la fracción de la alimentación vaporizada para una temperatura de salida del horno dada, así, es esencial para el diseño de la columna de

fraccionamiento de las líneas superiores y del condensador minimizar la pérdida de carga entre el dispositivo de inducción del vacío y la zona de flash. Un descenso de unos pocos “mm” en la pérdida de carga puede ahorrar mucho dinero en los costos de operación.

Las presiones de operación más bajas dan lugar a incrementos significativos en el volumen de vapor por barril vaporizado y por consiguiente las columnas de destilación al vacío tienen un diámetro mucho mayor que las columnas a presión atmosférica. No resulta extraño poseer columnas con un diámetro hasta de 40 pies.

La presión de operación deseada se mantiene mediante la utilización de eyectores de vapor y condensadores barométricos o de superficie. El tamaño y el número de eyectores utilizados viene determinado por las necesidades de vacío y la cantidad de vapor manipulado. Para una presión de 25 mm Hg en la zona de alimentación se requieren normalmente tres etapas de eyección. La primera etapa condensa el vapor y comprime los gases no condensables de los condensadores. El vacío producido está limitado por la presión de vapor de agua utilizada en los condensadores. Si se suministra agua fría a los condensadores puede obtenerse una presión absoluta menor en la columna de vacío aunque más costosos que los condensadores barométricos la tendencia actual es hacia el uso de los condensadores de superficie para reducir la contaminación del agua con aceite.

3.5 PRODUCTOS DE LA DESTILACIÓN^(5,7,8)

El principal objetivo de la destilación es separar una alimentación dada en productos de mayor valor. El valor de los productos depende principalmente de su calidad. Esto hace que el control de calidad sea la consideración más importante en la operación de la columna. Pero conseguir las especificaciones de calidad es sólo un aspecto del control de la columna: la operación debe ser rentable y a la vez se deben conseguir las metas de especificaciones requeridas aguas abajo. La calidad, rentabilidad y producción del proceso están íntimamente relacionadas entre sí.

Las fracciones o cortes son los nombres genéricos para todos los componentes que ebullicen entre dos temperaturas denominadas: puntos de corte. Las fracciones típicas del crudo son:

Tabla 4

Puntos de corte de las fracciones típicas

	Temperatura (°C)	Temperatura (°F)
Butano y más ligeros	<32	<90
Gasolina ligera	32-104	90-220
Naftas	104-157	220-315
Kerosén	157-232	315-450
Gasóleo	232-343	450-650
Fondo Atmosférico	>343	>650

Dentro de las curvas de destilación se tiene que la temperatura a la cual un producto, corte o fracción comienza a ebullicir es llamada punto inicial de ebullición (Initial Boiling Point, IBP). La temperatura a la cual el producto es vaporizado 100%

es la llamada punto final de ebullición (Final Boiling Point, FBP) de esta manera se puede decir que cada fracción presenta dos puntos de corte.

Los productos obtenidos en un proceso de destilación se pueden clasificar de la siguiente manera:

3.5.1 DESTILADOS LIVIANOS

Las fracciones que generalmente se consideran como destilados livianos son: la gasolina para avión, gasolina para motor de automóvil, naftas, disolventes de petróleo, combustibles para aviones de propulsión a reacción y kerosén.

NAFTAS

Son unos de los productos más importantes. El término nafta se aplica a materiales con puntos de ebullición entre la gasolina y el kerosén; y son destinadas para diferentes usos.

Las naftas son fracciones que ebullicen hasta los 200 °C y están compuestas de hidrocarburos de cuatro a diez átomos de carbono por molécula. En general, los cortes de naftas más livianos pueden utilizarse directamente en mezclas de gasolina de motor, mientras que las más pesadas pueden usarse como alimentación a plantas de reformación catalítica y plantas petroquímicas.

KEROSÉN

Es utilizado como combustible para aviones de reacción con el nombre de Jet A-1. esta constituido por hidrocarburos de 9 a 17 átomos de carbono por molécula, dentro de las cuales se encuentran estructuras parafínicas, nafténicas y aromáticas ya sean puras o combinadas entre sí.

Este producto es un destilado incoloro, menos volátil que la gasolina y con un rango de ebullición intermedio entre la nafta y el gasóleo. Este rango permite sustituciones con gasolinas pesadas o gasóleos livianos.

3.5.2 DESTILADOS INTERMEDIOS

Se incluyen entre ellos el gasóleo, los aceites ligeros y pesados para calefacción doméstica, los combustibles diesel y destilados que se utilizan para producir más gasolina por desintegración catalítica o térmica. Estos destilados se utilizan principalmente como combustible para camiones pesados, ferrocarriles, pequeñas embarcaciones comerciales y plantas generadoras de energía eléctrica.

FRACCIONES DE GASÓLEO

Estas fracciones están compuestas de hidrocarburos con 16 a 22 átomos de carbono por molécula. Debido al aumento de tamaño molecular la diversidad estructural se hace mayor por lo que la composición química de estos compuestos es mucho más compleja que la de fracciones anteriores. Estas fracciones, además, presentan mayor cantidad de compuestos de azufre y nitrógeno que las fracciones livianas.

3.5.3 RESIDUOS

Algunos componentes no tienen volatilidad suficiente para poder ser destilados. Entre ellos se hallan el asfalto, el aceite combustible residual y el coque. Estos materiales de menor valor, son subproductos del proceso de refinería; sin embargo existe mercado para estos productos.

La composición del fondo atmosférico puede ser:

- Parafínico: predominan los hidrocarburos pesados parafínicos.
- Asfálticos: predominan los hidrocarburos nafténicos-aromáticos y los asfáltenos.

En una torre de destilación atmosférica, el residuo largo saliente se procesa en la destilación al vacío para la manufactura de aceites lubricantes, parafinas, asfalto, alimentación a unidades de desintegración catalítica y térmica y también como combustible residual.

3.5.4 FRACCIONES DE LA DESTILACIÓN AL VACÍO

Los productos provenientes de la destilación al vacío se pueden clasificar en:

- Gasóleos ligeros de vacío, LVGO.
- Gasóleos pesados de vacío, HVGO.
- Fondo de vacío o residuo corto.

GASÓLEOS DE VACÍO

Los gasóleos de vacío pueden ser utilizados, dependiendo de las características del crudo, en la manufactura de lubricantes o como alimentación a unidades de conversión (hidrocraqueo) e hidrosulfuración.

FONDO DE VACÍO

El fondo de vacío es un aceite residual viscoso que queda después de la remoción de los destilados de vacío, el cual puede ser usado como carga para producir aceite lubricante residual, para uso como componente de combustibles

residuales pesados, para la elaboración de bitúmenes asfálticos o como alimentación a las plantas de conversión profunda, según sea su naturaleza química.

3.6 CALIDAD DE FRACCIONAMIENTO, PUNTOS DE CORTE

En refinación, dos términos son usados para discutir la composición del producto y el grado de separación entre fracciones adyacentes. La estimación de los rendimientos de las distintas fracciones de una columna de destilación atmosférica, usando el ensayo de crudo, puede efectuarse partiendo del punto de corte efectivo y del *GAP* (brecha) o solapamiento permitido entre dos cortes sucesivos o a partir del intervalo de corte, TBP o A.S.T.M. de los distintos productos, en este sentido estos intervalos de corte definen la composición general de la fracción y son usualmente una de las claves de especificación para la mayoría de los destilados provenientes de torres atmosféricas y de vacío⁽⁵⁾.

En los casos en que se requiere diseñar una nueva columna de destilación o remodelar una columna existente, se especifica el punto de corte efectivo y el *GAP* deseado entre dos fracciones sucesivas, además de las especificaciones más comunes de los productos que se desean obtener. Esto permite determinar el número de etapas para lograr la calidad específica del producto a partir de un crudo determinado.

El punto de corte efectivo es definido como la temperatura de ebullición TBP a la cual se ha recuperado el cincuenta por ciento del destilado y fija la temperatura a la cual se realiza la separación⁽⁹⁾.

Mientras que el *GAP* representa el grado de separación entre dos fracciones de crudo adyacentes. Este se obtiene restandole a la temperatura A.S.T.M. del 5%v de la fracción pesada adyacente, la temperatura A.S.T.M. del 95% v del corte liviano⁽⁵⁾. (ver *Figura 5*)

$$GAP = (T_{5H} - T_{95L}) \text{ A.S.T.M. , } ^\circ\text{F}$$

Otros autores (Shell) definen el *GAP* en función de la temperatura inicial del corte pesado y la temperatura final del corte liviano; a mayores valores de *GAP* se tiene mayor grado de separación entre dos cortes, a medida que este valor disminuye y se hace negativo, disminuye el grado de separación de los cortes ocurriendo un *overlap* (solapamiento) entre los cortes⁽⁵⁾.

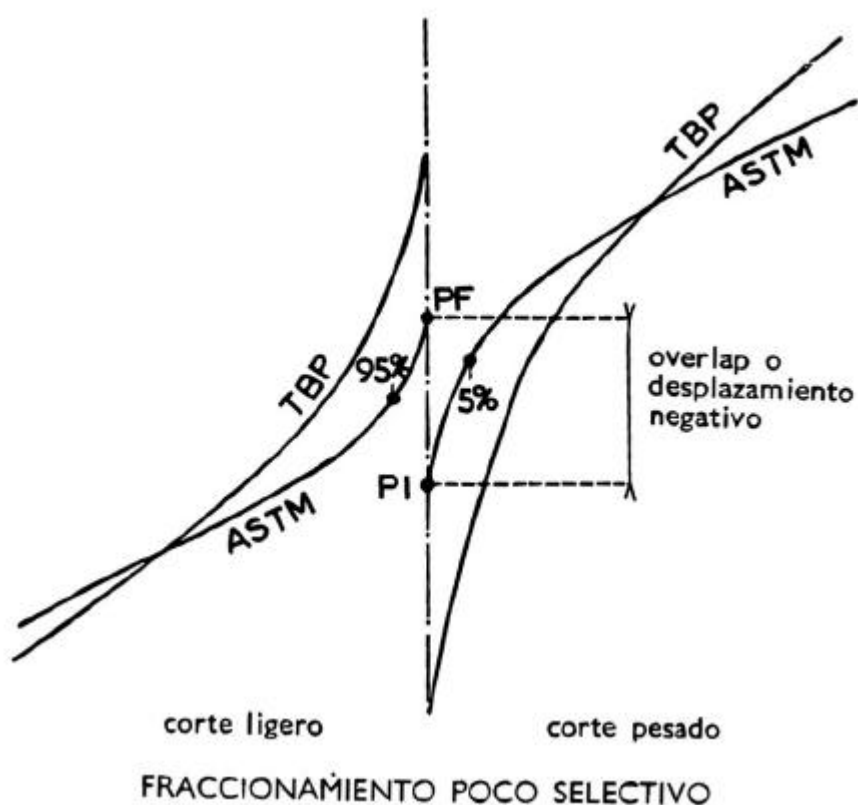


Figura 5

Representación Gráfica del Terminio *GAP*⁽⁵⁾

Si el fraccionamiento entre dos cortes fuese perfecto, tal como sucede en la destilación TBP, no habría componentes comunes en fracciones sucesivas, ya que el punto final TBP de la fracción ligera se identificaría con el punto inicial TBP de la fracción pesada. En estas condiciones, el punto final de la curva A.S.T.M. de la fracción ligera sería inferior al punto inicial de la curva A.S.T.M. de la fracción pesada⁽⁵⁾.

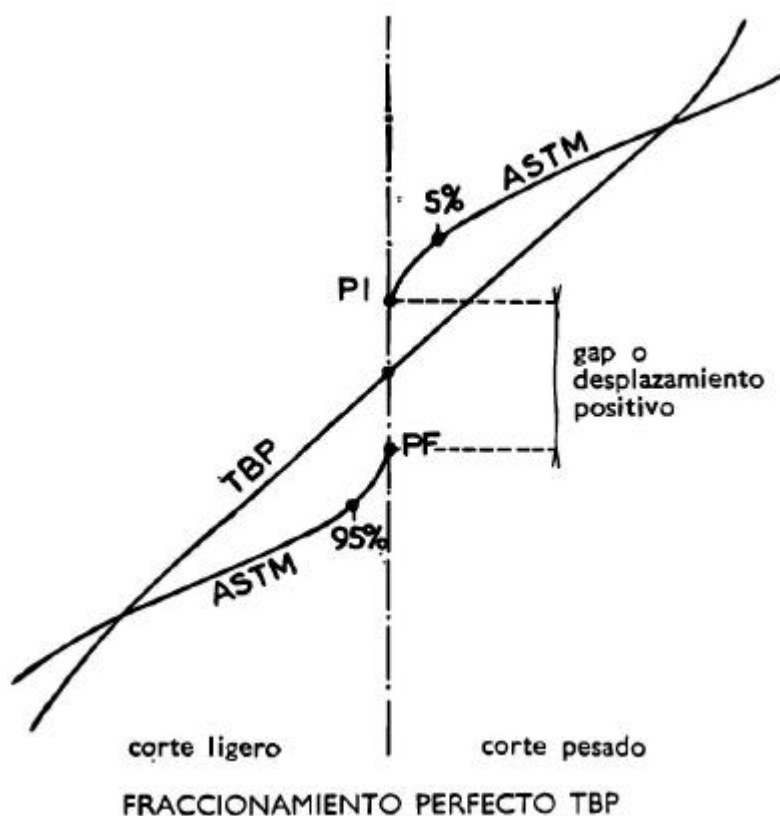


Figura 6

Representación Gráfica del Termino Overlap⁽⁵⁾

Si por el contrario la separación es deficiente, de modo que dos fracciones sucesivas tienen elementos comunes, los puntos finales de la TBP y A.S.T.M. de la fracción ligera son superiores a los puntos iniciales TBP y A.S.T.M. de la fracción

pesada, tal disposición de las curvas es la que suele llamarse *overlap* (solapamiento), recubrimiento o desplazamiento negativo⁽⁵⁾, siendo el valor de la separación, tanto más grande cuanto peor es la separación (*Figura 6*).

Como los puntos iniciales y finales de las curvas A.S.T.M. se determinan con muy poca precisión, J. W. Packie propone considerar la separación entre los puntos de 95% y 5% v A.S.T.M., para estimar así la calidad de fraccionamiento.

Adicionalmente es necesario recordar que en una destilación TBP no pueden precisarse los solapamientos entre los cortes debido a que la curva de destilación, temperatura en función del rendimiento acumulado se presenta como una curva suave reflejo de una destilación continua; mientras que las destilaciones A.S.T.M. D-86 y A.S.T.M. D-1160 trabajan en condiciones operativas que producen el fraccionamiento correspondiente a un plato teórico, y no permiten una separación perfecta obteniéndose así solapamientos, en donde al destilar por separado dos cortes de crudo consecutivos se obtiene que en ambas muestras hay componentes que ebullen a la misma temperatura.

A nivel de refinería, la determinación de puntos de corte en las unidades de destilación atmosféricas y de vacío, es de suma importancia para el proceso, ya que implica el esquema de procesamiento de una determinada dieta de crudo, en donde se definen los cortes producidos en las unidades, sus respectivos rendimientos, y las calidades que deben cumplir estos cortes para servir de alimentación a equipos aguas abajo del proceso.

Esto puede observarse por ejemplo en las unidades de vacío, en este caso, el punto de corte resume la severidad de operación de estas unidades, el cual está limitado por la cantidad máxima de metales (Ni, V) aceptable en los productos a ser alimentados a las unidades de craqueo catalítico fluidizado (FCC), estos metales envenenan al catalizador de esta unidad y reducen la conversión en la misma^(9,10).

Hay que tomar en cuenta al momento de estudiar los puntos de corte en una refinería, el hecho de simular el solapamiento entre los cortes y los aspectos operacionales de las columnas, tomando en cuenta por supuesto, la eficiencia de las mismas.

Las unidades de destilación presentes en las refinerías poseen puntos de corte de diseño, los cuales no necesariamente son los puntos de corte utilizados en la operación diaria, esto se debe a que los puntos de corte de estas unidades dependen en gran medida de^(9,10,11):

- Temperatura de la zona de vaporización instantánea de la columna.
- Presión de la columna.
- Presión parcial de hidrocarburos.
- Flujo de vapor de despojamiento.
- Dieta de crudos procesado.
- Volumen de carga en la unidad.

En el caso de los puntos de corte de las unidades de vacío, estos también pueden depender de la capacidad real del sistema de vacío.

La temperatura real de corte⁽¹²⁾ entre dos fracciones consecutivas separadas por destilación, se define como la temperatura para la cual ambas fracciones tienen el mismo porcentaje de contaminación cruzada. Debe entenderse por contaminación cruzada la temperatura a la cual el porcentaje de solapamiento entre los dos cortes es igual, al tener la distribución de puntos de ebullición de ambas fracciones consecutivas se iguala la cantidad de contaminantes, ponderada por los rendimientos respectivos de cada fracción.

Para determinar el punto de corte TBP entre dos fracciones solapadas es necesario convertir las temperaturas de destilación A.S.T.M. D-86 para los cortes atmosféricos y A.S.T.M. D-1160 para los cortes de vacío a temperaturas de destilación TBP mediante las correlaciones respectivas. A partir de las temperaturas de corte TBP 5% y TBP 95% se calcula el punto de corte TBP por medio de la siguiente ecuación⁽⁷⁾:

$$\text{Punto de Corte TBP} = \frac{(T_{95_L} - T_{5_P})}{2}$$

Donde:

T_{95_L} = TBP al 95% de la fracción liviana.

T_{5_P} = TBP al 5% de la fracción pesada.

De esta manera teniendo las destilaciones A.S.T.M. de los crudos y una vez convertidas a temperaturas TBP pueden obtenerse los puntos de corte TBP de las fracciones.

Hay que tener en cuenta la diferencia entre la definición de punto de corte y temperatura de ebullición o *True Boiling Point* TBP, mientras el punto de corte es fijado en función de obtener un rendimiento o alcanzar una calidad en el corte, la temperatura de ebullición representa, la temperatura a la cual comienza o finaliza la destilación de un componente presente en el crudo.

En la *Figura 7*, puede observarse un esquema del cálculo de la temperatura real de corte.

Las diferentes metodologías para determinar puntos de corte se basan en las curvas de destilación de cada uno de los cortes de interés o de la mezcla de estos. A continuación se presenta un breve resumen de estas metodologías.

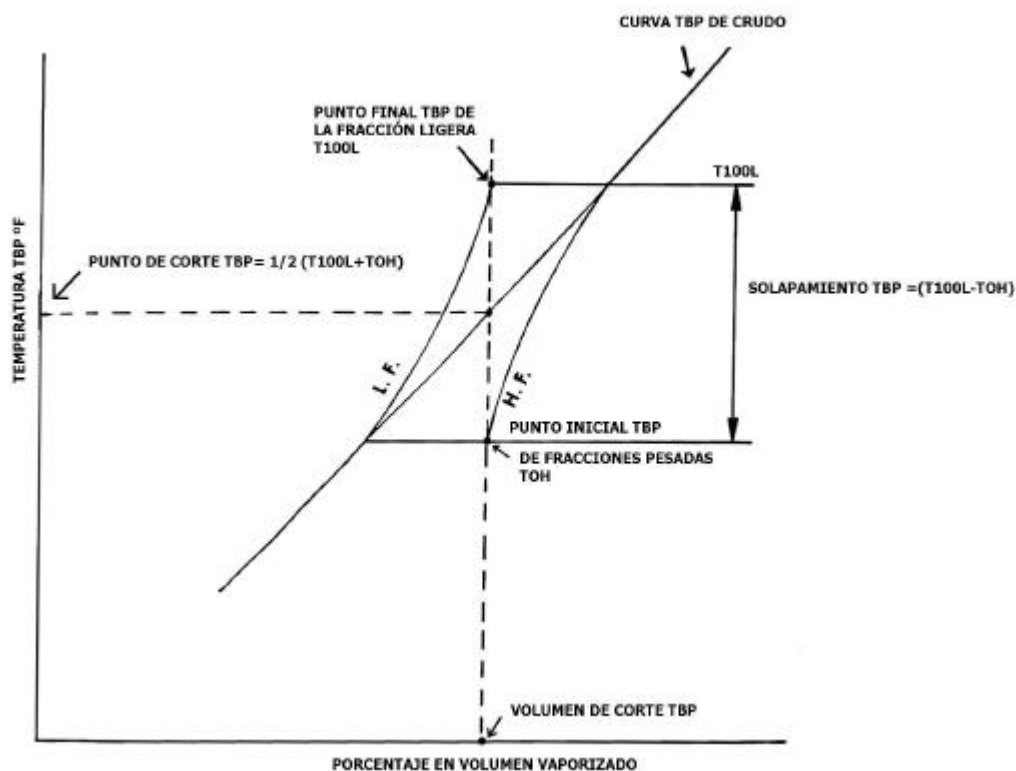


Figura 7

Cálculo del Punto de Corte⁽¹³⁾

3.6.1 METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR PUNTOS DE CORTE EN UNIDADES DE DESTILACIÓN^(9,11)

Las metodologías reseñadas a continuación son un breve resumen de los diferentes trabajos realizados en las refinerías del circuito PDVSA y en Intevep en cuanto a la determinación de puntos de corte en las unidades de destilación. Específicamente algunas de estas metodologías se aplicaron para determinar los puntos de corte de algunas de las unidades de vacío de la refinería de Amuay.

Método del Ensayo de Crudo.

Disponiendo del ensayo de crudo, se determina el punto de corte con el rendimiento del corte obtenido en planta respecto al crudo. Una vez conocida la composición promedio de la dieta de crudo se determina el rendimiento teórico de los productos, asumiendo fraccionamiento perfecto, y se cotejan con los rendimientos reales.

Dependiendo de la refinería este método no puede ser utilizado en una base rutinaria, sobre todo si hay cambios frecuentes en la composición del crudo procesado. Por otra parte, el punto de corte obtenido puede diferir del valor real dependiendo del grado de solapamiento entre los cortes, el cual no se ha estimado.

Método del Ensayo de Crudo Modificado.

Conociendo el rendimiento de un corte para un punto de corte dado y el rendimiento del mismo corte obtenido en planta, se obtiene el punto de corte actual mediante una relación matemática. Este método presenta el mismo inconveniente que el método anterior.

Método de Curva de Destilación.

El punto de corte es determinado a partir de la curva de destilación de la mezcla de los dos cortes involucrados; los cortes se mezclan en las mismas proporciones que los obtenidos en planta, los cuales son normalizados a 100 por ciento. La curva de la mezcla se convierte a TBP y se lee el punto de corte donde esta se intercepta con el porcentaje del corte más liviano conocido.

Método Gráfico.

El punto de corte se obtiene a partir de las curvas de destilación TBP de cada corte. Estas se transfieren a un gráfico y se cortan verticalmente usando el rendimiento del corte más liviano normalizado. La temperatura de corte se obtiene en el punto donde las dos curvas quedan equidistantes de la línea vertical, esta línea representa el rendimiento real del corte liviano. En su aplicación inicial este método mostró grandes desviaciones, en la medida que se ha ganado experiencia en destilación simulada, los resultados entre este y el método anterior se han acercado.

Para efectos prácticos en años anteriores los laboratorios de las refinerías preferían su empleo ya que sólo requiere realizar las destilaciones de los dos cortes en estudio. No obstante esta metodología también se basa en los rendimientos de planta y por ende, está sujeta a error.

Método Gráfico Modificado.

Este método, es una derivación del método anterior y se basa en el mismo principio de destilar por separado los dos cortes. El punto de corte es aquella temperatura donde, el porcentaje de solapamiento entre los cortes es igual. En este caso, no se requiere conocer los rendimientos de planta, por lo que se elimina esta fuente de error y provee al laboratorio de una herramienta rápida para reportar, en forma rutinaria el punto de corte de las unidades.

La mayoría de las metodologías presentadas anteriormente, responden a investigaciones realizadas hace algunos años con el fin de estimar el impacto de aumentar o disminuir el punto de corte de los cortes de las unidades de destilación dentro del circuito.

En la actualidad el uso de estas metodologías, no siempre aporta la reproducibilidad de la operación real, debido quizás a la no-disponibilidad de la data necesaria, modificaciones en las unidades o al no considerar la eficiencia de la columna y los solapamientos ente los cortes.

Es importante señalar que existen otras metodologías para estimar los puntos de corte en las unidades de destilación, por ejemplo una vía puede ser cortar los crudos en las unidades de acuerdo a especificaciones aguas abajo; en este caso ya se han hecho estudios y desarrollos en la refinería de Puerto la Cruz y no se han obtenido buenos resultados.

Otra opción puede ser el uso de simuladores rigurosos, como por ejemplo PROII o Hysys, pero esto requiere mayor soporte por parte de las refinerías en cuanto a información de las unidades de destilación que incluyen: datos de diseño, condiciones de operación o simulaciones validadas.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizará una metodología que se ajuste a los datos que se pueden obtener de las refinerías y a la reproducibilidad de la realidad operacional.

En el caso específico de la refinería de Cardón, los métodos en los cuales sean necesarios datos de curvas de destilación de los productos, como es el caso del método de curva de destilación, método gráfico y el método gráfico modificado; no son viables debido a que no es práctica común en la refinería la realización de estas pruebas.

Tomando en cuenta la falta de datos para estimar una nueva metodología sobre esta base, parte del desarrollo de esta metodología se basará en el método de ensayo de crudo, conocimiento de la alimentación y rendimientos reales de las plantas y la inclusión del sistema PAssMan.

Parte de esta metodología consta de generar data histórica de puntos de corte, utilizando promedios diarios de la alimentación y los rendimientos del crudo procesado. Además de disponer de los ensayos actualizados (2000-2001) de los crudos que conformen las mezclas y explorar las nuevas facilidades de fraccionamiento comercial incorporadas en la versión más reciente del sistema PAssMan, facilidades que serán comentadas en la siguiente sección.

Una de las vías para estimar los puntos de corte de un crudo o de una mezcla de crudos utilizando la herramienta PAssMan, implica un proceso iterativo del punto de corte deseado que reproduzca un rendimiento y/o una especificación deseada.

Este procedimiento implica varias pruebas moviendo el punto de corte de manera lógica (arriba o abajo) hasta obtener una data lo más cercana a la realidad, o un corte que cumpla con una especificación determinada.

El sistema PAssMan permite calcular los rendimientos y propiedades de un crudo, definidas previamente en un ensayo de entrada del mismo (*assay-in*) apoyándose en base de datos del programa y con ayuda de un Mapa de Corte (*CutMap*) como se explica en la siguiente sección.

Las variaciones de los puntos de corte supuestos se hacen en el mapa de cortes (*CutMap*), para el corte involucrado. Se debe importar el crudo de interés y utilizar la opción *Recut* disponible en PAssMan, de esta manera el ensayo de salida de PAssMan mostrará los nuevos rendimientos obtenidos y los nuevos valores de las calidades al cambiar el punto de corte, y estos datos permitirán verificar si se está reproduciendo la data deseada disminuyendo así la desviación.

Estas variaciones pueden realizarse para cada uno de los cortes definidos en el mapa de corte del crudo a procesar, y cada vez que se quiera ver reflejado un cambio

de punto de corte es necesario obtener el ensayo de salida del crudo que provee PAssMan.

Es recomendable ir ajustando un corte a la vez y graficar la curva de destilación del crudo, temperatura en función de porcentaje recuperado acumulado, para tratar de predecir el punto de corte si lo que se quiere ajustar son los rendimientos.

3.7 ¿QUÉ ES PAssMan?⁽¹⁴⁾

El paquete PAssMan es el sistema estándar usado en PDVSA para estimar rendimientos y calidades de los cortes producidos en el fraccionamiento de crudos, además de servir como administrador de información. Este sistema es una aplicación de PIMS (Process Industries Modeling System), herramienta de planificación económica para procesos de refinación y petroquímicos, mercadeado por la Aspen Technology, Inc.

El sistema PAssMan permite manejar la información contenida en una librería de crudos, integrando ensayos de orígenes diferentes y adaptando la información del crudo a diferentes esquemas de corte en refinerías. Una vez que el crudo está cargado en la librería, su información puede ser consultada y modificada de forma gráfica y se pueden realizar mezclas de crudos sin necesitar una receta específica, formando una base de datos que puede ser utilizada para generar ensayos compatibles en modelos de programación lineal (LP) y otras aplicaciones.

Además, este sistema permite conocer las fracciones volumétricas o en peso, así como las propiedades de un crudo, cortando a las temperaturas reales de las torres de destilación de las refinerías, a partir de las propiedades dadas por el ensayo de crudo realizado a cortes de temperaturas diferentes según métodos de destilación A.S.T.M. D-2892, A.S.T.M. D-86 y A.S.T.M. D-1160.

En primer lugar el programa necesita como datos de entrada (Input) todas las propiedades dadas por el ensayo para cada uno de los cortes (provenientes de las evaluaciones de crudo), tanto atmosféricos como de vacío. Estos datos se trabajan en una hoja de cálculo de Excel, en la que se hacen los cálculos correspondientes a:

- Balances de Gravedad específica, contenido de azufre y carbón conradson, para el crudo a partir de las ecuaciones de mezcla lineal.

- Gravedad API del crudo a partir del cálculo de la Gravedad Específica.
- Porcentaje en peso a partir de la fracción en volumen y de la gravedad específica en caso de que el ensayo no tenga los datos de porcentaje en peso.
- Los índices correspondientes a las propiedades de: punto de nube, punto de inflamación, punto de humo, punto de congelación, punto de fluidez, punto de anilina y viscosidad, calculados a partir de las ecuaciones de las que dispone el departamento.

Además, se reportan todas las propiedades dadas por el ensayo que no requieren el cálculo de ningún índice de mezcla.

Una vez terminada la hoja de cálculo se transfiere esta al programa PAssMan, con la opción *import* (importar), el cual toma las propiedades para cada corte de la hoja de cálculo, con la posibilidad de graficar estas propiedades en función de la temperatura de corte.

Posteriormente, se procede a cortar el crudo a las temperaturas de las torres de destilación en la refinería, utilizando como base un archivo *CutMap* (mapa de cortes), en el que están dispuestas las fracciones de interés con sus correspondientes temperaturas y definidas las propiedades que se desean obtener para cada corte a partir de los datos de entrada.

Finalmente, con la opción *recut* se obtienen los datos de salida (*output*), que no son más que los nuevos rendimientos y las nuevas calidades correspondientes a simular el corte de crudo utilizando los nuevos cortes de temperatura.

3.7.1 NUEVAS FACILIDADES DE LA VERSIÓN 4.0 DE PASSMAN

CRUDE RECUTTING

La herramienta de corte de crudos de PAssMan genera archivos de salida en formato PIMS, provenientes de crudos que formen parte de la base de datos dentro de Pasman. Existen dos métodos para recortar crudos: TBP Recut y CUC Recut (Crude Unit Characterization).

3.7.1.1 TBP RECUT

En esta opción, al seleccionar un crudo de la base de datos, PAssMan puede cortar el crudo con ayuda del CutMap (Mapa de Corte) de manera gráfica, actualizando los cortes de propiedades en tiempo real. Los resultados obtenidos pueden ser exportados a un archivo *assay* para conformar la entrada en modelos LP y otras aplicaciones.

Así como el usuario puede especificar los límites de los cortes como temperaturas, también, puede especificar el valor de una calidad deseada en un corte y el programa ajustará dinámicamente los límites de los cortes al conocer el requerimiento.

Utilizando esta opción el programa genera una simulación de un crudo en base a las temperaturas de corte presentadas en el Mapa de Cortes (*CutMap*), asumiendo un fraccionamiento perfecto entre los cortes, donde el punto final del corte más liviano corresponde al punto inicial del corte siguiente, o más pesado.

Fraccionamiento Comercial

Así bien, para el fraccionamiento perfecto, en el cual un corte está estrictamente limitado dentro de sus IVT (Initial Volume Temperature) y FVT (Final Volume Temperature), PAssMan contiene un modelo de fraccionamiento comercial. Este puede ser usado para simular el comportamiento real de una torre en una refinería, a través del uso de parámetros de calidad de fraccionamiento, los cuales definen al corte como "permeable" al final de la destilación del mismo. Estas calidades determinan esencialmente si parte del contenido del corte está presente dentro de otro corte.

Los parámetros de calidad de fraccionamiento son definidos dentro de PAssMan como:

LFQ: Esta es la calidad final inferior de fraccionamiento, define cuánta mezcla del corte liviano entra o sale del corte siguiente tomando como límite la temperatura inicial. Un valor de 1.0 define un fraccionamiento perfecto, con un límite impermeable, mientras que 0.0 representa la mezcla (contaminación) total con otros cortes.

HFQ: Esta es la calidad final superior de fraccionamiento, define cuánta mezcla del corte pesado entra o sale del corte anterior tomando como límite la temperatura final. Un valor de 1.0 define un fraccionamiento perfecto, con un límite impermeable, mientras que 0.0 representa la mezcla (contaminación) total con otros cortes.

Gráficamente, la forma de curva de rendimiento puede ser vista en tiempo real, donde los efectos del solapamiento también serán reflejados en los valores de las propiedades para los cortes.

3.7.1.2 CUC RECUT OPTION

Esta opción permite al usuario simular fraccionamiento comercial, especificando la distribución de masa (caracterización) del crudo por entrada de una corrida de prueba de la unidad (*Test Run Data*). La base de esta opción es la de asumir que la distribución de masa en una torre de refinería permanece estable si las condiciones de operación no cambian. El algoritmo calcula la distribución de masa a partir de la corrida de prueba. Esto entonces aplica la distribución de la masa a la curva de rendimiento del crudo que está siendo simulado, calculando las curvas de destilación y finalmente calculando las propiedades de los cortes basados en las curvas anteriores. De igual manera esta opción requiere la entrada de un Mapa de Cortes (*CutMap*).

La corrida de prueba que se necesita como entrada acepta diferentes métodos de destilación: TBP, ASTM D-86 y ASTM D-1160. La destilación debe proveer información para cada corte. Dependiendo del método especificado, algunos datos deben ser proveídos o PAssMan estimará éstos extrapolando o interpolando la curva cuando sea el caso.

Si todos los puntos requeridos no están disponibles, es importante proveerle al sistema tantos como sea posible. Esto es de suma importancia al proveer data que este por encima de la data del último punto, previniendo así que PAssMan extrapole a partir de la curva de destilación y calcule una temperatura errada.

3.8 SWING CUT

Una de las vías alternativas para simular el fraccionamiento de un crudo en una unidad de destilación dentro de los modelos de Programación Lineal (LP) usados en PIMS, es el uso de “*Swing Cut*”. Este puede ser definido como un corte ficticio y se obtiene con el objeto de simular la operación de la columna y predeterminedar la disposición de los cortes de destilación de crudo.

El uso de *Swing Cut* provee un método conveniente para indicar que un corte o partes de un corte es combinado con otro corte liviano o pesado (*ver Figura 8*). El sistema PIMS ajusta automáticamente los rendimientos y las propiedades de la combinación de un corte y su disposición.

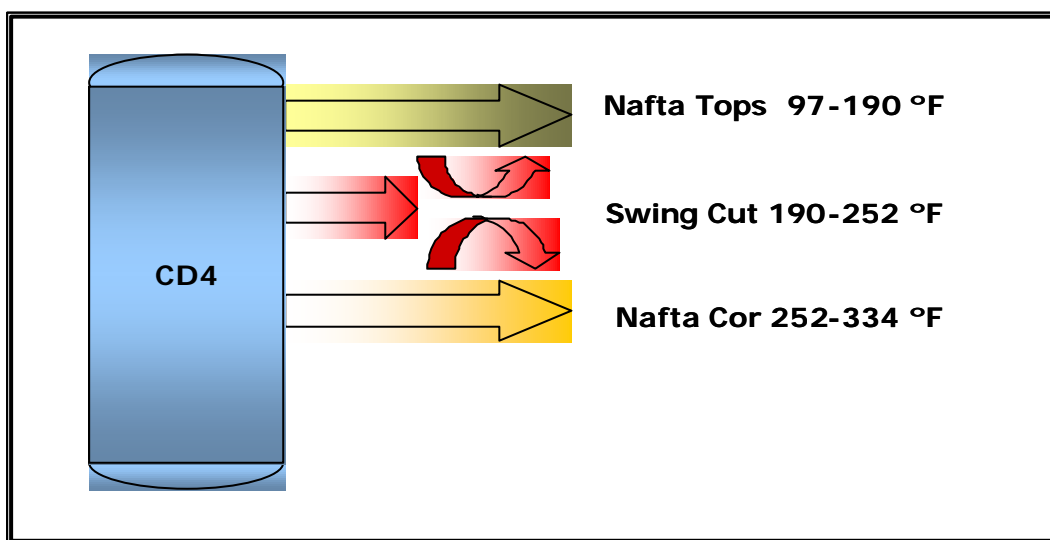


Figura 8

Esquema de Swing Cut

En la *Figura 8*, se observa un ejemplo del uso de *Swing Cut*, en este caso en el tope de la unidad CD4 se obtiene un corte de Nafta Tops seguido del corte de Nafta Cor ó Nafta Pesada, entre estos dos cortes esta definido el *Swing Cut* (*Swing Cut* TOPS-COR), la simulación presentará la posibilidad de que este corte sea combinado completamente con la Nafta Tops o con la Nafta Pesada y además de que el corte Swing sea repartido entre las dos fracciones.

En este trabajo se implementará el uso de *Swing Cut* con el objetivo de ajustar los rendimientos en las simulaciones contenidas en los modelos operacionales. El caso resultante al final de la simulación, es que este corte Swing sea reducido a cero, debido a que este corte no puede ser obtenido físicamente en la unidad y sea usado por el sistema PIMS para optimizar los puntos de corte en las unidades de destilación de crudo, reproduciendo la operación real de la unidad.

3.9 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Para el desarrollo de este trabajo se selecciono la Unidad Atmosférica 4, correspondiente al complejo de Propósitos Generales de la Refinería de Cardón en el Complejo Refinador Paraguaná.

Se selecciono esta unidad debido a que era la presentaba la mayor cantidad de datos: flujos de entrada, rendimientos a la salida, Gravedad API de la alimentación y conocimiento de la logística de los productos; todos estos datos necesarios para llevar a cabo un desarrollo de este tipo.

3.9.1 UNIDAD DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA 4 (CD-4)

A continuación se presenta una breve descripción de la logística de la Unidad CD4 (ver *Figura 9*):

La entrada a la unidad esta conformada por el crudo L26, que a temperatura ambiente, es bombeado a una sección de precalentamiento y luego a un tambor de vaporización, los vapores que salen de este tambor se envían a la torre fraccionadora principal (A-1) el crudo caliente entra en la columna A-1 en el plato N° 6.

Además de la alimentación de crudo esta unidad esta en capacidad de procesar desechos provenientes de otras plantas. Típicamente los desechos presentes en la unidad CD4 están compuestos de Kerosén (70%), GOP (20%) y Nafta (10%). Estos desechos pueden ir alternativamente a la unidad CD1 o a CD4.

La columna atmosférica A-1 tiene 46 platos (casquetes de burbujeo y perforados), se opera normalmente a una presión de 1,5 a 1,7 Kg/cm² abs. El crudo se despoja de sus fracciones más livianas inyectando vapor sobrecalentado por el fondo de la torre. Los productos más livianos salen de la columna como producto de tope,

mientras que el gasóleo liviano (GOL), gasóleo pesado (GOP) y el kerosén salen como corrientes laterales. El residuo atmosférico (R.L.) sale por el fondo y es enviado a la unidad de destilación al vacío (AV-2, no mostrada en este esquema). La columna A-1 posee un sistema de reflujo circulantes, los cuales se utilizan para mejorar el fraccionamiento del crudo.

La fracción de GOP que sale por el plato N° 18 pasa a la torre despojadora de gasóleos pesados A-6, la cual posee 15 platos, donde se despoja de los componentes livianos con vapor sobrecalentado. El GOL sale por el plato N° 32 y se envía a la torre despojadora A-2A, esta torre posee 15 platos y esta separada de la columna A-2 por unos tabiques, el despojamiento de gasóleos livianos se realiza por medio de un rehervidor y se inyecta una pequeña cantidad de vapor sobrecalentado. El kerosén se retira del plato N° 42 y es enviado hacia la columna A-2, donde se despoja de los componentes livianos.

La torre A-2 es la separadora nafta-kerosén, posee 31 platos y está provista de un sistema de reflujo, rehervidor e inyección de vapor para controlar las especificaciones de calidad del kerosén el cual es producto de fondo de esta columna.

Por el tope de la A-2 sale gasolina inestabilizada, las fracciones más livianas en forma de vapor pasan a través de un condensador (M-4) que ocasionalmente puede recibir gasolina liviana de las unidades CD1/2 y 3, del M-4 es retirado una porción de gasolina que va a Planta de Gas 1 y el resto se estabilizan en la columna debutanizadora A-3.

La torre A-3 es la que permite separar la fracción C4 de la gasolina. La presión de operación de esta torre es de 10 Kg/cm², la temperatura de fondo es de 180 °C y consta de 40 platos. La gasolina que sale del fondo de la A-3 va por diferencia de presión como carga a la columna A-4, la cual posee 30 platos. De la torre A-4, separadora de gasolina, salen por el tope una fracción de C5 (Tops) y nafta liviana como producto de fondo.

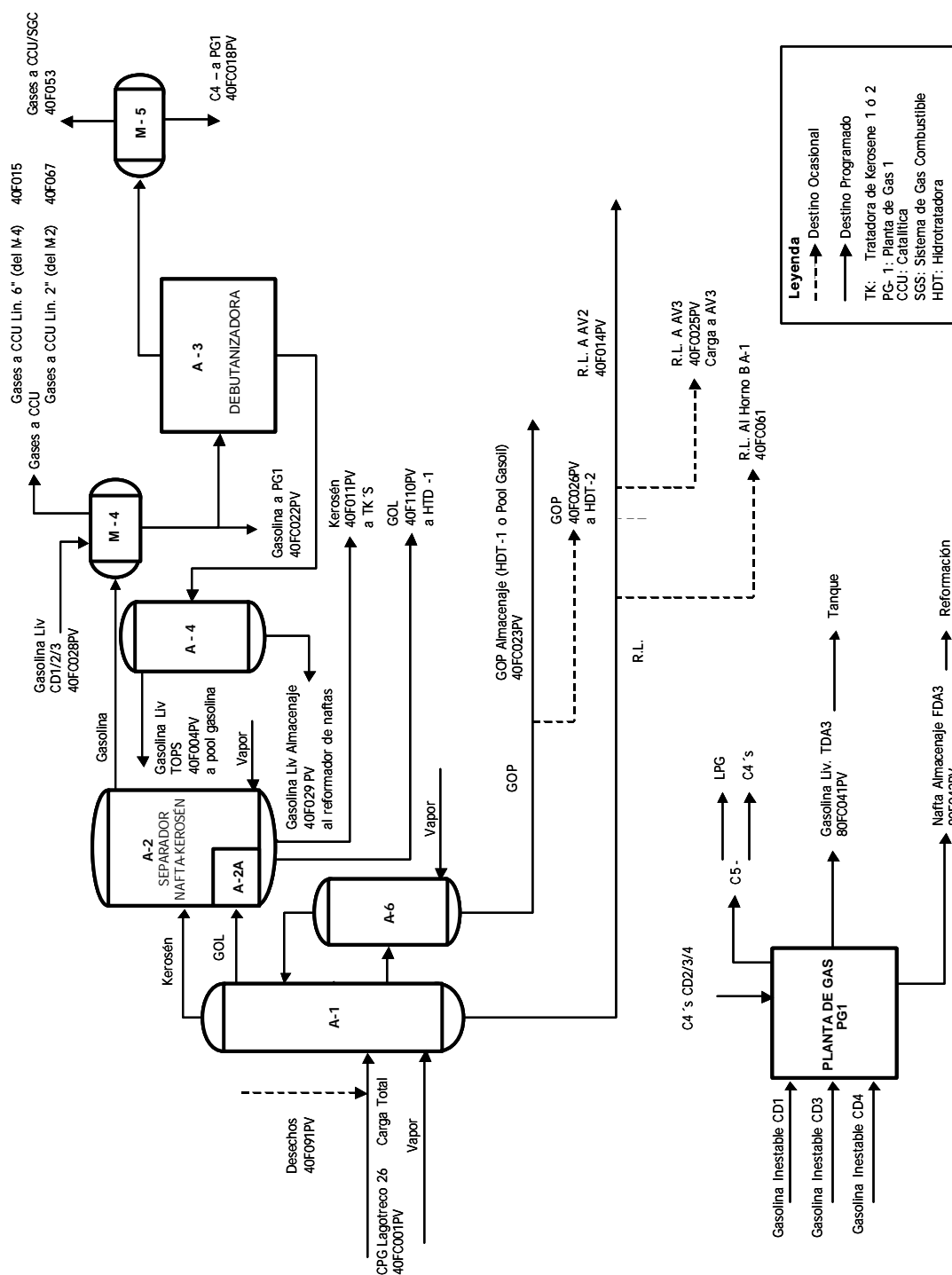


Figura 9

Esquema de Proceso Unidad Atmosférica 4 (CD4)

Es importante señalar que para modelar los rendimientos en la unidad CD4 es necesario tomar en cuenta el valor de los desechos y restarlos en las corrientes afectadas, de esta manera se evita tener rendimientos alterados por componentes que no forman parte del crudo que típicamente se procesa en la unidad.

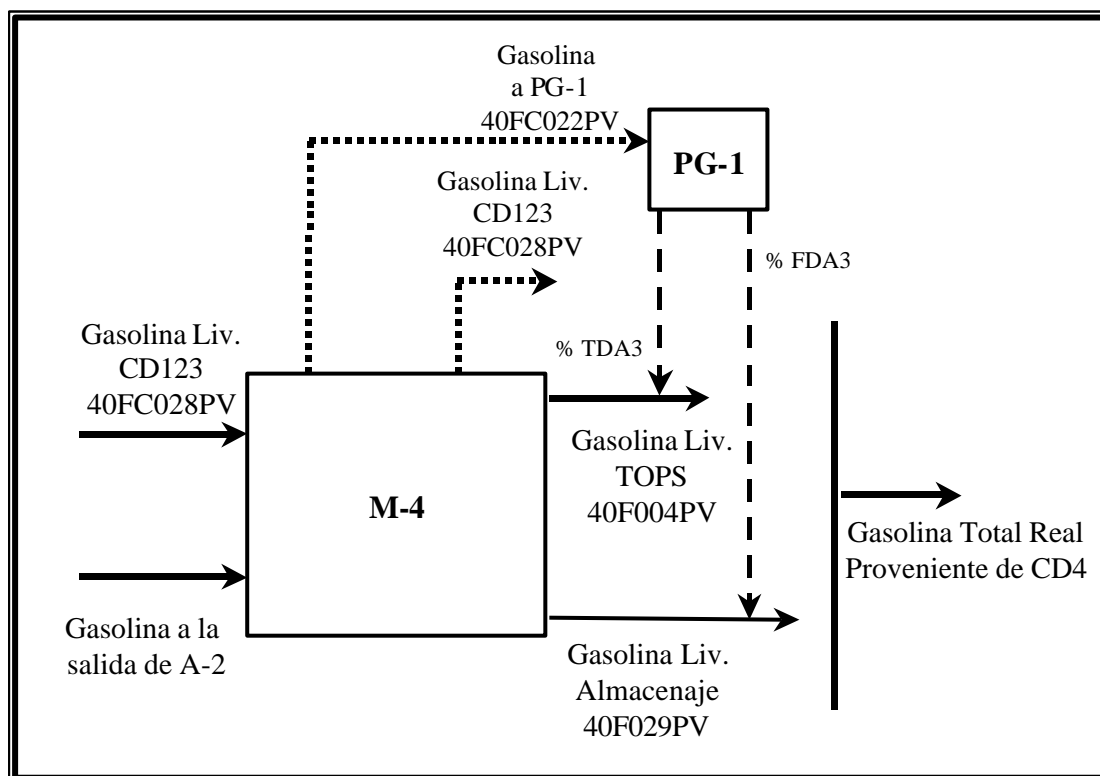


Figura 10

Rendimiento de nafta real que sale de la CD4

De la unidad CD4 se obtienen tres (3) corrientes de naftas: Gasolina del M4 a PG1, Gasolina Liv. TOPS y Gasolina Liv a Almacenaje, siendo estos dos últimos los productos finales en esta unidad (ver *Figura 9*).

La gasolina que sale de M-4 y va a Planta de Gas 1 contiene parte de los rendimientos de gasolina del crudo L26, en este caso para disgregar estas corrientes y

obtener el aporte real de gasolina del crudo L26, en primer lugar es necesario eliminar de los rendimientos las cantidades correspondientes a las gasolinas que vienen de las otras unidades y que entran a planta 4 por el M-4 (ver *Figura 10*). Para ello, se tomaran las proporciones de gasolina Liv. TDA3 y nafta a almacenaje FDA3 (ver *Figura 9*) a la salida de la planta de gas, debido a que son cortes de gasolina similares; con estas proporciones se calculara la fracción de gasolina TOPS y Gasolina Liv. Almacenaje, tal como se muestra en la *Figura 10*.

4 METODOLOGÍA

Para cumplir de manera eficiente con los objetivos planteados en la realización de este Trabajo Especial, se utilizó la siguiente metodología:

4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Revisión de procesos de refinación de Petróleo, haciendo énfasis en destilación de crudos tanto a presión atmosférica como de vacío.
2. Revisión bibliográfica de evaluación de crudos, para estudiar las propiedades físico-químicas que caracterizan a cada crudo, incluyendo los rendimientos y calidades de las fracciones que se pueden obtener de ellos y que son de interés para ser procesadas en las refinerías.
3. Investigación sobre la teoría de mezcla, que define el comportamiento de las propiedades al combinar diferentes fracciones del crudo.
4. Investigación del fundamento teórico y métodos para la obtención de puntos de corte.

4.2 SIMULACIÓN DE CORTE DE CRUDOS USANDO EL SISTEMA PASSMan VER.4.0.

En esta sección se presenta la metodología necesaria para realizar un ensayo de crudo a ser utilizando posteriormente por el sistema PAssMan.

En primer lugar, es necesario poseer la evaluación de crudo proveniente de laboratorio, con dicha evaluación se dispone a crear el ensayo de crudo de entrada, del crudo a cortar, este ensayo (*assay-in.xls*) es una hoja de cálculo en Microsoft

Excel donde se presenta ordenadamente información reportada en el análisis de crudo y que es de suma importancia al momento de simular un corte de crudo usando el sistema PAssMan.

La información presentada en el archivo de entrada a PAssMan (*agcrude-in.xls*) se presenta tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- A. Todas aquellas filas que comiencen con un asterisco (*) serán comentarios que el programa omitirá.
- B. En la parte superior se colocará información referente a la identificación del crudo: nombre, origen, código de la evaluación y fecha.
- C. En la sección siguiente de la hoja se colocarán las propiedades totales del crudo reportadas en la evaluación y las que se calcularán más adelante al verificar los balances totales.
- D. En la tercera sección del ensayo en la segunda columna, se coloca (sin asterisco) la palabra "TEXT" seguida en la columna siguiente de la identificación del crudo (*tag*).
- E. A continuación se presentan los rendimientos por corte en volumen y peso del crudo, tomando la siguiente nomenclatura: para identificar los rendimientos en volumen se coloca en la primera columna la letra V seguida de la palabra BAL y la identificación del corte al que corresponde, por ejemplo "VBALHNA", en este caso indica el rendimiento en peso de nafta pesada. Luego en la segunda columna se coloca la identificación del corte, para el caso anterior: "C5-392 HVY. NAPHTA", en la tercera columna se coloca el valor del rendimiento y en la cuarta columna se coloca un asterisco.

- F. De esta manera se colocan todos los rendimientos en volumen para los diferentes cortes, una vez finalizado esto, se colocan dos o tres filas con asteriscos de separación y se presenta la información correspondiente a rendimiento en peso, pero en este caso se utiliza como identificación inicialmente la letra W.
- G. Una vez colocados los rendimientos en peso, se reportan la temperatura de corte (FVT) para cada uno de los cortes presentes en la evaluación, en este caso se coloca en la primera columna la letra "I" (variable de inspección) seguido de las siglas FVT y los tres caracteres que identifican el corte, luego en la segunda columna se coloca "FVT CUT TEMP" seguido de la unidad de temperatura respectiva y en la tercera columna se coloca el valor correspondiente. Es importante que para efectos de simular los cortes en PAssMan que los cortes correspondientes a los gases hasta C4 no presenten valor de FVT y que el último corte tenga como temperatura 9999, de manera que estos valores sean estimados por el sistema.
- H. Luego de esto se colocan asteriscos de separación y se comienza a reportar las propiedades o calidades del crudo. En este caso cada propiedad tiene una identificación que consta de 3 letras y para identificar que es una propiedad se coloca inicialmente la letra "I", seguida de la identificación de la propiedad y de la identificación del corte al cual pertenece, por ejemplo: "ISULKER", en este caso se indica "I" propiedad, "SUL" contenido de azufre y "KER" presente en el corte identificado como Kerosén.
- I. De esta manera y como se realizó para el rendimiento en volumen (punto E), se coloca en la columna siguiente que propiedad se esta evaluando, por ejemplo "SULFUR, % WT", seguido en la siguiente columna del valor de la propiedad en ese corte y luego en la cuarta columna un asterisco.

J. Para el caso de propiedades que no mezclan lineal en volumen ni en peso y en las que se hace necesario el uso de índices de mezcla, se colocará en primer lugar el valor de la propiedad (comentariada) como se explicó anteriormente, y luego se colocará utilizando otra identificación el valor del índice de mezcla calculado con las ecuaciones de las que dispone el departamento. En este caso por ejemplo para la propiedad Punto de Humo (*Smoke Point*) su identificación sería SMK y para su índice de mezcla (*Smoke Point Index*) SMI. Esto se hace con la finalidad de que el sistema PAssMan utilice los índices de mezcla al cortar el crudo bajo otro esquema de corte.

De esta manera se reportan todas las propiedades requeridas para el corte del crudo particular calculando cuando fuera el caso, el valor total de la propiedad.

Es importante señalar que una vez concluido el ensayo, este requiere una segunda etapa correspondiente al análisis de los datos incluidos, verificando los balances totales calculados con los reportados en la evaluación, sobre todo en aquellas calidades de carácter crítico como por ejemplo: azufre, metales y carbón conradson. En este sentido si los balances presentan una elevada desviación, se hace necesario realizar balances de masa que ayuden a predecir el valor de una propiedad en aquel corte donde no ha sido reportada o donde la desviación es elevada.

Una vez obtenido el ensayo de entrada (*assay-in*), el siguiente paso para simular el corte de crudo es crear un Mapa de Corte (*CutMap*), este es una hoja de Excel en la cual se presenta de manera ordenada los cortes de interés de acuerdo al punto final de ebullición de cada uno, además de las propiedades y/o índices de mezcla que aplican a cada corte en particular (ver *Anexo I*).

A continuación se importa el crudo desde PAssMan, tomando el archivo del *assay-in.xls* obtenido en la sección anterior, una vez que el sistema ha realizado su verificación y el usuario a revisado los alertas y errores del sistema, además de

verificar que la importación del crudo ha sido satisfactoria y que se encuentran todas las propiedades y/o índices de interés; se procede a cortar el crudo con la opción *recut* presente en el paquete, se carga el mapa de corte realizado y se genera el *assay-out* (ensayo de salida) del crudo.

El ensayo de salida (*assay-out*) generado por PAssMan, presenta los nuevos rendimientos, cortes y calidades del crudo junto con el valor de los índices de mezcla calculados. Para obtener el valor de la propiedad puntual se utiliza la herramienta PESP-Procesamiento de Ensayos de Salida de PAssManTM la cual calcula a partir del índice, el valor puntual de la propiedad, además de funcionar como una herramienta de verificación de la información entre el ensayo de entrada y el de salida.

4.3 REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS EN PASSMAN VER. 4.0

1. Recopilación de la información de calidades de cortes de vacío, que serán incluidas en los ensayos de crudos, las cuales servirán de base para las nuevas correlaciones de productos en las Unidades de Desintegración Catalíticas de las refinerías venezolanas.
2. Revisión de las calidades por cada corriente de destilación, esto con la finalidad de incluir aquellas calidades a las que se hace referencia en el punto anterior, además de otras requeridas por nuevas especificaciones.
3. Revisión e inclusión de las nuevas propiedades en la librería de Crudos Propios y Foráneos del Comité de Rendimientos de Crudos.
4. Realizar los ensayos de entrada (*assay-in*) de aquellos crudos Propios y Foráneos cuyas evaluaciones fueron actualizadas^(15,16,17), ubicando los ensayos en papel más recientes en la Gerencia de Análisis Comercial PDVSA RSYC.

5. Actualización de la Librería de Propiedades presente en PAssMan Ver. 4.0.

En este punto es de suma importancia verificar las tendencias y rangos válidos para las distintas propiedades, determinando a que cortes de destilación son aplicables. La información recopilada en este punto para la actualización en el sistema PAssMan puede ser consultada en el *Anexo II*.

6. Actualización de los Crudos Propios presentes en la Base de Datos de PAssMan, en común acuerdo con Análisis Comercial.
7. Incorporación de los Crudos Foráneos a la Base de Datos en PAssMan Ver. 4.0^(15,17).

4.4 RECOPIACIÓN DE DATA PARA ESTIMACIÓN DE PUNTOS DE CORTE

1. Levantamiento de la data histórica de puntos de corte para discusión y solicitud de los puntos de cortes actuales de las unidades de destilación atmosférica y de vacío.
2. Solicitud de los modelos operacionales de las refinerías del circuito.
3. Comparación de los puntos de corte presentes en el modelo operacional de la Refinería de Cardón con los presentes en el Modelo Nacional Operacional (MNO) y los desarrollados en estudios anteriores (ver *Anexo III*).
4. Comparación de la información de crudos contenida en el punto 2, versus la información de crudos presentada en el Modelo Nacional Operacional (MNO), que utiliza la industria para sus diversos ejercicios de programación, presupuesto y visión trimestral.

En este caso se verificaron los crudos presentes en cada unidad lógica en conjunto con la Gerencia de Programación y Estrategia en PDVSA. Se depuró la información eliminando aquellos crudos en los que no se vislumbraba procesamiento a mediano y largo plazo y se envió esta información a la Refinería de Cardón para ser validada (ver *Anexo IV*).

5. Verificar que los crudos validados por refinería se encuentren cargados en la Librería de crudos de PAssMan Ver. 4.0.
6. Investigación de logística operacional del área de destilación de la refinería de Cardón, obteniendo diagramas esquemáticos de las unidades de destilación atmosférica y de vacío, para identificar los cortes y modos de operación de cada una de las unidades.
7. Establecimiento de contactos con las refinerías venezolanas, para revisar en común acuerdo la base de datos de crudos procesados en su dieta diaria y cantidades de los mismos.
8. Recopilación de pruebas de laboratorio realizadas tanto a los crudos procesados como a las corrientes de salida de la unidad CD4 en la Refinería de Cardón (ver *Anexo V*).
9. Recopilación de dieta de crudos procesados, flujos de alimentación y salida para la unidad CD4.

4.5 DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE PUNTOS DE CORTE

1. Selección de las Unidades de Destilación de estudio en la refinería de Cardón, en este caso se seleccionó la Unidad Atmosférica número 4 (CD4), por ser la que presentaba mayor cantidad de data para este desarrollo.
2. Revisión bibliográfica de métodos / sistemas disponibles para la simulación de fraccionamiento comercial.
3. Validación de los puntos de corte actuales de la unidad CD4 en conjunto con Alto Vacío 2, con el objetivo de comparar las diferencias entre los rendimientos presentados en el Modelo Nacional de Operación (MNO), en el Modelo Operacional de la Refinería de Cardón y los que se obtendrían al simular con el sistema PAssMan utilizando los puntos de corte actuales.

Para realizar esta validación en primer lugar, se simula el crudo L26, tomando como base para la mezcla la formulación suministrada por la Gerencia de Programación y Estrategia de PDVSA Caracas (ver *Tabla 5*) y utilizando el esquema de corte enviado por la Refinería de Cardón.

En una segunda etapa, se variaron las proporciones de los crudos de la formulación hasta llegar a la Gravedad API deseada y tratando de disminuir las desviaciones en las fracciones. En una fase final fue necesario estimar nuevos puntos de corte que permitieran ajustar los cortes desviados, los resultados de esta validación se encuentran en la sección de Resultados.

4. Recolección de flujos reales a la salida en la unidad de destilación CD4, dieta de crudos procesados y su correspondiente gravedad API sobre la base de promedios diarios.
5. Con los flujos de entrada y salida de las unidades y conociendo la logística de operación de la unidad, determinar los rendimientos a la salida de las unidades, tomando en cuenta las observaciones presentadas en la sección de Descripción del Proceso.
6. Graficar los rendimientos de cada uno de los cortes para el período de estudio y así identificar puntos desviados respecto al promedio.
7. Determinar el período de estudio tomando en cuenta la operación más típica de la unidad, los períodos de reparación, paradas de planta y cambios sufridos en las unidades de destilación en ese período de tiempo. Este desarrollo se basó en data operacional obtenida de la refinería para el período Julio-Octubre del 2001.
8. Normalizar los rendimientos obtenidos en una base de 100%, con el objetivo de disminuir los errores asociados de instrumentación y medición.
9. Tomando como base el API de la mezcla procesada diariamente, reproducir la mezcla de crudos que se alimenta a la unidad diariamente usando como apoyo para reproducir la receta Microsoft Excel y la herramienta PAssMan.

Debido a que en el período de tiempo seleccionado como base de estudio se desconoce la formulación del crudo L26 que alimenta a la unidad CD4, para reproducir la mezcla se utilizó una receta base del período Julio-Agosto suministrada por la Gerencia de Programación y Estrategia de PDVSA, en la cual se presenta la siguiente formulación para el crudo L26 que se prepara para la Refinería de Cardón:

Tabla 5
Composición del Crudo L26

Crudo	Gravedad API	% Vol en la Mezcla
Lagotreco Liviano	28	21
Lagomar	31,9	18
Lagomedio	31,9	17
Lagocinco	32,7	5
Menemota	20,8	26
DZO-Colón	24,6	6
Boscan	10,6	6

Con esta formulación y la Gravedad API obtenida de la planta se variaron los porcentajes en volumen de la mezcla hasta reproducir la Gravedad API deseada, tomando en consideración que el contenido del crudo BCN debe estar contenido entre el 5 y 8 por ciento.

Una vez obtenidas las composiciones de cada crudo, el sistema PAssMan permitió realizar las mezclas de crudos que estaban cargados en el sistema y que conformaban la receta. En este caso se usa la opción *Blend* y se introducen en el sistema las proporciones de cada crudo, quedando el nuevo crudo cargado dentro de la librería y disponible para ser cortado bajo el esquema de corte deseado.

10. Simular utilizando el sistema PAssMan las mezclas de crudos obteniendo los puntos de corte que reproduzcan la operación real de las unidades diariamente durante el período de estudio.

Para obtener los puntos de corte que reproducen la operación de la unidad CD4, se utiliza la opción *Recut*, luego con la opción *Load* se carga el Mapa de Cortes (*CutMap*) actual de la unidad. Una vez hecho esto, el usuario debe dirigirse a la

ventana *Graphical* y haciendo doble clic en el corte deseado, incluir la especificación de rendimiento a la que desea llegar.

El sistema actualizará automáticamente el corte generando un nuevo punto de corte que cumpla con la especificación. Luego se repite este procedimiento con todos aquellos cortes que sea necesario ajustar.

Con todos los cortes ajustados se presiona entonces la opción *Recut* para generar el ensayo de salida de PAssMan, donde se obtiene el crudo cortado bajo el esquema de corte que mejor reproduce la especificación de rendimiento suministrada por el usuario.

Con la herramienta PESP-Procesamiento de Ensayos de Salida de PAssManTM, se obtiene el ensayo de salida con la validación de los rendimientos y las propiedades del crudo, además de los puntos de corte que fueron utilizados por el sistema.

11. La operación descrita en el punto anterior se realizó para el período de estudio delimitado día a día, generando así data histórica de puntos de corte que reflejaran el comportamiento real de la unidad.
12. Paralelamente con la obtención de los puntos de corte, se probó la nueva facilidad de PAssMan para simular el fraccionamiento comercial.

Para este caso, se toma el mismo crudo y se repite el procedimiento descrito anteriormente hasta llegar a la ventana *Graphical* del sistema, en donde seleccionando el corte de interés se ajustarán manualmente los rendimientos moviendo arriba o abajo por ensayo y error los factores de calidad de fraccionamiento (ubicados a la derecha de la ventana del programa), hasta ajustar el rendimiento del corte al valor deseado.

Es importante señalar que una vez ajustados todos los cortes se debe salvar el Mapa de Cortes con la opción *Save Map*, ubicada en la parte inferior derecha de la ventana. Es en este archivo donde el sistema PAssMan reflejará los factores utilizados para ajustar los rendimientos.

13. De igual manera se obtienen los factores de calidad de fraccionamiento para cada día del estudio, usando como base los puntos de corte actuales de la unidad seleccionada.
14. Una vez obtenidos los puntos de corte para el período Julio-Octubre del 2001, y los factores de calidad de fraccionamiento para el mismo período, se procedió a analizar los datos obtenidos para observar el comportamiento de los mismos. Para ello se utilizaron cálculos estadísticos, empezando por obtener un promedio de las temperaturas de cada uno de los cortes y de cada uno de los factores de ajuste. Dado que el promedio de una muestra, es representativo de la misma si los datos se encuentran homogéneamente distribuidos, se verificó la representatividad del promedio obtenido calculando la mediana de los datos (para todo el período de estudio), ya que ésta señala el dato central de la muestra eliminando la inclinación hacia cualquiera de los dos extremos de la distribución, en este caso ambas medidas de tendencia central coincidieron, siendo entonces el promedio un dato representativo de la muestra.
15. Se definieron entonces los puntos de corte y los factores de ajuste como el promedio de la data histórica generada para el período Julio-Octubre del 2001.
16. Con los puntos de corte definidos, se calcularon los *Swing Cut* entre cada uno de los cortes, partiendo del corte de Nafta Tops hasta el de Gasóleo Liviano. En total se calcularon cuatro (4) *Swing Cut* que permitieron ajustar los rendimientos a la realidad operacional.

Los *Swing Cut* fueron calculados utilizando el punto de corte definido como el promedio de los datos obtenidos y el mínimo y máximo valor de temperatura obtenido para cada corte durante el período de estudio.

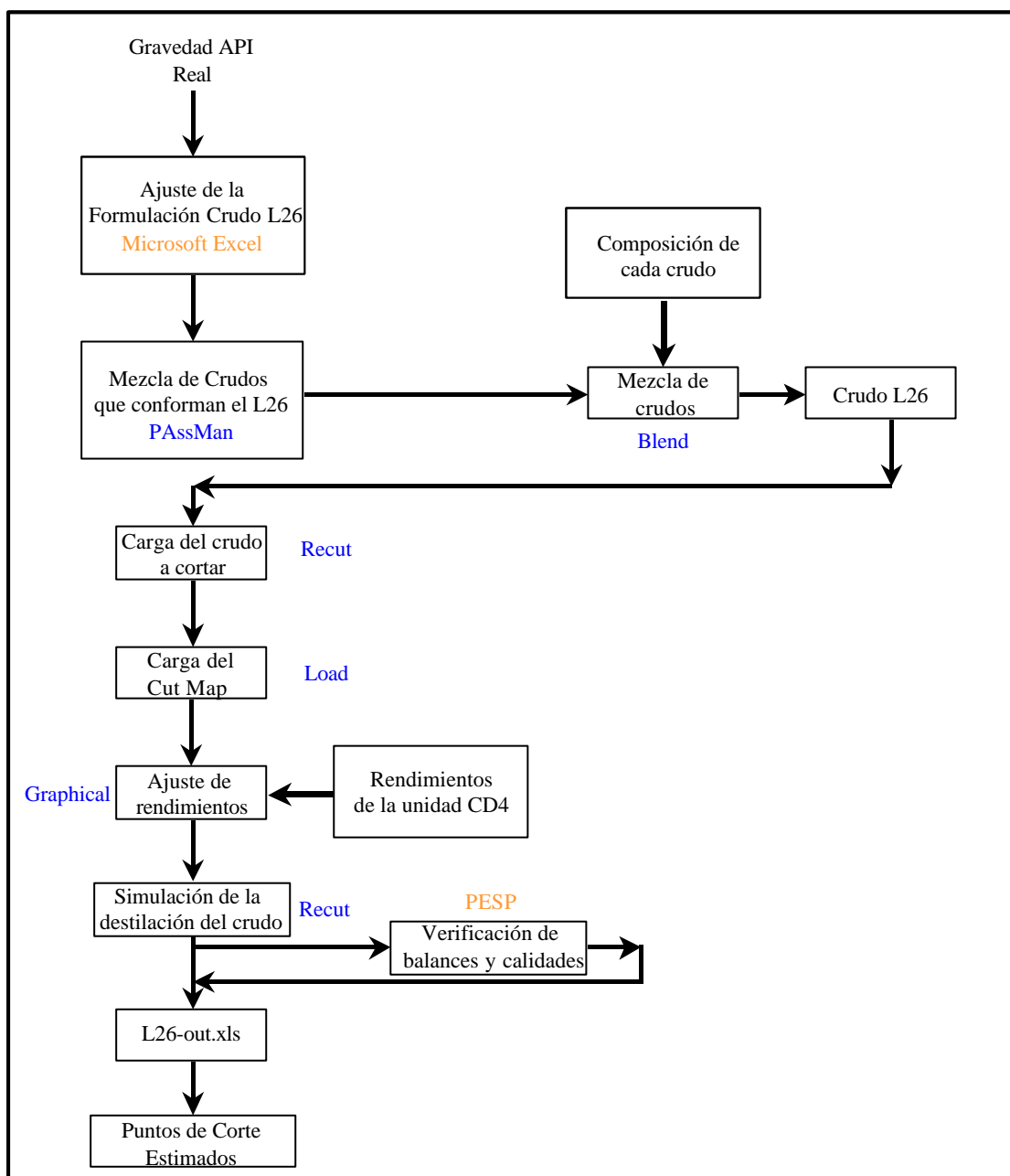
Cada *Swing Cut* fue determinado promediando el mínimo valor de temperatura obtenido para el corte liviano y el máximo valor de temperatura para el corte pesado. El esquema de corte desarrollado para el período de estudio puede ser consultado en el *Anexo VI*.

En la *Figura 11*, se presenta un diagrama de bloques que resume el procedimiento y las herramientas de cálculo empleadas en esta metodología para determinar los puntos de corte.

4.6 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

1. Para validar los resultados obtenidos se utilizó un mes de operación fuera del correspondiente estudio, para este caso el mes de Noviembre del 2001.
2. Analizando el comportamiento de la unidad durante este mes, se eligieron 4 días no consecutivos que fueran representativos del comportamiento de la unidad tomando en cuenta la variabilidad de la Gravedad API de la alimentación.

Tomando en cuenta la alimentación, la Gravedad API de la alimentación y los rendimientos a la salida, y manejando esta data de igual manera que para el desarrollo de los puntos de corte (logística) se obtuvieron los rendimientos de las corrientes a la salida de la unidad.

**Figura 11**

Esquema para el cálculo de puntos de corte

Una vez obtenidos los rendimientos, se procedió a cortar los crudos que conforman la mezcla L26, en PAssMan, con los puntos de corte obtenidos y los *Swing Cut*. El Mapa de Corte utilizado puede observarse en el *Anexo VI*.

3. Con los crudos que conforman la mezcla cortados con los puntos de corte desarrollados, se realizó una hoja mezcla en Microsoft Excel que permitiera realizar la mezcla manual de los ocho crudos reproduciendo la Gravedad API del día seleccionado.
4. Con el vector mezcla o crudo L26 resultante, la alimentación real de la unidad en Ton/d y los rendimientos reales a la salida de la unidad, se simuló los *Swing Cut* entre cada uno de los cortes, repartiendo las toneladas del *Swing Cut* al corte liviano o al corte pesado involucrado hasta lograr reproducir de la forma más eficiente las toneladas reales de la planta.
5. Una vez ajustados los rendimientos de las fracciones usando los *Swing Cut*, se calcularon los porcentajes de desviación de los nuevos rendimientos en base a la data real obtenida de planta.
6. Para validar los factores de calidad de fraccionamiento del sistema PAssMan, se utilizaron los mismos días del mes de Noviembre que para el caso anterior, pero la validación se desarrolló de manera distinta.

En este caso tomado como base la composición de los crudos que reprodujeron la Gravedad API para el caso anterior, se realizó la mezcla de los crudos en el sistema PAssMan y se simuló usando fraccionamiento comercial el corte del crudo utilizando el Mapa de Corte que contiene los factores de ajuste obtenidos del estudio (ver *Anexo VII*).

La salida de PAssMan, genera un crudo L26 con las fracciones convencionales y los puntos de corte actuales de la unidad CD4 en la Refinería de Cardón, mostrando los rendimientos ajustados en base a la ineficiencia que existe en la separación de la columna. Los resultados obtenidos pueden ser observados en la siguiente sección.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección, se presentarán y discutirán los resultados obtenidos una vez estructurada la base de datos de Crudos Propios y Foráneos y desarrollados los nuevos puntos de corte para la unidad atmosférica 4 (CD4) de la Refinería de Cardón; así como también la evaluación de las nuevas facilidades del sistema PAssMan Ver. 4.0 para el fraccionamiento comercial.

5.1 BASE DE DATOS PASSMAN VER. 4.0

Como fase inicial para el cumplimiento de los objetivos de este Trabajo Especial de Grado, estuvo la actualización de los Crudos Propios y la incorporación de los Crudos Foráneos a la librería de la nueva versión del sistema PAssMan. El producto de esta actividad es un archivo ***BD 2002.pmf***, en el que se encuentran la información correspondiente a los ensayos de crudos (evaluaciones) más actuales que posee PDVSA.

Esta base de datos puede ser consultada por cualquier usuario de PDVSA, y en ella encontrará los crudos ya cargados, disponibles para simular su corte, utilizando un Mapa de Corte real.

Los resultados más importantes de esta actividad son:

- Usando la información contenida en los ensayos en papel disponibles en el departamento, se incorporaron para los Crudos Propios (Venezolanos) y Crudos Foráneos disponibles en electrónico la calidad Sodio en aquellos cortes donde estaba disponible y la cantidad total de sodio presente en el crudo.

- Se incorporó en los ensayos electrónicos de la librería de crudos de PDVSA, el ***Distillation Blending Value (DBV)*** para todas aquellas fracciones de nafta y kerosén donde estaban presentes las destilaciones A.S.T.M.
- Se incluyeron los índices de mezcla para aquellas calidades en las que no estaba reportado y en algunos casos se incluyeron propiedades que no estaban originalmente en el ensayo electrónico.
- Se actualizó la librería de propiedades de PAssMan Ver. 4.0, y se verificaron para las calidades, sus rangos válidos y cortes a los que aplican.
- En total se actualizaron 38 Crudos Venezolanos y se incluyeron 15 nuevos, dando un total de 53 crudos cargados en la base de datos del sistema PAssMan.
- Se incluyeron 56 Crudos Foráneos a la base de datos del sistema PAssMan.

5.2 VALIDACIÓN DE PUNTOS DE CORTE ACTUALES DE LA UNIDAD CD4

En la *Tabla 6*, se pueden observar los resultados obtenidos al simular el crudo L26 en la unidad CD4 bajo el esquema de corte actual y la comparación con los rendimientos presentados en el Modelo Operacional de la refinería para el mes de Mayo del 2001, además de los rendimientos reportados en el Modelo Nacional de Operación en su versión 9.1. En este caso no se logró reproducir los rendimientos indicados en el modelo operacional de la Refinería de Cardón.

Las desviaciones más importantes corresponden a los cortes de Gasoil Pesado, los chorros 2 y 3 y el Residuo Corto, estas diferencias pueden ser observadas directamente en el corte de Residuo Largo, donde, el estimado arrojado por el sistema

PAssMan (59.6%) se encuentra por debajo de lo que predicen el Modelo Operacional (65.22%) y el MNO (61.15%).

Estas diferencias se deben principalmente a que el vector de crudo L26 presente en el Modelo Operacional y en el MNO, es resultado de mezclar solo 3 crudos del total de 8 que conforman la mezcla en la realidad. Las proporciones usadas en los modelos (MNO y MO) para reproducir el crudo L26 son: 70% LTC, 21,5 % LTM y 8% BCN. Esta aproximación de los modelos no permite predecir con exactitud los rendimientos del crudo L26 en la unidad CD4, más aún cuando la composición del crudo L26 varía frecuentemente en función de la disponibilidad de crudo.

Tabla 6

Comparación de los rendimientos obtenidos en la Unidad CD4 utilizando los Puntos de Corte actuales.

Corte	Estimados PAssMan (%Wt)	Modelo Operacional Cardón (%WT)	MNO Ver. 9.1 (%Wt)
Gases C4-	1.76	1.80	2.72
Nafta Tops	4.84	2.86	4.04
Nafta Cor	5.30	6.00	5.45
Kerosén	11.42	12.12	12.05
Gasoil Liviano	6.01	5.50	6.52
Gasoil Pesado	11.21	6.50	7.42
Chorro 1	3.81	2.00	3.52
Chorro 2	6.68	13.90	7.23
Chorro 3	8.75	14.00	10.34
Residuo Corto	40.32	35.32	40.06
Residuo Largo	59.6	65.22	61.15

Con el escenario descrito anteriormente, fue necesario calcular nuevos puntos de corte, La *Tabla 7* presenta, los puntos de corte obtenidos para reproducir los rendimientos de las fracciones de la destiladora y los puntos de corte actuales, mientras que la *Tabla 8* muestra los rendimientos obtenidos y la desviación porcentual obtenida basándose en los rendimientos reales de la planta.

Para obtener los rendimientos del promedio-mes, presentados en el Modelo Operacional fue necesario ajustar las temperaturas de corte, debido principalmente a que en no hay una combinación posible de en la formulación del crudo L26 que mantenga el API deseado y que además reproduzca con una desviación aceptable los rendimientos.

Tabla 7

Puntos de Corte que Reproducen la Operación Real

Corte	Estimado PAssMan T (°F)	Punto de Corte Actual T (°F)
Gases C4-	90	90
Nafta Tops	191	230
Nafta Cor	292	311
Kerosén	462	469
Gasoil Liviano	530	543
Gasoil Pesado	605	667
Chorro 1	627	707
Chorro 2	775	780
Chorro 3	962	890
Residuo Corto	962+	890+

Tabla 8

Rendimientos de la unidad estimados por PAssMan

Corte	Modelo Operacional Cardón (%Wt)	Rendimiento Estimado (% Wt)	Porcentaje de Desviación
Gases C4-	1.80	1.76	2.22
Nafta Tops	2.86	2.86	0.00
Nafta Cor	6.00	6.00	0.00
Kerosén	12.12	12.12	-0.01
Gasoil Liviano	5.50	5.50	0.00
Gasoil Pesado	6.50	6.50	0.00
Chorro 1	2.00	2.00	0.00
Chorro 2	13.90	13.90	0.00
Chorro 3	14.00	14.00	0.00
Residuo Corto	35.32	35.37	-0.14

Es importante señalar que estos puntos de corte sólo reproducen la operación puntual de la refinería, motivo por el cual se hace necesario desarrollar puntos de corte para la unidad CD4 que reproduzcan flexiblemente la operación.

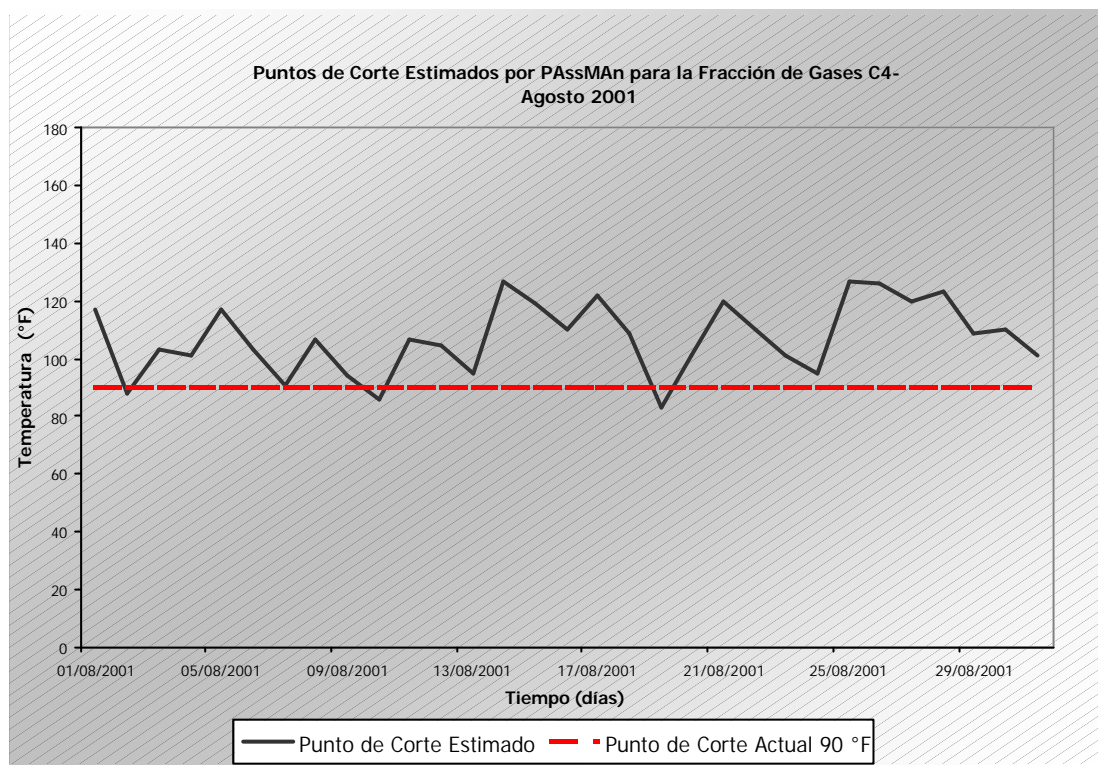
5.3 DESARROLLO DE PUNTOS DE CORTE

Siguiendo la metodología descrita en la sección anterior, se obtuvieron los puntos de corte que reproducen la realidad operacional de la unidad CD4 en el período de estudio Julio-Octubre del 2001. En esta sección se presentaran los puntos de corte obtenidos para el mes de Agosto, siendo este representativo del comportamiento observado en los otros meses, en la *Figura 12* pueden observarse los puntos de corte obtenidos para la fracción de gases C4⁻ durante este período.

En este gráfico se observa la variabilidad que experimenta el punto de corte al reproducir los rendimientos reales de esta fracción en la unidad de destilación, la línea punteada representa el punto de corte suministrado por la refinería, este punto de corte se presenta como un valor constante a lo largo del tiempo, a pesar de que la refinería en su operación diaria los ajusta según sean los requerimientos en cuanto a calidades.

Para el corte de gases las variaciones en el período de estudio son elevadas, alcanzando puntos de corte en el orden de 130 °F, con respecto a los 90 °F fijados por la refinería, en este caso la diferencia puede ser atribuida al arrastre de la Nafta Tops hacia el corte de gases, como consecuencia de una separación deficiente.

Las diferencias para esta fracción, se pueden atribuir a errores de medición para los gases en el tope de la columna, debido a la poca atención que recibe este corte por poseer poco valor comercial para la refinería en comparación con otros cortes (naftas y kerosén), y además a que el corte de gases es más sensible a cambios en la alimentación.

**Figura 12**

Puntos de Corte Estimados en la Fracción de Gases C4-

Las *Figuras 13, 14, 15 y 16* muestran los puntos de corte para algunas de las otras fracciones de la destiladora atmosférica: Nafta Tops, Nafta Cor, Kerosén y Gasóleo Liviano. En este caso los puntos de corte presentan resultados homogéneos entre sí, pero presentan desviaciones importantes con respecto al punto de corte actual.

Se debe recordar que los puntos de corte presentados fueron estimados en función de obtener un rendimiento real de planta, estos puntos de corte están estrechamente ligados a factores como: carga a la unidad, presión de la columna, temperatura de la zona de vaporización instantánea y dieta de crudos procesados^(9,10,11).

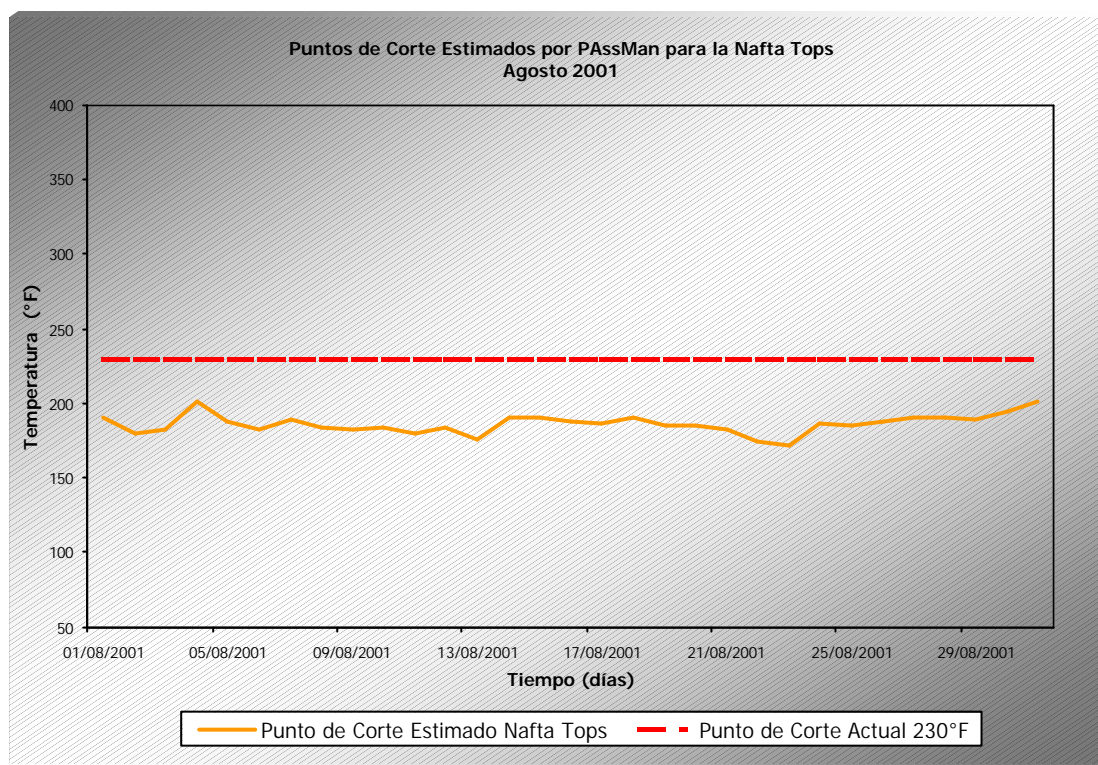


Figura 13
Puntos de Corte Estimados en la Nafta Tops

Las variaciones que tienen los puntos de corte en la operación diaria responden al impacto de los factores antes mencionados, a variaciones en la calidad de los crudos y a la condición de que la operación de la unidad no es la misma diariamente. En el caso particular de la Refinería de Cardón uno de los puntos más críticos a nivel de la logística de destilación es la variabilidad de la carga a la unidad CD4.

Para el caso de la *Figura 13*, el punto de corte estimado es menor que el punto de corte actual de la unidad, esto puede traducirse en una disminución en el rendimiento de Nafta Tops de la unidad que puede atribuirse a un cambio importante en la dieta de crudos en relación con la fecha en la que se implantaron los puntos de corte actuales.

El cambio en la dieta de crudos puede ser verificado al observar en conjunto los puntos de corte estimados para la Nafta Cor (Figura 14), Kerosén (Figura 15) y Gasóleo Liviano (Figura 16). En este caso los puntos de corte estimados para estas fracciones son superiores a los puntos de corte actuales de la unidad.

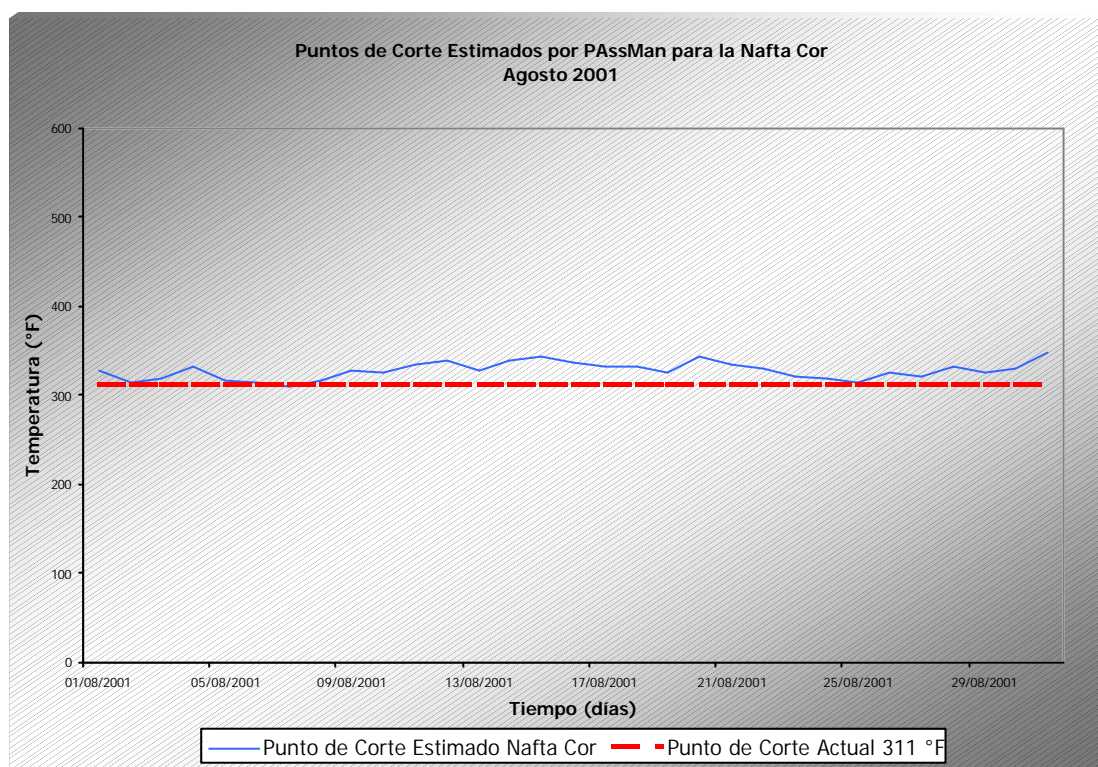
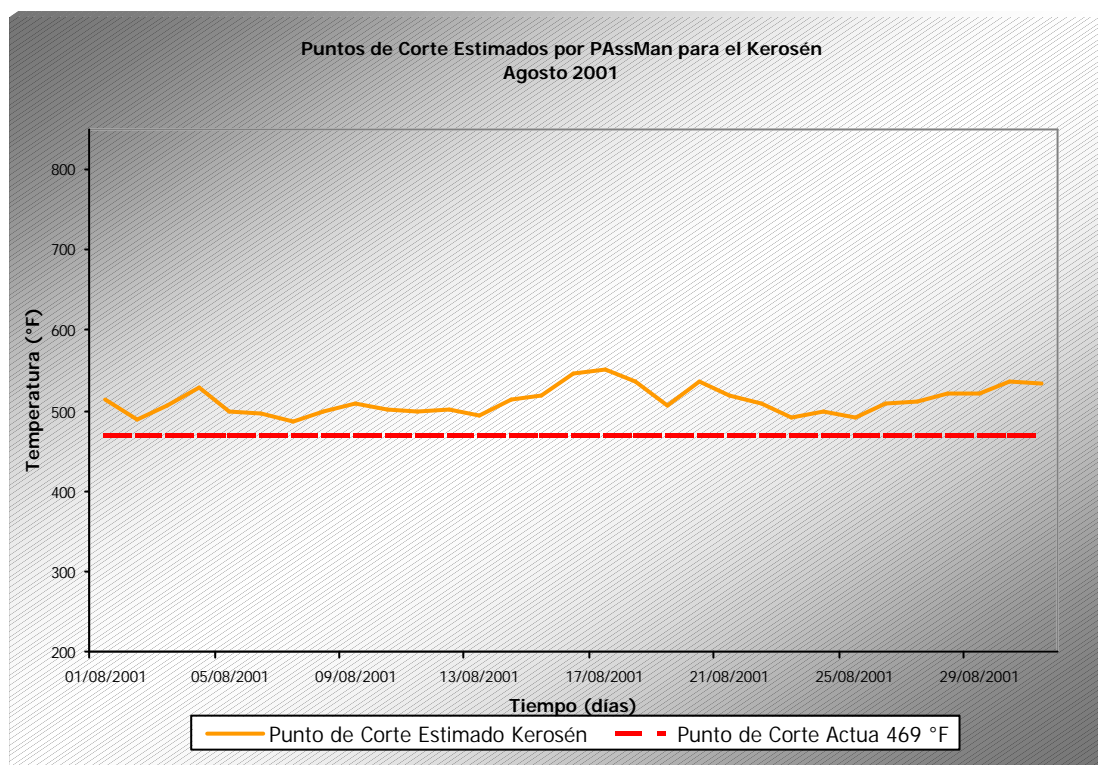


Figura 14

Puntos de Corte estimados para la Nafta Cor

En base a este comportamiento, el punto de corte que mejor reproduce los rendimientos en actuales de la planta para estos casos, es superior al valor fijado por refinería en su última revisión.

**Figura 15**

Puntos de Corte estimados para el Kerosén

Todos estos análisis se han hecho sobre la base de la operación típica de la unidad que en este caso es modo maximización en la producción de kerosén; en el otro escenario en el que puede operar esta planta, como es el caso de maximización en la producción de nafta este estudio con los puntos de corte finales no predecirían correctamente los rendimientos.

En la *Figura 17*, donde se presentan los puntos de corte estimados para el Gasóleo Pesado, se presenta una mayor variación de los puntos de corte en cuanto a la tendencia general de las otras fracciones y mayor desviación respecto al punto de corte actual de 667 °F versus un promedio de 691 °F como punto de corte estimado usando el sistema PAssMan.

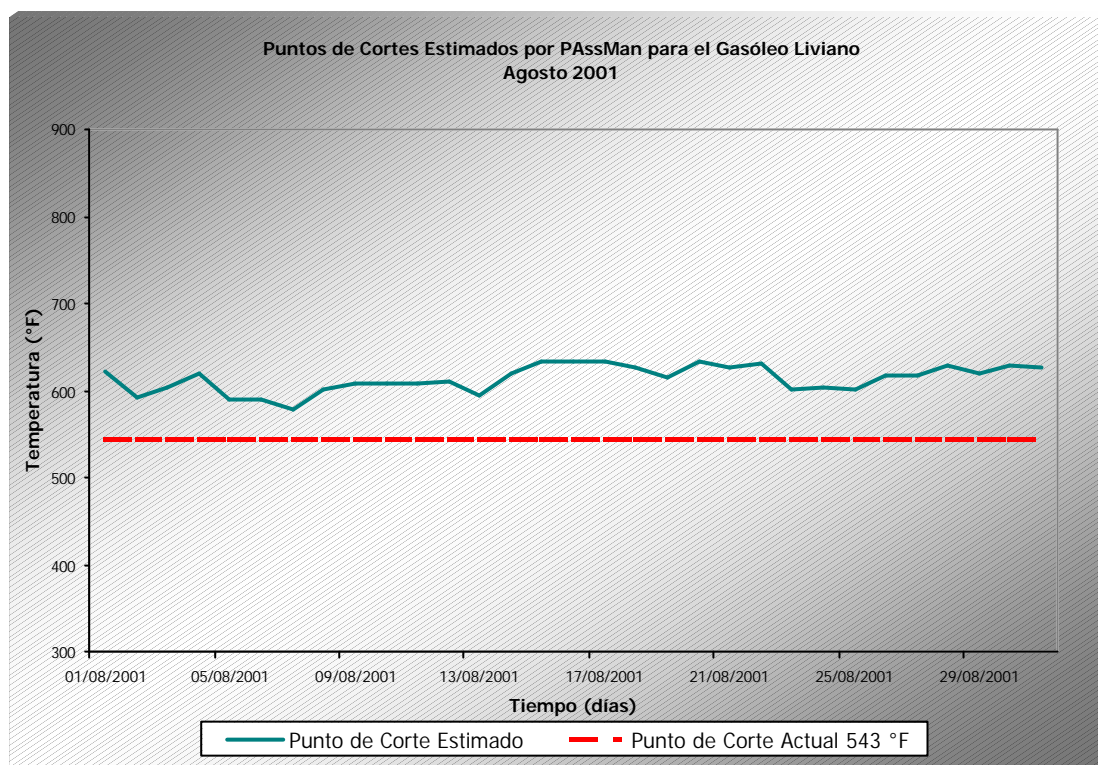
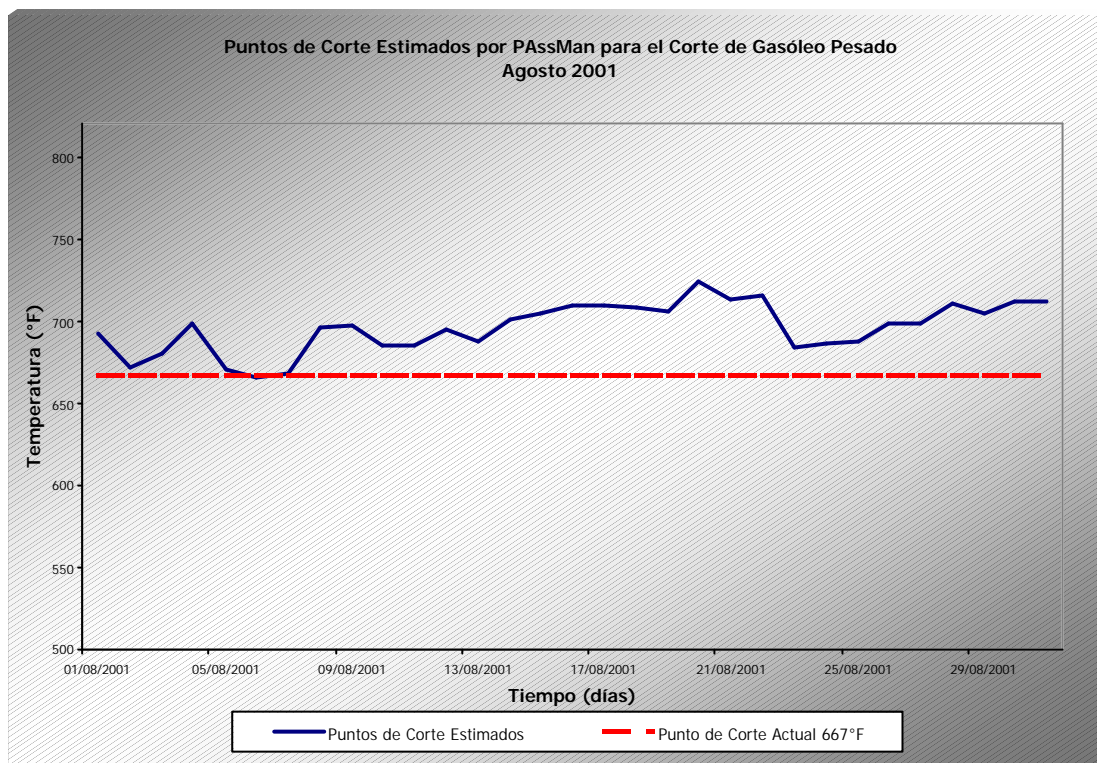


Figura 16
Puntos de Corte estimados para el Gasóleo Liviano

Esta variación también puede traducirse en una alta variabilidad en los rendimientos reales de este corte, estas diferencias pueden relacionarse con las fuertes discrepancias que presentan los rendimientos reales para el residuo largo (*Figura 18*), que sugieren que además de los factores antes mencionados existen problemas físicos de separación en la columna a nivel de la separación Gasóleo Pesado-Residuo Largo.

Debido a que el Sistema PAssMan establece una temperatura final de 1832 °F para el Residuo Largo, con el objetivo de ajustar los balances de masa, no se dispone del punto final para esta fracción. En este sentido la *Figura 18* muestra los rendimientos reales de la planta para el residuo largo durante el mes de Agosto del 2001.

**Figura 17**

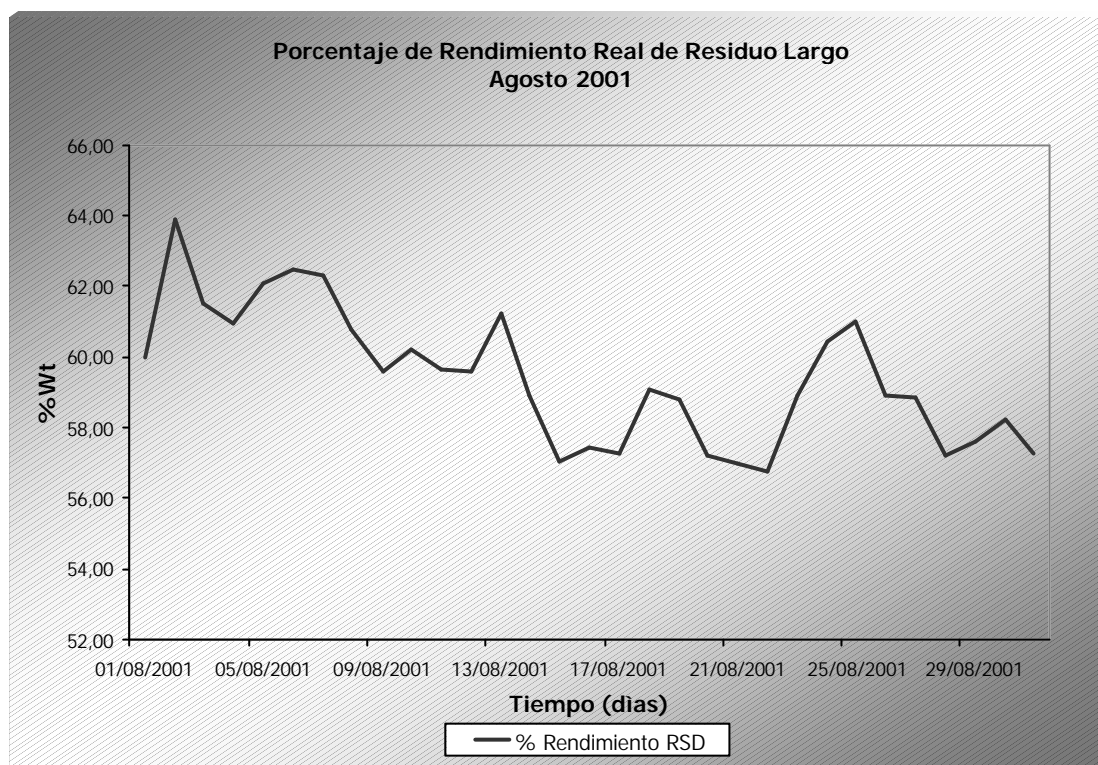
Puntos de Corte estimados para el Gasóleo Pesado

5.4 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.4.1 VALIDACIÓN EMPLEANDO SWING CUT

La validación de los puntos de corte obtenidos se realizó con cuatro (4) días no consecutivos y representativos de la operación real de la columna en el mes de Noviembre del 2001, tomando en cuenta además la variabilidad de la alimentación.

Los puntos de corte desarrollados a partir de la metodología propuesta, se muestran en la *Tabla 9*, estos puntos de corte responden al análisis del comportamiento de la unidad CD4 entre los meses de Julio y Octubre del año 2001.

**Figura 18**

Rendimientos Reales para la Fracción de Residuo Largo

Tabla 9

Puntos de Corte Estimados para la Unidad Atmosférica 4

Fracción	Temperatura de Corte (°F)
Gases C4-	97
Nafta Tops	190
Nafta Cor	334
Kerosén	508
Gasoil Liviano	610
Gasoil Pesado	691
Residuo Largo	691+

El esquema de corte que incluyen los *Swing Cut* calculados durante el desarrollo de este trabajo se muestra en la *Figura 19*. El objetivo de simular el corte de crudo en la unidad con el uso de estos *Swing Cut* permite el ajuste de los rendimientos de las fracciones obtenidas al procesar el crudo L26 en la unidad atmosférica 4, sirviendo esto como apoyo a la herramienta PIMS para optimizar los puntos de corte en función de la operación.

La formulación fijada para la mezcla L26 en el día de operación N° 1, en el cual la unidad CD4 procesó con una dieta de crudo L26 de Gravedad API igual a 26.56 se muestran en la *Tabla 10*.

Es importante recordar, que se desconoce con exactitud la composición de la mezcla que entra a la unidad, motivo por el cual esta formulación es un aproximado basado en la receta suministrada (ver *Tabla 5*) que reproduce la Gravedad API real.

Tabla 10

Composición de la Mezcla L26 para el Día de Operación N°1

Crudo	% Vol. En la Mezcla
Lagotreco Liviano	22
Lagomar	19
Lagomedio	18
Lagocinco	6
Menemota	23
DZO-Colón	6
Boscan	6

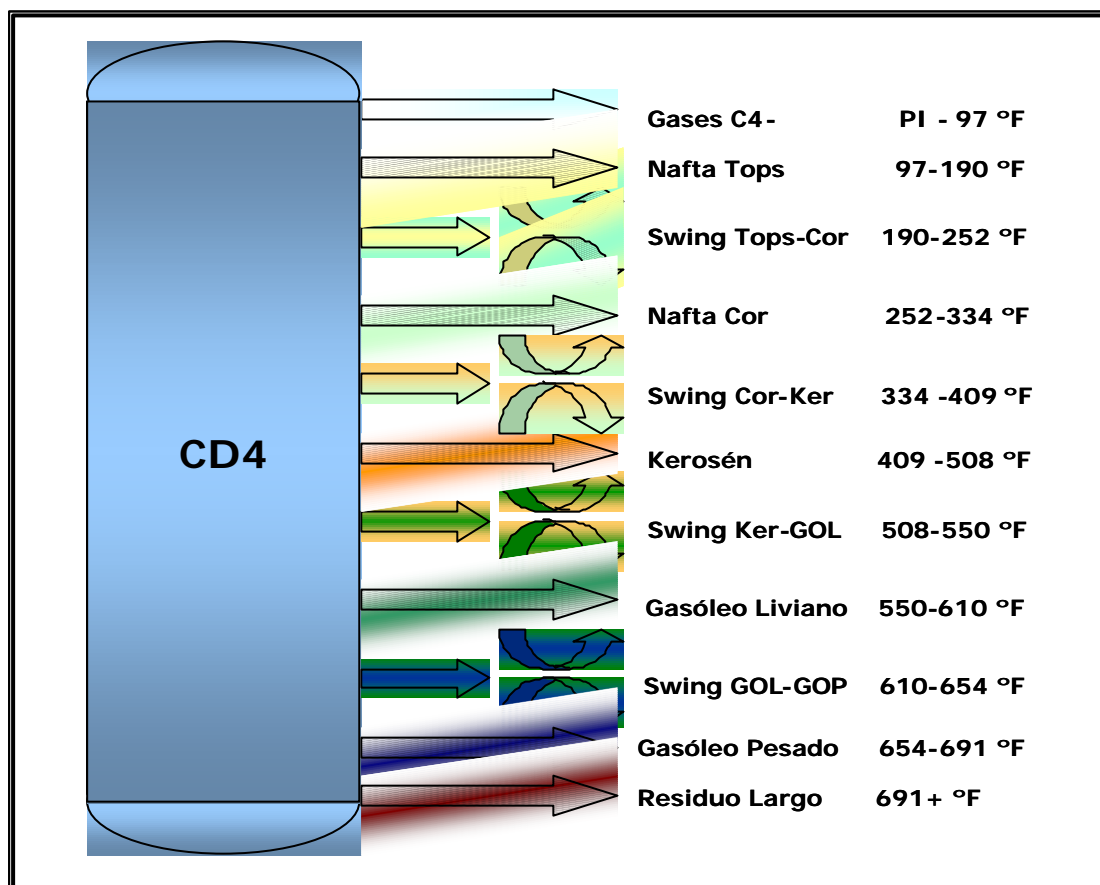


Figura 19

Esquema de Corte para CD4 con el uso de *Swing Cut*

Los resultados obtenidos al simular el corte de crudo usando el sistema PAssMan, el Mapa de Corte presentado en el Anexo VI (*Swing Cut* calculados) y la comparación de estos, con la data real del día de operación 1 son mostrados en la Tabla 11.

En la Tabla 11 se presentan las toneladas-día por corte, estimadas cortando el crudo con los puntos de corte desarrollados, estos flujos másicos en comparación con los flujos reales permitieron distribuir los *Swing Cut* entre cada una de las fracciones que requirieran ajuste; también se muestran los porcentajes de desviación de los

cortes ajustados en relación con los flujos reales a la salida para el día representativo escogido para realizar la validación.

Tabla 11

Reproducibilidad de la Operación Real Usando *Swing Cut* Día 1

Fracción	Simulación T/D	Ajuste Swing Cut T/D	Data Real T/D	Porcentaje de Desviación
Gases	246	246	286	13.90%
Nafta Tops	391	391	360	-8.61%
Swing Tops-Cor	495	0	0	-
Nafta Cor	797	1292	1222	-5.67%
Swing Cor-Ker	757	0	0	-
Kerosén	1156	2057	2057	0.00%
Swing Ker-Gol	508	0	0	-
Gasóleo Liviano	779	1398	1398	0.00%
Swing Gol-Gop	608	0	0	-
Gasóleo Pesado	523	876	951	7.91%
Residuo Largo	8586	8586	8572	-0.16%
Balance	14845	14845	14847	0.01%

Con excepción del corte de gases las desviaciones obtenidas se encuentran dentro rango aceptado ($< 10\%$), la diferencia que presenta este corte puede deberse a los factores discutidos en párrafos anteriores y al impacto de asumir la formulación del crudo. A pesar de conocer La Gravedad API real, la mezcla tomada para esta validación puede no ser correcta, por ejemplo pueden variar las proporciones del crudo pesado o del crudo liviano reproduciendo la misma Gravedad API y esto incide directamente en los rendimientos que se pueden obtener en la destilación.

En las *Tablas 12 y 13* se presentan los resultados de la validación para el día de operación N°2, en este caso el crudo procesado tenía una Gravedad API de 27.3.

Tabla 12

Composición del Crudo L26 para el Día de Operación N° 2

Crudo	% Vol. En la Mezcla
Lagotreco Liviano	20
Lagomar	15
Lagomedio	22
Lagocinco	3
Menemota	25
DZO-Colón	7
Boscan	7

En este caso la mayoría de los cortes también logran ser ajustados, específicamente para el corte de Gasóleo Pesado la desviación encontrada es de 10.14%, esta diferencia y la encontrada para el mismo corte en la *Tabla 11* (7.91%), puede estar relacionada con la posibilidad de que existan problemas de separación entre el Gasóleo Pesado y el Residuo Largo.

Tabla 13Reproducibilidad de la Operación Real Usando *Swing Cut* Día 2

Fracción	Simulación T/D	Ajuste Swing Cut T/D	Data Real T/D	Porcentaje de Desviación
Gases	201	201	211	4.43%
Nafta Tops	320	320	301	-6.36%
Swing Tops-Cor	404	0	0	-
Nafta Cor	651	1108	1108	0.01%
Swing Cor-Ker	618	0	0	-
Kerosén	945	1634	1634	-0.03%
Swing Ker-Gol	415	0	0	-
Gasóleo Liviano	637	1173	1176	0.23%
Swing Gol-Gop	497	0	0	-
Gasóleo Pesado	427	681	757	10.14%
Residuo Largo	7017	7017	6948	-0.99%
Balance	12134	12134	12135	0.01%

También hay que tomar en cuenta aspectos de la logística de operación de la Refinería de Cardón, en relación a esto la refinería no posee tanques segregados para la recepción de crudo L26, por lo cual los nuevos lotes que llegan a través de la tubería se mezclan con fondos remanentes que pertenecen al lote anterior. Tomando en cuenta la variabilidad que presenta la formulación, este puede ser otro factor de distorsión en los rendimientos obtenidos.

Para el caso de las fracciones ligeras, las desviaciones disminuyeron en relación con la validación anterior. La diferencia más significativa sería entonces la encontrada para la Nafta Cor: en el orden de 0.01% versus -5.67% del caso anterior. En este caso los rendimientos en los cortes de tope ajustaron mejor con el procesamiento de un crudo L26 un poco más liviano (27.3 versus 26.56 API).

En la *Tabla 14*, se presenta la mezcla para la validación del día de operación N° 3, con procesamiento de crudo L26 de 26.2 API, mientras que la *Tabla 15* muestra los resultados obtenidos para la simulación de este crudo.

Tabla 14

Composición del Crudo L26 para el Día de Operación N° 3

Crudo	% Vol. En la Mezcla
Lagotreco Liviano	25
Lagomar	15
Lagomedio	16
Lagocinco	4
Menemota	26
DZO-Colón	7
Boscan	7

Tabla 15

Reproducibilidad de la Operación Real Usando *Swing Cut* Día 3

Fracción	Simulación T/D	Ajuste Swing Cut T/D	Data Real T/D	Porcentaje de Desviación
Gases	244	244	265	8.1%
Nafta Tops	377	528	528	-0.1%
Swing Tops-Cor	479	0	0	-
Nafta Cor	775	1119	1119	-0.1%
Swing Cor-Ker	737	0	0	-
Kerosén	1129	1874	1874	0.0%
Swing Ker-Gol	498	0	0	-
Gasóleo Liviano	761	1331	1331	0.0%
Swing Gol-Gop	595	0	0	-
Gasóleo Pesado	514	1013	1069	5.2%
Residuo Largo	8435	8435	8360	-0.9%
Balance	14545	14545	14546	0.01%

La validación en este caso arroja diferencias similares que en los dos estudios anteriores, existiendo menor desviación para las fracciones de nafta, kerosén y gasóleo liviano, pero se mantienen para las fracciones de gases y gasóleo pesado.

Además de las observaciones señaladas anteriormente, es importante tomar en cuenta otros factores que pueden distorsionar las desviaciones en el estudio.

En primer lugar hay que tomar en cuenta el error asociado que genera el uso de un simulador, en este caso el sistema PAssMan. Este sistema fue usado para generar la mezcla de crudos y en algunos casos presenta diferencias entre la Gravedad Específica calculada por el sistema y la obtenida de forma manual. Además se deben tomar en cuenta los errores asociados al desempeño de PAssMan al simular el corte de crudo.

A continuación se presentan los resultados de la validación realizada para el día de operación N° 4, como en los casos anteriores la *Tabla 16* presenta la proporción en que se mezclaron los crudos para obtener en este caso un crudo L26 de 26.92 API.

Tabla 16

Composición del Crudo L26 para el Día de Operación N° 4

Crudo	% Vol. En la Mezcla
Lagoteco Liviano	20
Lagomar	14
Lagomedio	22
Lagocinco	4
Menemota	26
DZO-Colón	8
Boscan	5

La tabla siguiente (*Tabla 17*) muestra los resultados obtenidos al simular el corte de crudo y el ajuste realizado con los *Swing Cut* para reproducir la data real.

Tabla 17

Reproducibilidad de la Operación Real Usando *Swing Cut* Día 4

Fracción	Simulación T/D	Ajuste Swing Cut T/D	Data Real T/D	Porcentaje de Desviación
Gases	249	249	281	11.23%
Nafta Tops	399	399	365	-9.40%
Swing Tops-Cor	506	0	-	-
Nafta Cor	813	1319	1222	-7.87%
Swing Cor-Ker	769	0	-	-
Kerosén	1170	2057	2057	0.00%
Swing Ker-Gol	512	0	-	-
Gasóleo Liviano	786	1398	1398	0.00%
Swing Gol-Gop	612	0	-	-
Gasóleo Pesado	522	916	951	3.75%
Residuo Largo	8508	8508	8572	0.75%
Balance	14846	14846	14847	0.01%

En este caso se observan desviaciones en el orden de 11% nuevamente para el corte de gases y de 9% y 8% para los cortes de nafta liviana y pesada respectivamente.

Estas variaciones en los cortes de nafta y las presentadas en los análisis anteriores pueden ser consecuencia de la alimentación de nafta a la unidad, esta alimentación puede alterar los resultados ya que no es una nafta que forma parte del crudo procesado.

La nafta puede provenir de ajustes realizados al formular la mezcla L26, el añadir nafta al momento de mezclar las segregaciones tiene un fuerte impacto en los rendimientos de los cortes livianos. Si este fuera el caso, no es posible determinar cual de los lotes posee nafta, a menos que se realice un análisis de la alimentación. Este factor no fue cuantificado al momento de realizar este desarrollo debido a que se usaron ensayos de crudo para determinar las mezclas y no un muestreo de L26.

Otro punto importante para explicar las diferencias es el manejo de desechos. Esta práctica muchas veces común en esta refinería, trató de simularse con las bases que se asumieron al tratar de eliminar la distorsión del desecho. Recordemos que se planteó en la revisión bibliográfica de este trabajo manejar los desechos fijos durante el estudio con una composición típica, que incluía 10 % de nafta, 70 % de kerosén y 20 % de gasóleo pesado, esta caracterización del desecho no es constante durante la operación de la refinería, muchas veces el desecho esta compuesto en un 100% por kerosén que sale fuera de especificación debido a que se dejó caer parte del corte de Nafta y no se pueden cumplir con las calidades meta, que son aquellas a las que apunta el refinador y que consideran los errores de medición.

El empleo de *Swing Cut*, permitió distribuir los rendimientos obtenidos en la simulación, logrando ajustar estos rendimientos a la realidad operacional, esto puede

observarse en la *Tabla 18*, donde se presenta un resumen de los resultados más resaltantes obtenidos en la validación.

Tabla 18
Resumen de los resultados obtenidos con el uso de *Swing Cut*

Día de Operación	Porcentaje de desviación Máximo	Producto	Porcentaje de desviación Mínimo	Producto (s)
Día 1	13.90%	Gases	0.0%	Ker-GOL
Día 2	10.14%	Gasóleo Pesado	0.01%	Nafta Cor
Día 3	8.1%	Gases	0.0%	Ker-GOL
Día 4	11.23%	Gases	0.0%	Ker-GOL

5.4.2 VALIDACIÓN EMPLEANDO LOS FACTORES DE AJUSTE DE CALIDAD DE FRACCIONAMIENTO

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la validación de los Factores de Ajuste de Calidad de Fraccionamiento presentes en el sistema PAssMan.

La *Tabla 19* presenta los factores de ajuste LFQ y HFQ obtenidos durante el desarrollo de este trabajo.

Tabla 19
Factores de Calidad de Fraccionamiento

CORTE	LFQ	HFQ
GASES		0.84
TOPS (NAFTA LIV)	0.39	0.51
NAFTA COR	0.79	0.66
KEROSEN	0.67	0.76
GASOIL LIVIANO	0.49	0.64
GASOIL PESADO	0.50	1.00
RESIDUO LARGO	0.95	

Al incluir estos factores para cada una de las fracciones en el Mapa de Cortes que se utiliza como insumo de PAssMan y bajo el esquema de corte actual de la unidad CD4, el programa simula la ineficiencia de la separación que posee la columna.

Para validar los factores se utilizaron los mismos cuatro (4) días de operación que en el estudio de los *Swing Cut*. Los resultados obtenidos se presentan en la *Tabla 20*, en esta tabla se pueden observar las desviaciones obtenidas entre la simulación a la salida de PAssMan y los rendimientos reales de la unidad.

Tabla 20

Desviaciones obtenidas respecto a la Data Real usando los Factores de Calidad de Fraccionamiento de PAssMan

CORTE	Rendimientos (Ton/d)			
	Porcentaje de	Porcentaje de	Porcentaje de	Porcentaje de
	Desviación Día	Desviación Día	Desviación Día	Desviación Día
	1	2	3	4
GASES	-1.00%	-3.67%	-3.64%	4.90%
NAFTA TOPS	15.96%	7.14%	38.80%	6.45%
NAFTA COR	-0.08%	3.29%	-13.38%	-7.25%
KEROSEN	-13.32%	-3.00%	-7.11%	-0.12%
GOL	6.50%	13.19%	8.21%	10.67%
GOP	7.26%	-11.03%	5.67%	-8.13%
RESIDUO	0.20%	-1.06%	-0.96%	-0.23%

Para el corte de gases C4, las desviaciones fueron menores comparativamente con los arrojados por el uso de *Swing Cut*, presentando como desviación máxima un 4.9% para el día de operación número 4.

Para el residuo largo el caso es similar, las desviaciones obtenidas se encuentran igualmente en el orden de los presentados en el estudio anterior, caso contrario al comportamiento que presentan los cortes de nafta, kerosén y gasóleos.

Estos cortes presentan desviaciones alternadas proyectando desviaciones como es el caso de la Nafta Liviana en el orden de 38% correspondiente al día N° 3 (ver *Tabla 21*).

Es importante señalar que estas diferencias responden, además de las causas ya señaladas, al hecho de que los factores de calidad de fraccionamiento LFQ y HFQ no pueden ser calculados eficientemente cuando la dieta de crudos presenta una alta variación⁽¹⁴⁾.

En este caso la variabilidad de la alimentación y los puntos de corte en los que se base el estudio son variables importantes. Debido a esto al cambiar los puntos de corte en las unidades de destilación es necesario volver a estimar los factores de ajuste LFQ y HFQ.

Tabla 21

Resumen de los resultados obtenidos usando los Factores de Calidad de Fraccionamiento

Día de Operación	Porcentaje de desviación Máximo	Producto	Porcentaje de desviación Mínimo	Producto (s)
Día 1	15.96%	Nafta Tops	-0.08%	Nafta Cor
Día 2	13.19%	Gasóleo Liviano	-1.06%	Residuo
Día 3	38.80%	Nafta Tops	-0.96%	Residuo
Día 4	10.67%	Gasóleo Liviano	-0.12%	Kerosén

Cabe destacar, que no fue posible evaluar la facilidad de PAssMan denominada CUC Recut Option debido a que no se dispuso de un Test-Run validado de la unidad atmosférica estudiada.

6 CONCLUSIONES

- Los puntos de corte actuales de la unidad de destilación atmosférica 4 de la Refinería de Cardón en el Complejo Refinador Paraguaná, no reproducen los rendimientos reales.
- El uso de *Swing Cut* proporciona una metodología para la estimación de puntos de corte comerciales que aportan flexibilidad en función de los cambios de alimentación.
- Los rendimientos obtenidos con el uso de *Swing Cut* reproducen los rendimientos reales con una desviación que se encuentra dentro del rango establecido (<10% en los cortes de interés).
- Tomando en cuenta la falta de información para medir algunos de los puntos discutidos en la sección anterior, no puede determinarse cual de las variables tiene la mayor influencia sobre los rendimientos obtenidos y las desviaciones respecto a la data real.
- La metodología usando los Factores de Calidad de Fraccionamiento no reproduce la realidad operacional dentro del margen de desviación establecido.
- Es de suma importancia determinar de forma precisa la alimentación a las unidades de destilación con el objetivo de determinar puntos de corte que reproduzcan con mayor exactitud los rendimientos reales.
- La variación de las proporciones de la mezcla para el crudo L26 no garantiza la reproducibilidad de los rendimientos manteniendo el API deseado utilizando el esquema de corte actual.

7 RECOMENDACIONES

- Solicitar a Puerto Miranda la generación de reportes con la formulación utilizada para la mezcla L26 que se envía a la Refinería de Cardón.
- En vista de las diferencias en los rendimientos del corte de gases, se recomienda revisar la instrumentación, balances de materia y calidad de los crudos procesados.
- Para estudios posteriores verificar la agregación de nafta a la mezcla que conforma el crudo CPG L26.
- Monitorear con cierta regularidad la alimentación a la unidad CD4, haciendo el muestreo en la línea a la salida del tanque, con una evaluación de crudos completa que contemple las destilaciones A.S.T.M. Esto permitiría eliminar la fuente de error asociada a los ensayos de crudo y generar insumos para evaluar otras vías complementarias con este trabajo, como el uso de simuladores rigurosos.
- Realizar análisis rutinarios a las corrientes de destilación basados en curvas de destilación A.S.T.M D-86 y 1160, con el objetivo de generar data histórica de estos cortes. Esto permitiría evaluar el cálculo de Swing Cut aplicando otra metodología.
- Revisar las etapas de separación en la columna para descartar problemas físicos en la separación Gasóleo Pesado-Residuo Largo.
- Implantar la metodología de *Swing Cut* en los modelos de Programación Lineal del circuito de refinación de PDVSA a fin de mejorar la representación de los rendimientos en las unidades de destilación.

- Evaluar el comportamiento de los factores de calidad de fraccionamiento LFQ y HFQ en refinerías que procesen una dieta de crudos estable.
- En una próxima parada de planta, evaluar la posibilidad de efectuar un Test Run de la unidad atmosférica 4, con la finalidad de estudiar la facilidad de PAssMan CUC Recut Option y comparar los resultados con los obtenidos en este estudio.

8 BIBLIOGRAFÍA

1. Corpoven Filial de Petróleos de Venezuela. **Economía de Refinación**. Tomo I. Venezuela, octubre 1997.
2. GARY, J. H.G. E. HANDWERK. **Refino de Petróleo**. Editorial Reverté, S.A. España 1980.
3. PDVSA Centro Internacional de Educación y Desarrollo. **Caracterización y Evaluación de Crudos**. Paraguaná Noviembre 1992.
4. PDVSA, **Seminario de Actualización de Refinación**. Diciembre 1999.
5. Wuithier, R. **Refino y Tratamiento Químico**. Tomo 1. Editorial CEPISA. Madrid, 1971.
6. LOPEZ, Miguel. Fernández N. **Taller de Potencialidad de Crudos**, Departamento de Refinación, sección de Procesos de Separaciones Físicas. Noviembre 1992.
7. ARAGÚÉS, M, SARLI, G. **Simulación de Crudos a Procesar en el Complejo Refinador de Venezuela**, Venezuela 1999.
8. RUIZ, L. **Migración Base de Datos de Crudos Propios a PAssMan V. 4.0**. Venezuela 2000.
9. GONZALEZ, Manuel. **Informe de Asignación en la Refinería de Amuay Lagoven, S.A.**. INT-STE-00384,96.

10. GONZALEZ, Manuel. **Curvas de Metales Vs Puntos de Corte para las Unidades de Destilación al Vacío CRP**. INT-06704,99.
11. BLANCO A. **Informe sobre el Estudio de Puntos de Corte en PVAY-3/4/5**. INT-03019,89.
12. BELLET A. **CPE™ Cut Point and Efficiency Distillation Software**. Visión Tecnológica Vol. 5 N° 1, 1997. PDVSA-Intevep.
13. WATKINS, R. N. **Petroleum Refinery Distillation**. Segunda Edición. USA, 1979.
14. Aspen Technology, Inc. **PAssMan User's Manual Version 4.0**. USA. 2000.
15. GUTIERREZ, Mariela, CASTAÑO Patricia. **Manual Comité Rendimientos 1998**. Crudos Venezolanos Volumen II. PDVSA.
16. Crudos Venezolanos Vol. I, II, III y IV. PDVSA Manufactura y Mercadeo. Manual de Comité Rendimientos 1998.
17. Crudos Foráneos Vol. I, II, III y IV. PDVSA Manufactura y Mercadeo. Manual Comité Rendimientos 1998.

APÉNDICES

9 CARACTERIZACIÓN DE CORTES DE HIDROCARBUROS

9.1 MÉTODOS DE DESTILACIONES EN EVALUACIONES DE CRUDO^(1,4,5)

Los métodos analíticos que se utilizan para efectuar las destilaciones en Evaluaciones de crudos son:

9.1.1 DESTILACIÓN EN COLUMNA DE 15 PLATOS TEÓRICOS

Diferentes procedimientos de análisis han sido desarrollados para la realización de evaluaciones de crudo, sin embargo, todos los procedimientos se basan en el fraccionamiento del crudo en columnas de destilación por carga, las cuales permiten la separación de hidrocarburos de acuerdo a sus volatilidades (puntos de ebullición). Esta destilación conocida como TBP (True Boiling Point), es estandarizada con el método ASTM D-2892, el cual recomienda el uso de columnas de 25 a 50 mm de diámetro con 15 platos teóricos.

De esta manera el crudo es separado en fracciones de la siguiente manera:

Se contempla la destilación batch de una muestra de crudo (de presión de vapor Reid máxima de 12 psi), utilizando una carga de crudo comprendida entre 0.5 y 30 litros y se trabaja en una columna fraccionadora con una eficiencia comprendida entre 14 y 18 platos teóricos o su equivalente en relleno a reflujo total.

Esta columna opera con una relación de reflujo 5:1 para todas las presiones de operación, excepto cuando se trabaja a la presión mínima de 2 mmHg en la que la relación de reflujo es de 2:1. Se destila la muestra hasta una temperatura máxima de

400°C AET (Temperatura Atmosférica Equivalente) ya que por lo general a temperaturas superiores a presión atmosférica el crudo se descompone.

Este proceso puede ser aplicado a cualquier mezcla de petróleo, pero no a las fracciones de destilado. Este método permite el trazado de curvas de temperaturas de destilación en función del porcentaje en volumen o en peso de destilado (Curvas TBP), obteniéndose una curva similar a la presentada en la *Figura 20*.

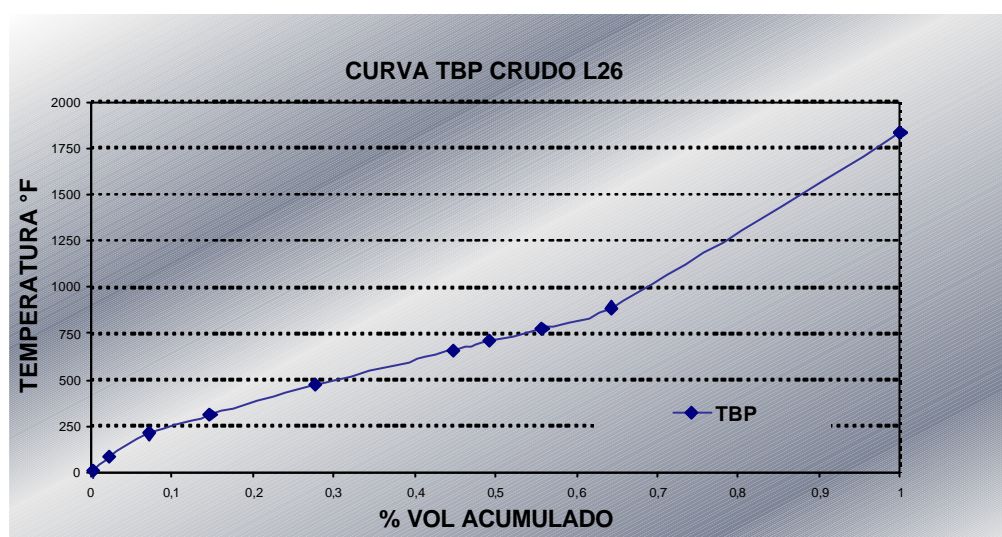


Figura 20

Curva True Boiling Point del Crudo L26

9.1.2 MÉTODO ESTÁNDAR PARA LA DESTILACIÓN DE PRODUCTOS DEL PETRÓLEO ASTM D-86

Este método contempla la destilación batch de las fracciones de destilación atmosférica exceptuando los residuos largos y de otros productos del petróleo tales como gasolinas de motor y de aviación entre otros.

Para este ensayo se utiliza una muestra de 100 ml y se trabaja con una columna de un solo plato teórico a presión atmosférica. En este caso no se tiene ninguna limitación de temperatura de fondo ya que se trabaja con fracciones destilados, se efectúan observaciones sistemáticas de las lecturas termométricas y de los volúmenes de condensado recogido y a partir de estos datos, se calculan y se publican los resultados del ensayo. No se emplea para productos que puedan craquear en destilación atmosférica ($PEF < 380\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Este método permite el trazado de curvas de destilación en función del porcentaje en volumen o en peso (Curvas ASTM).

9.1.3 DESTILACIÓN A PRESIONES REDUCIDAS ASTM D-1160

Al lograr la máxima temperatura de destilación en la columna de 15 platos teóricos, el residuo remanente se destila en un equipo de destilación de vacío que permite alcanzar presiones inferiores de 1 mmHg, para obtener los cortes que destilan hasta una temperatura de aproximadamente $566\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1050\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Este ensayo permite evaluar residuos atmosféricos, destilados de vacío y residuos de vacío ya que estos se descomponen a ser destilados a presiones atmosféricas. En este caso se trabaja en condiciones operativas que aproximadamente producen el fraccionamiento correspondiente a un plato teórico. La muestra se destila a una presión prefijada y exactamente controlada (presiones absolutas entre 50 y 1 mmHg) (ver *Figura 2I*).

En este caso existe una limitación de temperatura de fondo ya que se trabaja con una temperatura prefijada según lo indique la norma, que por lo general es un máximo de 400°C .

9.1.4 DESTILACIÓN SIMULADA

Destilación simulada es el término utilizado para designar los resultados obtenidos por cromatografía de gases, equivalentes a los calculados por destilación analítica. El método se fundamenta en que los hidrocarburos ebulen en columnas cromatográficas no-polares de acuerdo a sus puntos de ebullición.

La destilación simulada es una técnica muy ventajosa para determinar la curva TBP de un crudo hasta temperaturas de ebullición de 538 °C (1000 °F), obteniéndose muy buena correlación con la Destilación de 15 platos teóricos (A.S.T.M. D-2892), además requiere menor cantidad de muestra que la destilación ASTM D-2892 y requiere menor cantidad de tiempo.

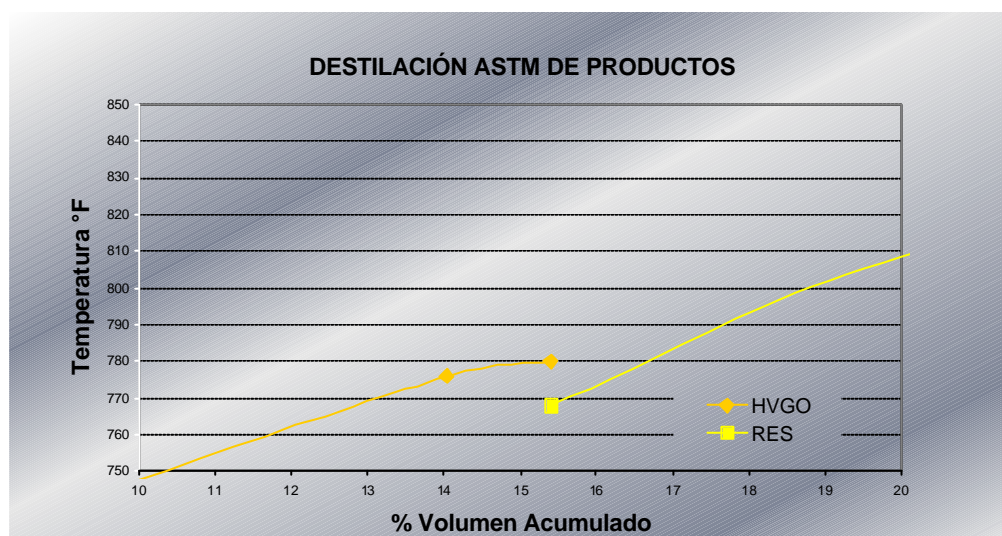


Figura 21

Curva ASTM D-1160 para las Fracciones Pesadas

Las curvas de destilación D-86, D-1160 y la destilación simulada, correlacionan bastante bien con la curva TBP (A.S.T.M. D-2892), pudiéndose reconstruir con bastante precisión la curva continua de destilación del crudo.

ANEXOS

Anexo I

Tabla A-1

Mapa de Cortes (CutMap.xls)

*TABLE MAPCD4		CRUDE CUTTING MAP										
*												
*		ARCHIVO: MAPCD4-AV2.XLS										
*												
*		MODO DE OPERACIÓN MAXIMIZACIÓN DE KEROSENE										
*												
*												
		TEXT	PROP	VALUE	FVT	LFQ	HFQ	WGT	SPG	SUL	ABP	RVP
*												
C4N	BUTANO C4-			90			1	1	1			
TP1	TOPS (NAFTA LIV)			230	1	1	1	1	1	1	1	1
LN1	NAFTA COR			311	1	1	1	1	1	1	1	1
HN1	KEROSEN			469	1	1	1	1	1	1	1	
LD1	GASOIL LIVIANO			543	1	1	1	1	1	1	1	
HD1	GASOIL PESADO			667	1	1	1	1	1	1	1	
RL1	RESIDUO LARGO			9999	1		1	1	1	1		
*												

Anexo II

Tabla A-2

Actualización de Propiedades Librería de Crudos PAssMan Ver 4.0

PROPIEDAD	TAG	MEZCLA	METODO	INDICE DE MEZCLA	FORMULA DEL INDICE	FORMULA CALCULO	RANGO °F		BOUNDS		GRADIENTE	EXTRAPOLACION	OBSERVACIONES	ALCANCE
							MIN	MAX	MIN	MAX				
Gravedad Especifica	SPG	Volumen	ASTM D70-82(90)	N/A	N/A	N/A	N/A	-	-	-	-	-	Su comportamiento esta definido en PAssMan por default	Todos los cortes.
Azúfre, %wt	SUL	Peso	ASTM D152-95/2622-94	N/A	N/A	N/A	-242	1832	0%	100%	Crece	Curve	Whole crude property	Todos los cortes.
K Factor	KFC	Volumen		N/A	N/A	(ABP+446)*(1/3)/SPG	20	1832	No unit	No unit	No presenta un comportamiento definido	Curve	Puede utilizarse la formula, en vez de importar el valor.	Aplica generalmente al crudo, naftas y gasoleos de vacío.
Average Boiling Point °F	ABP	Volumen	-	N/A	N/A	Para D-86 ABP= $((T10+2*T50+T90)/4)*2$ Para D-1140 es directamente T50	20	1832	-	-	Crece	Curve	En la librería de comite se calcula como un promedio de las temperaturas de recuperación desde T10 hasta T90	Todos los cortes.
RON	RON	Volumen	ASTM D 2695-97	N/A	N/A	N/A	20	400	0	150	Decrece	Curve	Realmente no mezcla lineal pero es una buena aproximación. Puede ser estimado conociendo el valor de MON para cada fracción	Gasolinas de motor, no aplica a gasolinas oxigenadas.
MON	MON	Volumen	ASTM D2700-95revA	N/A	N/A	N/A	20	400	0	150	Decrece	Curve	Puede ser estimado conociendo el valor de RON para cada fracción	Gasolinas de motor y aviación, no aplica a gasolinas oxigenadas.
RON + 3 cc. Tetralgal	R30	Volumen	-	N/A	N/A	N/A	20	400	0	150	Decrece	Curve	Puede ser estimado a partir del RON sumandole 25	-

MON + 3 cc Talgal	M30	Volumen	-	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	20	400	0	150	Decrece	Curve	Puede ser estimado a partir del MON sumándole 20	-
Reid Vapor Pressure, psi	RVP	Uso de Índice	ASTM D323-94	N/A	RVI	RVP-1.25	-	-	20	400	0	100	Decrece	Curve	Esta propiedad no mezcla lineal en peso en volumen se tienen buenas aproximaciones; por lo cual se recomienda el uso del índice de mezcla.	Gasolinas crudas volátiles. No aplica a GLP (Naltas-Kero)
Reid Vapor Pressure Index	RVI	Volumen	-	N/A	RVI	N/A	N/A	N/A	20	700	0	-	Decrece	Curve	-	-
Naphthenes, %vol	NAP	Volumen		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-292	700	0%	100%	-	Curve		NaltasKero
Aromatics, %vol	ARO	Volumen		N/A	N/A	N/A	-	-	-292	700	0%	100%	Crece	Curve		NaltasKero
Naphth. + Aromat, %vol	NPA	Volumen		N/A	N/A	N/A	NAP+ARO	N/A	30	1832	0%	100%	-	Curve		NaltasKero
Naphth. + 2 Aromat, %vol	N2A	Volumen		N/A	N/A	N/A	NAP+2*ARO	N/A	30	1832	0%	200%	-	Curve		NaltasKero
Oléfinas, % vol	OLF	Volumen		N/A	N/A	N/A	-	-	20	925	0%	100%	Crece	None		NaltasKero
Aniline Point, °F	ANI	Peso	ASTM D611-82(93)	ANB	ANB	N/A	N/A	N/A	20	1832	34	-	VER OBS	Curve	Tendencias: Parafinico-> Crece Naltinico-> La tendencia se invierte en los cortes más livianos. Mezcla linealmente en volumen utilizando el índice de mezcla.	Productos del petróleo y solventes; (HNA-VGO)

Aniline Point Index	ANB	Volumen	-	N/A	ANB-EXP(0.00652*ANU)	N/A	20	1832				Cuве	-		-
Flash Point, °F	FLS	Uso de Índice	ASTM D56-97a ASTM D92-97 ASTM D93-97	FLI	10*(42.1093-14.2861*LOG(FLS+460))	N/A	300	1832	-459	-	Crece	Cuве			A partir de la nafta pesada, hasta el VGO.
Flash Point Index	FLI	Volumen	N/A	N/A	N/A	N/A	20	1832	0 No Unit	-	Decrece	Cuве			
Smoke Point, mm	SMK	Uso de Índice	ASTM D 1322-97	SMI	1/SMK	N/A	300	650	1mm	-	Decrece	Cuве		Crece de un corte a otro, depende de la naturaleza del crudo. Normalmente son valores negativos.	Kerosén y destilados.
Smoke Point Index	SMI	Volumen	N/A	N/A	N/A	N/A	20	1832	0 No Unit	-	-	Cuве			
Freezing Point, °F	FRZ	Uso de Índice	ASTM D2386-97	FRI	EXP(0.037*FRZ)	N/A	80	1832	-250°F	-	Crece	Cuве			Nafta pesada, Kerosén y destilados atm y vac.
Freezing Point Index	FRI	Volumen	N/A	N/A	N/A	N/A	20	1832	0 No Unit	-	-	None			
Naftalenos, % wt	NTL	Peso	ASTM D1840-96	N/A	N/A	N/A	68	1832	0 %	100%	Crece	Cuве			Combustibles de turbinas de aviación con FBP <315°C
Pour Point, °F	POR	Uso de Índice	ASTM D97-96a	PPI	EXP(73.0883+12.8852*LN(POR+460))	-	80	600	-250°F	-	Crece	Cuве		La extrapolación es sensible al número de puntos presentes en el ensayo	Crudos y fracciones (Kero) a excepción de las gasolinas
Pour Point Index	PPI	Volumen	N/A	N/A	N/A	N/A	80	1832	1 NIU	-	Crece	Cuве			

Celane Number	CBN	Volumen		N/A	-	-	-	150/20	1200	0	100	-	Curve	Kerosén
Celane Index	CTI	Volumen		N/A	-	-	-	150/20	1200	-	-	-	Curve	Kerosén
Viscosity @ 122 DEG. F. CST	V12	Uso de Índice	ASTM D-2161	VBI	41.10743-49.08258*(LOG(LOG(V12+0.9)))	-	-	80	1832	-	-	Crece	None	Aplica desde Nafta pesada hasta el residuo.
Viscosity Blend Index	VBI	Peso		-	-	-	-	80	1832	-	-	Discrece	Curve	*
V50	V50	Peso		-	-	-	-	80	1832	-	-	Crece	Curve	*
Nickel, ppm wt	NIK	Peso	PDVSA 400	N/A	N/A	N/A	N/A	450	1832	0 ppm	-	Crece	Fixed	Gasoleos de vacío, residuo largo, residuo corto y crudo.
Vanadium, ppm wt	VAN	Peso	PDVSA 400 / Si es mayor a 5ppm rayos X	N/A	N/A	N/A	N/A	450	1832	0 ppm	-	Crece	Fixed	Gasoleos de vacío, residuo largo, residuo corto y crudo.
Nitrogen, ppm wt	TNT	Peso		N/A	N/A	N/A	N/A	300	1832	0 ppm	-	Crece	None	Cortes de kerosene, gasoleos de vacío y residuo.
Conradson Carbon Res % wt	CON	Peso	ASTM D-189	N/A	N/A	N/A	N/A	450	1832	0%	100%	Crece	Curve	Gasoleos de Vacío y residuos.
Total Acid Number, mgKOH/g	ACD	Peso	ASTM D-664 ASTM D-97	N/A	N/A	N/A	N/A	20	1832	0 KOH	-	-	Curve	(Ker-End)

Asfaltenos, % wt	ASP	Peso	ASTMD-482IP 4	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	500	1832	0%	100%	Crece	Curve		Gasoleos y residuos
T 10% Volume Recovered	T10	-	ASTM D-86 ASTM D-116						80	1832			Crece			Todos los cortes.
T 30% Volume Recovered	T30	-	ASTM D-86 ASTM D-116						80	1832			Crece			Todos los cortes.
T 50% Volume Recovered	T50	-	ASTM D-86 ASTM D-116						80	1832			Crece		Una buena aproximación es dada por una mezcla lineal.	Todos los cortes.
T 70% Volume Recovered	T70	-	ASTM D-86 ASTM D-116						80	1832			Crece			Todos los cortes.
T 90% Volume Recovered	T90	-	ASTM D-86 ASTM D-116						80	1832			Crece			Todos los cortes.
Sodium, ppm wt	SOD	Peso		N/A	N/A	N/A			500	1832	0 ppm	-	VEROBS	Curve	Se relaciona con la cantidad de sal contenida en el crudo. El método es muy sensible a las interferencias debidas a los equipos de medición, por ese motivo no se tiene un comportamiento definido.	Codo y Residuo Atmosferico.

Anexo III

Tabla A-3

Comparación de Puntos de Corte para la Unidad CD4

Corte	Puntos de Corte °F			
	MO	MNO	Otros Desarrollos	Actuales
Gases	N/D	N/D	-	90
TOPS (NAFTA LIV)	N/D	N/D	144	230
NAFTA COR	N/D	N/D	257	311
KEROSEN	N/D	N/D	398	469
GASOIL LIVIANO	N/D	N/D	475	543
GASOIL PESADO	N/D	N/D	585	667
RESIDUO LARGO	N/D	N/D	585+	667+

N/D: Data no disponible.

Anexo IV

Tabla A-4

Comparación de Crudos Procesados en la Refinería de Cardón

CRUDO	MODO DE OPERACIÓN	COD CDN	CRUDOS INF CRP	CRUDOS MNO (ver. 10)	COD MNO
LAGOCINCO	LG5/PCN 1-1 KER	AA0	✓	✓	AA0
	LG5/PCN 1-2/3 K	AB0	✓	✓	AB0
	LG5/PCN 4-2/3 K	AK0	✓	✓	AK0
	LG5/PCN 2-2/3 K	AF0	✓	✓	AF0
LAGOMAR	LG5/PCN 2-1 KER	AE0	✓	✓	AE0
	LAGOMAR 2-1 KER	CE0	✓	✓	CE0
	LAGOMAR 1-2/3 K	CB0	✓	✓	CB0
	LAGOMAR 1-1 KER	CA0	✓	✓	CA0
LAGOTRECO	LAGOMAR 4-2/3 K	CK0	✓	✓	CK0
	CPG LGTOM 26 CD1/AV3	L26/CP1	✓	✓	CP1
	CPG LGTOM 26 CD3/AV3	CP3	✓	✓	CP3
	CPG LGTOM 26 CD4/AV2	CP4	✓	✓	CP4
	LGTRCO 1-2/3 K	DB0	✓	✓	DB0
	LG3CO MED 1-3 K	NB0	✓	✓	NB0
	LGTRCO 3-2/3 K	DH4	✓	✓	DH4
	LGTRCO 3-2/3 X-DSU	LTO	✓	✓	LTO
	LG3CO MED 3-3 K	N14	✓	✓	N14
	LG3CO MED 3-3 X-DSU	MMD	✓	✓	MMD
	LGTRCO 4-2/3 K	DK0	✓	✓	DK0
	LG3CO MED 4-2/3 K	NK0	✓	✓	NK0
GUAFITA BLEND	GUAF.B.CD1/AV2/3	GB1	✓	✓	GB1
	GUAF.B.CD4/AV2/4	GB4	✓	✓	GB4
TJL	TJL CD1/AV2-3	TJ1	✓	✓	TJ1
IRANIAN H	IRANIAN H 1-2/3 K	IH1	✓	✓	IH1
	IRANIAN H. 3-2/3 K	IH3	✓	✓	IH3
	IRANIAN H. 4-2/3 K	IH4	✓	✓	IH4
LAGOMEDIO	LGMEDIO 1-2/3 K	IB0	✓	✓	IB0
	LGMEDIO 4-2/3 K	IK0	✓	✓	IK0
ORIENTE	ORIENTE 1-2/3 K	OR1	✓	✓	OR1
	ORIENTE 3-2/3 K	OR3	✓	✓	OR3
	ORIENTE 3-2/3 K	ORD	✓	✓	ORD
	ORIENTE 4-2/3 K	OR4	✓	✓	OR4
STA BARBARA	STA.BARBARA 1-2/3 K	SB1	✓	✓	SB1
	STA.BARBARA 4-2/3 K	SB4	✓	✓	SB4
BASRAH	BASRAH 1-2/3 K	BA1	✓	✓	BA1
	BASRAH 4-2/3 K	BA4	✓	✓	BA4
LEONA	BASRAH EN CD2 LUBS	BA2	✓	✓	BA2
	LEONA 1-2/3 K	LE1	✓	✓	LE1
	LEONA 3/3 K EX-DSU	L3D	✓	✓	L3D
	LEONA 4-2/3 K	LE4	✓	✓	LE4
VASCONIA	VASCONIA 1-2/3 K	VA1	✓	✓	VA0
	VASCONIA 3-2/3 K	VA3	✓	✓	VA5
	VASCONIA 4-2/3 K	VA4	✓	✓	VA4
DZO	DZO EN CD1/AV3	DZ1	✓	✓	DZ1
	DZO VIA CD3/AV3	DZ3	✓	✓	DZ3
	DZO CD4/AV2	DZ4	✓	✓	DZ4
CUSIANA	CUSIANA 4-2/3	CU4	✓	✓	CU4
	CUSIANA 1-2/3	CU1	✓	✓	CU1
LAGUNA BLEND	LAGUNA BLEND CD3/3	LG3	✓	✓	LG3
ZUATA	ZUATA 16 CDN CD3/3	ZU3	✓	✓	ZU3
BACHAQUERO	BQS 3-3 K	SO4	✓	✓	SO4
	BQS 3-3 X-DSU	BQD	✓	✓	BQD
	BQS AV3	BAC	✓	✓	BAC
	BQS AV3 X-DSU	BQV	✓	✓	BQV
BOSCAN	BOS14 SIN/DES.CD3/AV3	B14	✓	✓	B14
	BOS14 X DSU CD3/AV3	BOD	✓	✓	BOD
	BOSCAN 14 X DSU AV3	BOV	✓	✓	BOV
LAGUNA	LAGUNA (dil) CD3/AV3	UOA	✓	✓	UOA
MEREY	MEREY 3/3 K	MRY	✓	✓	MRY
TJP	TJP AV3	TOA	✓	✓	TOA
RESIDUALES	R.L. PLC AV2/3	PLZ	✓	✓	PLZ
	2RL X-INV AV2/3	RQK	✓	✓	RQK
	RL RUSO AV2/3	RCP	✓	✓	RCP
SINTETICO	EST SINCRUDE 3-2/3 K	SIC	✓	✓	SIC

Anexo V

Tabla A-5

Análisis Rutinarios para las Corrientes en la Unidad CD4

CD4	Corriente	Análisis
	Nafta Tops	RVP
	Nafta Cor	Destilación
	Kerosén	Inflamación Congelación
	Gasoil Liviano	Fluidez
	Gasoil Pesado	Destilación
	Crudo*	Gravedad API Sales Azufre

* Análisis realizados para la certificación de los tanques que contienen el crudo L26 que va a la unidad CD4.

Anexo VI

Tabla A-6

Mapa de Cortes incluyendo los Swing Cut*

* TABLE CUTMAP CD4 VALIDATION				CRUDE CUTTING MAP					
* ARCHIVO: MAPCD4 VALIDATION.XLS									
* TEXT									
		FVT	WGT	1 SPG	2 SUL	3 ABP	4 160	5 200	6 RON
C4N	GASES	97	1	1					
TP1	TOPS (NAFTA LIV)	190	1	1	1	1	1	1	1
SC1	SWING CUT TOPS-COR	252	1	1	1	1	1	1	1
LN1	NAFTA COR	334	1	1	1	1	1	1	1
SC2	SWING CUT COR-KER	409	1	1	1	1	1	1	1
HN1	KEROSEN	508	1	1	1	1			
SC3	SWING CUT KER-GOL	550	1	1	1	1			
LD1	GASOIL LIVIANO	610	1	1	1	1			
SC4	SWING CUT GOL-GOP	654	1	1	1	1			
HD1	GASOIL PESADO	691	1	1	1	1			
RSD	RESIDUO LARGO	9999	1	1	1	1			

* Puntos de corte basados en los promedios obtenidos del período Julio-Octubre del 2001.

Anexo VII

Tabla A-7

Mapa de Cortes Incluyendo los Factores de Calidad de Fraccionamiento*

* TABLE CUTMAP CD4 VALIDATION		CRUDE CUTTING MAP									
* ARCHIVO: MAPCD4 VALIDATION.XLS											
* TEXT		FVT	LFQ	HFQ	WGT	SPG	SUL	ABP	160	200	RON
C4N	GASES	90		0,84	1	1					
TP1	TOPS (NAFTA LIV)	230	0,39	0,51	1	1	1	1	1	1	1
LN1	NAFTA COR	311	0,79	0,66	1	1	1	1	1	1	1
HN1	KEROSEN	469	0,67	0,76	1	1	1	1			
LD1	GASOIL LIVIANO	543	0,49	0,64	1	1	1	1			
HD1	GASOIL PESADO	667	0,50	1,00	1	1	1	1			
RSD	RESIDUO LARGO	9999	0,95		1	1	1	1			

* Puntos de corte y Factores de Calidad de Fraccionamiento basados en los promedios obtenidos del período Julio-Octubre del 2001.