

**SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROCESO DE MEZCLADO DE UN
SISTEMA CRUDO-BUTANO-GASOLINA NATURAL PARA EL
APROVECHAMIENTO DE PRODUCTOS BLANCOS.**

**LAURA CRISTINA GARCÍA DELGADO
PAOLA CATALINA DE LA PEÑA ALDANA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2014

**SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROCESO DE MEZCLADO DE UN
SISTEMA CRUDO-BUTANO-GASOLINA NATURAL PARA EL
APROVECHAMIENTO DE PRODUCTOS BLANCOS.**

**LAURA CRISTINA GARCÍA DELGADO
PAOLA CATALINA DE LA PEÑA ALDANA**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director

Ing. Erik Giovany Montes Páez

Codirector

Ing. Jorge Luis Angarita Rubio

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

A Dios, quien me permitió subir un peldaño más en esta aventura que es mi vida. A quien le debo el milagro de existir y quien me permitió conocer a seres maravillosos durante estos años

A mis padres, Nancy y Ludwíng, que siempre estuvieron para mí, apoyándome y alentándome sin importar cual fuese la situación o lo que se tuviese que hacer. Gracias por la disciplina inculcada desde temprana edad y que hoy día continúa como base de mis sueños y proyectos. A tí papá por ser mi superhéroe y alcahueta favorito, por cada abrazo, palabra y consejo, por brindarme esa confianza y apoyo incondicional.

A tí mamá por darme todo por mi hermano y por mí, por creer totalmente en mí y en mis capacidades, por los valores inculcados y por el amor demostrado en cada acción, palabra y sonrisa.

A mi vida chiquita, mi hermano Ludwíng Javier, quien a su manera siempre me demostró su amor y su apoyo, ese ser que siempre espera lo mejor de mí.

A mis amigos incondicionales durante estos 5 años de estudio, en especial a Anny e Iván... Siempre ahí soportándome, escuchándome y dándome ánimo. Gracias. Los quiero mucho y les deseo infinitas bendiciones y éxitos, en esta aventura llamada vida.

A Jorge, quien me enseñó que "Todo empieza cuando el milagro se hace posible", quien confió en mí y me brindó una amistad sincera, a quien hoy por hoy puedo decirle: La "chiqui" se creció.

A mis exoditos, esos terremóticos llenos de luz y alegría; esos pequeños que con un abrazo y una sonrisa le ponían color a mi vida y convertían un gran problema en un reto.

A todos los que de alguna forma hicieron parte de este sueño ya sea con una palabra de aliento, con el suministro de información y muestras a utilizar en las pruebas o simplemente con su presencia en los meses definitivos de este sueño infinitas gracias y que Dios los bendiga.

Laura Cristina García Delgado

DEDICATORIA

Mi gratitud a Dios que me hizo capaz de alcanzar grandes logros, y quien fue mi guía y compañía en cada momento de este camino. Por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres Fanny Aldana y Oscar De La Peña, por ser el pilar más importante y por demostrarme su cariño y apoyo incondicional. Por ser la razón de lucha y coraje para continuar a pesar de los obstáculos que se presentaron. A ellos mi inmensa gratitud por formarme con buenos hábitos y valores, los cuales me han ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mi hermano Camilo De La Peña y mi prima "Tata" que siempre han estado junto a mí, brindándome su apoyo, y ser también una razón más de felicidad. Por todos sus consejos y por convertirse en ocasiones unos segundos padres.

Mi amor eterno y profundo respeto a mi familia en general que me enseñó todo lo necesario para ser una persona de bien. Gracias por el apoyo, por la paciencia y el amor.

A cada uno de mis amigos, quienes con su ayuda, cariño y comprensión han sido parte fundamental de mi vida. Por todos los momentos compartidos en los cuales me demostraron el verdadero significado de una buena amistad y convertirse en mi segunda familia.

A todas aquellas personas que con su conocimiento y ayuda aportaron al desarrollo y finalización de este trabajo. A todos sencillamente gracias, por ser un gran apoyo y por creer en mí.

Catalina de La Peña Aldana

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, el alma máter donde nos permitimos adquirir los conocimientos que hoy contribuyen a la realización de este proyecto. A los profesores de la Escuela de Ingeniería de Petróleos por el conocimiento y experiencias compartidas a lo largo de estos años.

A Petrosantander (Colombia) INC. Por permitirnos hacer parte de este proyecto y brindarnos el soporte y asesoría necesarias para el cumplimiento de los objetivos planteados.

Al Ing. Erik Giovany, docente de Facilidades de Superficie de la Escuela de Ingeniería de Petróleos, director de este proyecto por su apoyo, asesoría y colaboración durante este tiempo.

Al Ing. Jorge Luis Angarita Rubio, Líder de Ingeniería en PetroSantander (Colombia) INC. Y codirector del proyecto por brindarnos directrices útiles para la correcta ejecución del proyecto, al igual que su respaldo en cada aspecto a evaluar.

A Nelson Suluaga, por su invaluable ayuda y dedicación durante el desarrollo de las pruebas experimentales. Por la paciencia y horas de trabajo invertidas para el cumplimiento de los objetivos trazados para este proyecto.

Al Grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos (GMPH) de la Universidad Industrial de Santander, por permitir espacios para la investigación y el desarrollo de actitudes y aptitudes de aquellos que hacemos parte de él.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.1. CARACTERÍSTICA DE LA PRODUCCIÓN.....	20
1.2. SITUACIÓN CONTRACTUAL.....	20
1.3. CONDICIONES ACTUALES	23
1.3.1. CONSIDERACIONES DEL ANÁLISIS.....	24
1.3.2. TANQUES DE ALMACENAMIENTO	26
2. CLASIFICACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS.....	31
2.1. COMPORTAMIENTO DE FASES	36
2.2. MEZCLAS.....	37
2.3. REGLA DE LAS MEZCLAS.....	39
2.3.1. Reglas Aleatorizadas.....	39
2.3.2. Reglas No aleatorizadas	41
2.4. EQUILIBRIO DE FASES	41
2.4.1. Potencial Químico	44
2.4.2. Fugacidad.....	46
2.4.3. Actividad	48
2.5. DIAGRAMA PSEUDOTERNARIO.....	51
2.5.1 Miscibilidad.....	53
2.5.2. Tension Interfacial.....	54
2.6. PROCESOS DE DESPLAZAMIENTO MISCIBLE	55
2.6.1. Miscibilidad al Primer Contacto.....	55
2.6.2. Miscibilidad por Múltiples Contactos	55
2.6.3 Contacto Directo de Fases Miscibles.....	57
2.6.4 Difusión Molecular.....	58
2.6.5 Difusividad en Líquidos	59
3. PARAMETROS DE LA SIMULACION	60

3.1.	DISEÑO EXPERIMENTAL	61
3.2.	INFORMACIÓN TERMODINÁMICA DE LAS CORRIENTES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO	65
3.3.	INFORMACION DE LAS COMPOSICIONES DE LOS TRES TIPOS DE CRUDO, BUTANO Y GASOLINA NATURAL	66
3.4.	CONSIDERACIONES.....	68
3.5.	DESCRIPCION DEL PROCESO	69
3.6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	73
4.	PRUEBAS LABORATORIO.....	80
4.1.	MONTAJE EXPERIMENTAL.....	80
4.2.	PROCEDIMIENTO	82
4.2.1.	Paso a Paso.....	83
4.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	89
5.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	104
5.1.	AJUSTE DE LA E.O.S.....	111
6.	CONCLUSIONES.....	121
7.	RECOMENDACIONES	124
	BIBLIOGRAFÍA.....	127
	ANEXOS.....	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pozo con inyección de Butano	22
Figura 2. Techo con tanque fijo.....	28
Figura 3. Tanque de techo flotante	30
Figura 4. Tanque sin techo	30
Figura 5. Tanque Esférico	31
Figura 6. Clasificación de los hidrocarburos.....	33
Figura 7. Alcano	34
Figura 8. Alqueno	34
Figura 9. Alquino	35
Figura 10. Cicloalcanos-Naftenos	35
Figura 11. Aromáticos- Benceno.....	36
Figura 12. Diagrama Pseudoternario	52
Figura 13. Influencia de la presión en diagrama pseudoternario	52
Figura 14. Influencia de la temperatura en diagrama pseudoternario	53
Figura 15. Miscibilidad entre crudo y LGN.	54
Figura 16. Miscibilidad al primer contacto	56
Figura 17. Miscibilidad a múltiples contactos	57
Figura 18. Pruebas aleatorias Mezcla Crudo-Gasolina-Butano	62
Figura 19. Esquema proceso de mezclado propuesto a escala de campo	72
Figura 20. Gravedad API influenciada por composición crudo mediano según Hysys	77
Figura 21. RVP influenciado por composición de crudo mediano según Hysys ...	78
Figura 22. Análisis Final crudo mediano según Hysys.....	79
Figura 23. Cilindro Aforado Para Desarrollo de Prueba	84
Figura 24. Elementos utilizados para realizar las pruebas.....	85
Figura 25. Adición del crudo al cilindro.	87
Figura 26. Mezcla Petróleo-Gasolina-Butano.....	88

Figura 27. Medidor de presión de vapor	89
Figura 28. Medición de RVP	90
Figura 29. Medición API	91
Figura 30. Análisis Gravedad API	93
Figura 31. Contornos de superficie de respuesta API.....	94
Figura 32. Análisis RVP	96
Figura 33. Contorno de superficie de respuesta RVP.....	97
Figura 34. Análisis Crudo Mediano	99
Figura 35. Comparación Gravedad API entre Hysys y Laboratorio.....	109
Figura 36. Comparación RVP entre Hysys y Laboratorio.....	110
Figura 37. Comparación para crudo mediano entre Hysys y Laboratorio	111
Figura 38. Error absoluto de API para los diferentes paquetes de fluidos	113
Figura 39. Ajuste por Densidad.....	117
Figura 40. Ajuste API	118
Figura 41. Ajuste RVP.....	119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del crudo y tuberías	25
Tabla 2. Resultados Número de Reynolds de las líneas.	25
Tabla 3. Restricciones para cada uno de los componentes.	63
Tabla 4. Diseño experimental arrojado por Statgraphics.	64
Tabla 5. Matriz de correlación	65
Tabla 6. Condiciones Operación de Almacenamiento.....	66
Tabla 7. Condiciones de Operación Bombas Reforzadoras.....	66
Tabla 8. Composición corriente de Butano.....	67
Tabla 9. Composición corriente de Gasolina natural	68
Tabla 10. Composición Crudo pesado (12,2 °API), Crudo mediano (29,19 ° API) y Crudo liviano (36,06 ° API)	71
Tabla 11. Condiciones óptimas mezcla crudo mediano	74
Tabla 12. Resultados obtenidos para crudo 29,19 API mediante ASPEN HYSYS	75
Tabla 13. Pruebas en blanco.....	83
Tabla 14. Resultados obtenidos para crudo de 29° API	92
Tabla 15. Tabla ANOVA API Crudo Mediano	95
Tabla 16. Tabla ANOVA RVP Crudo Mediano	97
Tabla 17. Condiciones de Mezcla Estable.....	100
Tabla 18. Pérdidas por evaporación en crudo mediano	101
Tabla 19. Pérdidas por Miscibilidad.....	102
Tabla 20. Composiciones de mezcla según ejecución	105
Tabla 21. Margen de Error entre Hysis y las pruebas de Laboratorio	106
Tabla 22. Proporciones de mezcla para cada componente.....	107
Tabla 23. Condiciones óptimas mezcla crudo mediano.	108
Tabla 24. Ajuste de la E.O.S.	115
Tabla 25. Error Relativo.....	120
Tabla 26. Ajuste de Presión y Temperatura Crítica	120

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. SIMULACION DE PROCESOS – ASPEN HYSYS CRUDO PESADO	131
ANEXO B. SIMULACION DE PROCESOS – ASPEN HYSYS CRUDO LIVIANO	137
ANEXO C. PRUEBAS EXPERIMENTALES REALIZADAS CRUDO PESADO ...	142
ANEXO D. PRUEBAS EXPERIMENTALES CRUDO LIVIANO	148
ANEXO E. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE HYSYS Y LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	155

RESUMEN

TITULO: SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROCESO DE MEZCLADO DE UN SISTEMA CRUDO-BUTANO-GASOLINA NATURAL PARA EL APROVECHAMIENTO DE PRODUCTOS BLANCOS.

AUTORES: LAURA CRISTINA GARCÍA DELGADO
PAOLA CATALINA DE LA PEÑA ALDANA**

PALABRAS CLAVE: Procesamiento del gas natural, líquidos del gas natural, Simulación de procesos, Mezcla estable, Optimización

DESCRIPCIÓN: Las diferentes aplicaciones que pueden darse a los productos obtenidos del procesamiento del gas natural incluyen su aprovechamiento como combustible en procesos industriales, materia prima en la producción de productos petroquímicos y en algunas ocasiones son utilizados como compuestos de mezclas para gasolinas.

En este proyecto se evalúa la viabilidad técnica de la implementación del butano y la gasolina natural como componentes de una mezcla estable con crudo con el objetivo de darle un enfoque adicional al aprovechamiento de la producción de estos productos blancos con la consecuencia de mejorar la calidad de los crudos con los cuales se realiza la mezcla. Actualmente el butano es vendido como líquido a terceros por parte de la empresa operadora.

Este estudio incluye un análisis a propiedades de la mezcla como la gravedad API y el RVP, las cuales permiten evaluar el efecto del butano y la gasolina sobre la calidad y estabilidad del crudo final, teniendo en cuenta varios escenarios.

A través de este estudio, se evalúan las pérdidas por evaporación y miscibilidad sufridas por la mezcla en cada una de las pruebas realizadas con el fin de tener idea de que tan volátil y estable será el comportamiento de la mezcla para su posterior transferencia de custodia.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Erik Giovany Montes Páez. Codirector: Jorge Luis Angarita Rubio.

ABSTRACT

TITLE: SIMULATION AND VALIDATION OF MIXING PROCESS AN OIL-BUTANE-NATURAL GASOLINE FOR THE USE OF WHITE PRODUCTS.*

AUTHORS: LAURA CRISTINA GARCÍA DELGADO
PAOLA CATALINA DE LA PEÑA ALDANA**

KEYWORDS: Natural gas Processing, Natural gas liquids, Process Simulation, Stable Mixture, Optimization

DESCRIPTION: The different applications that can be given to the products from natural gas processing include its use as fuel in industrial process, feedstock in petro-chemical industry and sometimes are used as compounds of gasoline blends.

This project evaluates the technical feasibility of the implementation of butane and natural gasoline as compound of a stable mixture with oil in order to give additional focus to the use of the production of these white products with the result of improving quality of oils which the mixture is made. Currently, butane is sold as liquid by the operator company.

This paper include an analysis of properties such as API gravity and RVP (Reid Vapor Pressure), which allow to evaluate the effect of butane and gasoline on the quality and stability of final oil, considering various scenarios.

Through this study, will be evaporation and miscibility losses suffered by the blend in each of tests in order to get an idea of how volatile and stable will be the behavior of the blend for later transfer of custody.

* Degree Work

** Physical-Chemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Directors: Petroleum Engineer Erik Giovany Montes Páez. Co-Director: Engineer Jorge Luis Angarita Rubio.

INTRODUCCIÓN

En los comienzos de la actividad petrolera la extracción y comercialización del gas natural no era del todo atractiva para las empresas operadoras que centraban sus esfuerzos en el aprovechamiento del hidrocarburo líquido, el cual se postulaba como el recurso energético más importante de todos los tiempos.

Sin embargo, y con el transcurrir de los años la necesidad de aumentar la cantidad de fuentes energéticas para satisfacer la alta demanda ha llevado a la explotación y producción de recursos antes no contemplados y a la búsqueda de nuevas alternativas de optimización de los ya existentes. Dentro de esas nuevas formas se incluye el gas natural en conjunto con los productos obtenidos a partir de su procesamiento.

El reto que día a día enfrentan las compañías operadoras del sector de los hidrocarburos se centra en maximizar sus dividendos mediante la optimización de los procesos referentes a la extracción, producción, refinación y transporte de este recurso energético, sin embargo la incursión de nuevas tecnologías en la industria dificulta el crecimiento económico de algunos sectores, generando como resultado la búsqueda de formas alternativas para estar a la altura de estas nuevas formas de producción y así competir de una manera más directa.

En la actualidad, las expectativas de Colombia comprenden el convertirse en un país capaz de abastecer la demanda energética creciente día a día. El cumplimiento de esta meta tiene sus bases en las reservas probadas con las que se contaban a finales de 2012 las cuales equivalían a¹ 5,5 Terapias cúbicos (TPC) así como con el índice de abastecimiento del país, según el cual se contaría con gas natural para aproximadamente 15 años siempre y cuando se mantenga

¹ Statical Review of World Energy 2013. BP. www.bp.com

estable el ritmo de producción y consumo del recurso, según lo expresó la Asociación Colombiana de Gas Natural (Naturgas).

Al evaluar el mercado actual de los hidrocarburos, se hace visible que aunque día a día la producción y consumo del gas va en aumento, el crudo es el hidrocarburo preferente y que domina el planeta, no solo económicamente hablando sino en las formas de optimizar su extracción. Es por esto que la inclusión del butano y la gasolina en el crudo para su transferencia y posterior almacenamiento abre una puerta para un mayor consumo de los productos blancos obtenidos a partir del procesamiento del gas otorgando con esto un valor agregado a este hidrocarburo gaseoso en el mercado actual, teniendo en cuenta además que éste es un recurso limpio y amigable con el medio ambiente.

A través de este estudio, se busca evaluar las condiciones óptimas y bajo las cuales es posible obtener una mezcla estable crudo-butano-gasolina natural dando un mejor aprovechamiento a los productos blancos obtenidos del procesamiento del gas natural, teniendo en cuenta que para la implementación de esta mezcla a nivel macro se hacen necesarias determinadas condiciones de operación y producción al interior de un campo.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En esta sección se darán a conocer los motivos por los cuales surgió la propuesta de este proyecto, así como las generalidades del campo objeto de estudio.

1.1. CARACTERÍSTICA DE LA PRODUCCIÓN

A diciembre de 2013, el campo contaba con una producción promedio de 3670 BOPD correspondiente a un total de 148 pozos activos, los cuales producen mediante los sistemas de levantamiento artificial: bombeo mecánico, PCP y gas lift. De la producción total de crudo del contrato un 60% corresponde al campo “La Salina”, proveniente de las formaciones Mugrosa, Esmeralda- La Paz y Lisama, con una gravedad API promedio de 26°.

La producción de gas del campo a diciembre de 2013 fue de 20000 KSCFD en promedio, de los cuales 17375 KSCFD corresponden a las ventas de este, el restante utilizado como consumo interno.

1.2. SITUACIÓN CONTRACTUAL

De la producción total del campo tanto de crudo como de gas, Ecopetrol S.A. cuenta con una participación del 30%, la cual le es vendida por parte de Petrosantander (Colombia) INC, operador del campo. Sin embargo, y a raíz de la reversión de algunos contratos de Asociación hacia Ecopetrol S.A.², entre ellos el de Cupiagua con la posterior construcción y puesta en marcha de la planta de gas que lleva el mismo nombre se han generado una serie de restricciones en la venta

² El fruto gaseoso de Cupiagua. Revista Petróleo y Gas. 2013.

de productos procesados del gas natural provenientes de Petrosantander (Colombia) INC. Debido a que la capacidad de abastecimiento de la Refinería de Barrancabermeja es suplida con los productos provenientes de plantas de procesamiento pertenecientes a Ecopetrol S.A. la idea de comprar a terceros, como es el caso de Payoa no es atractiva bajo las condiciones actuales de producción de la empresa Ecopetrol S.A.

Ante la problemática actual derivada de las restricciones establecidas a las ventas de gas se entró a evaluar por parte de la compañía operadora otras opciones de comercialización de estos productos derivados del gas natural.

Inicialmente se llevó a cabo la inyección de butano a pozo, Figura 1. sin embargo no se continuó con esta práctica debido a que no se contaba con las condiciones operativas en el pozo para el manejo e inyección del mismo, además de representar riesgo de contaminación ambiental. Adicional a esto, no fue posible cuantificar el daño o no generado al pozo con las inyecciones de Butano, aunque se observó una leve mejora en la calidad del crudo proveniente del pozo piloto de esta idea.

La idea de parar la planta de procesamiento no era una opción considerable dentro de las acciones a realizar y la venta del gas rico no era atractiva para los inversionistas de la empresa, así la posibilidad de quemarlo tampoco fue contemplada, esto debido a la contaminación ambiental que puede generarse con esta acción además de la reglamentación correspondiente para las quemas según lo dispuesto por la Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH.

Teniendo en cuenta este panorama se hacía necesario buscar nuevas alternativas de aprovechamiento de este producto, fue entonces y a raíz de una publicación hecha por el portal portafolio.co³, que surgió la idea de utilizar el butano como componente de una mezcla de crudo junto con la gasolina natural. En la publicación realizada citan el uso del GLP como diluyente para mezclas de crudo

³ Plan por US\$800 millones para “adelgazar” crudo pesado. Portafolio.co

pesado en proporciones de 85% de crudo y 15% de diluyente (GLP), si bien en este caso se utilizaría el propano, en el proyecto desarrollado se utilizó la gasolina natural y el butano.

Figura 1. Pozo con inyección de Butano



Sumado a esto, el crudo proveniente de Petrosantander (Colombia) INC. es usado en refinería como nafta y mezclado con crudo de baja gravedad API con el objetivo de mejorar su aprovechamiento y calidad. De acuerdo a esta situación, la aplicación de esta mezcla a escala de campo traería beneficios no solo a la compañía operadora sino a Ecopetrol S.A., por un lado se daría aprovechamiento a los productos blancos los cuales no cuentan con un mercado competitivo actual y por otro lado se contaría con la nafta útil para el mejoramiento de los procesos en refinería. Esto, bajo condiciones de mezcla que garanticen la menor cantidad de evaporación de estos productos una vez en refinería, lo cual pueda llevar a riesgos operacionales o ambientales.

1.3. CONDICIONES ACTUALES

Bajo la configuración actual del sistema de bombeo del campo se busca evaluar si la mezcla butano-gasolina natural-crudo exhibe un comportamiento turbulento de acuerdo al régimen de flujo de ésta, que garantice su homogenización en un punto determinado del sistema. (Antes del medidor del sistema de transferencia) o si por el contrario es necesaria la instalación de un mezclador que contribuya a la homogenización de esta.

Para comprender este comportamiento se parte del concepto de número de Reynolds, el cual caracteriza el flujo dentro de tuberías y se define como la relación entre las fuerzas dinámicas respecto a las viscosas en un determinado fluido. Según el número de Reynolds los regímenes de flujo se clasifican así:

1. Flujo laminar : $Re < 2000$
2. Flujo transitorio : $2000 < Re < 4000$
3. Flujo turbulento : $Re > 4000$

Este número es adimensional y es descrito por la siguiente ecuación:

$$Re = 92,2 \frac{Q\gamma}{D\mu} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

$D = \text{Diámetro de la tubeía, in}$

$Q = \text{Caudal, Bls/día}$

$\mu = \text{Viscosidad del fluido, cp}$

$\gamma = \text{Gravedad Específica}$

1.3.1. CONSIDERACIONES DEL ANÁLISIS

Para el correspondiente análisis se recopiló información de las facilidades de superficie la cual incluía: diámetro de la línea de butano, gasolina natural y aceite; flujo másico de cada corriente, la velocidad de los mismos en las líneas y la viscosidad de los fluidos.

El parámetro de velocidad no se encontraba de manera directa en el campo, razón por la cual se utilizó la correlación disponible en la literatura (Ecuación 2) recomendadas por los mismos ingenieros.

El rango permitido de velocidad de un líquido dentro de la tubería es: 3 – 15 ft/s.

Velocidad del líquido en una tubería:

$$V = 0.012 \frac{Q}{D^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde:

Q : Flujo másico de la corriente, BPD

La Tabla 1, muestra las propiedades del fluido y la característica de la tubería, con las unidades correspondientes para ser aplicadas:

Tabla 1. Propiedades del crudo y tuberías

COMPUESTO	GRAVEDAD ESPECÍFICA	CAUDAL (BLS/DÍA)	VISCOSIDAD (CP)	DIÁMETRO TUB (IN)
Gasolina	0,760	2160	0,35	2
Butano	0,586	2160	0,16	2
Aceite Pesado	0,987	24000	1650,00	4
Aceite Mediano	0,882	24000	242,55	4
Aceite Liviano	0,845	24000	8,50	4

Fuente: Modificado. Petrosantander (Colombia) INC.

Ya establecidas las variables que definen el número de Reynolds, se procede a determinarlo y establecer con los rangos anteriormente mostrados el régimen de flujo al que pertenece cada fluido en su línea. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados Número de Reynolds de las líneas.

COMPUESTO	REYNOLDS
Gasolina	216222,17
Butano	364832,74
Aceite Pesado	330,76
Aceite Mediano	2011,75
Aceite Liviano	55007,10

Los resultados observados muestran que los flujos son turbulentos en el caso de la gasolina y el butano producto de la baja oposición que exhiben estos fluidos al movimiento, ocurriendo algo similar en crudos livianos. Sin embargo, tanto en crudos medianos como pesados se observa un flujo laminar. La consecuencia al mezclarse estas corrientes no garantiza que la mezcla se homogenice totalmente, ya que pueden presentarse baches de gasolina y butano en un volumen muy pequeño de crudo. Es por esto, que se hace necesario un mezclador luego de que se lleve a cabo la mezcla para de esta forma tener un flujo turbulento total que me garantice una mezcla homogénea.

1.3.2. TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Los tanques de almacenamiento son usados como depósitos para contener una reserva suficiente de determinado producto para su posterior uso y/o comercialización. La construcción de tanques de almacenamiento debe estar sujeta estrictamente a las normas establecidas por el API y está en función del volumen que van almacenar, el tipo de fluido a almacenar entre otros aspectos. El material con el cual se construyen este tipo de tanques debe ser resistente a la corrosión, intemperismo, tensión, presión, etc. En la industria se han empleado tanques de diversos materiales como: madera, plástico, concreto, aluminio y acero inoxidable, siendo este último el de mayor uso.

Durante el diseño de un tanque, así como de los accesorios que lo constituyen, se deben considerar condiciones extremas de presión y vacío. Las paredes de los tanques deben ser herméticas con el fin de evitar la formación de bolsas y la acumulación de líquido en su interior. Debe destinarse un volumen para líquido y otro para vapores, este último no debe exceder el 20% del volumen total del tanque. De igual forma, debe existir una tolerancia con relación a la presión existente en el espacio destinado a vapores y la presión de alivio de las válvulas,

de manera que puedan contenerse dentro del tanque, los vapores que por temperatura o agitación se desprendan del aceite. La presión máxima permisible para el espacio de vapores no debe exceder las 15 PSI.

Es de gran importancia tener en cuenta a la hora del diseño de un tanque, las condiciones a las cuales este va a operar, es decir, presión y temperatura de trabajo, teniendo en cuenta que la presión de trabajo está en función de la presión de vapor del fluido que se almacena al igual que de otros factores. Adicional a esto, se debe tener en cuenta el peso del tanque y su contenido tanto lleno como vacío, esfuerzos a la tensión y a la compresión, esfuerzos de corte y cargas adicionales como plataformas, escaleras, conexiones de tubería etc.

Los tanques de almacenamiento se clasifican en tanques cilíndricos verticales y horizontales. Los tanques cilíndricos horizontales, generalmente son empleados para almacenar volúmenes relativamente bajos, debido a que presentan fallas ocasionadas por corte y flexión.

Los tanques cilíndricos verticales permiten almacenar grandes cantidades volumétricas con un bajo costo, sin embargo tienen la limitante de que solo pueden ser utilizados con productos cuya presión sea la presión atmosférica o presiones internas relativamente pequeñas.

Estos tipos de tanques se clasifican en: Techo fijo, techo flotante y sin techo. La clasificación de los tanques se realiza de acuerdo a la norma estándar API 650.

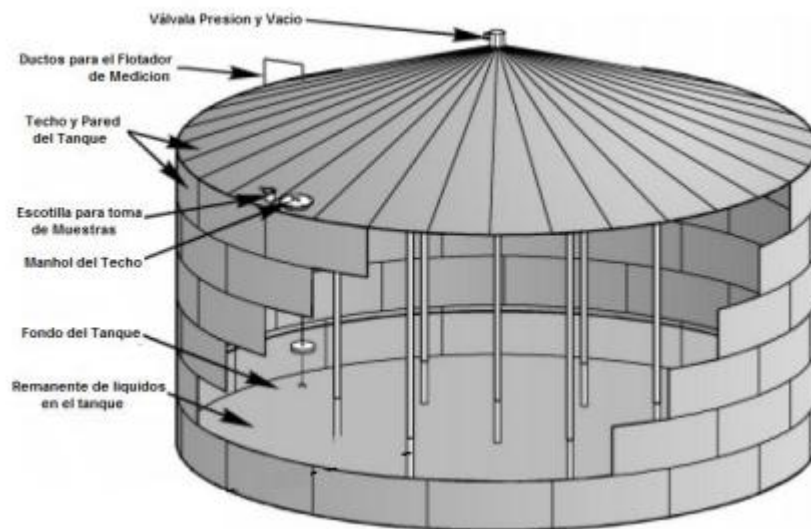
- **TECHO FIJO**

Son empleados para contener productos no volátiles o de bajo contenido de livianos, productos no inflamables, tales como: agua, diesel, asfalto, petróleo crudo, etc. Debido a que al disminuir la columna del fluido, se va generando una

cámara de aire que facilita la evaporación del fluido, lo cual es altamente peligroso. Dentro de los techos fijos se encuentran tres tipos:

- **Cónicos**, los cuales consisten en una cubierta con la forma y superficie de un cono recto.
- **Domo**, consiste en una cubierta con la forma y superficie de un casquete esférico.
- **Sombrilla**, es un polígono regular curvado por el eje vertical, los cuales pueden ser techos autosoportados o techos soportados por la estructura.

Figura 2. Techo con tanque fijo



Fuente: API MPMS, Capítulo 19,1.

- **TECHO FLOTANTE**

Se emplea para almacenar productos con alto contenido de volátiles como: alcohol, gasolinas y combustibles en general.

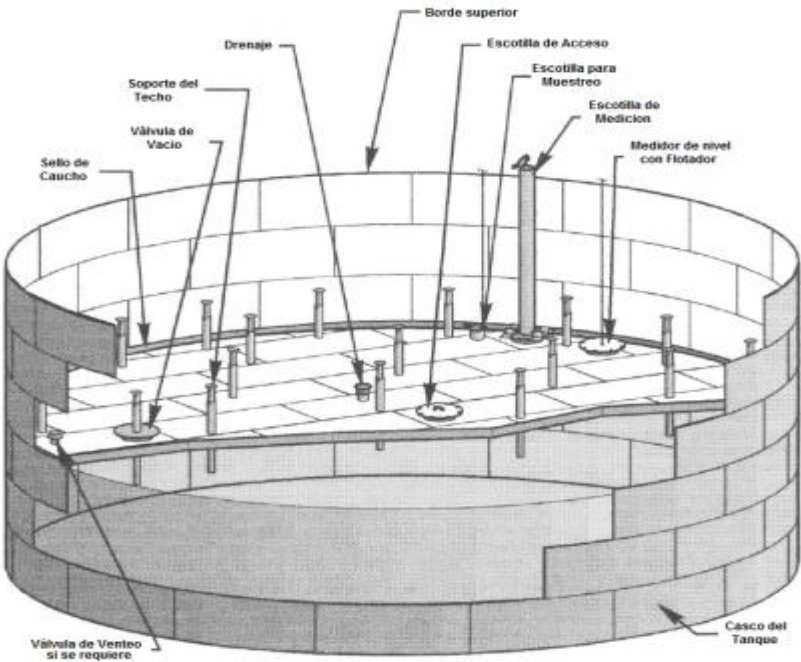
La cubierta del tanque es formada por el diafragma y elementos de flotación como boyas y pontón perimetral, que permiten la flotabilidad del techo sobre el líquido contenido en el interior del tanque y el libre ascenso y descenso de la cúpula durante el llenado y vaciado, con postes de soporte que cuando el tanque es vaciado y la cúpula desciende, se apoyan directamente sobre las planchetas instaladas en el fondo del tanque.

Este tipo de techo fue desarrollado para reducir o anular la cámara de aire, o espacio libre entre el espejo del líquido y el techo, además de proporcionar un medio aislante para la superficie del líquido, reducir la velocidad de transferencia de calor al producto almacenado durante los periodos en que la temperatura ambiental es alta, evitando así la evaporación de gases (su evaporación), y consecuentemente, la contaminación del ambiente y al mismo tiempo se reducen los riesgos de almacenar productos inflamables. La pared y el techo son construidos en acero. Aunque los tanques de techo flotante son las más eficaces en cuanto a la reducción de pérdidas por evaporación, su uso está limitado ya que la empaquetadura de caucho del techo tiene un límite de presión de operación.

- **SIN TECHO**

Se usan para almacenar productos en los cuales no es importante que éste se contamine o que se evapore a la atmosfera como en el caso del agua cruda, residual, contra incendios, etc. El diseño de este tipo de tanques requiere de un cálculo especial del anillo de coronamiento.

Figura 3. Tanque de techo flotante



Fuente: API, MPMS, Capítulo 19.2

Figura 4. Tanque sin techo



- **ESFERAS**

Las esferas son construidas en láminas de acero y soldadas herméticamente para resistir presiones un poco mayores a la atmosférica. Se sostienen mediante columnas que deben ser calculadas para soportar el peso de la esfera durante la prueba hidráulica (pandeo).

Cuentan con una escalera para acceder a la parte superior para el mantenimiento de las válvulas de seguridad, aparatos de tele medición, etc.

Estos tanques se utilizan para almacenar productos cuya presión de vapor oscila entre 25 y 100 PSI.

Figura 5. Tanque Esférico



2. CLASIFICACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS

Entre los fluidos contenidos en las rocas de yacimientos petrolíferos se encuentran una serie de compuestos orgánicos constituidos exclusivamente por carbono e

hidrógeno, denominados hidrocarburos, los cuales tienen la capacidad de formar largas y continuas cadenas que originan diferentes compuestos que conforman el petróleo crudo; a partir del cual se obtienen diversos productos tales como: gas licuado del petróleo, gasolinas, kerosén, combustibles residuales, aceites lubricantes, parafinas y otros, además, el crudo está formado por otros elementos en proporciones muy pequeñas que en algunos casos tiene un efecto negativo en la calidad de los productos.⁴

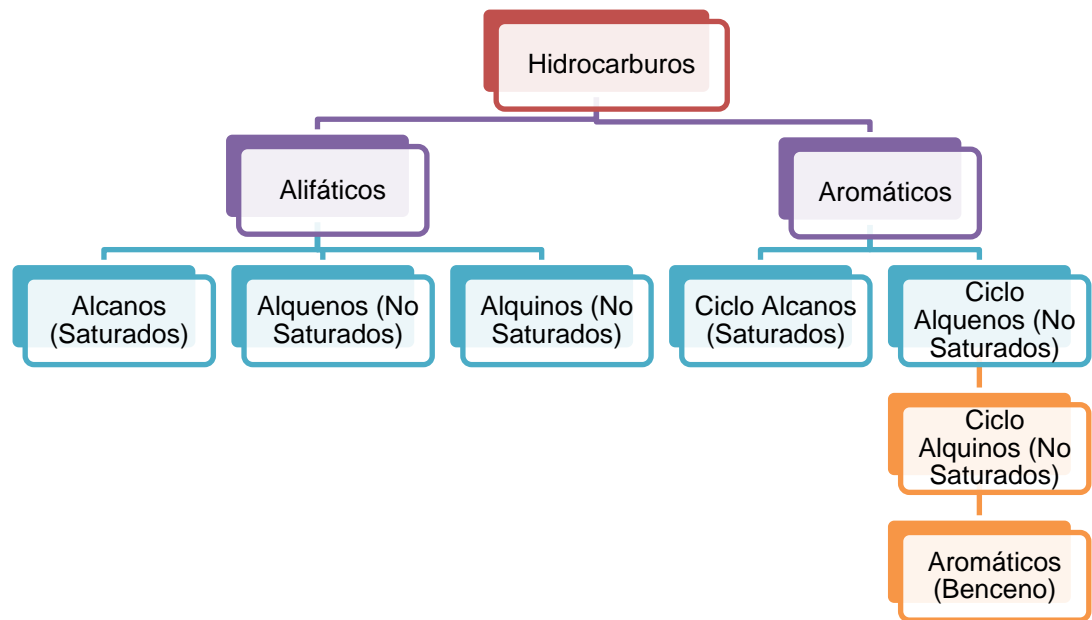
Bajo las condiciones iniciales del yacimiento, presión y temperatura, los hidrocarburos se encuentran en estado monofásico o bifásico dependiendo si la presión de yacimiento es mayor o menor al punto de burbuja. El estado monofásico puede ser líquido, caso en el cual los componentes livianos que constituyen el gas están en estado líquido de igual forma el estado monofásico puede ser gaseoso y en el cual dependiendo de las condiciones del fluido se pueden obtener líquidos en superficie o solo producción de gas.

Cuando se tiene estado bifásico, se cuenta con una capa de gas libre y bajo ésta se hallará la zona de petróleo. En condiciones normales de presión y temperatura, los hidrocarburos pueden existir en estado líquido, sólido o gaseoso, según el número y arreglo de los átomos de carbono en las moléculas.

Con el fin de facilitar su identificación y usos, los hidrocarburos se han clasificado según la caracterización físico-química de los componentes de sus mezclas, en varias familias o grupos de compuestos que tienen comportamientos promedios similares. Con base a su estructura, los hidrocarburos se dividen en dos clases: Alifáticos y Aromáticos, a su vez los hidrocarburos alifáticos se dividen en alcanos, alquenos, alquinos y sus cíclicos análogos.

⁴ PARÍS DE FERRER, Magdalena. Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos. 2009.

Figura 6. Clasificación de los hidrocarburos.

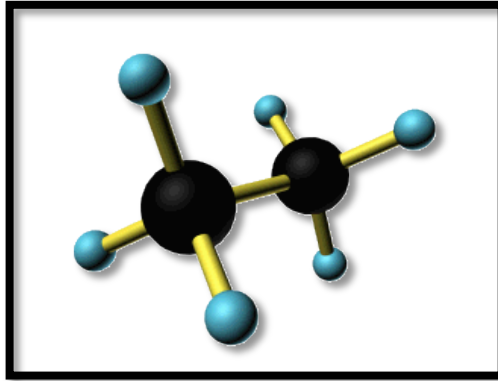


Fuente: William Mc Cain, Jr. The properties of petroleum fluids.

- **Alcanos**

Hidrocarburos con fórmula general C_nH_{2n+2} . Llamados hidrocarburos saturados porque tienen la cadena de carbonos totalmente llena con átomos de hidrógeno. Estos alcanos también son llamados parafinas. Dentro de los alcanos pertenecientes a esta familia se encuentra el metano, etano, propano, butano, pentano, etc.; siendo el etano el más común.

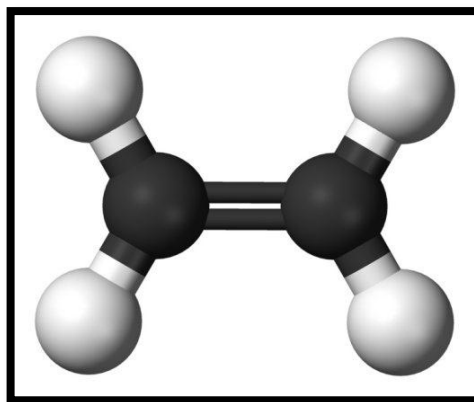
Figura 7. Alcano



- **Alquenos**

También llamados hidrocarburos insaturados u oleofinas. La fórmula general es C_nH_{2n} . La característica predominante en la estructura de los alquenos es el doble enlace carbono-carbono presente. El compuesto más simple de la familia de los alquenos es el etino, C_2H_4 , llamado comúnmente etileno.

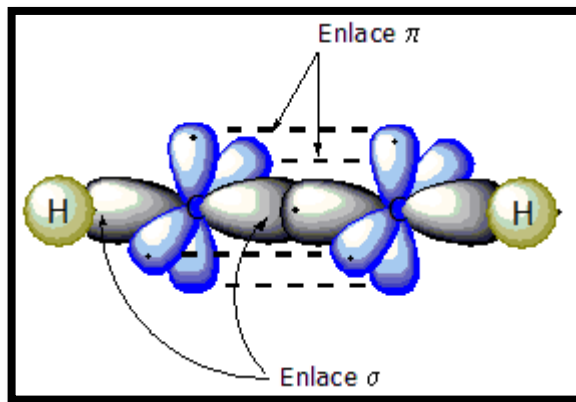
Figura 8. Alqueno



- **Alquinos**

Hidrocarburos que contienen triple enlace. La fórmula general es C_nH_{2n-2} . Son compuestos no polares insolubles en agua. Se les conoce como hidrocarburos acetilénicos porque derivan del alquino más simple, el acetileno.

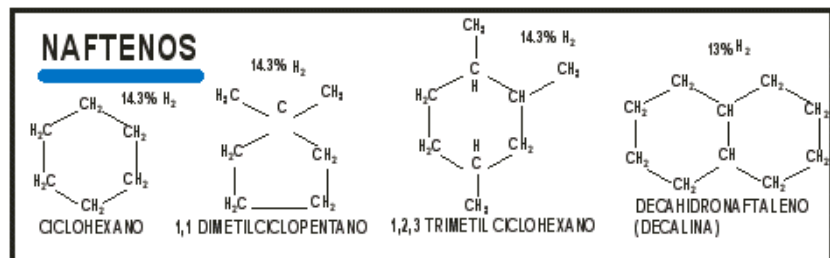
Figura 9. Alquino



- **Cicloalcanos**

También conocidos como naftenos, cicloparafinas o hidrocarburos alicíclicos. Los naftenos son anillos saturados cuya fórmula general es C_nH_{2n} .

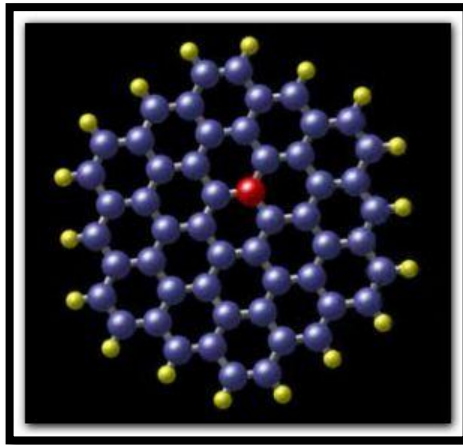
Figura 10. Cicloalcanos-Naftenos



- **Aromáticos**

Hidrocarburos cuya fórmula general es C_nH_{2n-6} . Son compuestos químicamente muy activos, muy susceptibles de oxidarse para formación de aceites orgánicos. Las estructuras de los compuestos aromáticos están formadas con benceno como elemento básico.

Figura 11. Aromáticos- Benceno



2.1. COMPORTAMIENTO DE FASES

Una fase es definida como cualquier parte homogénea de un sistema que es físicamente distinta y separada de otras partes del sistema por fronteras definidas. La existencia de una sustancia en fase líquida, sólida o gaseosa depende de la presión y temperatura que actúe sobre la sustancia, siendo este el enfoque principal del comportamiento de fases.⁵

En equilibrio, un sistema podría estar formado por un número de fases en las cuales coexistan todos los constituyentes presentes en todas las fases

⁵ AHMAD, Tarek. Hydrocarbon Phase Behavior. Gulf Publishing Company. Houston, Texas. 1989

equilibradas. El número de variables independientes para definir un sistema de este tipo se determina por la *Regla de las Fases de Gibbs*.

Una fase compuesta por N componentes está totalmente definida por su número de moles más dos funciones termodinámicas, siendo la temperatura y la presión las más comunes, es decir, $N + 2$ variables. Las propiedades intensivas son, sin embargo, determinadas solo por $N + 1$ variables como la concentración de componentes, los cuales están limitados por:

$$\sum_1^N X_i = 1 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde X_i es la fracción molar del compuesto i .

Para un sistema con K fases, el número total de variables es igual a $K(N + 1)$. Sin embargo, la presión, temperatura y potencial químico de cada uno de los componentes a través de todas las fases debería ser uniforme a las condiciones de equilibrio. Para este tipo de sistemas se consideran restricciones del tipo $(N + 2)(K - 1)$. El número de variables o grados de libertad, F necesarios para definir un sistema multifásico está dado por:

$$F = K(N + 1) - (N + 2)(K - 1) = N - K + 2 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Para un sistema de un solo componente, el valor de F es igual a $(3 - K)$.

2.2. MEZCLAS

El proceso de mezclado es aquel en el cual diferentes fluidos son combinados entre sí para lograr homogeneidad. Con líquidos miscibles el resultado es una mezcla, con fluidos inmiscibles se formarían dispersiones o emulsiones, una

mezcla entre gases y líquidos dará como resultado dispersiones y la combinación de sólidos y líquidos forma suspensiones; de igual forma si los fluidos son calentados o enfriados las mezclas proporcionan un mecanismo para mantener la temperatura uniforme a lo largo del sistema⁶

La realización de mezclas tiene diferentes propósitos en diferentes procesos de refinería: la mezcla de materia prima y de productos terminados son esenciales para la economía de las operaciones y el control de calidad.

La mezcla de líquidos miscibles toma lugar lentamente bajo difusión molecular y convección natural. Por lo tanto, la energía empleada para la mezcla debe ser justificada en base al menor tiempo requerido y a la mayor uniformidad del producto.

La convección forzada se puede alcanzar de dos formas: mediante corrientes de pequeños remolinos que se presentan en el movimiento turbulento de fluidos, esos remolinos mueven consigo pequeños materiales a través de cortas distancias en todas las direcciones proporcionando transferencia de material en la mezcla; este proceso es conocido como agitación, mecanismo importante en el concepto de mezcla. De igual forma, movimientos más grandes resultan de una corriente principal de masa viajando grandes distancias y transportando grandes cantidades de material.

La apropiada combinación de turbulencia y flujo másico es necesaria para economizar la energía de mezclado. El uso adecuado de la potencia es alcanzado aplicando la apropiada relación de cada tipo de movimiento. La cantidad de movimiento de cada una de los componentes de una mezcla es una función de las propiedades físicas del material, la manera en la cual son mezclados y la forma del recipiente en donde se lleva a cabo la mezcla.

⁶ RUSHTON, J. Henry. Fundamentals Of Mixing In Petroleum Refining. Fourth world petroleum congress. Section III.

Una mezcla por si misma produce solo efectos mecánicos, de esta manera cualquier efecto químico es consecuencia de la transferencia de masa a la interfaz donde la reacción puede ocurrir.

2.3. REGLA DE LAS MEZCLAS⁷

Las ecuaciones de estado han sido desarrolladas para componentes puros, pero aplicadas a sistemas multicomponentes empleando algunas reglas de mezclas para determinar sus parámetros de mezclas de una forma adecuada. Las reglas de las mezclas son empleadas para describir las fuerzas prevalecientes entre las moléculas de las distintas sustancias que forman las mezclas. Se han planteado reglas de mezcla tan simples como aquellas que asumen que los componentes son distribuidos aleatoriamente dentro de las mezclas, éstas son bastantes adecuadas para describir las mezclas de hidrocarburos presentes en los yacimientos. Reglas más complejas, son requeridas para representar la interacción entre hidrocarburos y compuestos asimétricos como el agua presente en los yacimientos.

2.3.1. Reglas Aleatorizadas

Para los fluidos hidrocarburos producidos en yacimientos estas reglas aleatorizadas solo consideran la interacción entre pares de moléculas vecinas y desprecian la interacción entre tres o más moléculas.

⁷ DANESH, Alí. Pvt And Phase Behaviour Of Petroleum Reservoir Fluids. Elsevier, Tercera edición, 2003.

Los coeficientes viriales, relacionados en la ecuación representan el comportamiento no-ideal de un fluido real debido a la interacción entre varias combinaciones de moléculas. Mecanismos estáticos pueden ser empleados para derivar reglas de mezclas para la determinación de los coeficientes de la ecuación virial, esto es argumentado en el hecho de que la regla de mezcla usada en cualquier ecuación de estado debe alcanzar la misma forma que la ecuación virial a las condiciones en las cuales ambas sean válidas.

$$Z = 1 + \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \frac{D}{v^3} + \dots \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde Z: Factor de compresibilidad

v : Volumen molar

B, C y D: Coeficientes Viriales (Dependen solo de la temperatura de cada componente)

Para gases a bajas presiones, el tercer y más alto coeficiente virial puede ser despreciado. El segundo coeficiente, el cual representa la interacción entre dos moléculas vecinas, es suficiente para describir el comportamiento volumétrico. La regla de mezcla, para este coeficiente (B), tiene forma cuadrática:

$$B = \sum_i \sum_j x_i x_j B_{ij} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde: B_{ij} es el coeficiente debido a la interacción entre las moléculas i, j .

A partir de la ecuación virial y la de van der Waals para bajas presiones es posible determinar el coeficiente B.

2.3.2. Reglas No aleatorizadas

La regla de las mezclas de Van der Waals es adecuada para describir las mezclas de hidrocarburos presentes en un yacimiento. Sin embargo, no es posible describir a partir de estas la interacción entre los hidrocarburos y los componentes asimétricos como el agua o el metano, empleado en ocasiones como inhibidor de hidratos. Aunque cierta flexibilidad es alcanzada incrementando el número de coeficientes en los parámetros de interacción binaria, se pueden obtener resultados aceptables en mezclas binarias con estos componentes, sin embargo, el modelo falla completamente para sistemas multicomponentes.

Variadas expresiones han sido propuestas y exitosamente probadas para sistemas binarios con términos asimétricos. Schwartzentruber and Renon⁸ demuestran que la mayoría de éstas pueden ser expresadas a partir de:

$$a^A = \sum_i \sum_j -l_{ij}(x_i - x_j)x_i x_j (a_i a_j)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde $l_{ij} = -l_{ji}$ y es el coeficiente de interacción binaria. Esta ecuación es capaz de describir igualmente el comportamiento para mezclas multicomponentes con componentes altamente asimétricos cuando son usadas las ecuaciones de estado cúbicas.

2.4. EQUILIBRIO DE FASES

El mundo tal y como lo conocemos es una combinación de sustancias que en sus diferentes estados constituyen lo que se conoce como mezcla; las cuales no son más que la combinación de dos o más sustancias en distintas proporciones. Si dicha mezcla está compuesta por sustancias que no pierden sus propiedades

⁸ SCHWARTZENTRUBER, Jand RENON, H. "Equation of state: How to reconcile flexible mixing rules, the virial coefficient constraint and the "Michelsen-Kistenmacher Syndrome" for multicomponent systems", J. Fluid phase equilibria, 67, 99-110. (1991).

durante la combinación, se dice que se tiene una mezcla homogénea, mientras que si son composiciones que carecen de uniformidad y no es posible diferenciar una sola fase, se habla de mezclas heterogéneas.

Según la teoría, en toda mezcla está presente la transferencia de una sustancia de una fase a otra; esto se da porque cuando dos fases se ponen en contacto, tienden a intercambiar sus componentes hasta que la composición de cada fase alcanza un valor constante, cuando esto se logra, se dice que las fases están en equilibrio.

Las composiciones de equilibrio de dos fases, frecuentemente son muy diferentes entre sí, y es esta diferencia precisamente la que permite separar las mezclas por destilación, extracción u otras formas de separación.

Las composiciones finales o de equilibrio, de cada una fase dependen de diversas variables, tales como la temperatura y la presión al igual que la naturaleza química y la concentración de cada sustancia en la mezcla. La termodinámica del equilibrio de fases trata de establecer las relaciones entre las distintas propiedades que se cumplen cuando dos o más fases alcanzan un estado de equilibrio, en el que cesa cualquier tendencia hacia futuros cambios.

El problema clásico del equilibrio de fases considera el equilibrio interno respecto a tres aspectos:

1. Transferencia de calor entre dos fases cualesquiera en un sistema heterogéneo.
2. Desplazamiento de una interfase
3. Transferencia de masa de cualquier componente del sistema a través de la interfase.

De igual forma, lo que nos rodea está formado por conjuntos de sistemas, los cuales pueden llegar a ser homogéneos, heterogéneos, abiertos o cerrados. En un sistema homogéneo todas las propiedades tienen un valor uniforme en todo el

sistemas, mientras que un sistema cerrado es aquel que no intercambia material con el medio, aunque si puede intercambiar energía. En un sistema cerrado en el que no se produzca reacción química, la cantidad de sustancia de cada componente es constante. Esto puede expresarse como:

$$dn_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Donde n_i es la cantidad de sustancia del componente de dos o más fases y m es el número de componentes presentes.

Para un sistema cerrado que no intercambia masa con sus alrededores, el cambio total de energía en el sistema está dado en forma de energía interna (U), energía potencial (Ep) y energía cinética (Ek).

$$\Delta E = \Delta U + \Delta Ep + \Delta Ek = Q - W \quad (\text{Ecuación 8})$$

De igual forma un sistema cerrado homogéneo, puede interactuar con sus alrededores en forma de transferencia de calor y trabajo de volumen.

$$dU \leq TdS - PdV \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde dU , dS y dV son pequeños cambios de energía, entropía y volumen del sistema. Cada una de esas propiedades es una función de estado, cuyo valor en un determinado estado es independiente de la historia previa del sistema.

Existen tres conceptos en el ámbito del equilibrio de fases que precisan aclaración para el correcto análisis y entendimiento de este: *estado de equilibrio*; el cual hace referencia a aquel estado que no tiene tendencia alguna a ser abandonado espontáneamente respecto a ciertos cambios o procesos permitidos, por ejemplo la transferencia de calor o la transferencia de masa a través de una interfase. En un estado de equilibrio las propiedades son independientes del tiempo y de la

historia previa del sistema; además son estables, es decir, no sufren cambios drásticos cuando las condiciones externas varían ligeramente. Se diferencia de un sistema estacionario porque en el estado de equilibrio no hay flujos netos de transferencia de calor a través de una superficie plana puesta en cualquier parte del sistema.

La termodinámica tiene como uno de sus fines, ocuparse de los cambios finitos en el estado de equilibrio de un sistema, o de la variación de un estado de equilibrio sujeto a determinadas condiciones. Un cambio en el estado de equilibrio de un sistema se llama *proceso*. En un proceso reversible el sistema se mantiene en estado de equilibrio virtual durante todo el proceso, un proceso reversible es descrito en ocasiones como una sucesión de estados de equilibrio, sin embargo es de aclarar que cualquier proceso real o natural ocurre de forma irreversible, creyendo que un proceso reversible es un límite al que podemos acercarnos, pero nunca alcanzarlo.

2.4.1. Potencial Químico⁹

Potencial químico o energía parcial molar de Gibbs de un sistema termodinámico “es el cambio de energía que experimentaría el sistema si fuera introducida en éste una partícula adicional, con la entropía y el volumen constantes”, dicho en otras palabras, se entiende como el número de moles de cualquier componente a presión, temperatura y otros números molares constante.

Sin embargo, la forma de calcular el potencial químico se hace a partir de cambios en el mismo, los cuales acompañan a cualquier cambio arbitrario de las variables

⁹ DANESH, Alí. PVT And Phase Behaviour Of Petroleum Reservoir Fluids. Elsevier, Tercera edición, 2003.

independientes temperatura, presión y composición. El potencial químico es medido en energía/mol.

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,P,n_{j \neq i}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,P,n_{j \neq i}} = \left(\frac{\partial A}{\partial n_i}\right)_{T,V,n_{j \neq i}} = \left(\frac{\partial H}{\partial n_i}\right)_{S,P,n_{j \neq i}} = \left(\frac{\partial U}{\partial n_i}\right)_{S,V,n_{j \neq i}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Sustituyendo 16 en 17, se obtiene:

$$dG = -SdT + VdP + \sum_i \mu_i dn_i \quad (\text{Ecuación 12})$$

Para un sistema cerrado conformado por θ fases, la ecuación 18 puede ser escrita para cada fase:

$$dG = \sum_{\tau=1}^{\theta} (-S)_{\tau} dT + \sum_{\tau=1}^{\theta} (V)_{\tau} dP + \sum_{\tau=1}^{\theta} (\sum_i \mu_i dn_i)_{\tau} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde τ denota cada fase.

A presión y temperatura constante, la ecuación general para el equilibrio esta dada por la ecuación:

$$(dG)_{T,P} = \sum_{\tau=1}^{\theta} (\sum_i \mu_i dn_i)_{\tau} = 0 \quad (\text{Ecuación 14})$$

Como el sistema total es cerrado y sin reacción química, el número total de moles de cada componente permanecen constantes dentro del sistema,

$$\sum_{\tau=1}^{\theta} (dn_i)_{\tau} = 0 \quad \text{(Ecuación 15)}$$

La ecuación , que representa el potencial químico de varias fases co-existiendo en equilibrio, se convierte en una herramienta útil si el potencial puede ser medido; sin embargo para que esto ocurra, el potencial químico debe ser expresado en términos de funciones termodinámicas auxiliares, tales como la fugacidad o la actividad.

2.4.2. Fugacidad

El concepto de fugacidad puede ser empleado en ocasiones para expresar el potencial químico ya que este no tiene un equivalente en el mundo físico, este concepto hace alusión a la tendencia que tiene una sustancia de preferir una fase frente a otra; aquella fase con la menor fugacidad será la mas favorable.

A partir de este concepto, Lewis consideró el potencial químico de un gas ideal puro para generalizar una expresión para el equilibrio químico.

Teniendo en cuenta lo anterior, la fugacidad es definida a partir del comportamiento ideal de un gas:

$$dG = -SdT + VdP \quad \text{(Ecuación 16)}$$

$$\left(\frac{\partial \mu_i}{\partial P}\right)_T = v_i \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Sustituyendo la ecuación del gas ideal,

$$v_i = \frac{RT}{P} \quad \text{(Ecuación 18)}$$

E integrando a temperatura constante,

$$\mu_i - \mu_i^0 = RT \ln \frac{P}{P^0} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Según la ecuación 25, a temperatura constante el cambio de la magnitud termodinámica abstracta μ , es una función logarítmica de la magnitud física real, la presión. Sin embargo, esta ecuación es aplicable solamente a gases ideales puros, para generalizarla, Lewis¹⁰ introdujo una nueva función, f , denominada fugacidad, extendiéndola hacia cualquier sistema sólido, líquido o gas, en estado puro o como parte de una mezcla, ideal o real.

$$\mu_i - \mu_i^0 = RT \ln \frac{f_i}{f_i^0} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde, μ_i^0 y f_i^0 son el potencial químico y la fugacidad del componente i .

Para un gas ideal, la fugacidad es igual a la presión y para el componente i de una mezcla de gases ideales a su presión parcial $y_i P$. Ya que todos los sistemas, ya sean de un solo componente o mezclas a bajas presiones se acercan al comportamiento de gas ideal, el término de fugacidad se completa con la siguiente definición:

$$\frac{f_i}{y_i P} \rightarrow 1 \text{ cuando } P \rightarrow 0 \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde y_i es la fracción molar de i .

De igual forma, la relación de la fugacidad con la presión es definido como coeficiente de fugacidad, ϕ .

¹⁰ PRAUSNITZ, J.M., LICHTENTHALER, R.N. and DE AZEVEDO, E.G: "Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria", 2nd Edition, Prentice-Hall Inc., NJ.1986.

$$\Phi = \frac{f_i}{Py_i} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde y_i es la fracción molar del componente i . este coeficiente es una medida de la no idealidad de un sistema.

A bajas presiones, $\Phi \rightarrow 1$, cuando $P \rightarrow 0$

2.4.3. Actividad

En la actualidad, muchas soluciones líquidas y mezclas gaseosas reales no cumplen con la ley de Lewis y Randall; según la cual la fugacidad de un componente en una mezcla de sustancias es el producto de la fracción molar del componente puro por la fugacidad que tendría en estado puro bajo las mismas condiciones de presión y temperatura.

$$f_i(p, T, n_i \dots n_r) = x_i f_i^O(p, T) \quad (\text{Ecuación 23})$$

La ecuación es empleada como una aproximación para mezclas reales. Sin embargo, cuando se sigue la ley de Lewis, la mezcla se comporta aparentemente como una mezcla de gases ideales. Entonces:

$$\mu_i^{re}(p, T, n_i \dots n_k) = \mu_i^O(p, T) + RT \log x_i \quad (\text{Ecuación 24})$$

Según Lewis, la actividad de un componente i en una mezcla real obedece a la expresión:

$$a_i = \frac{f_i}{f_i^O} \quad (\text{Ecuación 25})$$

En la cual, el término f_i^0 hace referencia a la fugacidad del componente en su estado normal o de referencia, el cual el más habitual es el componente puro a la misma temperatura y presión que en la mezcla. En términos de potencial químico la actividad puede ser expresada a partir de la ecuación:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i \quad (\text{Ecuación 26})$$

Cuando $x \rightarrow 1$, el sistema se acerca más a un i puro y μ_i debe aproximarse más a μ_i^0 de modo que:

$$\mu_i - \mu_i^0 = 0 \quad \text{Cuando } x \rightarrow 1 \quad (\text{Ecuación 27})$$

Teniendo en cuenta la ecuación $\ln a_i = 0$, a medida que $x \rightarrow 1$

$$a_i = 1 \quad \text{Cuando } x \rightarrow 1 \quad (\text{Ecuación 28})$$

Así, para el potencial químico de una solución líquida ideal se cumple que:

$$\mu_i^{id} = \mu_i^0 + RT \ln x_i \quad (\text{Ecuación 29})$$

Restando las ecuaciones, se obtiene

$$\mu_i - \mu_i^{id} = RT \ln \frac{a_i}{x_i} \quad (\text{Ecuación 30})$$

La actividad proporciona una idea de cuán activa es una sustancia con respecto a su estado estándar, ya que da una medida de la diferencia entre el potencial químico de la sustancia en el estado de interés y el estado estándar, igualmente la actividad puede ser una función de la temperatura y la presión.

La teoría del equilibrio podría desarrollarse en su totalidad en función de las actividades de las sustancias, en lugar de sus potenciales químicos.

Como complemento a la definición de actividad, se desarrolló el concepto de coeficiente de actividad, el cual hace referencia a una función auxiliar muy útil para describir la fase líquida dentro de los cálculos de equilibrio de fases. Además, es empleada en la expresión para el potencial químico de una solución no ideal o real.

$$\gamma_i = \frac{a_i}{x_i} \quad (\text{Ecuación 31})$$

Dónde:

γ_i Es el coeficiente de actividad

x_i Es la fracción molar del componente en la fase líquida

a_i Es la actividad química.

Con esta definición, la ecuación se transforma en:

$$\mu_i = \mu_i^{id} + RT \ln \gamma_i \quad (\text{Ecuación 32})$$

En donde γ_i , se refiere a la magnitud de la desviación respecto al comportamiento ideal. A partir de la ecuación, se deduce que:

$$\gamma_i = 1 \text{ Cuando } x \rightarrow 1$$

Los coeficientes de actividad son adecuados para aquellos sistemas en los cuales la fracción molar de los componentes puede variar desde cero hasta la unidad.

2.5. DIAGRAMA PSEUDOTERNARIO

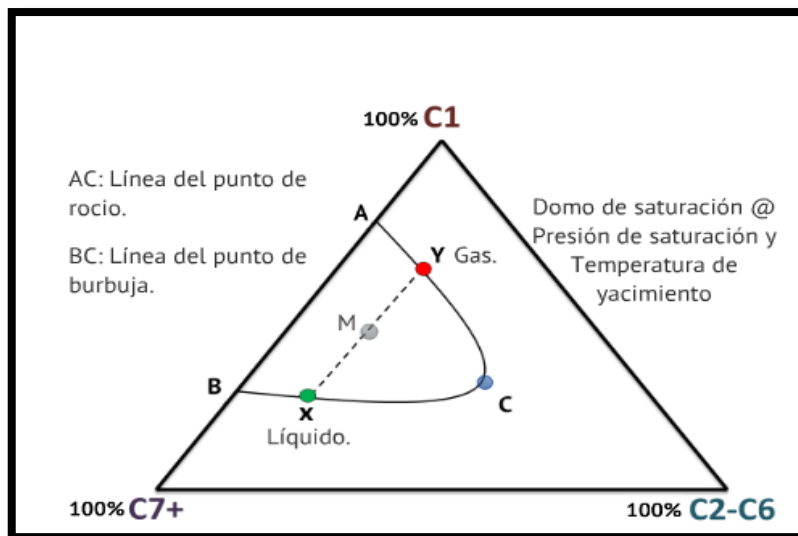
El fluido de un yacimiento es una mezcla multicomponente de diferentes compuestos hidrocarburos y no hidrocarburos. Para visualizar de una manera sencilla la composición de un crudo se suele emplear un diagrama pseudoternario en el cual el crudo se subdivide en 3 pseudocomponentes, uno representa la fracción liviana, otro la intermedia y el tercero la fracción pesada, diagrama que es representado por triángulos equiláteros. Cada vértice del triángulo corresponde al 100% de cada componente de la mezcla, la cual puede ser expresada en términos de fracción molar o porcentaje molar.

En la figura 12, la curva AB representa el domo de saturación del fluido a la presión de saturación y temperatura del yacimiento, el punto C es el punto crítico de la mezcla, en donde la composición del líquido es igual a la composición del vapor. La sección AC representa la fase del vapor la cual es llamada curva de punto de rocío y la sección CB es la fase líquida del fluido, llamada punto de burbuja. Cualquier punto dentro del domo de saturación se encuentra en la región de dos fases como el punto M así como cualquier punto que se ubique por fuera del domo se encuentra en la región de una fase.

La línea XY es llamada línea de equilibrio, la cual representa el equilibrio líquido-vapor entre ambas fases.

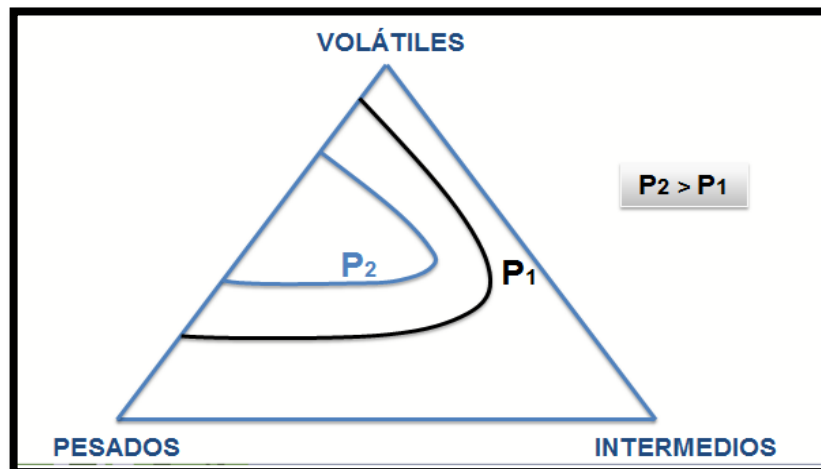
El tamaño de la zona de dos fases, depende de la temperatura y la presión del sistema con el cual se trabaja, según se muestra en las figuras 13 y 14. En la cual se observa la reducción de la zona a medida que la presión aumenta, por otro lado cuando se incrementa la temperatura a presión constante, la región de dos fases se incrementa.

Figura 12. Diagrama Pseudoternario



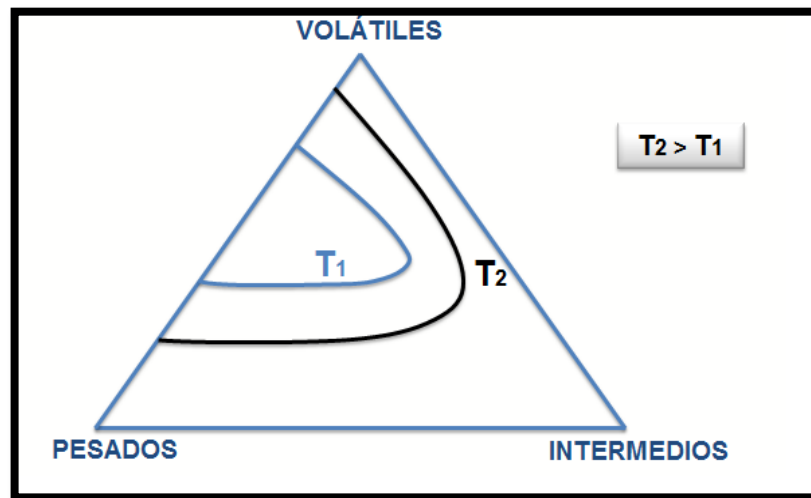
Fuente: Vecino, I., Forero, M. "Miscibilidad y diagramas ternarios". Seminario Métodos de Recobro. 2012.

Figura 13. Influencia de la presión en diagrama pseudoternario



Fuente: Vecino, I., Forero, M. "Miscibilidad y diagramas ternarios". Seminario Métodos de Recobro. 2012

Figura 14. Influencia de la temperatura en diagrama pseudoternario

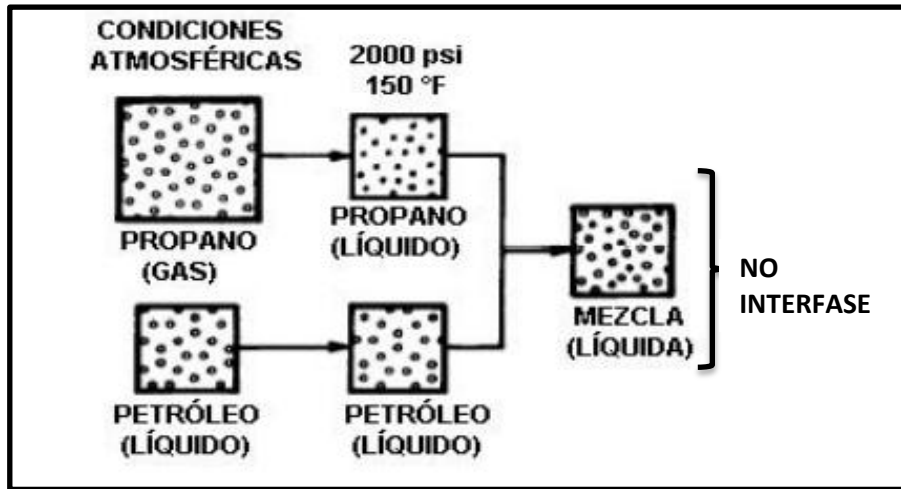


Fuente: Vecino, I., Forero, M. "Miscibilidad y diagramas ternarios". Seminario Métodos de Recobro. 2012.

2.5.1 Miscibilidad

Es definida como la habilidad de dos o más sustancias a formar una sola fase homogénea cuando la mezcla es llevada a cabo en todas las proporciones. En yacimientos de petróleo, se entiende por miscibilidad como aquella condición física entre dos o más fluidos que permitirán que estos se mezclen en todas las proporciones sin que exista una interfase. En otras palabras, es el grado de solubilidad de un fluido en otro.

Figura 15. Miscibilidad entre crudo y LGN.



Fuente: Modification. Holm, L.W. "Miscibility and Miscible Displacement", SPE, UNOCAL Corp.

2.5.2. Tension Interfacial

Se define como la energía por unidad de área en la superficie entre dos fuerzas. Es expresada comúnmente en dinas/cm. Son el resultado de fuerzas moleculares no balanceadas en los límites de las fases, fuerzas adhesivas y cohesivas. Cuando dos fluidos inmiscibles están en contacto, en la superficie que los separa hay un desequilibrio de fuerzas, debido a que las moléculas que los constituyen son de distinta naturaleza. Esta energía afecta la saturación, distribución y desplazamiento de los fluidos en el medio poroso. La tensión interfacial tiende a aumentar conforme aumenta la temperatura.

2.6. PROCESOS DE DESPLAZAMIENTO MISCIBLE

2.6.1. Miscibilidad al Primer Contacto

Este proceso se caracteriza por la inyección de un solvente con características similares a la del petróleo de tal forma que al ponerse en contacto, se mezclen en todas las proporciones sin que observe una interfase entre ellos. Es el método más simple y rápido para obtener un desplazamiento miscible entre el crudo y el solvente. Los solventes comúnmente utilizados en este proceso son los hidrocarburos de peso molecular intermedio como el propano, butano y mezcla LPG.¹¹

En la figura 16 se observa el proceso de miscibilidad al primer contacto, en el la composición del yacimiento se representa en el punto Z y la composición del solvente es el punto G. al ponerse en contacto ambos fluidos cualquier punto en la línea de unión ZG corresponderá a la región de una sola fase, teniendo de esta manera miscibilidad del sistema al primer contacto.

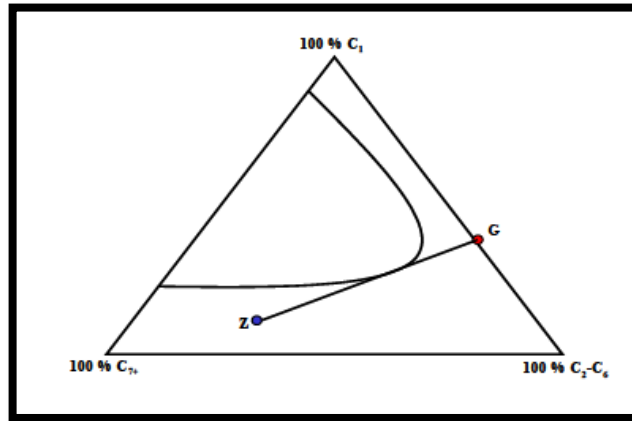
2.6.2. Miscibilidad por Múltiples Contactos

Debido a que algunos fluidos no son miscibles a un primer contacto se hace necesaria la transferencia de masa entre ambos fluidos para crear de esta manera el desplazamiento y obtener la miscibilidad a varios contactos. Existen dos mecanismos para obtener miscibilidad a múltiples contactos los cuales son:

¹¹ MARÍN, J. "Metodología para estimar presión mínima de miscibilidad mediante una ecuación de estado". Tesis de grado. 2012.

condensación del gas de inyección y vaporización del crudo por el gas de inyección¹².

Figura 16. Miscibilidad al primer contacto



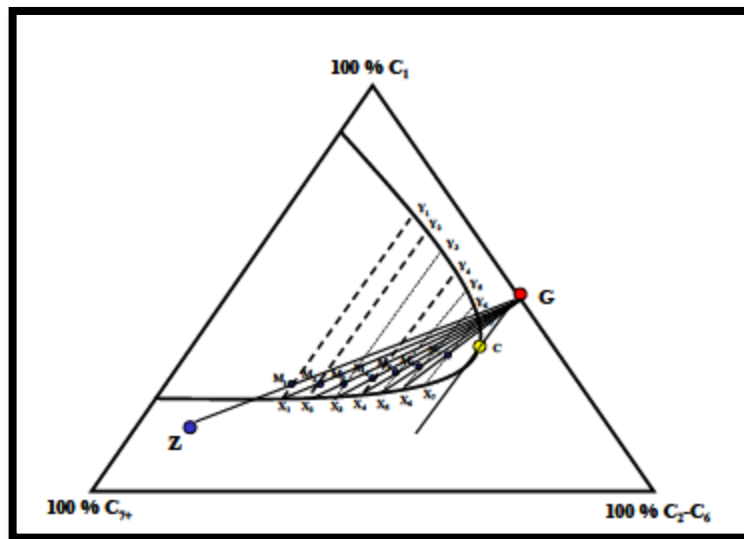
Fuente: Marín, J. "Metodología para estimar presión mínima de miscibilidad mediante una ecuación de estado". Tesis de grado. 2012.

En la figura 17, la composición del crudo está representada por el punto Z y la composición del gas de inyección por el punto G. al ponerse en contacto el gas de inyección con el crudo, se produce una mezcla representada por el primer punto de mezcla M_1 , a través de este punto pasa la línea de equilibrio Y_1X_1 . El líquido resultante es más rico en componentes intermedios que el crudo original, mientras que el vapor en equilibrio es más pobre que el gas original, evidenciando de esta manera la transferencia de masa que tiene lugar. Seguido a esto, L_f se pone en contacto con el gas de inyección originando con esto otro punto de mezcla M_2 cuyas composiciones líquido-vapor en equilibrio están representadas por los puntos Y_2 y X_2 . Este proceso se repite hasta que la última línea de la unión

¹² MARÍN, J. "Metodología para estimar presión mínima de miscibilidad mediante una ecuación de estado". Tesis de grado. 2012.

coincida con la línea de unión límite, la cual pasa por el punto crítico y la composición del gas de inyección. Si la última línea de unión coincide o converge con la línea límite entonces el sistema ha llegado a condiciones de miscibilidad a la presión y temperatura de trabajo.

Figura 17. Miscibilidad a múltiples contactos



Fuente: Marín, J. “Metodología para estimar presión mínima de miscibilidad mediante una ecuación de estado”. Tesis de grado. 2012.

2.6.3 Contacto Directo de Fases Miscibles¹³

Teniendo en cuenta la dificultad que se tiene para mantener los gradientes de concentración sin mezclar el fluido, las operaciones en las que se involucran estos tipos de procesos generalmente no son llevadas a cabo desde el punto de vista industrial.

¹³ TREYBAL, R. “Operaciones de transferencia de masa”. Segunda Edición. Editorail McGraw-Hill. México.1988

Así, la difusión térmica implica la formación de una diferencia de concentración dentro de una única fase gaseosa o líquida al someter al fluido a un gradiente de temperatura con lo cual es posible separar los componentes de la solución.

2.6.4 Difusión Molecular

Un componente en una mezcla fluida homogénea solo se transfiere al interior de la misma como consecuencia del gradiente de concentraciones; en un fluido en reposo o fluyendo en forma laminar en dirección perpendicular al gradiente de concentración, la transferencia se desarrolla como consecuencia del movimiento caótico de las moléculas de la mezcla dando lugar al mecanismo de la Difusión Molecular¹⁴.

Todos los procesos que impliquen la realización de mezclas implican la transferencia de masa, ya sea para generar uniformidad en la composición o para mover los reactivos hacia una interfase.

La convección forzada puede alcanzarse de dos formas: mediante pequeños remolinos presentes en el movimiento turbulento de fluidos, esos remolinos mueven consigo pequeños materiales a través de cortas distancias en todas las direcciones proporcionando transferencia de masa en la mezcla; este proceso es conocido como agitación, mecanismo importante en el concepto de mezcla.

La apropiada combinación de turbulencia y flujo másico es necesaria para economizar la energía de mezclado. El uso adecuado de la potencia es alcanzado aplicando la apropiada relación de cada tipo de movimiento. La cantidad de movimiento de cada una de los componentes de una mezcla es una función de las

¹⁴ GONZÁLEZ, G., SALAZAR, O. "Consideración de la transferencia de masa y cantidad de movimiento en el modelamiento de un reactor tubular". Universidad Nacional de Colombia. Tesis de pregrado. 2004.

propiedades físicas del material, la manera en la cual son mezclados y la forma del recipiente en donde se lleva a cabo la mezcla.

2.6.5 Difusividad en Líquidos¹⁵

La velocidad de difusión molecular en líquidos es mucho menor que en gases. Las moléculas de un líquido se encuentran muy cercanas entre sí en comparación con las de un gas; además la densidad y la resistencia a la difusión de un líquido son mucho mayores. Así, las moléculas A que se difunden chocarán con las moléculas B con más frecuencia y se difundirán con mayor lentitud que en los gases.

La teoría cinético-molecular de los líquidos esta menos desarrollada que la de los gases, razón por la cual la mayor parte de los conocimientos referentes a las propiedades de transporte se han obtenido experimentalmente. Y aunque se han elaborado varias teorías o modelos, los resultados de las ecuaciones obtenidas aun presentan desviaciones notables respecto a los datos experimentales. En comparación con la difusividad de gases, la difusividad de líquidos está ligada notoriamente con la concentración de los componentes que se difunden.

¹⁵ BERROCAL, I. "Principios de transferencia de masa en la ingeniería de alimentos". Universidad Nacional de Callao. Informe de investigación. 2011.

3. PARAMETROS DE LA SIMULACION

La simulación de procesos con software comerciales como HYSYS ha dado a los ingenieros de procesamiento una ventaja significativa al momento de tomar decisiones respecto a proyectos a desarrollar en campo pudiendo evaluar impactos económicos así como condiciones adecuadas de operación. Gracias a estas herramientas se pueden evaluar diferentes escenarios que permiten establecer los pro y los contra de cada uno de los mismos generando así, un balance entre lo que se requiere para el cumplimiento técnico del proyecto y la rentabilidad esperada para el mismo.

En este proyecto se busca la viabilidad técnica de la mezcla de condensados del GN con crudo para el aprovechamiento de los mismos. Según la operación actual del campo evaluado es posible analizar tres alternativas para el mismo: Vender el butano y gasolina natural como productos derivados del gas como **Alternativa “A”** (Operación actual), mezclar a condiciones de campo el crudo y los LGN, transportándolos a través de líneas y aprovechando los regímenes de flujo alcanzados a partir de los caudales de inyección de las corrientes a la mezcla como **Alternativa “B”** (*Desarrollado en el capítulo 2*) y realizar la mezcla de dichos compuestos a condiciones de campo adicionando un mezclador al trayecto de las corrientes de butano - gasolina natural - crudo garantizando homogenización de esta como **Alternativa “C”**.

Sin embargo, debido a que en HYSYS no es posible modelar el comportamiento en tuberías, la alternativa “B” no hará parte de la simulación; sin que esto signifique que no será evaluada. El análisis de la alternativa “B” fue realizado en el capítulo 2, teniendo en cuenta el número de Reynolds como referencia para el grado de homogenización de la mezcla.

Teniendo en cuenta lo anterior, este capítulo se centrará en la alternativa “C”, la cual fue evaluada por medio del software comercial considerando el esquema actual de la planta de procesamiento de gas natural.

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la correcta realización de las pruebas descritas tanto a escala de campo como de laboratorio se elaboró el respectivo diseño experimental teniendo en cuenta las variables más representativas que pudieran afectar las variables de salida, las cuales están ligadas directamente con la estabilidad de la mezcla. Para la selección de las variables más influyentes en el experimento se realizaron una serie de pruebas aleatorias con los diferentes componentes de la mezcla, observando el comportamiento de la gravedad API, el RVP y las pérdidas en volumen debidas a la evaporación.

A partir de lo observado, se concluyó que las proporciones en que se realizaron las mezclas, la presión y la homogenización del sistema juegan un papel importante en la estabilidad del producto final; sin embargo, las pruebas experimentales se llevaron a cabo teniendo en cuenta solamente los porcentajes en volumen de cada componente, debido a que las otras variables fueron difíciles de controlar a lo largo de las pruebas.

La figura 18 muestra el producto final de las pruebas aleatorias realizadas con el objetivo de evaluar su comportamiento para su posterior reproducción según diseño experimental.

Figura 18. Pruebas aleatorias Mezcla Crudo-Gasolina-Butano



Generalmente cuando los factores a estudiar son componentes de una mezcla, la respuesta dependerá de las proporciones relativas de cada uno de los componentes, las cuales deberán sumar una cantidad fija, 100%.¹⁶

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1 \quad (\text{Ecuación 33})$$

Teniendo en cuenta lo anterior y habiendo seleccionado las variables que intervienen en la estabilidad de la mezcla final, se procedió a realizar el diseño experimental en la herramienta software STATGRAPHICS Centurion XVI. Este programa cuenta con diferentes tipos de diseños útiles al momento de estudiar el efecto de hasta 12 componentes sobre una o más respuestas. Estos incluyen: Diseño Simplex-Lattice, Diseño Simplex-Centroid y Diseño de vértices extremos, siendo empleado en el desarrollo del proyecto, el diseño experimental de Vértices Extremos, el cual consiste en la realización de una corrida por cada vértice de la

¹⁶ Manual diseño de experimentos STATGRAPHICS Centurion XVI.

región factible, éste permite restricciones con respecto a valores máximos y mínimos de cada componente a adicionar en la realización de la mezcla. A partir de este diseño es posible conocer cuál es la mejor combinación de las proporciones de los componentes de una mezcla para obtener el valor mínimo o máximo de determinada respuesta.

En conjunto con el software se obtuvo un diseño experimental de vértices extremos con un total de 13 pruebas a realizar, totalmente aleatorizado y con límites superiores e inferiores para los tres componentes a mezclar.

En la tabla 3 se muestran los límites tanto inferiores como superiores de cada uno de los componentes de la mezcla a realizar, los cuales se tuvieron en cuenta a la hora de ejecutar cada una de las pruebas que hacían parte del diseño experimental. Los límites de estos compuestos fueron seleccionados a partir de los resultados obtenidos en las pruebas preliminares realizadas así como de la producción de crudo, LGN en el campo y lo expuesto en el portal portafolio.co.

Tabla 3. Restricciones para cada uno de los componentes.

COMPONENTES	LÍMITES	
	BAJO (%)	ALTO (%)
ACEITE	70	90
C ₄	5	15
C ₅	5	15

Fuente: Ingenieros de Producción de Campo Payoa.

En la tabla 4 se resumen las corridas a realizar según el diseño de experimentos llevado a cabo en la herramienta software. Adicional a esto, durante el desarrollo del diseño experimental en la herramienta STATGRAPHICS fueron llevados a

cabo algunos análisis estadísticos complementarios a la selección de los componentes a mezclar en cada prueba a realizar, uno de estos uno de estos fue la matriz de correlación, la cual muestra el grado de confusión entre los efectos y en la cual, “un diseño perfectamente ortogonal mostraría una matriz diagonal con 1’s en la diagonal y 0’s fuera de ella. Cualquier término distinto de cero implica que los efectos estimados correspondientes a esa fila y a esa columna están correlacionados”.

Tabla 4. Diseño experimental arrojado por Statgraphics.

<i>Ejecución</i>	<i>Aceite (%)</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>
1	90	5,0	5,0
2	80	5,0	15,0
3	70	15,0	15,0
4	80	15,0	5,0
5	85	7,5	7,5
6	80	7,5	12,5
7	75	12,5	12,5
8	80	12,5	7,5
9	85	5,0	10,0
10	85	10,0	5,0
11	75	10,0	15,0
12	80	10,0	10,0
13	75	15,0	10,0

Fuente: Statgraphics Centurion XVI.

Teniendo en cuenta que para este caso se presentan interacciones diferentes de cero es posible tener dificultades para interpretar los efectos de unos sobre otros. Adicionalmente, la confusión es normal entre los diseños de mezclas.

Finalmente, en la tabla 5 se presenta la matriz de correlación arrojada por el software según el diseño experimental realizado, y la cual aplica para el proceso de mezclado de la gasolina, el butano y el crudo, teniendo en cuenta las variaciones generadas en cuanto al RVP y a la gravedad API.

Tabla 5. Matriz de correlación

	<i>A: Oil</i>	<i>B:C5</i>	<i>C:C4</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
<i>A:Oil</i>	1,0000	0,3359	0,3359	-0,4914	-0,4914	-0,4070	0,4698
<i>B:C5</i>	0,3359	1,0000	0,2967	-0,9586	-0,2882	-0,7945	0,6002
<i>C:C4</i>	0,3359	0,2967	1,0000	-0,2882	-0,9586	-0,7945	0,6002
<i>AB</i>	-0,4914	-0,9586	-0,2882	1,0000	0,3153	0,7654	-0,6797
<i>AC</i>	-0,4914	-0,2882	-0,9586	0,3153	1,0000	0,7654	-0,6797
<i>BC</i>	-0,4070	-0,7945	-0,7945	0,7654	0,7654	1,0000	-0,7911
<i>ABC</i>	0,4698	0,6002	0,6002	-0,6797	-0,6797	-0,7911	1,0000

Fuente: STAGRAPHICS Centurion XV

3.2. INFORMACIÓN TERMODINÁMICA DE LAS CORRIENTES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO

Se solicitó información termodinámica detallada de las corrientes involucradas en el proceso con el fin de analizar termodinámicamente la operación y seleccionar la configuración más apropiada que represente de mejor manera la mezcla crudo-butano-gasolina natural, buscando principalmente la optimización de energía y ubicación de los mezcladores.

La información recopilada referente a los parámetros de operación en el campo se relaciona en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Condiciones Operación de Almacenamiento

Productos	Condiciones de Operación almacenamiento	
	Temperatura (°F)	Presión (psia)
Butano	80	38,7
Gasolina Natural	80	24,7
Aceite	90	15

Fuente: Petrosantander (Colombia) INC.

Tabla 7. Condiciones de Operación Bombas Reforzadoras

Bombas Reforzadoras	Condiciones de Operación almacenamiento		
	Succión		Descarga
	Temperatura (°F)	Presión (psia)	Presión (psia)
Aceie	90	15	60
Butano - Gasolina Natural	83	54,7	144,7

Fuente: Petrosantander (Colombia) INC.

3.3. INFORMACION DE LAS COMPOSICIONES DE LOS TRES TIPOS DE CRUDO, BUTANO Y GASOLINA NATURAL

De igual forma se recopiló información correspondiente a la composición y especificaciones de la fracción pesada de cada tipo de crudo a simular en el

simulador de procesos HYSYS, con el objetivo de representar de la manera más cercana a la realidad el comportamiento a evaluar; igualmente fue posible obtener la información correspondiente a la composición del butano y gasolina natural obtenida de la planta de procesamiento de gas, Tablas 8 y 9.

La tabla 10. muestra las destilaciones ASSAY realizadas en campo a los crudos que serán sometidos al estudio, estos se encuentran en tanques de almacenamiento atmosféricos y son de suma importancia para la simulación, pues aquí está la clave para generar un proceso más realista y garantizar una mayor precisión de los resultados.

Tabla 8. Composición corriente de Butano

	Fracción Molar
C3	0,1326
i-C4	0,3084
n-C4	0,5405
I-C5	0,0156
n-C5	0,0029

Fuente: Petrosantander (Colombia) INC.

Tabla 9. Composición corriente de Gasolina natural

	Fracción Molar
i-C4	0,0601
n-C4	0,1001
I-C5	0,465
n-C5	0,3549
C6	0,02

Fuente: Petrosantander (Colombia) INC.

3.4. CONSIDERACIONES

Se utilizó el simulador de procesos comercial ASPEN-HYSYS para evaluar la viabilidad técnica de la mezcla crudo- butano- gasolina natural para crudo liviano, mediano y pesado bajo las condiciones actuales de procesamiento de la planta de gas natural, así como con las condiciones de operación de las líneas de flujo dentro del campo petrolero.

Los criterios de diseño que se tuvieron en cuenta para el esquema de simulación se enumeran a continuación:

- El paquete de fluidos escogido fue el de Peng Robinson ya que considera la presencia de las dos fases: gas y crudo al igual que componentes contaminantes como el nitrógeno. Este arroja valores de propiedades de líquidos con grados de error que pueden ser considerados despreciables.

- Las propiedades de las fracciones pesadas del crudo tales como el peso molecular, densidad y temperaturas normales de ebullición fueron obtenidas a partir de ASSAYS suministradas por los ingenieros con el objetivo modelar de la mejor forma los tres tipos de crudo.
- Se asumió que las caídas de presión fueran de 10 PSI, para simular los sistemas de filtro de los fluidos; valor sugerido por la GPSA y J. CAMPBELL.
- Para modelar el tanque de almacenamiento final de la mezcla se utilizó un separador bifásico, a partir del cual fue posible conocer las pérdidas por evaporación a las condiciones de transferencia (Presión atmosférica y temperatura de 80-90°F), para el diseño del mismo se tomó por default el que arroja el simulador.
- Para simular la mezcla crudo - butano - gasolina natural se utilizó un equipo llamado MIXER, el cual fue configurado de tal manera que la presión de la corriente de salida sea el valor de la presión menor de las corrientes de entrada para generar un proceso con menor grado de incertidumbre. Se considera que la mezcla es homogénea y estable.

3.5. DESCRIPCION DEL PROCESO

En la figura 19 se muestra el esquema de la simulación realizado. Los porcentajes de volúmenes registrados en el diseño experimental son los diferentes flujos volumétricos que se manejan en el proceso de simulación pero a condiciones actuales de campo.

El almacenamiento de crudo se modela en una corriente que se describe con las condiciones termodinámicas expuestas anteriormente, luego pasa por una bomba reforzadora 1 que aumenta su presión hasta 60 PSla. Simultáneamente el butano y la gasolina natural pasan por bombas reforzadoras, sistemas de filtrado (simulados con caídas de presión) y control de flujo que aumentan su presión de 38.7 PSla y 24.7 PSla respectivamente a 144.7 PSla.

Posterior al aumento de presión controlado para evitar que los condensados del gas natural pasan a fase gaseosa se realiza el proceso de mezcla del crudo – butano – gasolina natural, el cual es almacenado a condiciones de transferencia de custodia, es decir a 14.7 PSla y a una temperatura entre los 70 y 90 °F, teniendo en cuenta los cambios climáticos a los que se expone el producto final. Bajo estas condiciones se evalúa la calidad final del crudo (Mezcla), a partir del RVP, la gravedad API y las pérdidas por evaporación.

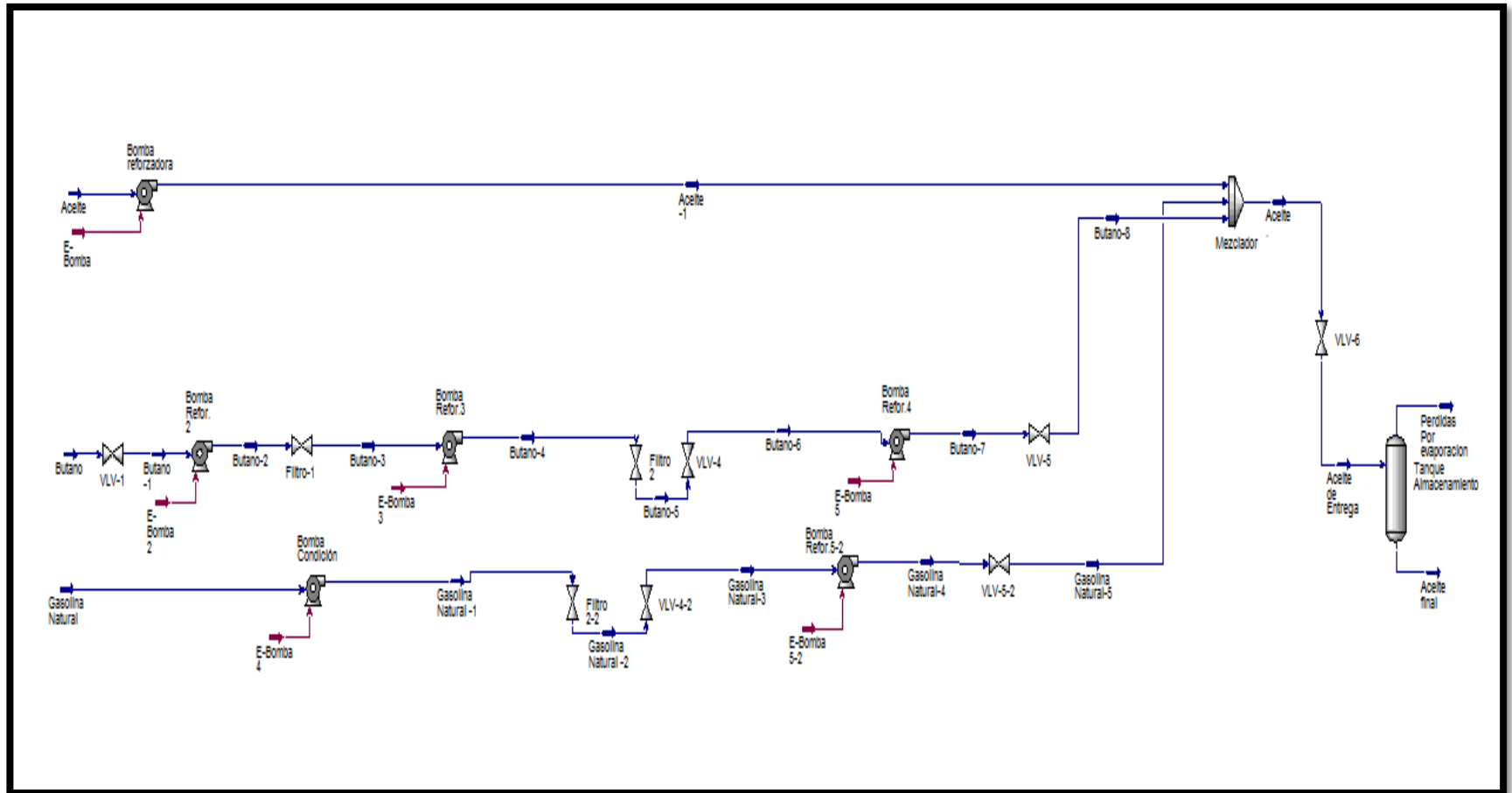
El sistema es evaluado para tres tipos de crudo: liviano, mediano y pesado, esto con el fin de evidenciar el efecto que tiene la mezcla de los productos blancos en la calidad del crudo y el RVP; las condiciones operacionales siguen siendo las mismas en cada tipo de crudo, lo que se modifica es la composición y especificación de la fracción pesada de cada caso.

Tabla 10. Composición Crudo pesado (12,2 °API), Crudo mediano (29,19 ° API) y Crudo liviano (36,06 ° API)

API	Fracción Molar		
	12.2	29.19	36.06
Aceite	Pesado	Mediano	Liviano
CO2	0,0018	0,0019	0,0009
C1	0,0019	0,002	0,1029
C2	0,0005	0,0005	0,0448
C3	0,0021	0,0022	0,0465
i-C4	0,0038	0,0039	0,015
n-C4	0,0054	0,0074	0,0348
i-C5	0	0	0,0212
n-C5	0,0007	0,0007	0,0248
C6	0,0055	0,0268	0,0408
C7	0,0048	0,1008	0,0399
C8	0,0072	0,1	0,0351
C9	0,0001	0,1	0,0288
C10	0,0001	0,1	0,0282
C11	0,0001	0,03	0,0391
C12	0,0008	0	0,0333
C13	0,0072	0,03	0,0335
C14	0,0089	0,01	0,028
C15	0,0036	0,4838	0,0272
C16	0,8874	0	0,0222
C17	0,0581	0	0,0184
C18	0	0	0,0184
C19	0	0	0,0165
C20	0	0	0,0142
C21	0	0	0,013
C22	0	0	0,0117
C23	0	0	0,0108
C24	0	0	0,0097
C25	0	0	0,0081
C26	0	0	0,0069
C27	0	0	0,0078
C28	0	0	0,0071
C29	0	0	0,0068
C30	0	0	0,2036

Fuente: Modificado. Petrosantander (Colombia) INC.

Figura 19. Esquema proceso de mezclado propuesto a escala de campo



3.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo principal de la simulación es evaluar la calidad del crudo de entrega, el RVP y las pérdidas por evaporación a condiciones de transferencia, una vez se ha llevado a cabo la mezcla de este con los derivados del gas natural.

Debido a la importancia que tienen las condiciones meteorológicas a las que está expuesto el fluido, se mostraran las temperaturas y presiones modeladas por el simulador para observar que tanto se ajustan a la realidad.

El análisis de los resultados y la selección de las proporciones óptimas de composición de la mezcla crudo- butano- gasolina natural se basó principalmente en garantizar las menores pérdidas de componentes livianos por evaporación a las condiciones de transferencia de custodia, tomando como parámetro de referencia la presión de vapor de la mezcla(RVP), la cual debía encontrarse cerca o más baja que la presión atmosférica, logrando con ello disminuir el grado de incertidumbre en cuanto a la estabilidad y homogenización de los compuestos en la mezcla, a su vez está relacionado al hecho de mejorar la calidad del crudo con la adición de los condensados del GN.

Así, los resultados obtenidos en la simulación del crudo Mediano al igual que los porcentajes de volumen de la corriente de la mezcla, pérdidas por evaporación y condiciones finales del proceso se resumen en las tablas a continuación:

En la Tabla 12. Se observan las condiciones finales de la mezcla crudo - butano –gasolina natural de un aceite de 29,19° API inicial. A partir de esto es posible analizar el efecto en el API luego de la adición del butano y gasolina natural al crudo. Este efecto puede considerarse como positivo dentro de un rango de aumento de 15- 20 % respecto al valor inicial. El comportamiento del RVP y de las pérdidas por evaporación tiene una tendencia a aumentar cuando el porcentaje en volumen del crudo disminuye. La estabilidad de la mezcla teóricamente es buena,

esto se ve reflejado en los rangos del RVP cercanos a 14,7 PSia, lo que significa que para el crudo mediano, la mezcla logra una mejor homogenización bajo las condiciones operacionales de campo.

Así, se concluye que la composición de la mezcla que mejor representa las necesidades del proyecto se encuentran reflejadas en la Tabla 11. Ya que el RVP de la mezcla bajo estas proporciones es menor a la presión atmosférica teniendo de esta manera, un porcentaje mínimo de pérdidas por evaporación.

Tabla 11. Condiciones óptimas mezcla crudo mediano

Número Prueba	Oil (%)	Butano (%)	Gasolina Natural (%)	API	Psia	MMSCFD
					RVP	Perdidas de Evaporación
1	90	5,0	5,0	33,48	10,93	0,0001726
5	85	7,5	7,5	35,56	13,7	0,0009679
9	85	5,0	10,0	35,56	12,34	0,0003009
10	85	10,0	5,0	35,36	14,63	0,002187

Fuente: Modificado Hysys

La Prueba 9 representa la composición de la mezcla óptima que cumple con todos parámetros establecidos, un bajo RVP, manteniendo una gravedad API alta.

Tabla 12. Resultados obtenidos para crudo 29,19 API mediante ASPEN HYSYS

Número Prueba	Oil (%)	Butano (%)	Gasolina Natural (%)	API	Psia	MMSCFD	Tanque Almacenamiento	
					RVP	Perdidas de Evaporación	Temperatura [F]	Presion (Psia)
1	90	5,0	5,0	33,48	10,93	0,0001726	89,29	14,7
2	80	5,0	15,0	37,72	13,6	0,0004936	87,92	14,7
3	70	15,0	15,0	40,94	18,89	0,008053	76,17	14,7
4	80	15,0	5,0	36,61	16,87	0,006352	80,26	14,7
5	85	7,5	7,5	35,56	13,7	0,0009679	87,85	14,7
6	80	7,5	12,5	37,64	14,78	0,001434	86,71	14,7
7	75	12,5	12,5	39,09	17,24	0,00545	80,63	14,7
8	80	12,5	7,5	37	16,28	0,004601	82,55	14,7
9	85	5,0	10,0	35,56	12,34	0,0003009	88,66	14,7
10	85	10,0	5,0	35,36	14,63	0,002187	86,33	14,7
11	75	10,0	15,0	39,47	16,55	0,003672	83,06	14,7
12	80	10,0	10,0	37,36	15,62	0,002905	84,77	14,7
13	75	15,0	10,0	38,7	17,88	0,007239	78,2	14,7

Fuente: Modificado. Hysys

En las figuras 20 y 21 puede observarse el comportamiento de la gravedad API y el RVP influenciado por las proporciones en las cuales se llevaron las diferentes pruebas, en estas figuras es posible apreciar que las condiciones bajo las cuales se genera un mayor valor de gravedad API es la de 70%-30% crudo- LGN. Sin embargo, bajo estas mismas condiciones el RVP que se obtiene es de 18,89 PSI, muy superior a la presión atmosférica, evidenciando altas pérdidas por evaporación, representado en disminución del volumen final de la mezcla.

Los resultados para crudo liviano y pesado, al igual que sus respectivos análisis se encuentran en los anexos A y B.

Nota: El tanque de almacenamiento está operando a condiciones atmosféricas, es decir a 14 PSIA y a 96 °F aproximadamente. Los resultados obtenidos para los tres tipos de crudo ninguno alcanza a estas condiciones de temperatura; aclaración importante debido a que la evaporación de componentes livianos altamente volátiles podría representar una posible amenaza de seguridad (incendios, explosiones) al encontrarse bajo estas condiciones.

Figura 20. Gravedad API influenciada por composición crudo mediano según Hysys

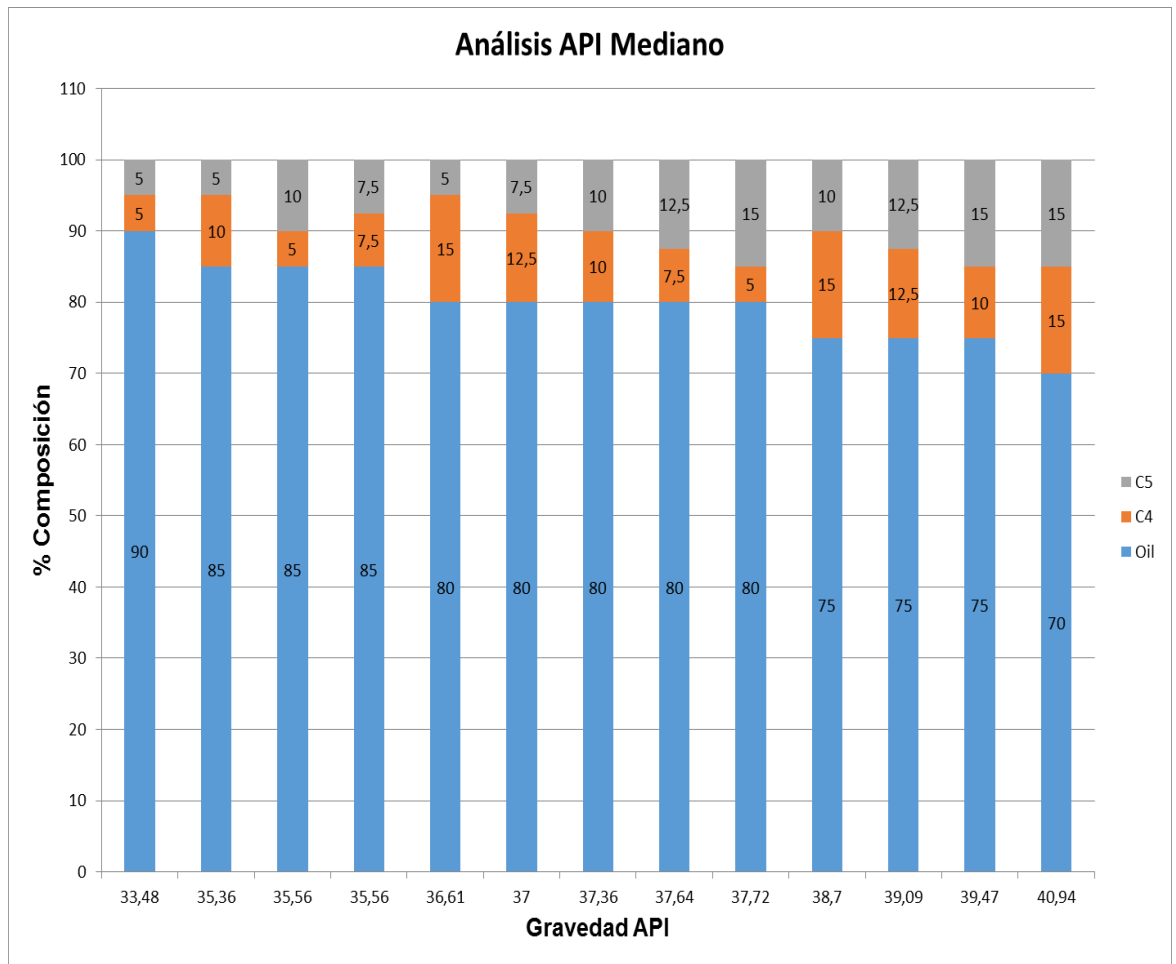
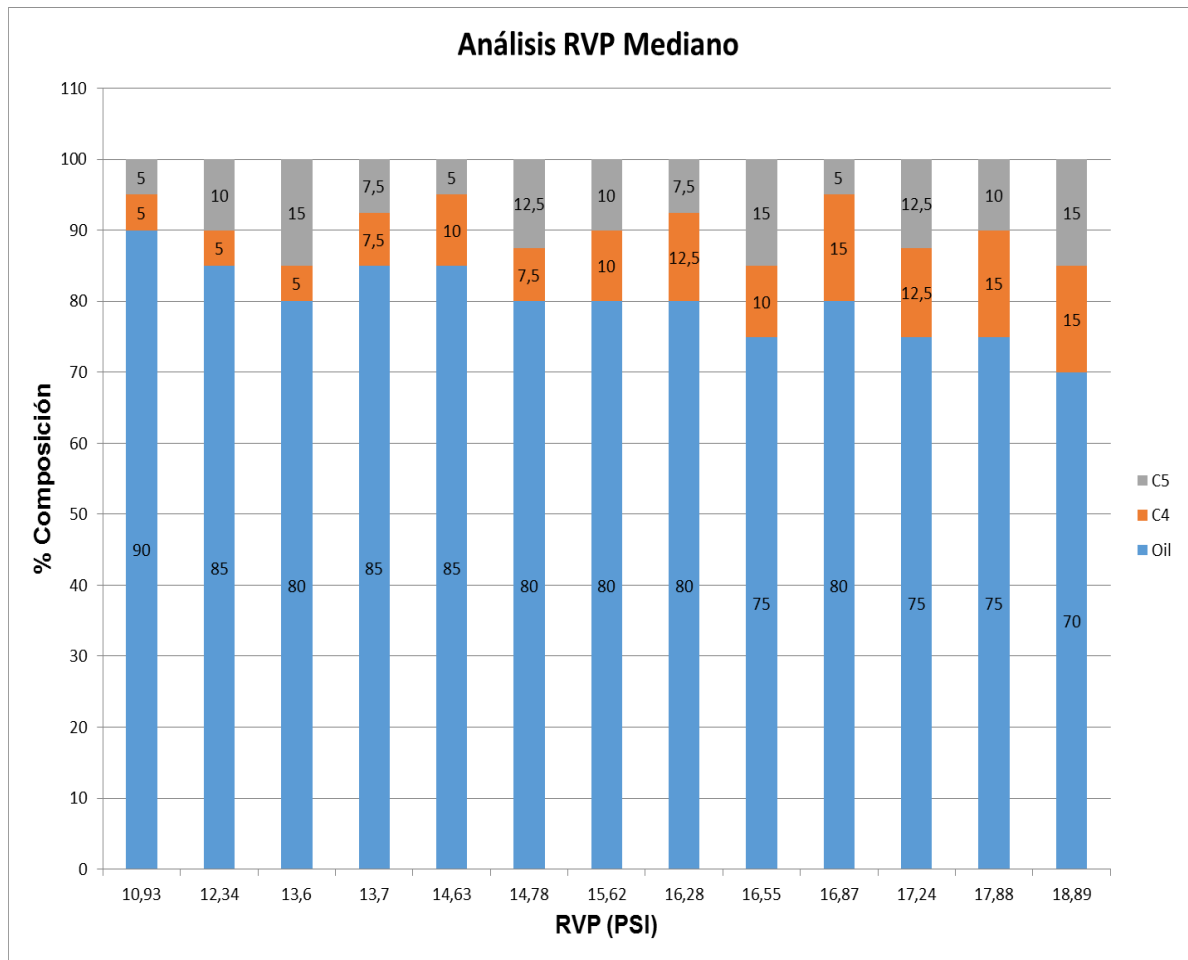
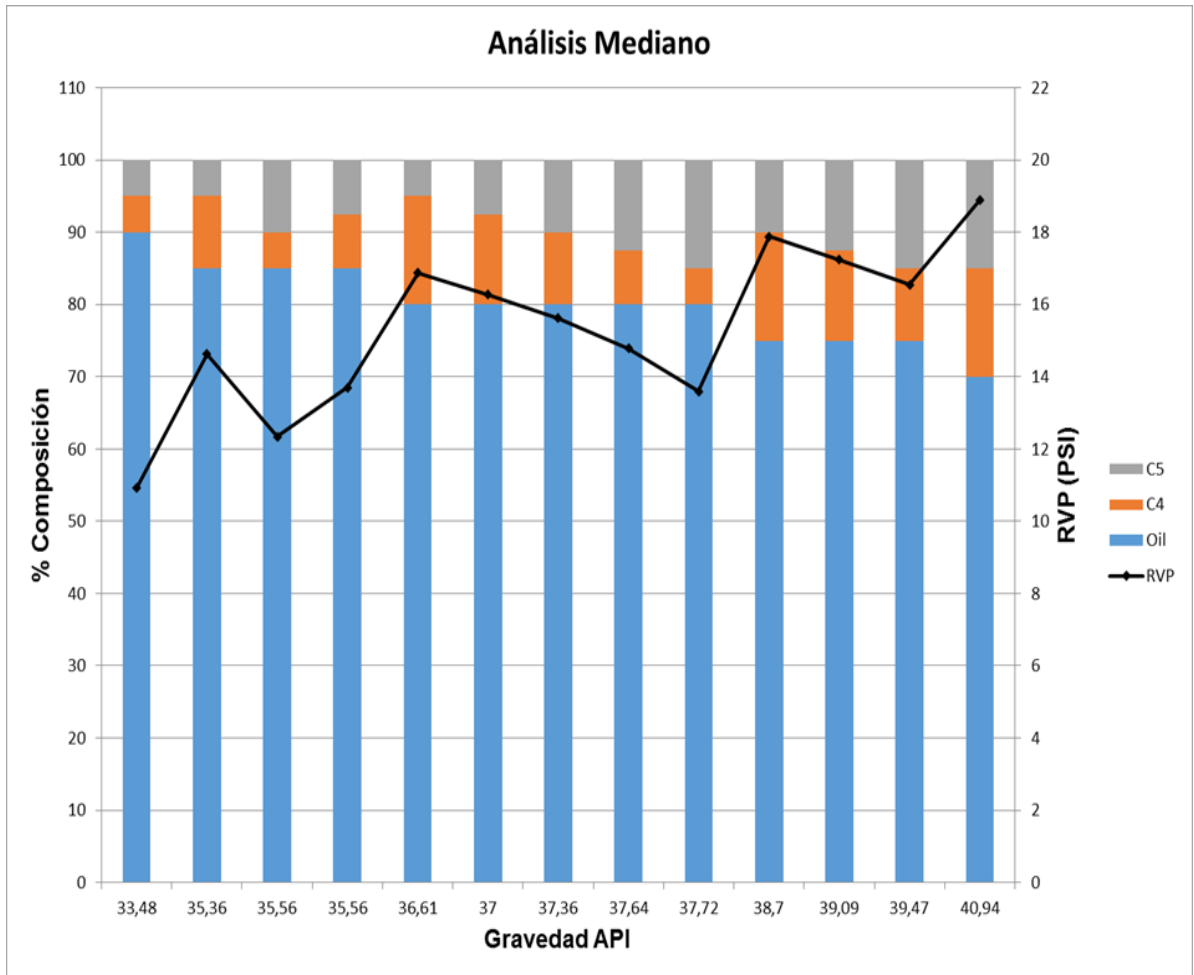


Figura 21. RVP influenciado por composición de crudo mediano según Hysys



En la figura 22 puede observarse en conjunto el análisis para RVP y gravedad API, de acuerdo a la composición, en la cual tal como se mostró en la tabla 12, los mejores comportamientos son descritos bajo los escenarios con composiciones del 85%-15% crudo-LGN y 90%-10%; casos para los cuales el RVP es cercano a 14,7 PSI o menor.

Figura 22. Análisis Final crudo mediano según Hysys



4. PRUEBAS LABORATORIO

Teniendo en cuenta uno de los objetivos del estudio, el cual es determinar las proporciones óptimas de una mezcla estable crudo-butano-gasolina natural, se plantearon una serie de pruebas experimentales que buscaban evaluar la estabilidad tanto de la gasolina como del butano bajo determinadas condiciones. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas a escala de laboratorio y en las cuales se buscaba observar el comportamiento de la gasolina y el butano en presencia de crudo de diferentes gravedades API, pasando por crudo de tipo liviano, mediano y pesado respectivamente. Las variables medidas durante las pruebas experimentales fueron temperatura, gravedad API y RVP.

Teniendo en cuenta el diseño experimental realizado y lo observado en las pruebas preliminares aleatorias se decidió la mejor forma de reproducir el sistema de mezclado a estudiar contemplando los volúmenes a utilizar y el equipo necesario para el seguimiento de las pruebas.

4.1. MONTAJE EXPERIMENTAL

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo mezclando butano, gasolina y crudo en diferentes proporciones con el fin de identificar bajo qué condiciones la mezcla exhibe un comportamiento estable en cuanto a la calidad observada del crudo después de la adición de los productos blancos y en cuanto a pérdidas por evaporación una vez se lleve la muestra a condiciones atmosféricas. Durante el transcurso de las pruebas, se realizó medición de la temperatura, gravedad API y el RVP, tanto al crudo sin mezcla como a la mezcla realizada. Los elementos utilizados para llevar a cabo el montaje experimental de las pruebas desarrolladas se muestra en las figuras 23 y 24.

La realización de las pruebas conllevó a la utilización de probetas, cilindro de presión aforado, termohidrómetro, termómetro, equipo RVP y el volumen suficiente de cada uno de los componentes para llevar a cabo las mezclas.

Inicialmente se prepararon los volúmenes correspondientes a los porcentajes de cada uno de los componentes y los cuales se ajustaban a los anteriormente especificados en el diseño experimental. Estos volúmenes se midieron directamente en el cilindro aforado a medida que se adicionaban a la mezcla, durante este proceso se realizó medición estática bajo estas condiciones con el fin de determinar el volumen que se pierde por efecto de miscibilidad entre estos componentes.

Para efectos de este estudio, se hicieron las pruebas de dos maneras diferentes:

1. Se hizo una pre-mezcla gasolina-butano en diferentes proporciones y posteriormente se mezclaron con el crudo, se presurizó y se agitó la mezcla con el objetivo de homogenizarla. Una vez lista la mezcla se llevó a cabo la respectiva medición de las propiedades anteriormente mencionadas.
2. Se realizó la mezcla, adicionando uno a uno cada componente, se procedió a presurizar el sistema y mediante agitación manual se intentó homogenizar la mezcla, para la posterior medición de sus características.

Se realizaron pruebas de las dos formas mencionadas anteriormente y ya que se observaron resultados similares, se decidió para efectos prácticos y en cumplimiento del diseño experimental realizado ejecutar las pruebas adicionando uno a uno cada componente.

4.2. PROCEDIMIENTO

En un cilindro aforado se llevó a cabo la mezcla final que contenía crudo, butano y gasolina en las proporciones determinadas a partir del diseño elaborado. El cilindro contenía dos válvulas que permitían regular la entrada de cada componente al mismo, así como presurizar el sistema para garantizar el estado líquido del butano y la gasolina y despresurizarlo para realizar la respectiva medición de las pérdidas por evaporación.

Al crudo a utilizar durante el estudio experimental de laboratorio se le realizó previamente medición de temperatura y gravedad API para contar con bases que permitieran discernir de una buena manera los resultados obtenidos en el desarrollo del mismo; la medición de la gravedad API antes de adicionarle los productos blancos se realizó según procedimiento de la norma ASTM D 287, API Gravity Of Crude Petroleum And Petroleum Products (Hydrometer Method)¹⁷ y la interpretación y análisis de los resultados se complementó con la norma ASTM D 1250, "Petroleum Measurements Tables"¹⁸. Los resultados de las pruebas en blanco son mostrados en la tabla 13.

Una vez la mezcla estuvo contenida en el cilindro y las mediciones respectivas de API y temperatura fueron realizadas se procedió a llevar una muestra representativa al equipo de RVP y medir la presión de vapor de la misma, esto con el objetivo de tener idea acerca de las pérdidas en volumen que se podrían obtener bajo las condiciones de determinada prueba.

En la figura 23 se muestra el cilindro utilizado para la realización de las pruebas experimentales, con sus correspondientes accesorios, los cuales fueron de vital importancia para el cumplimiento de lo planteado en el proyecto, en especial para

¹⁷ STANDAR TEST METHOD

¹⁸ BENJUMEA, P., CHAVÉS, G., VARGAS, C. "Efecto de la temperatura sobre la densidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel convencional". Instituto de Energía, Facultad de minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2006

la medición del volumen final una vez llevada la mezcla a condiciones atmosféricas.

Tabla 13. Pruebas en blanco

Pruebas en Blanco		
	API (°)	RVP (PSI)
Crudo Pesado	12	1,5
Crudo Mediano	29	4,5
Crudo Liviano	36	5,4
Gasolina Natural	54,68	12
Butano	109,96	45

Fuente: Petrosantander (Colombia) INC.

(Nota: Se realizaron pruebas simultáneas de iguales composiciones para hacer la medición de RVP y de pérdidas por evaporación)

4.2.1. Paso a Paso

Para la realización de las pruebas descritas a lo largo de este capítulo, inicialmente se adicionó el volumen de crudo al cilindro aforado, posteriormente el volumen de gasolina y butano respectivamente, según evaluación arrojada por el diseño experimental creado en la herramienta software STATGRAPHICS Centurion XVI.

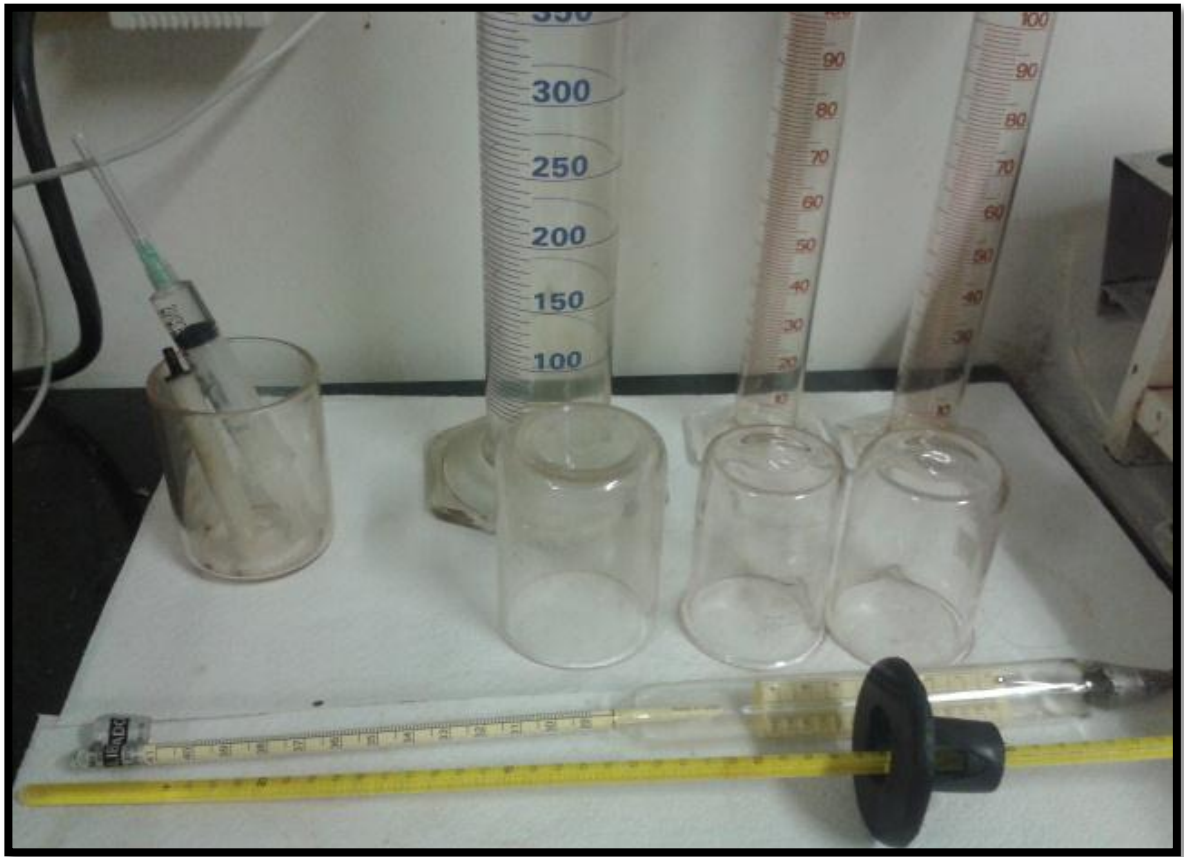
Figura 23. Cilindro Aforado Para Desarrollo de Prueba



Si bien, una vez obtenidas las pruebas que exhibían un bajo RVP con una alta gravedad API a través de la simulación la idea era corroborar dichos resultados con esas mismas pruebas, sin embargo se realizaron las mismas 13 pruebas para contar con resultados válidos a la hora de la comparación de los mismos.

Cada una de las 13 pruebas a realizar según diseño experimental, se ejecutaron para crudo liviano, mediano y pesado en cumplimiento de los objetivos del estudio.

Figura 24. Elementos utilizados para realizar las pruebas



En principio, el crudo fue agregado al sistema de acuerdo a la proporción correspondiente según el número de pruebas a realizar teniendo en cuenta lo obtenido a partir de la herramienta software.

- a. La mezcla crudo-gasolina-butano se presurizó hasta 45 PSI aproximadamente, esto con el fin de evitar la evaporación de los productos blancos del gas natural. Figura 26.

COMPONENTE	RVP
C ₄	45
C ₅	12

- b. Una vez se tuvieron todos los componentes en el cilindro se procedió a agitar la mezcla con el fin de homogenizar la misma y de esta manera tener resultados más reales del comportamiento de dicha mezcla.
- c. Una vez garantizado lo anterior, la muestra fue llevada a condiciones atmosféricas, momento en el cual se realizó la medición de gravedad API y temperatura; así mismo una muestra representativa de la mezcla fue llevada a medición de RVP (Según procedimiento de la norma ASTM D 323 Standard Test Method for Vapor Pressure of Petroleum Products). Figura 28.
- d. Se realizó el mismo procedimiento variando las proporciones de butano, gasolina y crudo a utilizar, al igual que el tipo de crudo.
- e. Cada uno de los resultados obtenidos en las pruebas fueron registrados en una tabla resumen con el fin de obtener tener mayor claridad acerca de estos.

Figura 25. Adición del crudo al cilindro.



Figura 26. Mezcla Petróleo-Gasolina-Butano



Figura 27. Medidor de presión de vapor



4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de los resultados obtenidos se tuvo en cuenta la incertidumbre generada en la evaluación de la mezcla con crudo pesado ya que no en todos los casos fue posible una homogenización total del crudo con el butano y la gasolina. Sin embargo, tanto en crudos medianos como en livianos fue posible llevar a cabo el análisis completo en cuanto a gravedad API y RVP. Para efectos de este proyecto, serán mostrados los resultados obtenidos con el crudo producido en el campo a evaluar, el cual es crudo mediano de aproximadamente 29° API.

El análisis de los resultados y la consecuente elección de las proporciones óptimas para una mezcla estable crudo-butano-gasolina natural se realizó teniendo en cuenta que para garantizar las menores pérdidas de volumen por efecto de la evaporación, las composiciones a elegir eran aquellas cuyo RVP de la mezcla estuviera cercano o menor a la presión atmosférica, logrando con ello tener un margen de certeza en cuanto a la estabilidad de los compuestos de la mezcla, esto ligado al hecho de mejorar la calidad del crudo con la adición de butano y gasolina natural.

Figura 28. Medición de RVP



Figura 29. Medición API



Los resultados obtenidos durante el desarrollo de la prueba son presentados en la tabla 14 al igual que gráficamente mediante diagramas de barras y de contornos de superficies, en estos se puede apreciar el efecto de las proporciones tanto de crudo, como de butano y gasolina natural sobre el comportamiento de la gravedad API, la cual varía desde los 32,7° hasta los 36,8°.

El gráfico de contornos (Figura 32) ofrece una región factible y a partir de la cual es viable establecer las proporciones de cada uno de los componentes en las cuales es posible obtener un crudo de mejor calidad, igualmente con el gráfico de contornos, es posible evaluar las proporciones en las cuales se obtiene un valor de RVP estable para la mezcla.

Tabla 14. Resultados obtenidos para crudo de 29° API

<i>Ejecución</i>	Crudo Mediano @ 29° API					Pre mezcla	
	<i>Oil (%)</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>	<i>API</i>	<i>RVP</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>
1	90	5	5	32,7	9	50,0	50,0
2	80	5	15	34,6	11,1	25,0	75,0
3	70	15	15	42,3	15	50,0	50,0
4	80	15	5	37,3	11,8	70,0	30,0
5	85	7,5	7,5	34	9	50,0	50,0
6	80	7,5	12,5	33,9	11	37,5	62,5
7	75	12,5	12,5	39,5	12,5	50,0	50,0
8	80	12,5	7,5	36,1	11,5	62,5	37,5
9	85	5	10	34,4	9	33,3	66,7
10	85	10	5	34,8	9,5	66,7	33,3
11	75	10	15	37,7	12,7	39,4	60,6
12	80	10	10	36,4	10,7	50,0	50,0
13	75	15	10	38,2	13	60,0	40,0

En las figuras 30 y 32 se puede observar la influencia de las diferentes proporciones en que se realizaron las distintas mezclas butano-gasolina-crudo sobre la gravedad API y el RVP respectivamente. En la figura 30 se puede apreciar que la proporción que ofrece una mayor calidad del crudo está en el orden de 70-30% crudo-LGN, sin embargo, al comparar esta proporción con su correspondiente en función del RVP (Figura 32) es notorio que bajo estas condiciones se exhibe el mayor valor de RVP, consiguiendo con esto una alta probabilidad de pérdidas por evaporación y baja estabilidad de la mezcla.

Figura 30. Análisis Gravedad API

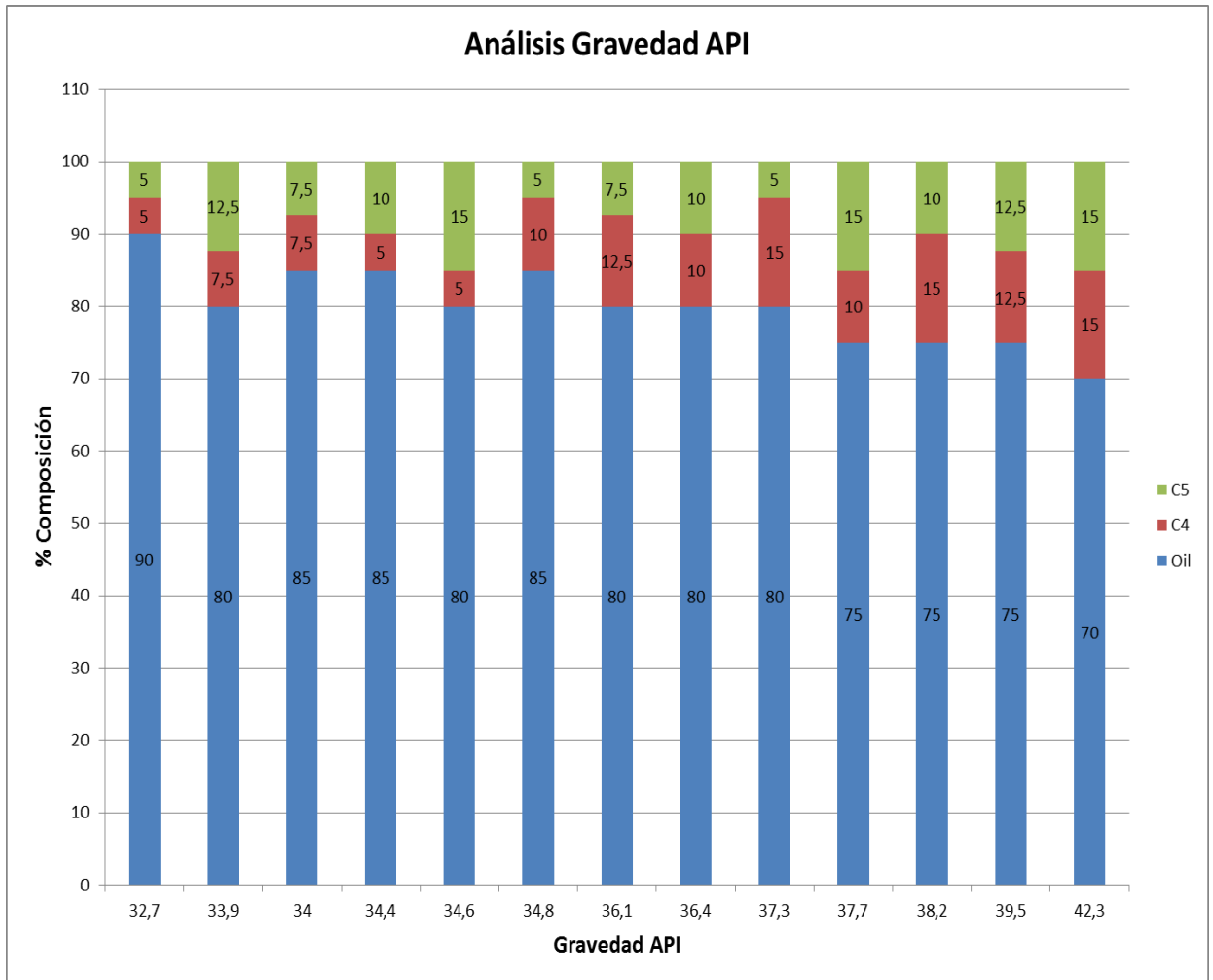
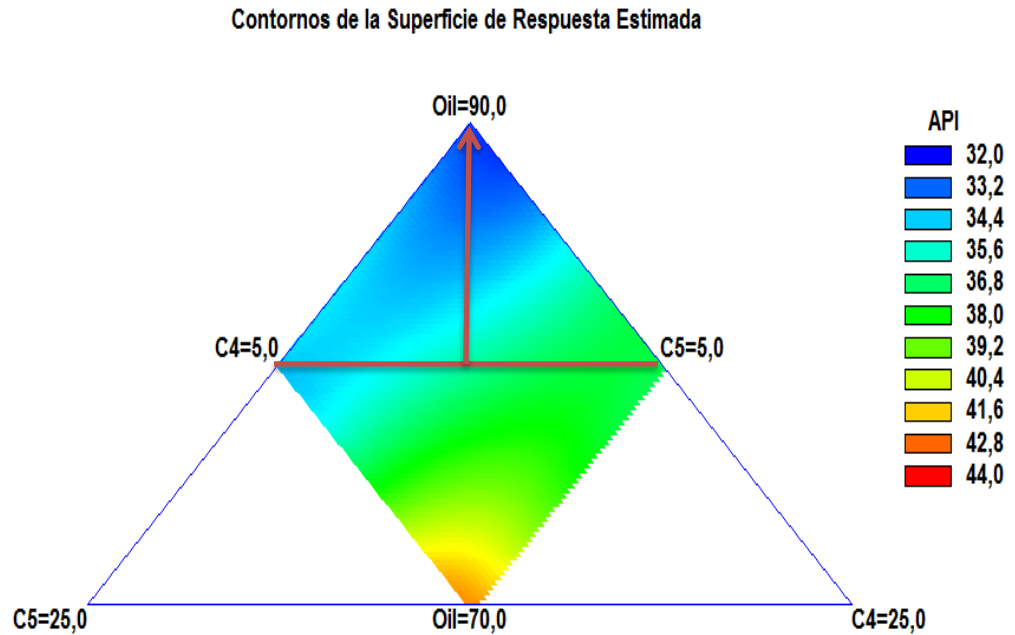


Figura 31. Contornos de superficie de respuesta API



Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Una vez obtenidos los resultados, se buscó validar los mismos mediante un análisis estadístico el cual se encuentra resumido en una tabla ANOVA, la cual muestra los grados de libertad posibles en la estimación del error experimental. En general, un buen diseño tiene al menos tres o cuatro grados de libertad, en este caso se muestran 7.

De igual manera, la tabla 15 presenta el R- cuadrado, una medida que explica el % de variabilidad de una respuesta, para este caso, se tuvo una variabilidad del 93,9% para la gravedad API en crudo mediano según el diseño seleccionado para el desarrollo del proyecto. Teniendo en cuenta el valor de R-cuadrado es posible concluir que el diseño seleccionado para modelar este comportamiento se ajusta de manera positiva.

Tabla 15. Tabla ANOVA API Crudo Mediano

FUENTE	GL / VALOR
Modelo Cúbico Especial	6
Error Total	7
Falta de ajuste	6
Error Puro	1
Total	13
R-Cuadrada	93,9 (%)
Error estándar	0,282
Error absoluto	0,473

Las figuras 32 y 33 se complementan ya que la figura 33 muestra una ayuda visual a la interpretación de resultados desde el diagrama de barras. En el contorno de superficie se observa la variación del RVP desde los 8,8 PSI en color azul hasta los 14,8 PSI en color naranja oscuro, valores correspondientes a la zona factible formada por los límites elegidos para cada uno de los componentes, y en la cual será posible definir la mejor condición para la obtención de un RVP mínimo que garantice pocas o nulas pérdidas en volumen debido a la evaporación.

En este caso se observa que el modelo cúbico especial explica en un 95% la variabilidad del RVP en un crudo mediano. Teniendo en cuenta el comportamiento de los resultados mediante el modelo seleccionado es posible decir que fue acertada la decisión de aplicarlo en el caso estudio.

Figura 32. Análisis RVP

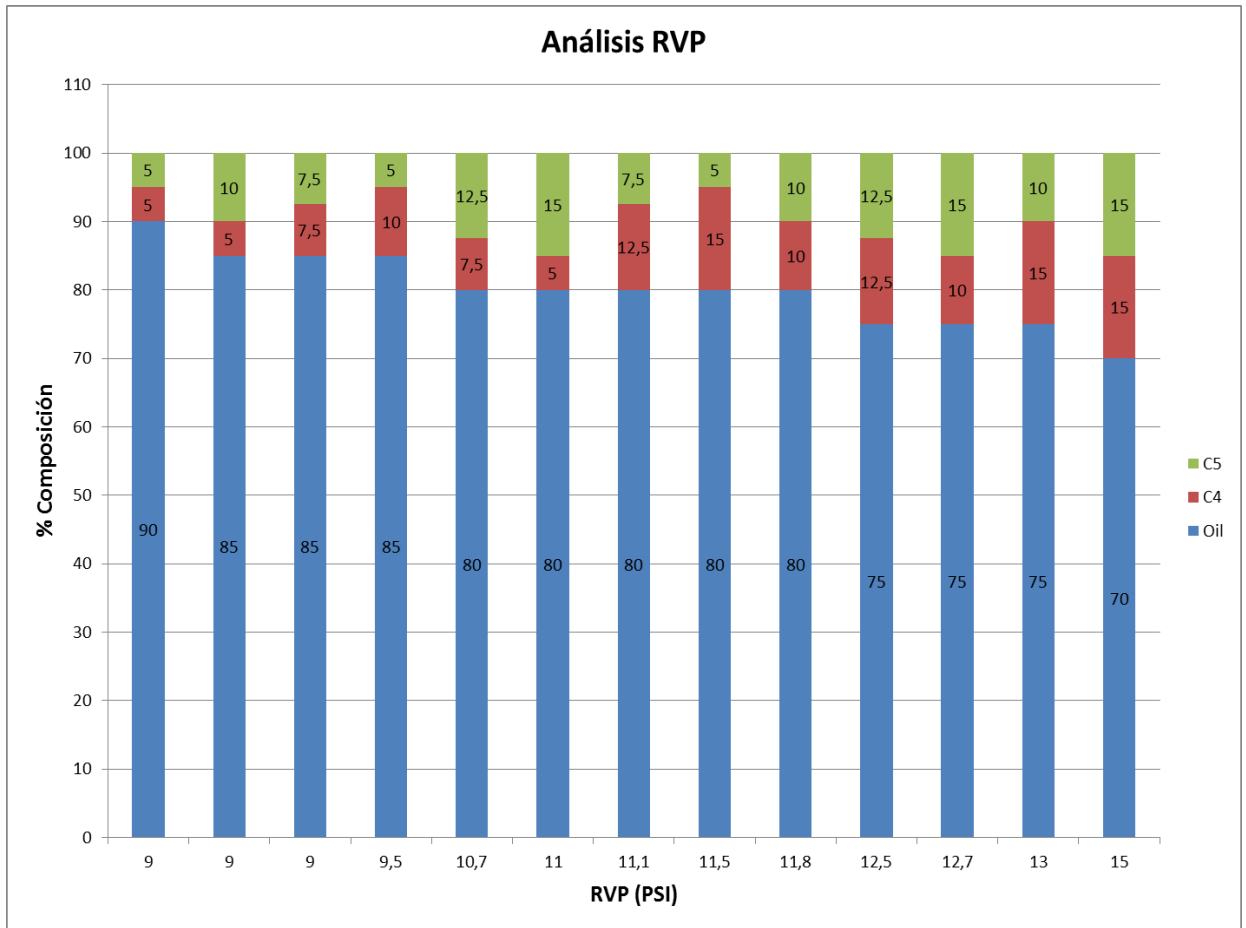
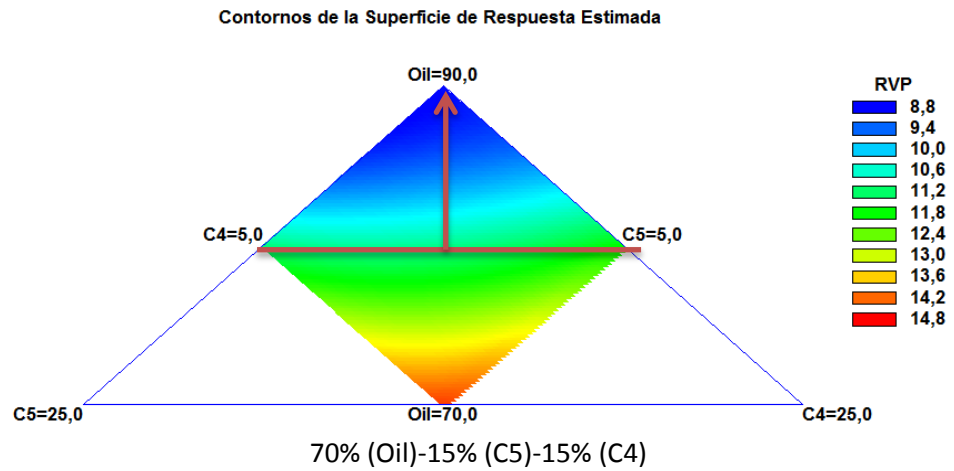


Figura 33. Contorno de superficie de respuesta RVP.



Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Tabla 16. Tabla ANOVA RVP Crudo Mediano

FUENTE	GL / VALOR
Modelo Cúbico Especial	6
Error Total	7
Falta de ajuste	6
Error Puro	1
Total	13
R-Cuadrada	95,08 (%)
Error estándar	1,06
Error absoluto	0,268

Fuente: Modificado. Statgraphics

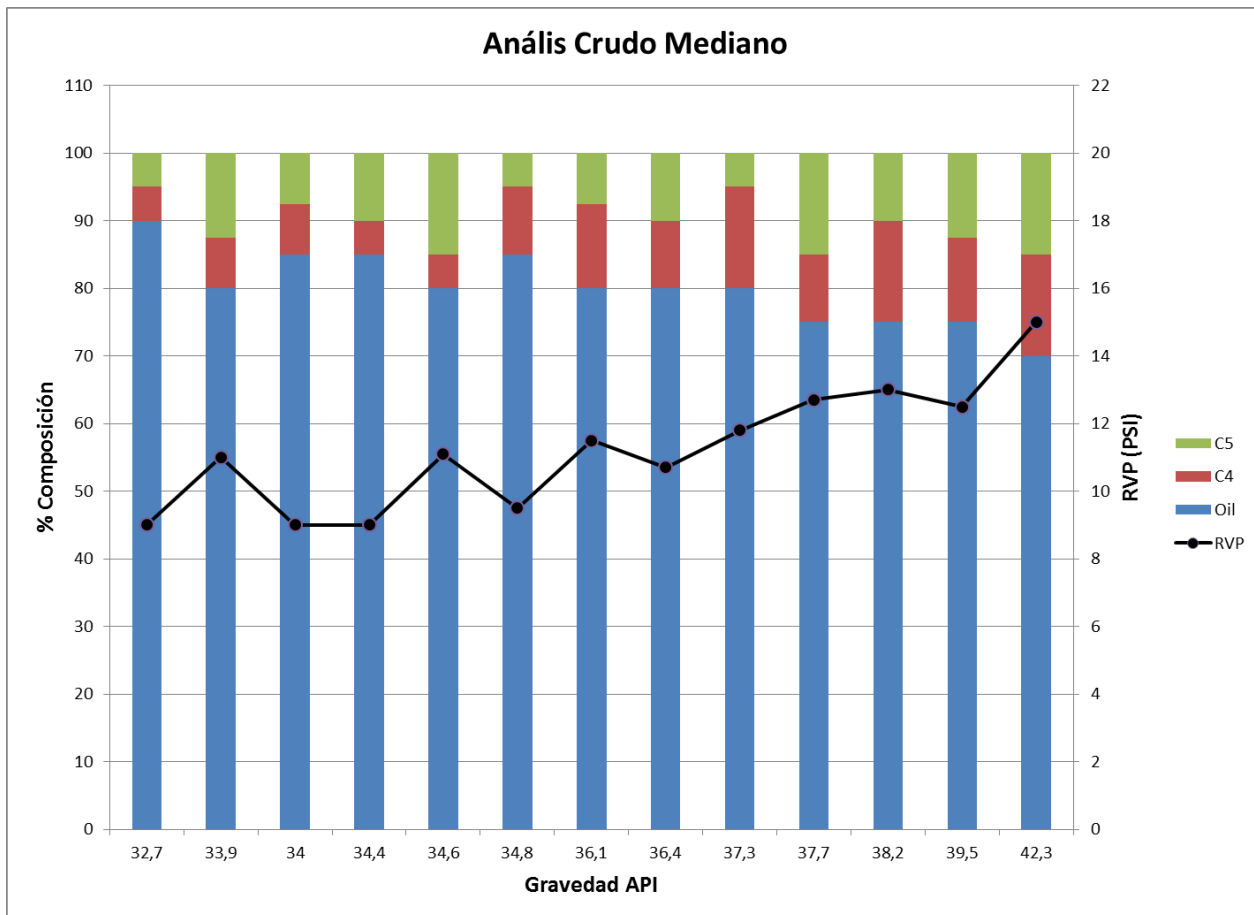
Según lo presentado en la Figura 34, teniendo en cuenta tanto RVP como gravedad API las proporciones máximas a mezclar con crudos de gravedad API de 29 o similares, dentro del rango de los crudos medianos serían todas las proporciones realizadas en este estudio, exceptuando la prueba realizada bajo proporciones 70%-30% crudo-LGN, ya que el RVP medido en este caso excede la presión atmosférica. Por lo que respecta a las demás proporciones es teóricamente aceptable realizarlas ya que el RVP de estas es menor o cercano a la presión atmosférica, lo que garantizaría una estabilidad en términos de pérdidas de volumen de la mezcla.

Sin embargo, haciendo más rigurosa la selección y teniendo en cuenta que con este estudio se busca aprovechar al máximo los productos blancos como componentes de la mezcla para su posterior uso en el proceso de transferencia de custodia, se considerarán las condiciones de presión y temperatura a la cual se encuentran sometidos finalmente los tanques de almacenamiento de crudo al final del proceso y que harán que las condiciones de evaporación de los compuestos cambien. Estas condiciones serán las presentadas en Refinería, aproximadamente 90°F y 10 PSI¹⁹

Es por esto y que con el fin de garantizar la estabilidad planteada para la mezcla, se elegirán aquellas composiciones que hayan obtenido un RVP experimental de 10 PSI, teniendo así un mayor grado de certeza del comportamiento que exhibirá la mezcla. Siendo así, las corridas ejecutadas y que cumplen con esta característica se muestran en la tabla 17.

¹⁹ Condiciones de presión y temperatura Barrancabermeja aproximadamente

Figura 34. Análisis Crudo Mediano



Teniendo en cuenta esto, las proporciones seleccionadas son resumidas a continuación en la tabla 17.

Aunque para este caso, la proporción 90-10% petróleo-LGN exhibe un buen comportamiento, no se elige debido a que se busca dar el mayor aprovechamiento a estos LGN y un 10% no sería un porcentaje representativo para dicho fin, además la calidad del crudo aunque mejoraría, es mejor cuando se emplea una proporción de LGN mayor. Es por esto que en este caso, se concluye que la

proporción adecuada y óptima que puede ofrecer una mezcla estable en cuanto a RVP y gravedad API es la de 85-15%.

Teniendo en cuenta los resultados optimizados tanto para gravedad API como para RVP la región descrita por la línea perpendicular (Figuras 31 y 33) a las líneas de contorno ofrece una zona de estabilidad para la mezcla teniendo en cuenta los límites mostrados para cada uno de los componentes a combinar.

Tabla 17. Condiciones de Mezcla Estable

<i>Oil (%)</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>	<i>API</i>	<i>RVP</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>
90	5	5	32,7	9	50,0	50,0
85	7,5	7,5	34	9	50,0	50,0
85	5	10	34,4	9	33,3	66,7
85	10	5	34,8	9,5	66,7	33,3

4.3.1. Pérdidas

A lo largo del proceso de mezclado además de la medición de gravedad API y RVP se llevó a cabo la medición del volumen que se perdía por miscibilidad de los componentes entre sí, así como pérdidas por evaporación al pasar el sistema de unas condiciones en las cuales se podría garantizar el estado líquido de cada uno de los componentes a condiciones atmosféricas; que sería el equivalente de representar condiciones de transferencia y finalmente condiciones de almacenamiento.

En la tabla 18 se pueden apreciar las pérdidas por evaporación registradas en la mezcla dependiendo de las proporciones en las cuales se estableció el diseño experimental.

Tabla 18. Pérdidas por evaporación en crudo mediano

<i>Ejecución</i>	Crudo Mediano @ 29° API					Pre mezcla		
	<i>Oil (%)</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>	<i>API</i>	<i>RVP</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>	<i>% Pérdidas</i>
1	90	5	5	32,7	9	50,0	50,0	3,61
2	80	5	15	34,6	11,1	25,0	75,0	4,72
3	70	15	15	42,3	15	50,0	50,0	16,67
4	80	15	5	37,3	11,8	70,0	30,0	5,56
5	85	7,5	7,5	34	9	50,0	50,0	4,72
6	80	7,5	12,5	33,9	11	37,5	62,5	5,00
7	75	12,5	12,5	39,5	12,5	50,0	50,0	13,89
8	80	12,5	7,5	36,1	11,5	62,5	37,5	5,56
9	85	5	10	34,4	9	33,3	66,7	4,86
10	85	10	5	34,8	9,5	66,7	33,3	4,60
11	75	10	15	37,7	12,7	39,4	60,6	5,56
12	80	10	10	36,4	10,7	50,0	50,0	5,44
13	75	15	10	38,2	13	60,0	40,0	13,89

Teniendo en cuenta el análisis hecho al RVP y a la gravedad API de la mezcla final y con el cual se determinó que las proporciones optimas de mezclado serían las planteadas en la prueba #9, 85% crudo, 15% LGN, se procedió a evaluar igualmente las pérdidas por evaporación asociadas a estas proporciones, las cuales están en un orden del 5% en volumen aproximadamente. Aunque uno de los objetivos es determinar qué tan estable puede ser el sistema teniendo en cuenta las pérdidas producto de la evaporación, es importante resaltar que esto va

de la mano con la optimización en cuanto a la calidad del crudo final, lo que a su vez estaría ligado a una mayor fuente de ingresos en caso de ser una práctica viable a nivel de campo. Teniendo en cuenta que la mejora en cuanto a la calidad final del crudo es de un 15% aproximadamente, la pérdida de un 5% sería aceptable como parte del proyecto y como punto de partida en cuanto a la búsqueda de nuevas formas de mejorar la estabilidad de la mezcla.

De igual manera, no solo se aprecian pérdidas por evaporación, las hay también debidas a la miscibilidad que existe entre los componentes del sistema, estos al ser derivados del petróleo, poseen una alta afinidad a disolverse en este bajo determinadas condiciones de presión y temperatura. En la tabla 19 se pueden apreciar las pérdidas por miscibilidad realizadas bajo medición estática y bajo escenarios aislados a las pruebas de laboratorio iniciales.

Tabla 19. Pérdidas por Miscibilidad

Oil	Premezcla	% Miscibilidad
90,5	9,5	2,24
90	10	0,54
91	9	0,27

Una vez teniendo en cuenta las pérdidas por miscibilidad observadas más las producidas por evaporación a escala de laboratorio es necesario entrar a evaluar si las condiciones bajo las cuales se realizaron las pruebas son las más adecuadas y cumplen con lo necesario para garantizar la no evaporación de estos componentes; referente a las mediciones obtenidas para definir el grado de miscibilidad de los componentes de la mezcla se puede concluir que estos

porcentajes son debidos a las características afines que poseen estos compuestos al ser derivados del petróleo. Si bien, los resultados arrojados de las mediciones no son concluyentes debido al bajo porcentaje de pre-mezcla utilizado, puede observarse la tendencia de miscibilidad de estos compuestos aún para bajas proporciones de mezcla. Teniendo en cuenta estos resultados, se hace necesario realizar a una escala mayor estas pruebas, no solo para evaluar las pérdidas en volumen por miscibilidad sino por evaporación; igualmente evaluar la viabilidad de económica de realizar mezclas en mayores proporciones para compensar las pérdidas generadas.

Los análisis realizados a crudo pesado y crudo liviano en cumplimiento con los objetivos planteados en este estudio, se encuentran en los anexos C y D.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

El presente estudio fue realizado tanto a nivel de laboratorio, como escalado a condiciones de campo mediante el simulador de procesos HYSYS. Los resultados obtenidos fueron presentados y analizados en los capítulos anteriores.

En este capítulo se plantea una comparación bajo los dos escenarios con el objetivo de evaluar las condiciones en las cuales la mezcla exhibiría un comportamiento estable a nivel de gravedad API y RVP, teniendo en cuenta las condiciones operativas en caso tal de ser realizada a escala macro en la implementación del proceso de transferencia de custodia.

Las figuras 35, 36 y 37 muestran el análisis comparativo entre los resultados obtenidos en laboratorio y los arrojados por Hysys; aunque en algunas la tendencia mostrada es casi similar, en la tabla 21 puede apreciarse el grado de error generado en cada variable de respuesta.

Teniendo en cuenta los análisis realizados en los capítulos 3 y 4 respecto a las pruebas de laboratorio y las simulaciones hechas en Hysys, se puede concluir que el principal factor de influencia tanto en el aumento de la gravedad API y el RVP es el butano, ya que a mayores proporciones de este dentro de la mezcla, estas variables revelan un cambio; a mayor contenido de butano más alto será el valor de gravedad API y el RVP.

Sin embargo, las condiciones de presión y temperatura a condiciones ambientales juegan un papel importante, ya que a medida que la temperatura externa aumenta, la tendencia de los componentes livianos a abandonar la fase líquida aumenta, conllevando con esto a que deba considerarse una mezcla estable aquella cuyo RVP (Presión de vapor Reid) arroje un menor valor respecto a la presión atmosférica.

En la tabla 20 se observan las composiciones de cada una de las mezclas realizadas durante el estudio. Esta tabla es usada como complemento de la tabla 21 para evaluar y decidir las condiciones de mezcla que exhiben un comportamiento adecuado para el fin último de este proyecto, el cual es determinar si es viable aplicar la mezcla a un proceso de transferencia de custodia.

Tabla 20. Composiciones de mezcla según ejecución

<i>Ejecución</i>	<i>Aceite (%)</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>
1	90	5,0	5,0
2	80	5,0	15,0
3	70	15,0	15,0
4	80	15,0	5,0
5	85	7,5	7,5
6	80	7,5	12,5
7	75	12,5	12,5
8	80	12,5	7,5
9	85	5,0	10,0
10	85	10,0	5,0
11	75	10,0	15,0
12	80	10,0	10,0
13	75	15,0	10,0

Fuente: Statgraphics Centurion XVI

Tabla 21. Margen de Error entre Hysis y las pruebas de Laboratorio

Número	LAB		HYSYS		% ERROR	
	API	RVP	API	RVP	API	RVP
	1	32,7	9	33,48	10,93	2,33
2	34,6	11,1	37,72	13,6	8,27	18,38
3	42,3	15	40,94	18,89	3,32	20,59
4	37,3	11,8	36,61	16,87	1,88	30,05
5	34	9	35,56	13,7	4,39	34,31
6	33,9	11	37,64	14,78	9,94	25,58
7	39,5	12,5	39,09	17,24	1,05	27,49
8	36,1	11,5	37	16,28	2,43	29,36
9	34,4	9	35,56	12,34	3,26	27,07
10	34,8	9,5	35,36	14,63	1,58	35,06
11	37,7	12,7	39,47	16,55	4,48	23,26
12	36,4	10,7	37,36	15,62	2,57	31,50
13	38,2	13	38,7	17,88	1,29	27,29

Teniendo en cuenta los resultados presentados en la tabla, y a partir de los % de error obtenidos bajo ambos escenarios concluimos que una mezcla estable crudo-butano-gasolina natural, será aquella cuya composición esté representada según resumen de la tabla 22, ya que bajo estas condiciones se obtiene un grado de error del 3,26% en la gravedad API y de un 27% en el RVP respecto a la simulación hecha en Hysys, siendo estos valores los que entregan una calidad de crudo mejor, un RVP cercano pero menor a la presión atmosférica y un mayor

aprovechamiento de los productos blancos obtenidos del procesamiento del gas natural.

La selección de esta proporción (Prueba # 9) otorga una gravedad entre 34 y 35° API, valores que pueden considerarse buenos si se tiene en cuenta que la gravedad API del crudo antes de mezclar era de 29°API.

Tabla 22. Proporciones de mezcla para cada componente

COMPONENTE	PROPORCIÓN (% RESPECTO A MEZCLA TOTAL)
CRUDO	85
BUTANO	10
GASOLINA	5

Sin embargo, con el objetivo de optimizar los resultados obtenidos de acuerdo a comparaciones hechas entre Hysys y las pruebas de laboratorio, se realizó un análisis en conjunto con la herramienta software STATGRAPHICS Centurion XVI el cual permitió establecer las proporciones bajo las cuales se obtendría el mayor valor de gravedad API manteniendo un bajo RVP. Los resultados son presentados en la tabla 23.

Tabla 23. Condiciones óptimas mezcla crudo mediano.

Componente	Bajo	Alto	Óptimo
Oil	70	90	82,03
C ₄	5	15	12,96
C ₅	5	15	5

Respuesta	Óptimo
API	36,1
RVP	10,7

Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Figura 35. Comparación Gravedad API entre Hysys y Laboratorio

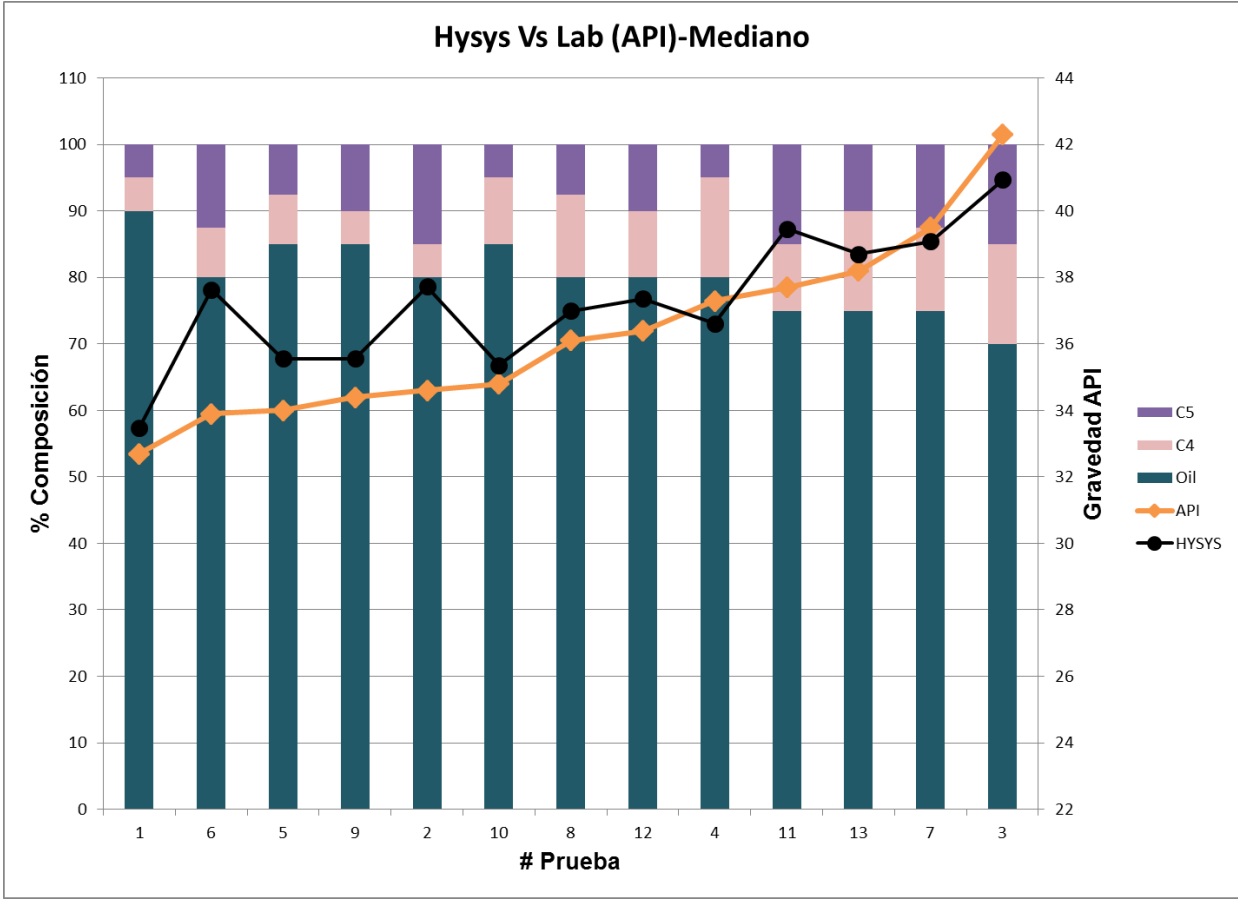
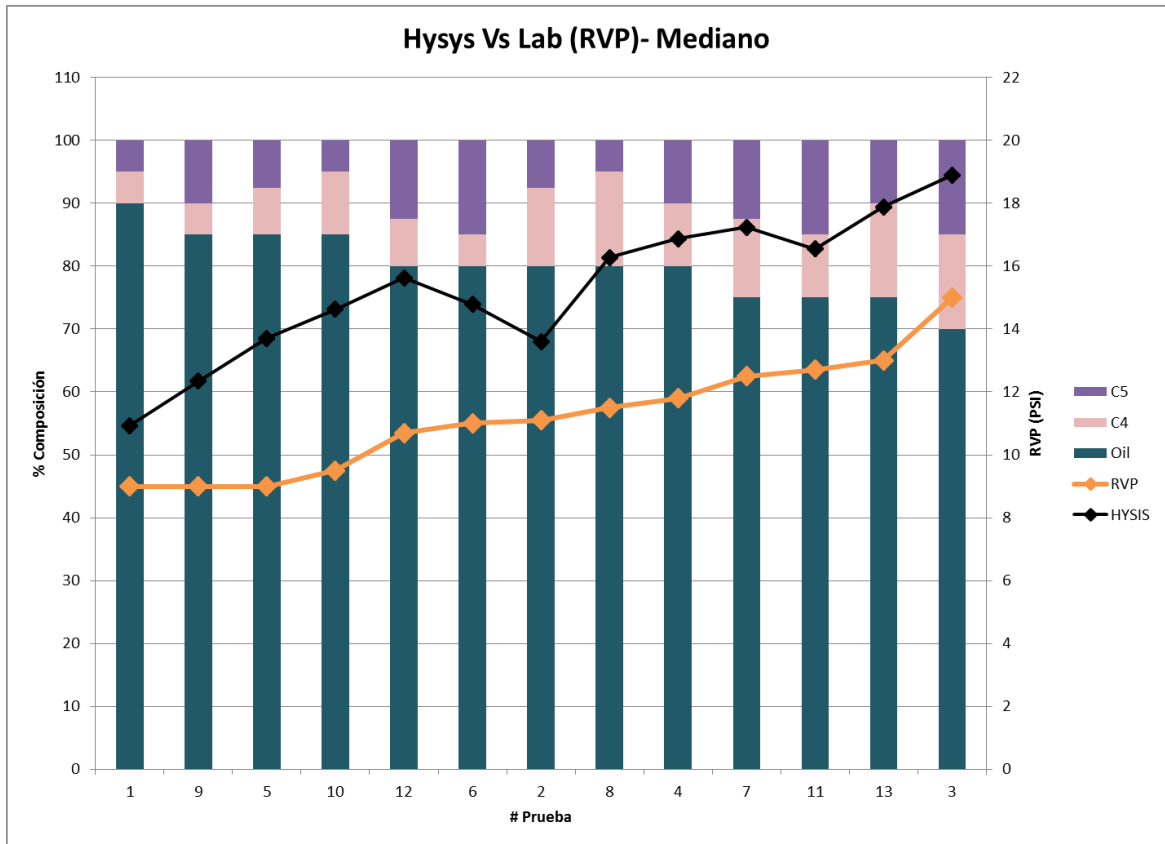
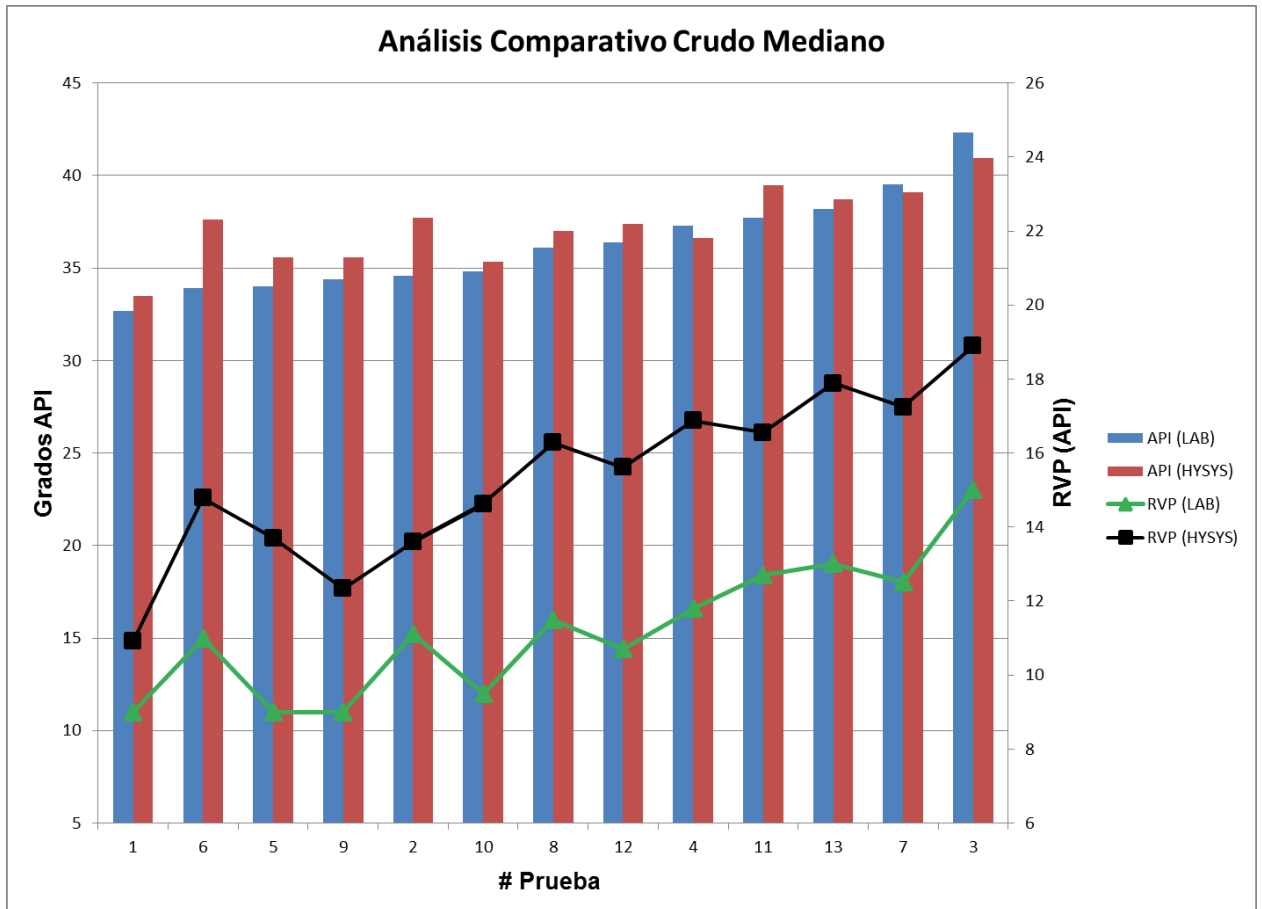


Figura 36. Comparación RVP entre Hysys y Laboratorio



La figura 37 resume el análisis final hecho a los resultados obtenidos de la comparación entre hysys y las pruebas de laboratorio. En esta se puede observar que según los resultados obtenidos en la tabla 23 un crudo con un RVP de 10 PSI puede efectivamente alcanzar una gravedad API de 36° aproximadamente, esto a partir del comportamiento observado en la prueba #9, la cual fue realizada en proporciones 85%-15% crudo-LGN.

Figura 37. Comparación para crudo mediano entre Hysys y Laboratorio



5.1. AJUSTE DE LA E.O.S.

En un proceso de simulación para garantizar que el modelo describa de la mejor manera la operación, se hace necesario un ajuste en los parámetros de la E.O.S.; este proceso se realizó teniendo en cuenta tres aspectos que influyen en el comportamiento de las propiedades físicas y termodinámicas del aceite, butano y

gasolina natural y por consiguiente en la del aceite posterior a la mezcla. Dichos parámetros son:

1. Caracterización de la fracción pesada.
2. Selección de la E.O.S. óptima.
3. Ajuste de los parámetros de la E.O.S.

Nota: El ajuste se realizó al Crudo Mediano ya que es el tipo de crudo objeto del estudio.

1. La caracterización de la fracción pesada fue realizada a partir del Assay del crudo en estudio, el cual fue recopilado para efectos del proyecto y en el cual se tenía registro tanto de la fracción molar de cada componente así como de la densidad y el peso molecular de la Cn+.
2. La selección de ecuación de estado es determinante en el estudio en curso, por esta razón se utilizó el concepto de Error absoluto y Error relativo para escoger la E.O.S óptima. Para el caso en particular se compararon 5 E.O.S que en la literatura son consideradas como las más eficientes en la predicción de las propiedades físicas y termodinámicas tanto de la fase gaseosa como la fase líquida, las cuales son : Peng Robinson (1976), Soave-Redlich-Kwong (1972)²⁰, Kadabi-Danner (KD), Peng-Robinson-Stryjek-Vera (PRSV) y Sour SRK.

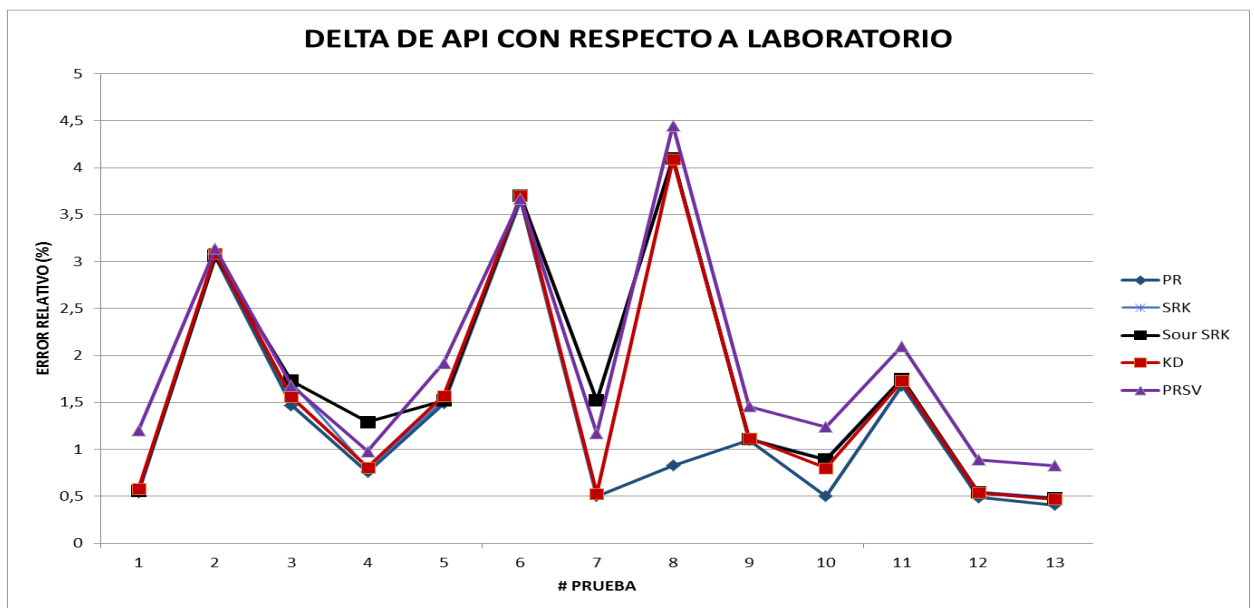
Con la ayuda de una inspección visual (grafico de barras), se dedujo que la ecuación que mejor representa el comportamiento es la de **Peng- Robinson**, la cual obtiene propiedades físicas y termodinámicas más acertadas con relación a las obtenidas en las pruebas experimentales. El análisis se realizó con el API, que en las propiedades que se estudiaron en el desarrollo del proyecto representa la

²⁰ PEDERSEN, K., CHRISTENSEN, P. "Phase Behavior Of Petroleum Reservoir Fluids". Taylor & Francis Group. 2007.

propiedad que resaltó la mayor diferencia entre las E.O.S mencionadas anteriormente.

La diferencia se atribuye a la sobre estimación de la presión de vapor de los componentes pesados en la ecuación de PR al compararla con SRK. En algunos estudios investigativos²¹ encontrados en la revisión bibliográfica se menciona que la ecuación de estado de Peng- Robinson es aplicable en un rango más amplio de temperatura, presión, no idealidad y simplicidad, por tal razón es la más empleada para el modelamiento de comportamientos de este tipo de estudios donde existe tanto fase gaseosa como fase líquida; igualmente es útil para estudios de condensación de gases naturales. Como se puede observar en la figura 38 la ecuación de estado con el menor error absoluto es la de **Peng-Robinson**, por tal razón es la seleccionada como la E.O.S óptima.

Figura 38. Error absoluto de API para los diferentes paquetes de fluidos



²¹ MERRIL R. C, HARTMAN K. J, CREEK J. L. A comparison of equation of state tuning methods. Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, Inc. Nueva Orleans, Los Angeles (Estados Unidos). 25 de Septiembre de 1994

3. De acuerdo con los estudios de Agarwal²², las EOS cúbicas generalmente no predicen los datos de laboratorio de las mezclas de petróleo/gas con precisión sin ajuste de los parámetros de EOS. La práctica ha sido a menudo ajustar las propiedades de los componentes (por lo general las fracciones pesadas), como la presión crítica, temperatura crítica y el factor acéntrico, para ajustar los datos experimentales.

En este proyecto, se realizó un método iterativo en el simulador HYSYS ASPEN, el cual es un método común que implica el ajuste de parámetros cuestionables de la E.O.S. de tal manera que se generen resultados de mayor precisión con respecto a los datos experimentales. Los parámetros de ajuste que en los estudios investigativos han sido utilizados para diferentes escenarios son:

- Coeficiente de interacción binaria (CIB)
- Presión crítica, temperatura crítica y factor acéntrico del último grupo hidrocarburo (pseudo-componente)
- Constantes Ω_a y Ω_b del metano.
- Constantes Ω_a y Ω_b del último grupo hidrocarburo.

Sin embargo, Whitson²³ comprobó que el ajuste de las propiedades críticas y el factor acéntrico para la fracción pesada cumplen una función similar a ajustar los valores de las constantes de la ecuación de estado Ω_a y Ω_b para el último grupo hidrocarburo, las cuales no son susceptibles de modificación en el ambiente de simulación de HYSYS.

²² AGARWAL, R., Li, Y., NGHIEM, L. "A regression technique with dynamic parameter selection for phase-behavior matching". Society of Petroleum Engineers. February.1990.

²³ WHITSON C. H. "Effect of physical properties estimation on equation of state predictions". Whitson Oil Co, Inc. Society of Petroleum Engineers Journal. December, 1984.

Por facilidad y por conocimiento de los conceptos teóricos de los parámetros mencionados se seleccionó la presión crítica, temperatura crítica y factor acéntrico del último grupo hidrocarburo (pseudo-componente) como parámetros de ajuste en este proyecto.

Los resultados del ajuste se muestran en la tabla 24, donde se refleja que los valores de las propiedades API, PVR y densidad son más cercanos al valor obtenido en las pruebas experimentales que a los obtenidos en la simulación inicial.

Tabla 24. Ajuste de la E.O.S.

AJUSTE POR Pc y Tc								
	Pc	psia 193,5	Tc	F 892,5	Factor acéntrico	0,70599		
API Inicial	29,19		Temperatura	90				
	psia		LB/FT3	Tanque Almacenamiento				
Número Prueba	Oil (%)	Butano (%)	Gasolina Natural (%)	API	RVP	DENSIDAD	Volumen @ CS	Presión (Psia)
1	90	5,0	5,0	33,44	10,19	60,78	99,42	14,7
2	80	5,0	15,0	37,65	12,36	57,84	98,98	14,7
3	70	15,0	15,0	40,83	17,14	56,41	93,1	14,7
4	80	15,0	5,0	36,54	14,97	59,15	94,6	14,7
5	85	7,5	7,5	35,49	11,56	59,43	98,69	14,7
6	80	7,5	12,5	37,56	14,04	58,03	98,24	14,7
7	75	12,5	12,5	39	15,49	57,39	95,14	14,7
8	80	12,5	7,5	36,93	14,54	58,74	95,88	14,7
9	85	5,0	10,0	35,5	10,9	59,31	99,21	14,7
10	85	10,0	5,0	35,3	13,89	59,7	97,78	14,7
11	75	10,0	15,0	39,38	14,61	56,99	96,47	14,7
12	80	10,0	10,0	37,29	13,47	58,35	97,14	14,7
13	75	15,0	10,0	38,61	16,14	57,8	93,86	14,7

Para mostrar la variación de los valores de las propiedades anteriormente mencionadas, se utilizó el concepto de error absoluto y error relativo, que reflejan de manera didáctica la mejora del modelo luego del ajuste de la presión crítica y temperatura crítica, lo que hace que el mismo tenga mayor precisión y veracidad;

logrando así que el modelo refleje adecuadamente el proceso en análisis a escala de campo.

Como se observa en la tabla 24, a pesar de realizarse el ajuste; la diferencia entre los valores simulados y los experimentales de la Presión de Vapor Reid siguen siendo altos, lo que se puede deducir que la propiedad no es afectada drásticamente por las propiedades críticas de la fracción pesada en el ambiente de simulación de HYSYS.

Por el contrario, el API y la densidad del fluido si mejoraron notablemente con el ajuste de los parámetros; logrando así que el modelo utilizado para el análisis junto con el ajuste de las propiedades críticas sean un escenario de mayor veracidad y precisión para el caso en estudio.

Las figuras 39, 40 y 41 reflejan el comportamiento de las variables de respuesta del proyecto en curso: experimentalmente, como resultado de la simulación inicial en Hysys y finalmente la tendencia del ajuste hecho a la simulación inicial con el objetivo de correlacionar de mejor manera los resultados de la simulación con los datos experimentales.

Figura 39. Ajuste por Densidad

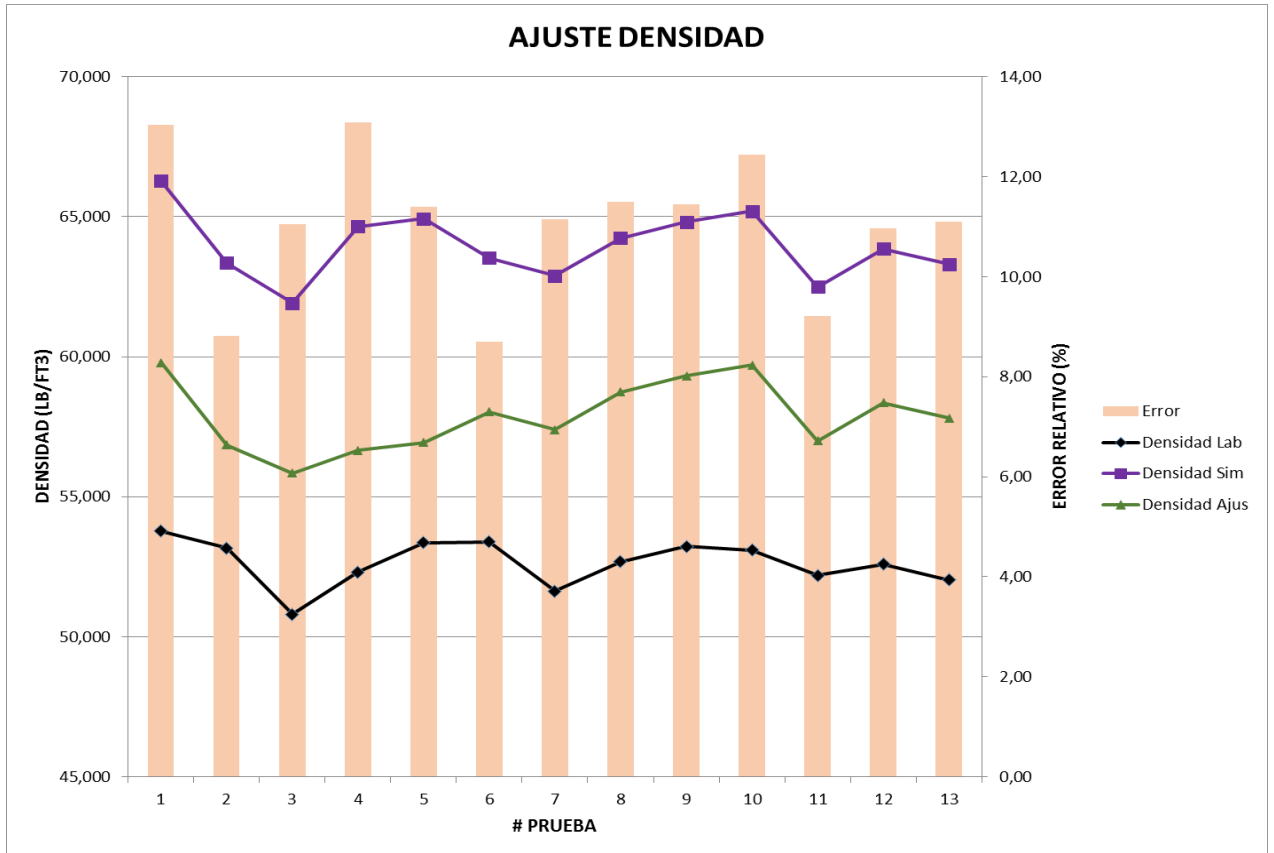
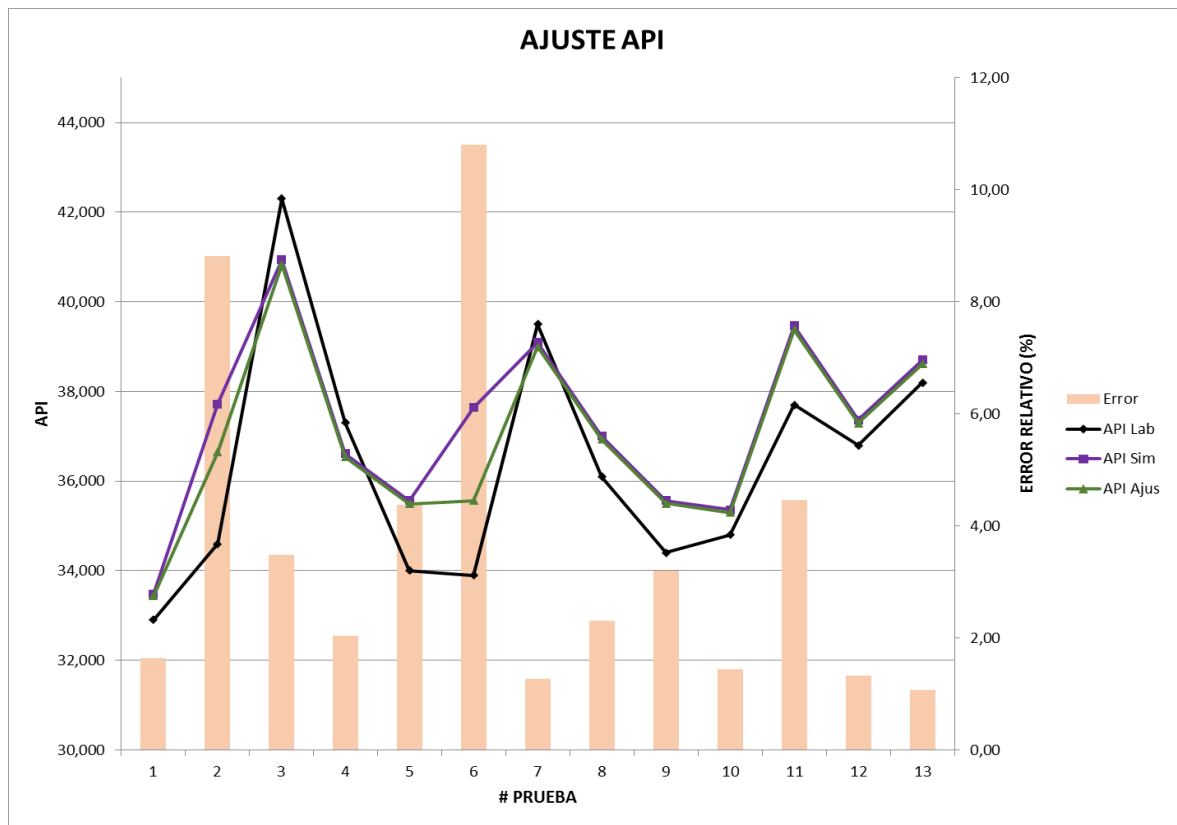
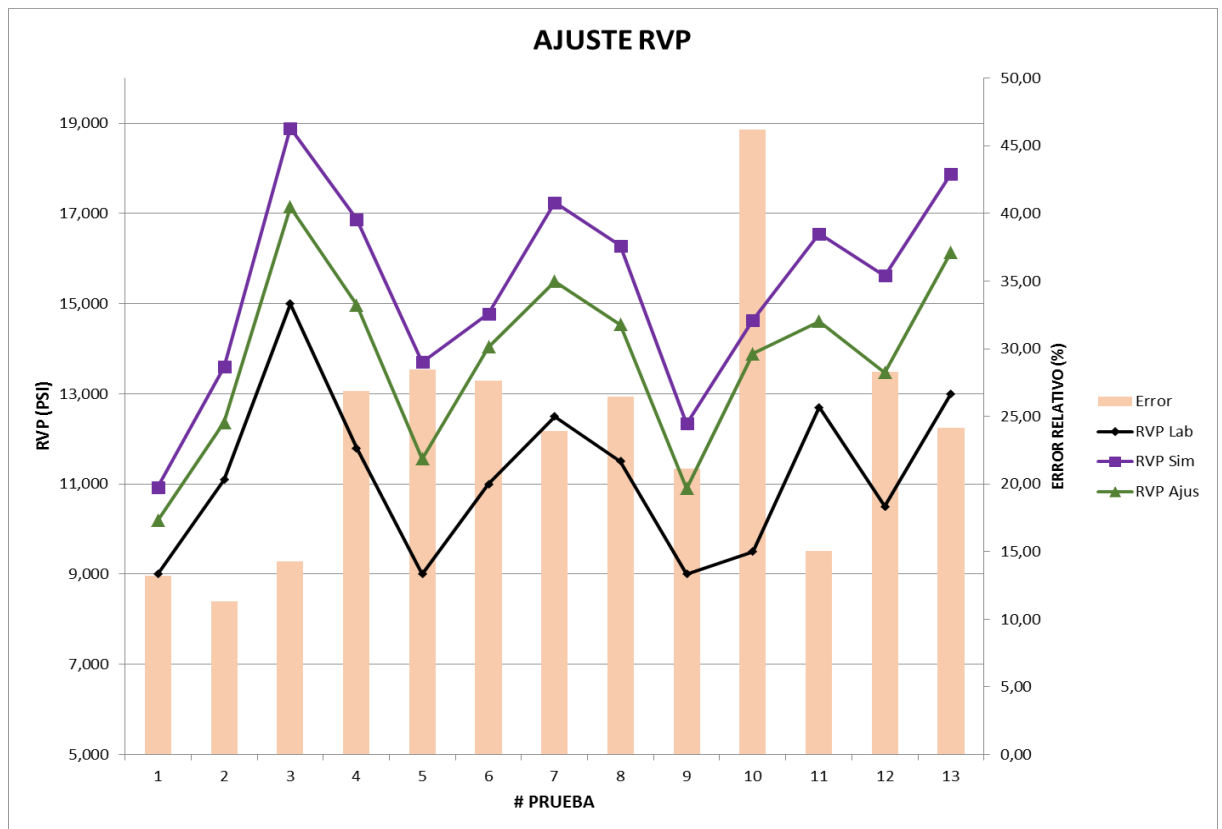


Figura 40. Ajuste API



En la figura 41, se muestra el ajuste hecho al RVP; a pesar del ajuste hecho a las propiedades críticas no fue posible reducir considerablemente el error respecto a los datos experimentales posiblemente porque estas propiedades no afectan directamente la presión de vapor de cada compuesto. Adicionalmente, al ser las ecuaciones de estado utilizadas en su mayoría para fluidos gaseosos se limita su utilización en fluidos en estado líquido, tales como los usados en el presente proyecto.

Figura 41. Ajuste RVP



La tabla 25 muestra el error relativo existente entre los datos experimentales y el ajuste hecho en Hysys; indicando que tan cercano o lejano se encuentra el comportamiento de cada una de las variables de salida con respecto a la simulación.

Según lo observado gráficamente y como complemento de la tabla 25; el RVP es la variable que menos se ve afectada por el ajuste iterativo hecho a las propiedades críticas de los componentes; confirmando de esta manera, que esta propiedad no se afectada por estos parámetros dentro del ambiente de simulación de Hysys.

Tabla 25. Error Relativo

ERROR RELATIVO (%)		
API	RVP	Densidad
1,64	13,22	13,03
8,82	11,35	8,81
3,48	14,27	11,04
2,04	26,86	13,08
4,38	28,44	11,39
10,80	27,64	8,70
1,27	23,92	11,15
2,30	26,43	11,50
3,20	21,11	11,44
1,44	46,21	12,44
4,46	15,04	9,21
1,33	28,29	10,96
1,07	24,15	11,09

En la tabla 26 se muestra los valores de la presión crítica y temperatura crítica antes y después del ajuste, para ilustrar así que con pequeños cambios en propiedades determinantes de la ecuación de estado se puede mejorar notablemente un modelo de simulación.

Tabla 26. Ajuste de Presión y Temperatura Crítica

AJUSTE REALIZADO			
Temperatura Crítica		Presión Crítica	
°F		Psia	
<i>Antes</i>	<i>Después</i>	<i>Antes</i>	<i>Después</i>
812,93	892,5	219,9	193,5

6. CONCLUSIONES

- La utilización del butano y la gasolina natural como parte de una mezcla estable con crudo ofrece no solo la opción de aprovechamiento de estos productos al interior del campo sino que la misma conlleva a una mejora en la calidad del crudo producido en el campo de hasta un 20% con relación al valor inicial.
- A pesar de lograrse una mejora en la calidad del crudo del campo y en crudos pesados con la realización de la mezcla, las pérdidas por evaporación y miscibilidad reportadas para crudos medianos con la misma hacen replantear la viabilidad de su preparación, ya que conseguir esta mejora implicaría un volumen entre el 5 y el 10% de más de pre-mezcla para de esta manera alcanzar el volumen total deseable.
- A partir de las pruebas de laboratorio realizadas fue posible observar el efecto de la gasolina natural y el butano en tres tipos de crudo diferentes, concluyendo que si bien mejora la calidad de éstos, la realización de la mezcla en crudos livianos no es factible debido a que bajo las proporciones de 85%-15%, óptimas según pruebas de laboratorio, la simulación arroja valores de gravedad API menores al inicial, pudiendo ser consecuencia de que este tipo de crudo tuviese un contenido importante de livianos en él y la adición de más de estos generara un crudo susceptible a las caídas de presión por más mínimas que fuesen, es decir , se logra la estabilidad y la homogenización, pero el fluido final resulta siendo un fluido compresible.
- En el presente estudio se analizan tres opciones para el aprovechamiento del butano, de las cuales la opción evaluada mediante simulación en Hysys

ofrece mayores garantías en cuanto a homogenización de la mezcla ya que ésta contempla la inclusión de un mezclador en el sistema antes del medidor en línea, logrando con esto un flujo turbulento durante el recorrido de la mezcla hacia su destino final.

- La implementación de la mezcla, en caso de considerarse económicamente viable y aceptable incluso teniendo en cuenta el comportamiento de las pérdidas presentes en la misma debe contar con el aval del comprador del crudo.
- El alto grado de error observado a partir de la comparación hecha entre Hysys y las pruebas de laboratorio en la presión de vapor Reid obedece al hecho de que las pruebas experimentales no fueron realizadas para la fecha en la cual fue hecho el assay para el crudo en estudio, generando con esto desfase en algunas propiedades y composiciones del crudo, pues las características del fluido varían de acuerdo al tiempo y a las condiciones a las cuales está expuesto.
- La posibilidad de utilizarla en otros campos con crudos de gravedad API diferentes es viable según resultados obtenidos, mejora de hasta un 75% para crudos pesados, logrando con esto mejora en la movilidad de este facilitando su transporte por oleoductos. Sin embargo, la producción de líquidos del gas natural en estos campos debe ser por lo menos el 20% de la producción de crudo para que sea posible realizar la mezcla en las proporciones adecuadas que generen una mezcla estable y procurando tener las mínimas pérdidas por evaporación y miscibilidad.
- La mezcla de crudo con butano y gasolina natural ofrece una opción viable para el aprovechamiento de estos derivados siempre y cuando se

establezcan acuerdos entre comprador y vendedor que garanticen beneficios para ambas partes.

- Los resultados experimentales en relación con la simulación obtenida evidencian la necesidad y obligatoriedad de un ajuste a los parámetros y/o propiedades de los componentes de la simulación que permita modelar el comportamiento de la mezcla de manera que refleje con mayor certeza la tendencia registrada en las pruebas de laboratorio.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el diseño de un dispositivo en el cual se puedan medir directamente las características de interés tales como la gravedad API y el RVP de la mezcla a escala de laboratorio ya que a través del procedimiento realizado en el presente estudio se pudieron presentar pérdidas de volumen por efecto de evaporación al momento de cambiar la mezcla de un recipiente a otro para la medición de RVP.
- Antes de considerar la aplicación de forma permanente en campo se debe desarrollar una prueba piloto que permita cuantificar con mayor certeza las pérdidas en volumen que puedan obtenerse de la mezcla producto de la evaporación y la miscibilidad, ya que si bien durante el desarrollo del estudio se realizaron dichas mediciones, se consideraron condiciones de laboratorio, las cuales aunque se acercan a las tenidas en campo, no lo representan en su totalidad ya que no contemplan los trayectos durante el proceso de transferencia.
- Al momento de realizar la prueba piloto en campo, debe considerarse la viabilidad de mezclar el crudo con la pre-mezcla directamente en los tanques de almacenamiento de crudo con el fin de evaluar el comportamiento miscible de ésta bajo estas condiciones, ya que si bien se estudió este comportamiento en estado estático a condiciones de laboratorio, el volumen de crudo y las condiciones ambientales difieren.
- Realizar análisis de BSW y contenido de sal a la mezcla final con el fin de evaluar si la adición de gasolina y butano al crudo afecta sus demás propiedades, lo cual se ve reflejado directamente en la calidad de éste al momento de hacer la transferencia de custodia.

- Realizar el diseño de los equipos utilizados durante el proceso a escala de campo (bombas, válvulas, separador y mezclador), para garantizar un proceso mucho más eficiente y con menor grado de incertidumbre; teniendo en cuenta principalmente la presión y temperatura de trabajo para estos equipos respecto al fluido con el que van a trabajar.
- Llevar a cabo el análisis financiero de la implementación de un mezclador crudo-gasolina-butano así como un pre-mezclador butano – gasolina natural, para evaluar si la propuesta es atractiva o no en el mercado.
- Evaluar la necesidad de incluir una unidad de estabilización de crudo durante la simulación del proceso; indicando mejor punto de ubicación al interior de las facilidades de superficie, esto con el fin de evitar que productos volátiles generen sobrepresión en las líneas o tanques de almacenamiento ocasionando con esto daños materiales y posiblemente humanos.
- Se recomienda hacer el diseño de la planta de procesamiento de gas natural junto con el esquema de la mezcla crudo-butano- gasolina natural; para poder sensibilizar la producción de gas y cantidad de condensados generados con el objetivo de conocer la capacidad total de todos los equipos requeridos para su montaje y conocer el límite económico de producción de gas para generar un volumen aceptable de condensados para realizar la mezcla.
- Si bien, el producto final del campo en estudio es empleado como cargue en refinería y como adelgazante de crudos de menor gravedad API, en caso de implementarse la mezcla su almacenamiento debería llevarse a cabo en tanques de techo flotante para garantizar que los vapores que se puedan liberar de la mezcla no generen explosiones ni afecten el medio

ambiente. Igualmente, se podría evaluar el almacenamiento de la mezcla en tanques cilindros, los cuales pueden soportar fluidos con presiones de vapor desde 25 hasta 100 PSI, valores cercanos a los obtenidos para algunas proporciones de la mezcla en estudio.

- Se recomienda realizar las pruebas experimentales para evaluar la estabilidad de la mezcla en períodos de tiempo iguales o cercanos a la fecha de realización de Assays con el fin de obtener resultados más reales acerca del comportamiento de la mezcla y de esta manera tener certeza sobre el efecto de estos productos blancos en las propiedades físicas del crudo.

BIBLIOGRAFÍA

- AHMED, Tarek. Hydrocarbon Phase Behavior. Gulf Publishing Company. 1989. Volume 7.
- AHMED, Tarek. Equation Of State And Pvt Analysis, Applications For Improved Reservoir Modeling. Gulf Publishing Company. 2007.
- AGARWAL, R., LI, Y., NGHIEM, L. A Regression Technique With Dynamic Parameter Selection For Phase-Behavior Matching. Society of Petroleum Engineers. February.1990.
- BÁNZER, Carlos. Correlaciones Numéricas PVT. Universidad de Zulia, Maracaibo. Enero 1996.
- BERROCAL, I. "Principios de transferencia de masa en la ingeniería de alimentos". Universidad Nacional de Callao. Informe de investigación. 2011.
- CAMPBELL, John. Gas Conditioning And Processing. Seventh Edition. Campbell petroleum series, 1992. Volumen 1.
- CAMPBELL, John & Company. Technical Assistances Service For Design, Operation, And Maintenanc Of Gas Plants. Septiembre, 2003.
- CASTAÑO, Jeannie., VILLARREAL, Luis. Evaluación De La Implementación Del Sistema De Levantamiento Artificial Plunger Lift En Los Pozos Del Campo La Salina. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2013

- CELIS, Jorge, RODRÍGUEZ, Leonardo. Determinación Del Potencial De Producción De Líquidos Estabilizados A Parir De La Corriente De Gas De Ventas Boosting, EPF-Floreña. 2013. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos
- COLEMAN, D. and MONTGOMERY, Douglas. A Systematic Approach To Planning For A Design Industrial Experiment. Technometrics, 1993.
- DANESH, Alí. PVT And Phase Behaviour Of Petroleum Reservoir Fluids. Elsevier, Tercera edición, 2003.
- DÍAZ, Jorge, LÓPEZ, Juan. Análisis Y Mejoramiento De La Producción De Pozos En Bombeo Mecánico Con Alta Relación Gas-Aceite Aplicación Campo Payoa. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela Ingeniería de Petróleos. 2007
- Gas Processors Suppliers Association. GPSA. Engineering data book Edición 12. 2004
- HOYOS, Carlos. Sistema De Almacenamiento Y Distribución De GLP En Una Planta De Gas. Tesis previa a la obtención de tecnólogo en petróleos. Ecuador. 2006
- KIDNAY, Arthur., PARRISH, William. Fundamentals Of Natural Gas Processing. Taylor and Francis Group, 2006.
- KUEHL, Robert. Diseño De Experimentos, Principio estadísticos de diseños y análisis de investigación. Thomson Learning. Second Edition. 2001.

- MCCAIN, William, Jr. The Properties Of Petroleum Fluids. Pennweel Publishing Company. Tulsa, Oklahoma. Second Edition, 1990.
- MANUAL DISEÑO DE EXPERIMENTOS. FORMATO DIGITAL.
- MANUAL DE MEDICIÓN DE HIDROCARBUROS. Vicepresidencia de Suministro de Mercadeo. ECOPETROL. Capítulos 3,19.2007
- MANUAL STATGRAPHICS, 2006.
- MERRIL, R., HARTMAN, K., CREEK, J. A Comparison Of Equation Of State Tuning Methods. Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, Inc. Nueva Orleans, Los Ángeles. September. 1994
- MONTGOMERY, Douglas. Diseño Y Análisis De Experimentos. Limusa Wiley. Segunda Edición. 2003.
- MOKHATAB, Saied. Handbook Of Natural Gas Transmission And Processing. Elsevier, 2006.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA- NTC 1486. NORMAS ICONTEC. 2013.
- PARÍS DE FERRER, Magdalena. Fundamentos De Ingeniería De Yacimientos. 2009.
- PEDERSEN, K., CHRISTENSEN, P. "Phase Behavior Of Petroleum Reservoir Fluids". Taylor & Francis Group. 2007.

- PEÑA, H., SANTOS, N., PÉREZ, J. Estudio Experimental, Caracterización Composicional Detallada, Ajuste De La Ecuación De Estado Y Generación De Las Envolventes De Fase De Las Corrientes De Carga A Los Gasoductos Centragas Y Promigas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2004.
- PRAUSNITZ, John., LICHTENTHALER, Rudiger., GÓMEZ de Azevedo, Edmundo. Termodinámica Molecular De Los Equilibrios De Fases. Prentice Hall, Tercera Edición. 2000.
- RUSHTON, J. Henry. Fundamentals Of Mixing In Petroleum Refining. Fourth world petroleum congress. Section III.
- WHITSON, C. Effect Of Physical Properties Estimation On Equation Of State Predictions. Whitson Oil Co, Inc. Society of Petroleum Engineers. December.1984.

FUENTES ELECTRÓNICAS

- Campo Cupiagua pasa a manos de Ecopetrol S.A. Tomado de: www.caracol.com
- 2012 Brief: Natural gas liquids prices down in 2012. Tomado de: <http://www.eia.gov/>
- Plan por US\$800 millones para “adelgazar” crudo pesado. Citado en: www.portafolio.co

ANEXOS

ANEXO A. SIMULACION DE PROCESOS – ASPEN HYSYS CRUDO PESADO

- **CRUDO PESADO**

En la tabla A1. Se muestran las condiciones finales de la mezcla crudo - butano – gasolina natural de un aceite de 12,2 °API inicial arrojada por el simulador a escala de campo, en el cual se puede observar que en cualquiera de sus proporciones las pérdidas por evaporación son bajas, el RVP se mantiene dentro de un rango aceptable y que la calidad del crudo pasa de pesado a mediano, lo que confirma que la adición de componentes livianos a la corriente de crudo garantiza la optimización de las condiciones del crudo, sin embargo también se busca el aprovechamiento máximo del butano y gasolina natural; lo que significa que el rango de la composición que cumple con los requisitos óptimos del proyecto no solo contempla las propiedades del crudo final si no también el máximo aprovechamiento de los condensados.

Por todo lo expuesto con anterioridad, se considera que el rango en cual la composición cumple con el objetivo de generar una mezcla estable y homogénea con bajas perdidas por evaporación y aprovechamiento de los productos mediante la simulación es:

Tabla A1. Resultados obtenidos para crudo 12,2 API mediante ASPEN HYSYS

Número Prueba	Oil (%)	Butano (%)	Gasolina Natural (%)	API	Psia	MMSCFD	Tanque Almacenamiento	
					RVP	Pérdidas de Evaporación	Temperatura [F]	Presión (Psia)
1	90	5,0	5,0	19,42	12,12	0,000418	88,31	14,7
2	80	5,0	15,0	26,27	15,08	0,001177	85,43	14,7
3	70	15,0	15,0	30,8	20,99	0,009517	68,91	14,7
4	80	15,0	5,0	23,58	18,28	0,008199	73,56	14,7
5	85	7,5	7,5	22,38	14,83	0,002099	84,76	14,7
6	80	7,5	12,5	25,7	16,08	0,002802	82,65	14,7
7	75	12,5	12,5	27,77	18,9	0,007167	74,13	14,7
8	80	12,5	7,5	24,29	17,6	0,006424	76,52	14,7
9	85	5,0	10,0	22,83	13,73	0,0007358	86,99	14,7
10	85	10,0	5,0	21,71	15,59	0,003803	81,96	14,7
11	75	10,0	15,0	28,45	18,09	0,005347	77,29	14,7
12	80	10,0	10,0	25,01	16,87	0,004613	79,57	14,7
13	75	15,0	10,0	27,09	19,69	0,008937	71,09	14,7

Fuente: Modificado. Hysys

Tabla A2. Condiciones óptimas mezcla crudo pesado

Número Prueba	Oil (%)	Butano (%)	Gasolina Natural (%)	API	Psia	MMSCFD
					RVP	Pérdidas de Evaporación
1	90	5,0	5,0	19,42	12,12	0,000418
5	85	7,5	7,5	22,38	14,83	0,002099
9	85	5,0	10,0	22,83	13,73	0,0007358
10	85	10,0	5,0	21,71	15,59	0,003803

Fuente: Modificado. Hysys

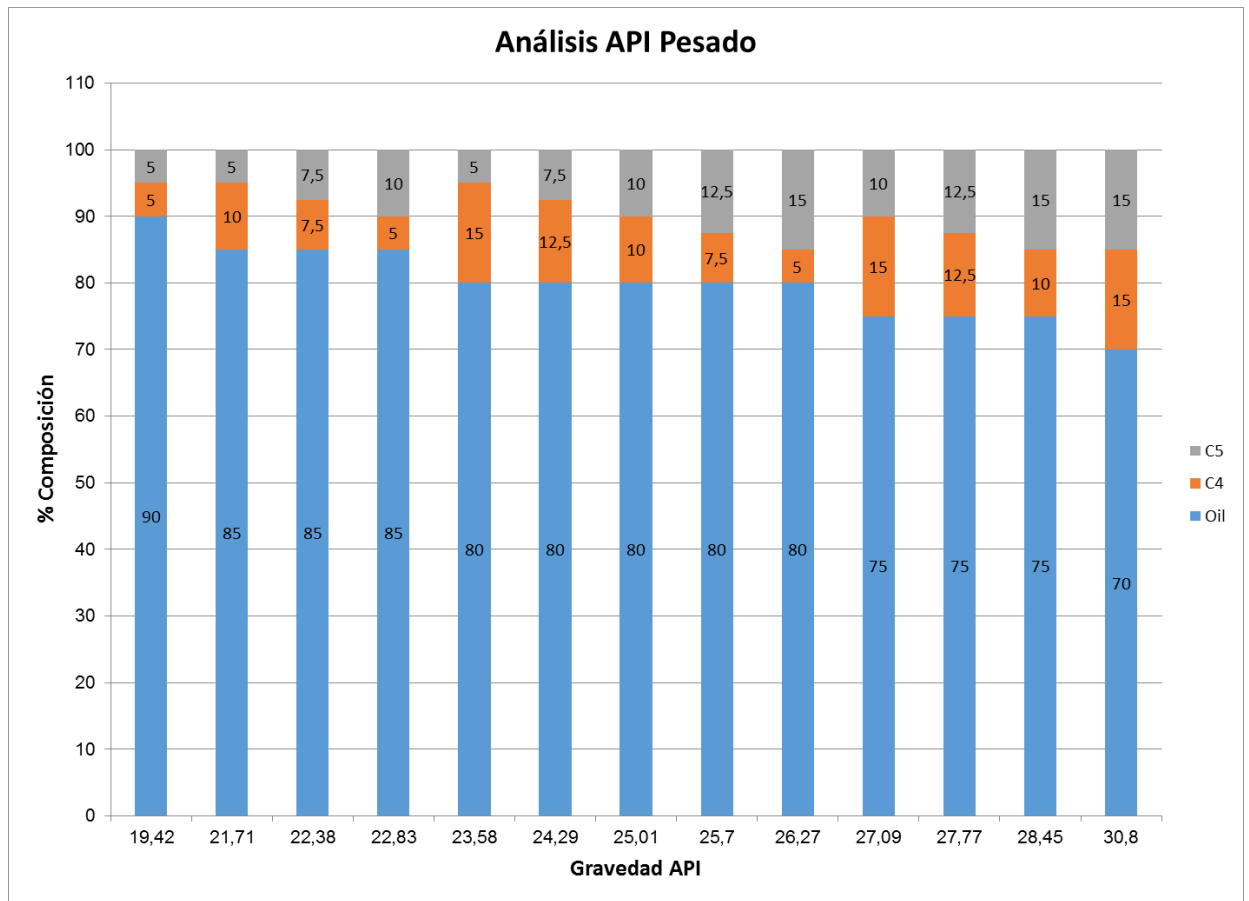
Si bien, la Prueba 1 según la tabla C2 muestra las mejores propiedades de crudo al final de la mezcla no garantiza el aprovechamiento máximo del butano y la gasolina natural, por esta razón no se considera que cumpla con los todos los parámetros establecidos.

Sin embargo como se observa en las demás proporciones realizadas, se cumple que las proporciones en volumen de 85 % y 15 % de crudo y condensados del GN respectivamente muestran resultados favorables en cuanto a las propiedades del crudo, lo que se interpreta como una buena homogenización y estabilidad de la mezcla aprovechando de mejor manera el butano y la gasolina natural.

El aumento en el volumen de butano en la mezcla incrementa el RVP de la misma al igual que su API; efecto contrario ocurre cuando la cantidad de gasolina natural incrementa.

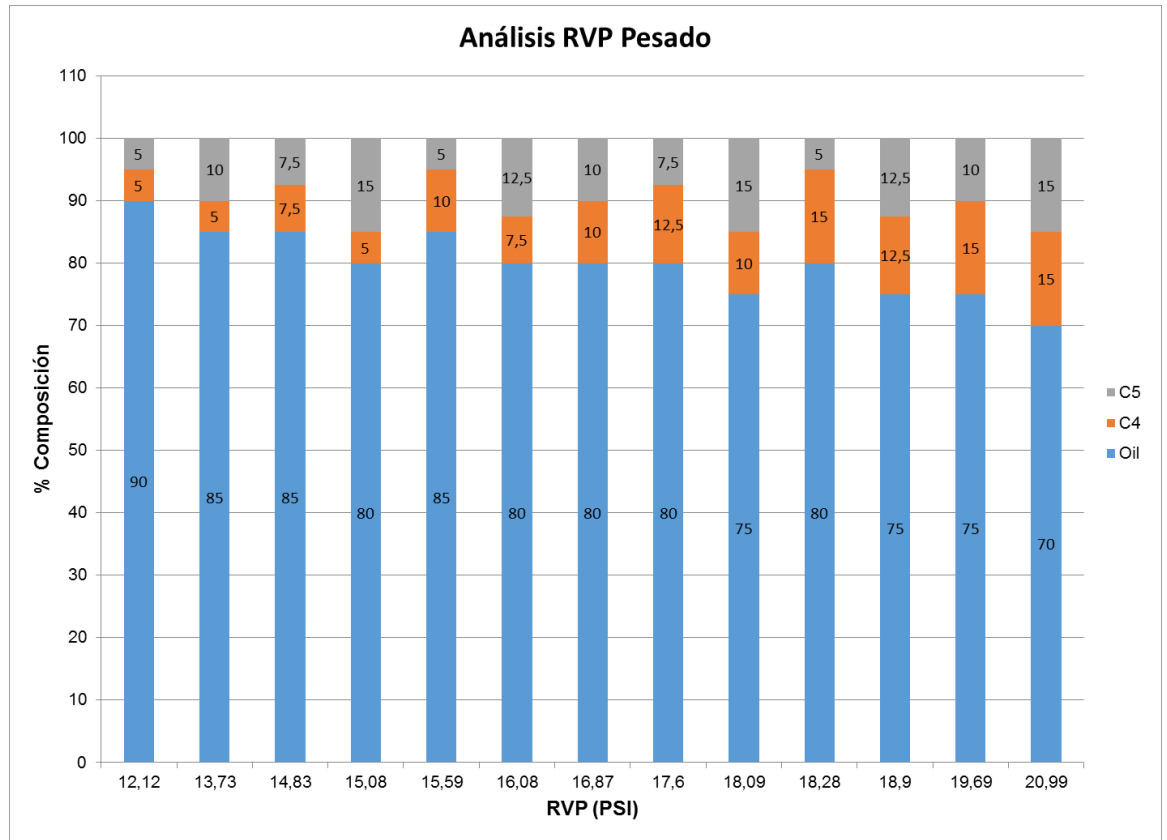
Así, las figuras C1 y C2 permiten observar el comportamiento de la gravedad API y el RVP bajo las distintas proporciones de la mezcla llevada a cabo con este tipo de crudo.

Figura A1. Gravedad API influenciada por mezcla butano – gasolina natural-crudo pesado



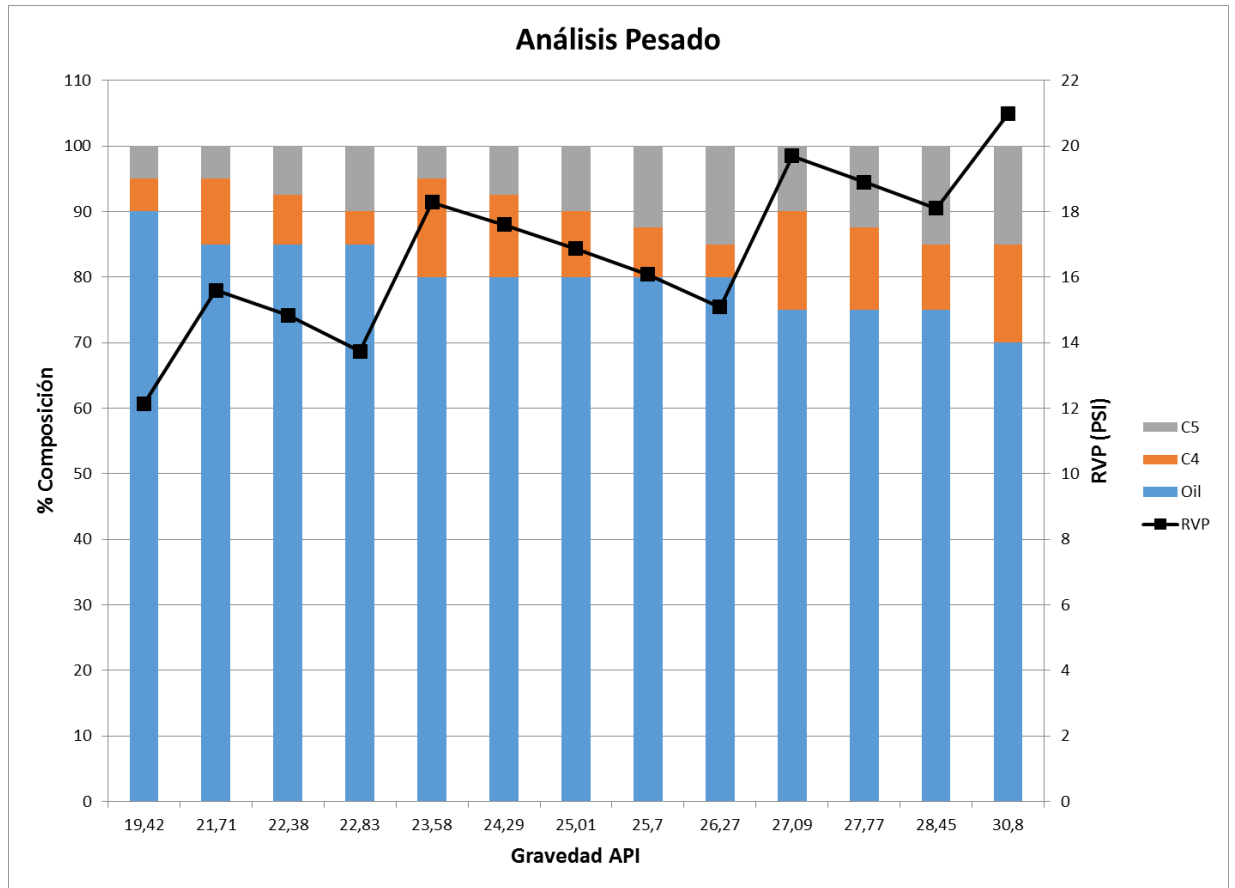
La figura A3 muestra el análisis completo para un crudo pesado, teniendo en cuenta la gravedad API y el RVP de la mezcla, producto de las distintas proporciones del butano, la gasolina y el crudo.

Figura A2. RVP influenciado por mezcla butano – gasolina natural-crudo pesado



Si bien los resultados obtenidos para crudo pesado ofrecen una mejora significativa de las propiedades del crudo, al momento de implementar esta se deben tener en cuenta otras características del crudo a emplear, como su composición y movilidad, factores que influirán en la facilidad o dificultad de su transporte.

Figura A3. Análisis completo para crudo pesado



ANEXO B. SIMULACION DE PROCESOS – ASPEN HYSYS CRUDO LIVIANO

CRUDO LIVIANO

Tabla B1. Resultados obtenidos para crudo liviano de **36,06** mediante Hysys

Número Prueba	oil (%)	Butano (%)	Gasolina Natural (%)	API	Psia	MMSCFD	Tanque Almacenamiento	
					RVP	Perdidas de Evaporación	Temperatura [F]	Presión (Psia)
1	90	5,0	5,0	33,32	10,07	0,01801	85,91	14,7
2	80	5,0	15,0	36,88	13,68	0,02038	77,41	14,7
3	70	15,0	15,0	39,78	19,68	0,02777	62,01	14,7
4	80	15,0	5,0	35,19	15,41	0,02663	69,82	14,7
5	85	7,5	7,5	34,58	12,28	0,02089	79,71	14,7
6	80	7,5	12,5	36,46	14,17	0,02197	75,46	14,7
7	75	12,5	12,5	37,75	17,08	0,02587	67,58	14,7
8	80	12,5	7,5	35,61	15,03	0,0251	71,66	14,7
9	85	5,0	10,0	34,98	11,89	0,01936	81,49	14,7
10	85	10,0	5,0	34,18	12,64	0,0224	77,89	14,7
11	75	10,0	15,0	38,19	16,55	0,02427	69,62	14,7
12	80	10,0	10,0	36,04	14,61	0,02354	73,54	14,7
13	75	15,0	10,0	37,32	17,59	0,02744	65,57	14,7

Fuente: Modificado. Hysys

En las figuras B1, B2 y B3. Se presenta la influencia de las proporciones utilizadas para las pruebas en las respuestas de gravedad API y RVP.

Teniendo en cuenta que el RVP es la variable que controla que tan estable puede ser la mezcla en términos de pérdidas por evaporación se seleccionaron como composiciones estables aquellas que exhibieran un comportamiento de RVP cercano o menor a la presión atmosférica, garantizando con esto bajas o nulas pérdidas por evaporación.

Figura B1. API influenciado por composición de crudo liviano

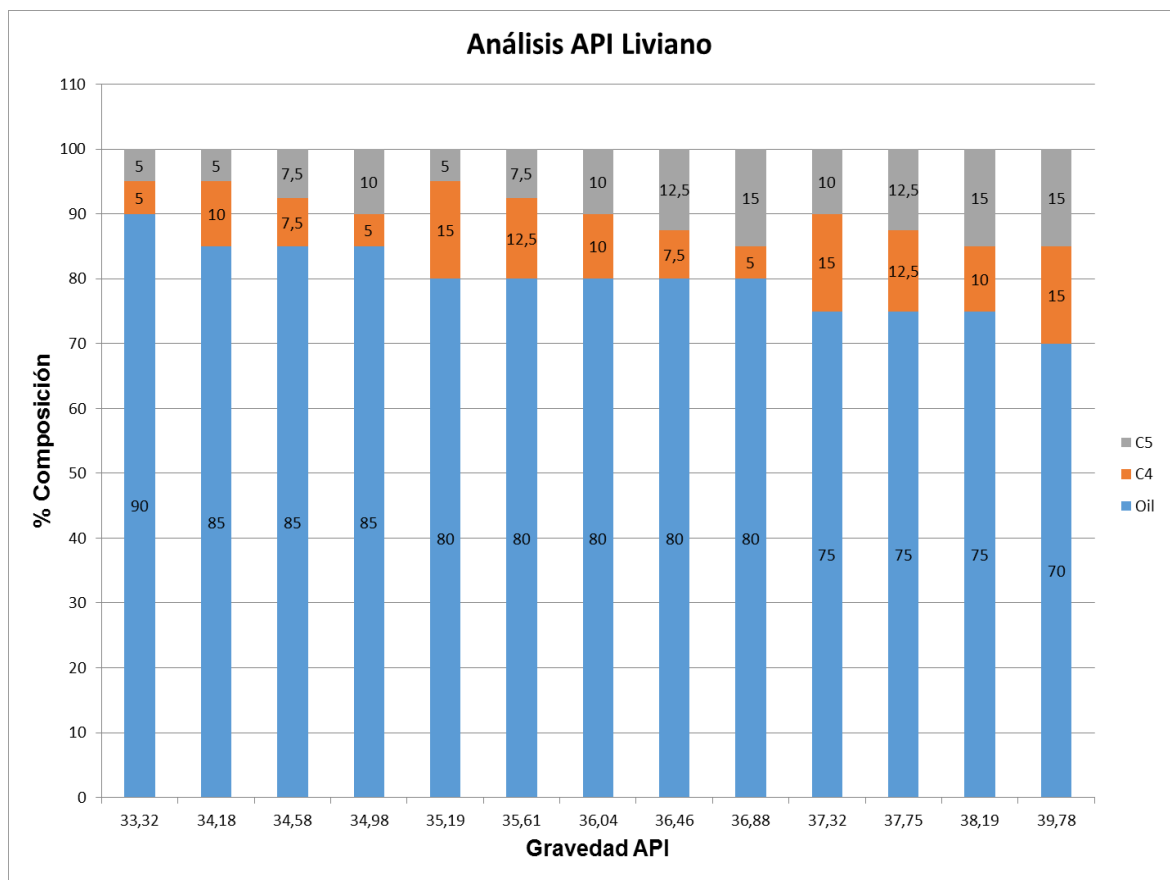


Figura B2. RVP influenciado por composición de crudo liviano.

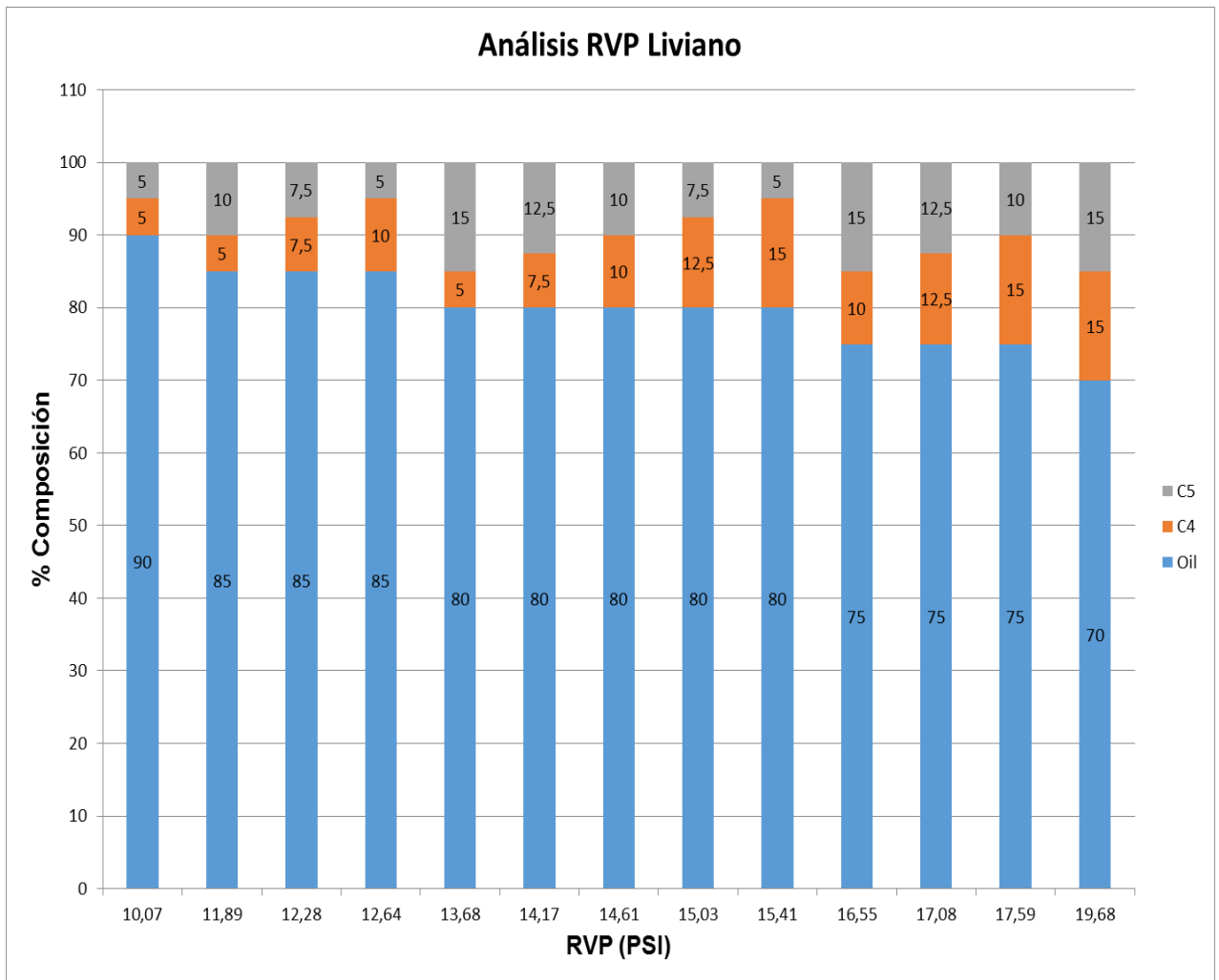
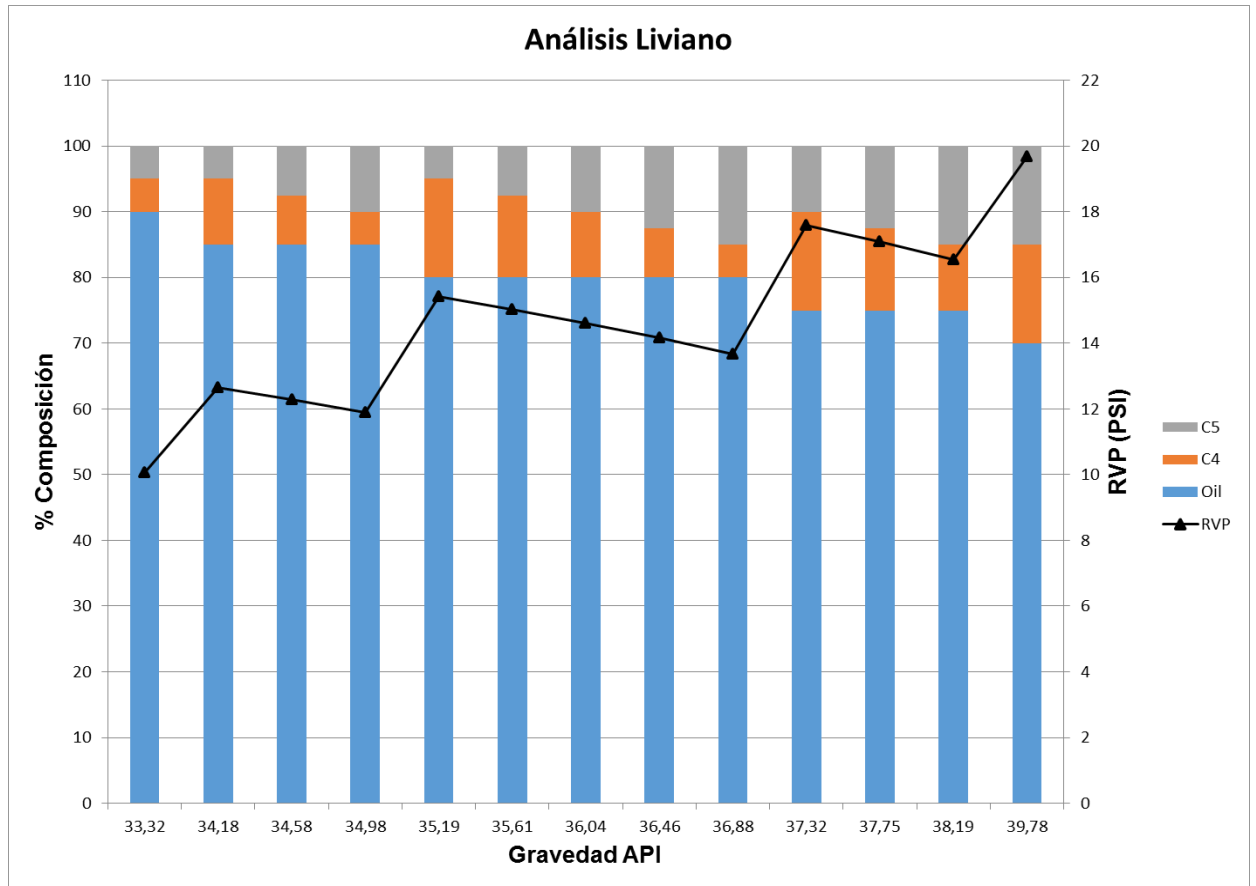


Figura B3. Análisis para crudo liviano



La tabla B1 y la figura B3. Muestran las condiciones finales de la mezcla crudo - butano –gasolina natural de un aceite de 36,06 API inicial arrojada por el simulador a escala de campo, a partir de éstos es posible observar que en la Prueba 1, Prueba 4, Prueba 5, Prueba 8, Prueba 9, Prueba 10 y Prueba 12 se observa un comportamiento fuera de los esperado al presentar una disminución en el API respecto al inicial, esto puede deberse a que los componentes livianos en este tipo de crudo ya tiene un contenido importante en él y la adición de más de estos genera un crudo susceptible a las caídas de presión por más mínimas que sean, es decir , logra la estabilidad y la homogenización, pero el fluido final resulta

siendo un fluido compresible. Además, la calidad del API en las pruebas que lo aumentan respecto al inicial lo hacen de manera muy leve y los valores de RVP mantienen la tendencia a aumentar a medida que incrementa el volumen de LGN presente en la mezcla.

Esta simulación se hizo con el fin de evaluar si la adición de estos productos representa una optimización del proceso o si por el contrario el comportamiento puede traer contradicciones, por supuesto se tiene que tener en cuenta que como todo proceso de simulación es muy ideal y puede tener grados de error significativos.

Teniendo en cuenta esto, los rangos que cumplen con estas especificaciones son los siguientes:

Tabla B2. Condiciones óptimas mezcla crudo liviano

Número Prueba	oil (%)	Butano (%)	Gasolina Natural (%)	API	Psia	MMSCFD
					RVP	Perdidas de Evaporación
1	90	5,0	5,0	33,32	10,07	0,01801
5	85	7,5	7,5	34,58	12,28	0,02089
9	85	5,0	10,0	34,98	11,89	0,01936
10	85	10,0	5,0	34,18	12,64	0,0224

ANEXO C. PRUEBAS EXPERIMENTALES REALIZADAS CRUDO PESADO

Tabla C1. Resultados obtenidos para crudo de 12° API

<i>Ejecución</i>	Crudo Pesado @12° API					Pre mezcla	
	<i>Oil (%)</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>	<i>API</i>	<i>RVP</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>
1	90	5	5	20,4	8,6	50,0	50,0
2	80	5	15	22,5	11,4	25,0	75,0
3	70	15	15	28,1	14,8	50,0	50,0
4	80	15	5	25,4	12,5	70,0	30,0
5	85	7,5	7,5	21,7	10,3	50,0	50,0
6	80	7,5	12,5	23,8	11,7	37,5	62,5
7	75	12,5	12,5	24,6	13,9	50,0	50,0
8	80	12,5	7,5	23,3	12,6	62,5	37,5
9	85	5	10	20,9	9	33,3	66,7
10	85	10	5	21,3	9,3	66,7	33,3
11	75	10	15	23,4	13,2	39,4	60,6
12	80	10	10	22,7	12,1	50,0	50,0
13	75	15	10	24,8	14,1	60,0	40,0

Figura C1. Análisis Gravedad API

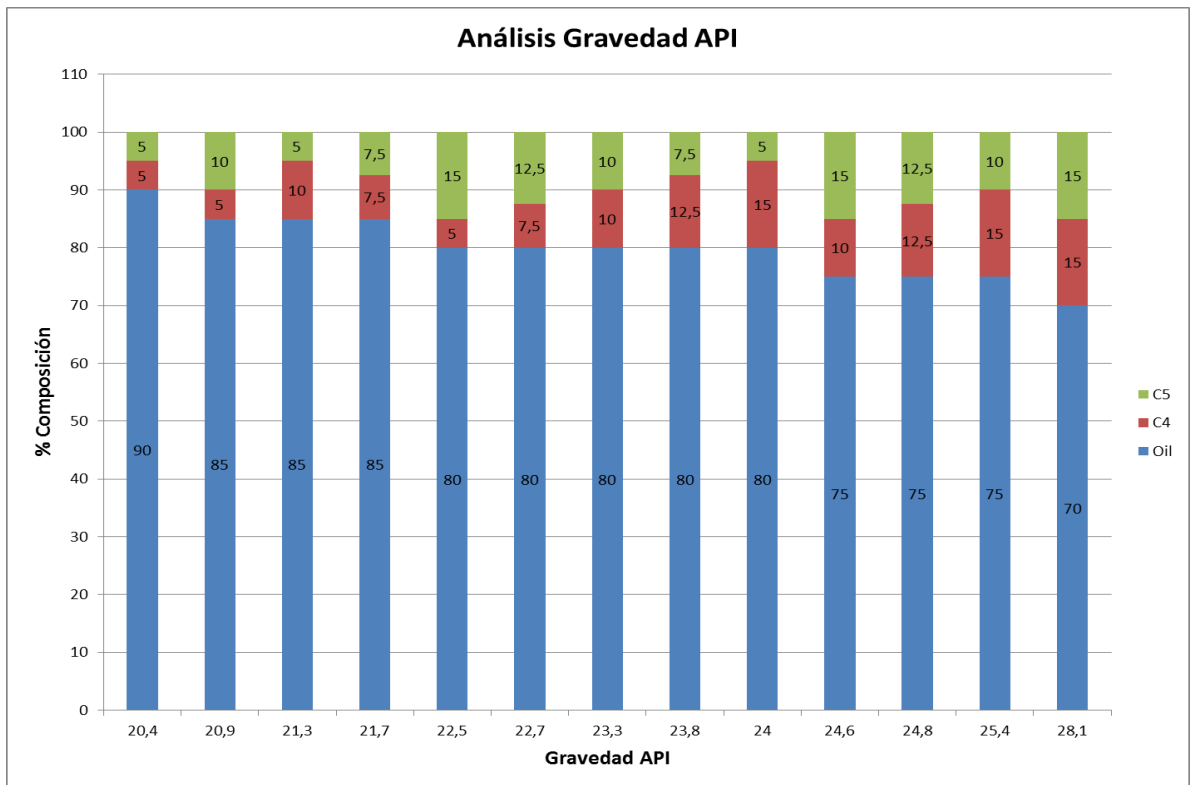
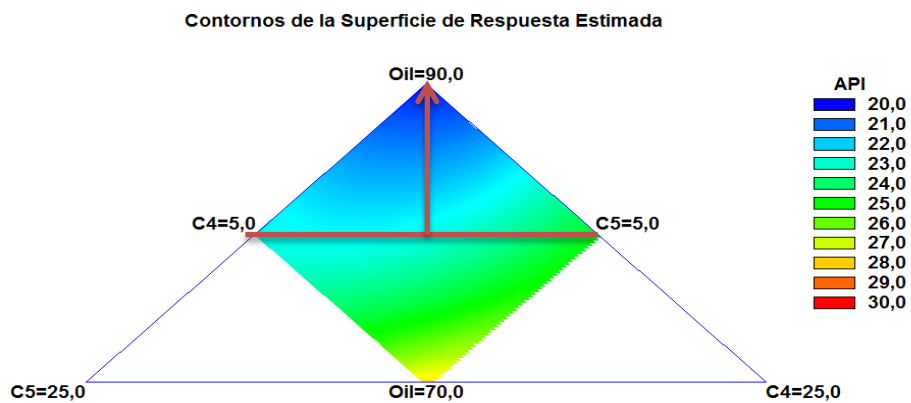


Figura C2. Contornos de respuesta gravedad API



Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Tabla C2. ANOVA API Crudo Pesado

FUENTE	GL / Valor
Modelo Cúbico Especial	6
Error Total	7
Falta de ajuste	6
Error Puro	1
Total	13
R-Cuadrada	91,73 (%)
Error estándar	0,141
Error absoluto	0,442

Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Figura C3. Análisis RVP crudo pesado

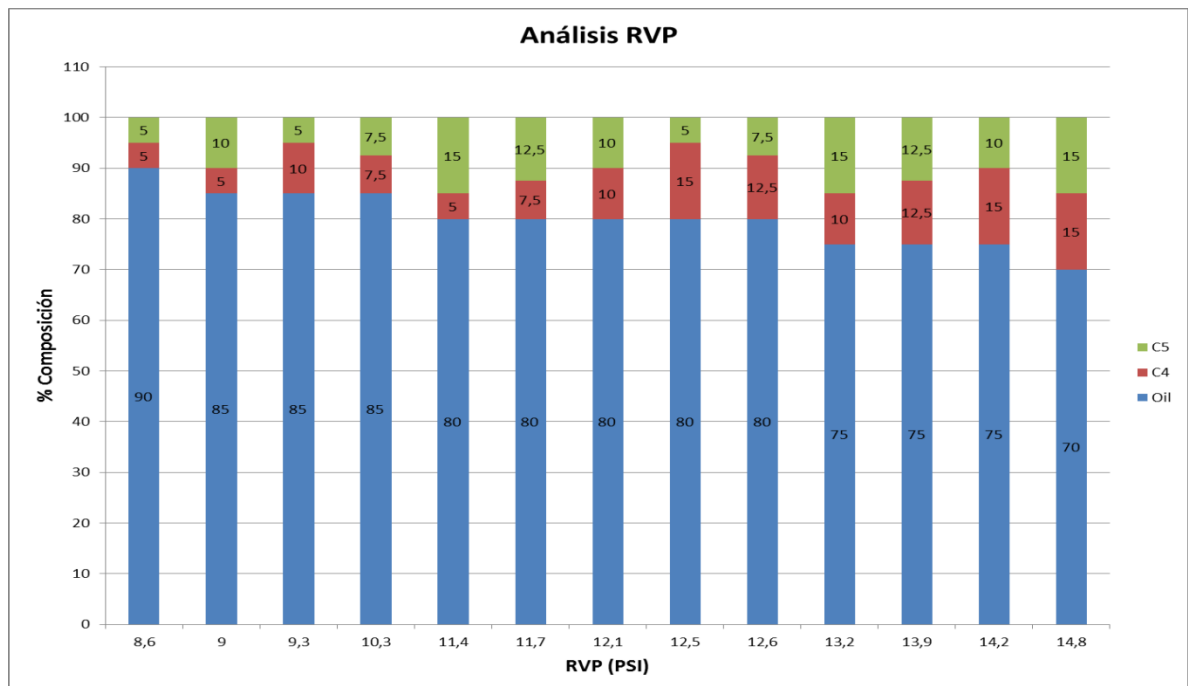
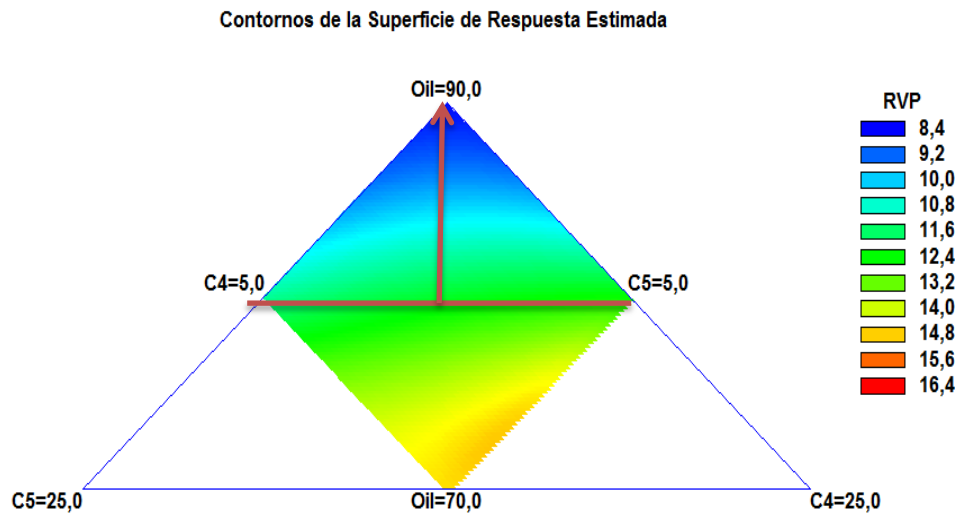


Figura C4. Contornos de respuesta RVP



Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Tabla C3. ANOVA RVP Crudo Pesado

FUENTE	GL
Modelo Cúbico Especial	6
Error Total	7
Falta de ajuste	6
Error Puro	1
Total	13
R-Cuadrada	97,53 (%)
Error estándar	0,141
Error absoluto	0,248

Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Figura C5. Análisis final crudo pesado

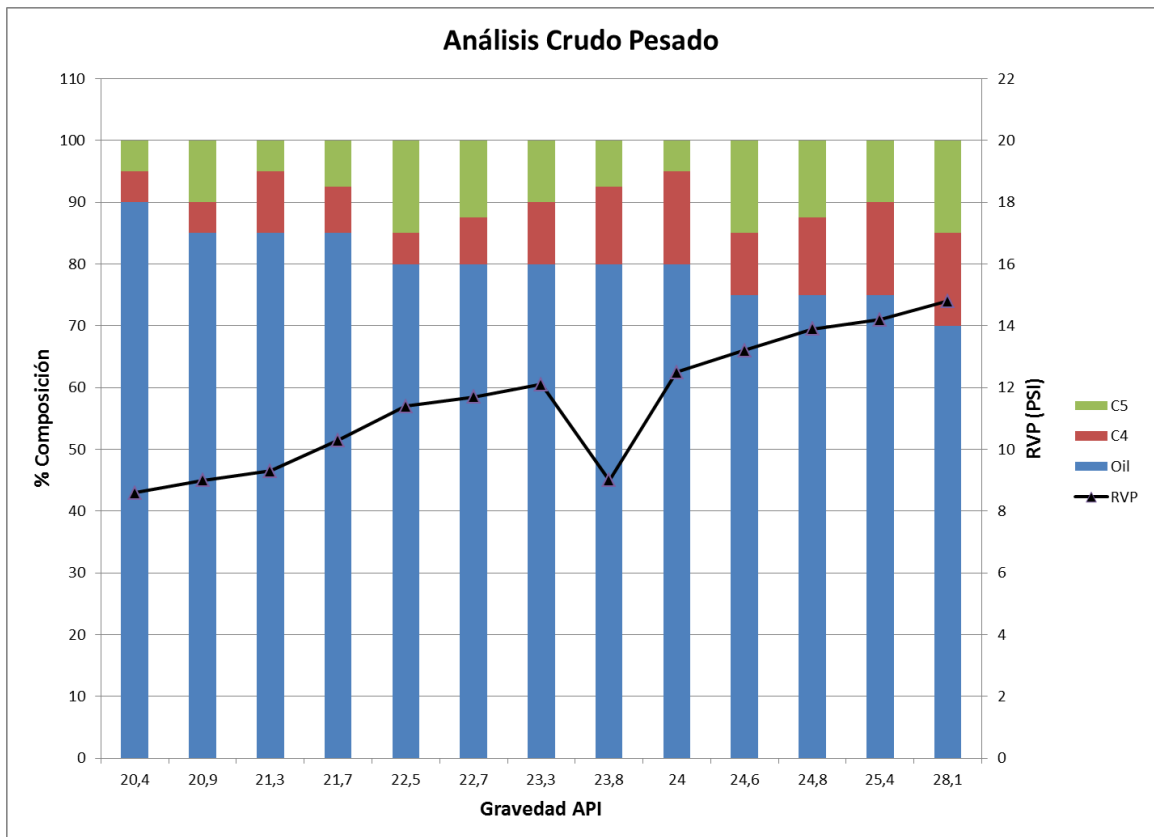


Tabla C4. Resultados Óptimos Crudo Pesado

Oil (%)	C ₄ (%)	C ₅ (%)	API	RVP	C ₄ (%)	C ₅ (%)
85	7,5	7,5	21,7	10,3	50,0	50,0
85	5	10	20,9	9	33,3	66,7
85	10	5	21,3	9,3	66,7	33,3

Si bien, la proporción 85-15 % petróleo-LGN ofrece una mezcla estable en cuanto al RVP y proporciona una mejora en la calidad del crudo, llevándolo de 12° a 21° API (Mejora en un 75% aproximadamente) es apreciable en los resultados, que la proporción del butano influye en mayor medida en el aumento tanto del RVP como de la gravedad API en comparación con la gasolina. Esto concluido a partir del porcentaje de butano dentro de la pre-mezcla butano gasolina y como parte de la mezcla total.

Igualmente, a partir de los resultados obtenidos con las pruebas de laboratorio se realizó un análisis en conjunto con STATGRAPHICS el cual permitió conocer las proporciones óptimas para cada componente teniendo en cuenta que se buscaba maximizar la gravedad API y minimizar el RVP. La tabla A5 resume las condiciones óptimas de respuesta y composición.

Tabla C5. Condiciones óptimas mezcla crudo pesado

Componente	Bajo	Alto	Óptimo
Oil	70	90	81,6
C ₄	5	15	13,3
C ₅	5	15	5

Respuesta	Optimo
API	23,8
RVP	11,4

Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI.

Teniendo en cuenta los análisis realizados, así como los gráficos de contornos, es posible concluir que la región señalada con la línea perpendicular a las superficies de contorno ofrece un conjunto de proporciones estables para la realización de la mezcla, incluyendo claro está, las seleccionadas finalmente en este caso.

ANEXO D. PRUEBAS EXPERIMENTALES CRUDO LIVIANO

Tabla D1. Resultados obtenidos para crudo de **34,5° API**

<i>Ejecución</i>	Crudo Liviano @ 34,5 ° API					Pre mezcla	
	<i>Oil (%)</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>	<i>API</i>	<i>RVP</i>	<i>C₄ (%)</i>	<i>C₅ (%)</i>
1	90	5	5	38,8	9,8	50,0	50,0
2	80	5	15	40,7	12,5	25,0	75,0
3	70	15	15	48,4	22,4	50,0	50,0
4	80	15	5	43,1	15,4	70,0	30,0
5	85	7,5	7,5	39,7	11	50,0	50,0
6	80	7,5	12,5	41,8	13,3	37,5	62,5
7	75	12,5	12,5	43,7	17,4	50,0	50,0
8	80	12,5	7,5	42,6	15	62,5	37,5
9	85	5	10	40,5	10,4	33,3	66,7
10	85	10	5	40,9	11,6	66,7	33,3
11	75	10	15	43,5	16,9	39,4	60,6
12	80	10	10	42,3	14,7	50,0	50,0
13	75	15	10	44,1	18,3	60,0	40,0

Figura D1. Análisis Gravedad API crudo liviano

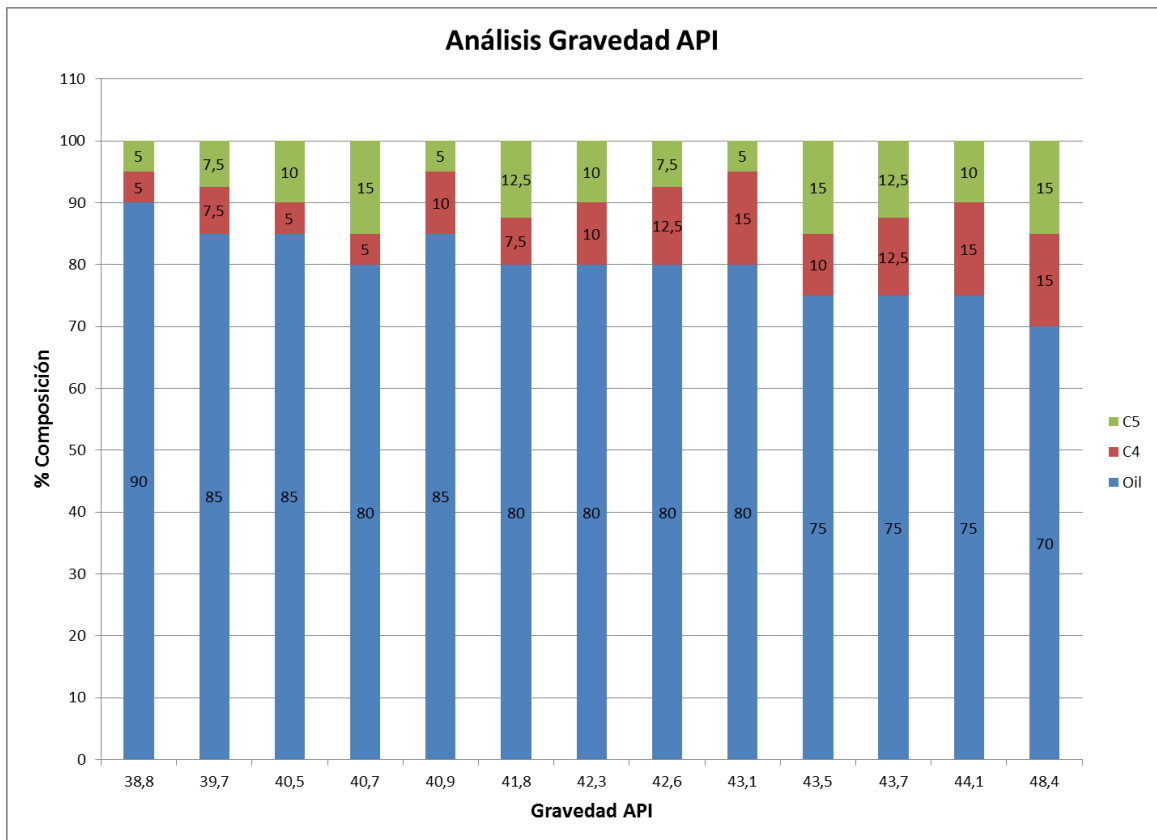
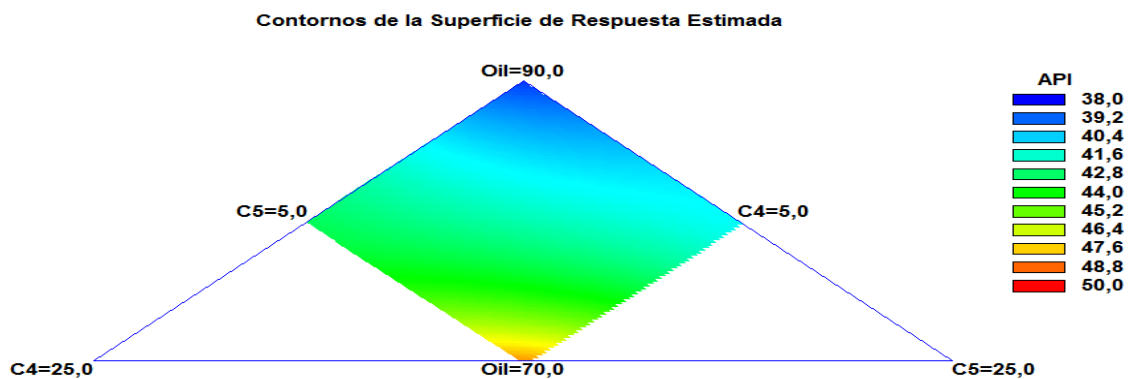


Figura D2. Contornos de respuesta gravedad API



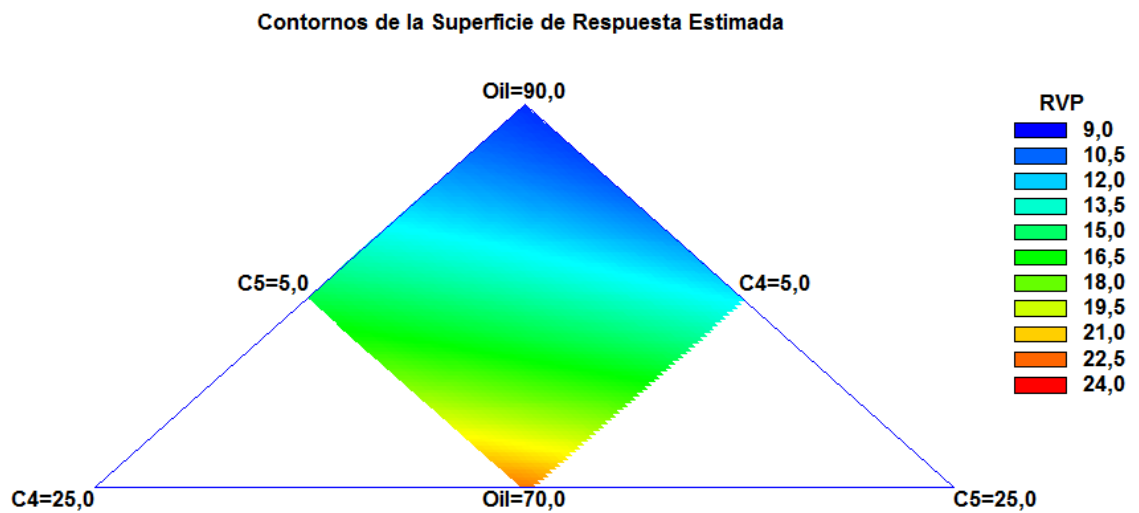
Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Tabla D2. ANOVA API Crudo Liviano

FUENTE	GL / VALOR
Modelo cúbico Especial	6
Error Total	7
Falta de ajuste	6
Error Puro	1
Total	13
R-Cuadrada	97,89 (%)
Error Estándar	0,464
Error Absoluto	0,284

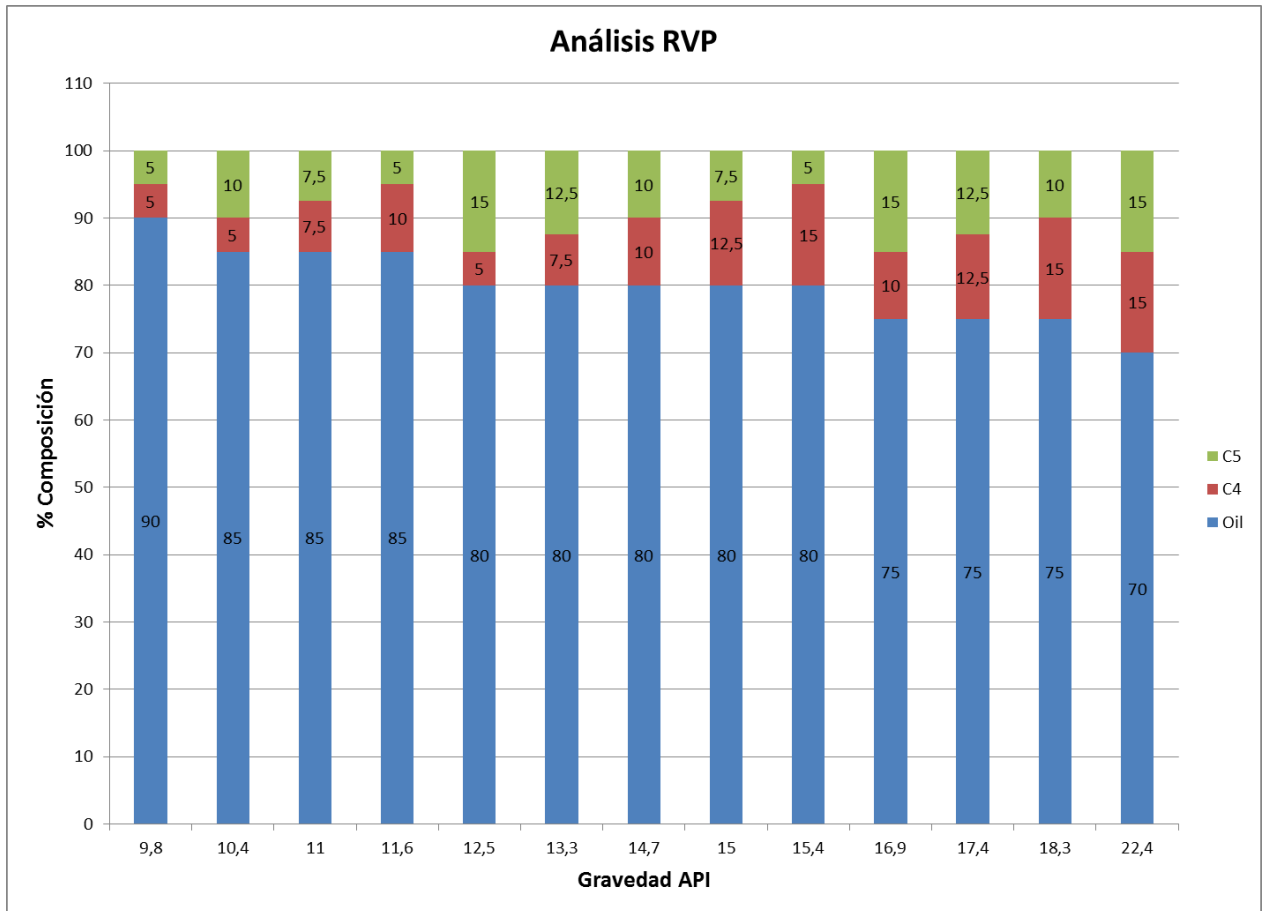
Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Figura D3. Contornos de respuesta RVP



Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Figura D4. Análisis RVP



La tabla Anova (Tabla D3) obtenida para RVP de crudo liviano permitir observar la variabilidad de esta variable de respuesta. Un valor de 98,9% de R-cuadrado indica que el modelo elegido para evaluar el comportamiento de dicho parámetro en la mezcla fue acertado, pues me indica que este comportamiento es modelado casi en su totalidad.

La figura D5 muestra el análisis final hecho al crudo liviano teniendo en cuenta la composición, el RVP y la gravedad API, siendo útil en el momento de identificar

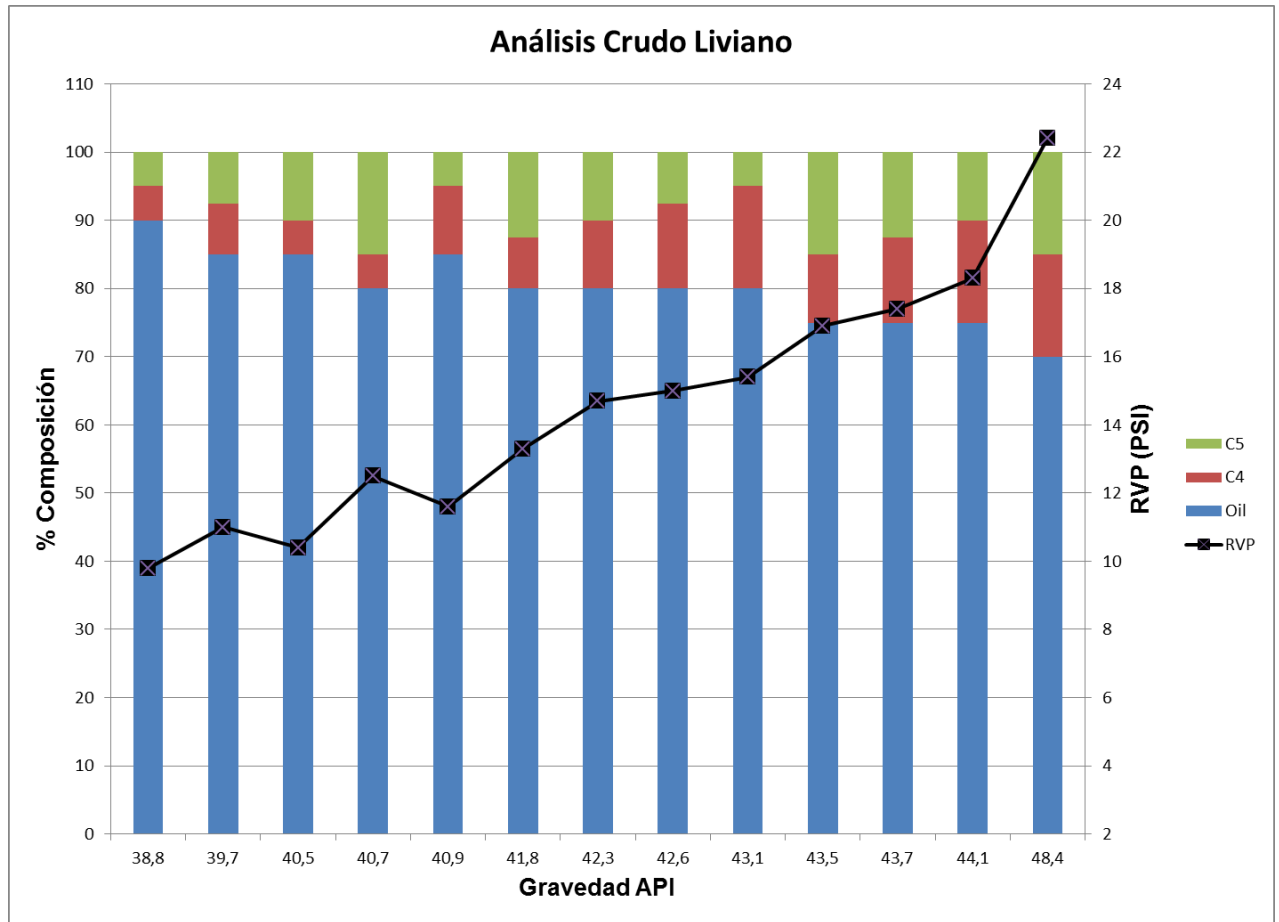
las condiciones estables de mezcla, las cuales según esta son desde 90%-10% crudo-LGN hasta algunas proporciones de 80%-20%.

Tabla D3. ANOVA RVP Crudo Liviano

FUENTE	GL/ VALOR
Modelo Cúbico Especial	6
Error Total	7
Falta de Ajuste	6
Error Puro	1
Total	13
R.cuadrada	98,89 (%)
Error estándar	0,365
Error Absoluto	0,210

Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI

Figura D5. Análisis Final Crudo Liviano



De la misma forma en que se realizó la optimización para crudo pesado y mediano se realizó para crudo liviano, con ayuda de STATGRAPHICS Centurion XVI. En este caso el aumento de gravedad API fue de hasta un 11%, evidenciando con esto que no es necesario o viable realizar mezclas con este tipo de crudo bajo estas condiciones, porque si bien se presentó aumento en la calidad, no fue tanto para que se justificara la aplicación de la mezcla.

Tabla D4. Resultados Óptimos Crudo Liviano

Oil (%)	C ₄ (%)	C ₅ (%)	API	RVP	C ₄ (%)	C ₅ (%)
90	5	5	38,8	9,8	50,0	50,0
80	5	15	40,7	12,5	25,0	75,0
85	7,5	7,5	39,7	11	50,0	50,0
85	10	5	40,9	11,6	66,7	33,3
85	5	10	40,5	10,4	33,3	66,7

Tabla D5. Condiciones óptimas mezcla crudo Liviano

Componente	Bajo	Alto	Óptimo
Oil	70	90	81,42
C ₄	5	15	13,56
C ₅	5	15	5

Respuesta	Optimo
API	42,45
RVP	14,22

Fuente: STATGRAPHICS Centurion XVI.

ANEXO E. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE HYSYS Y LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

Figura E1. Análisis comparativo para crudo pesado

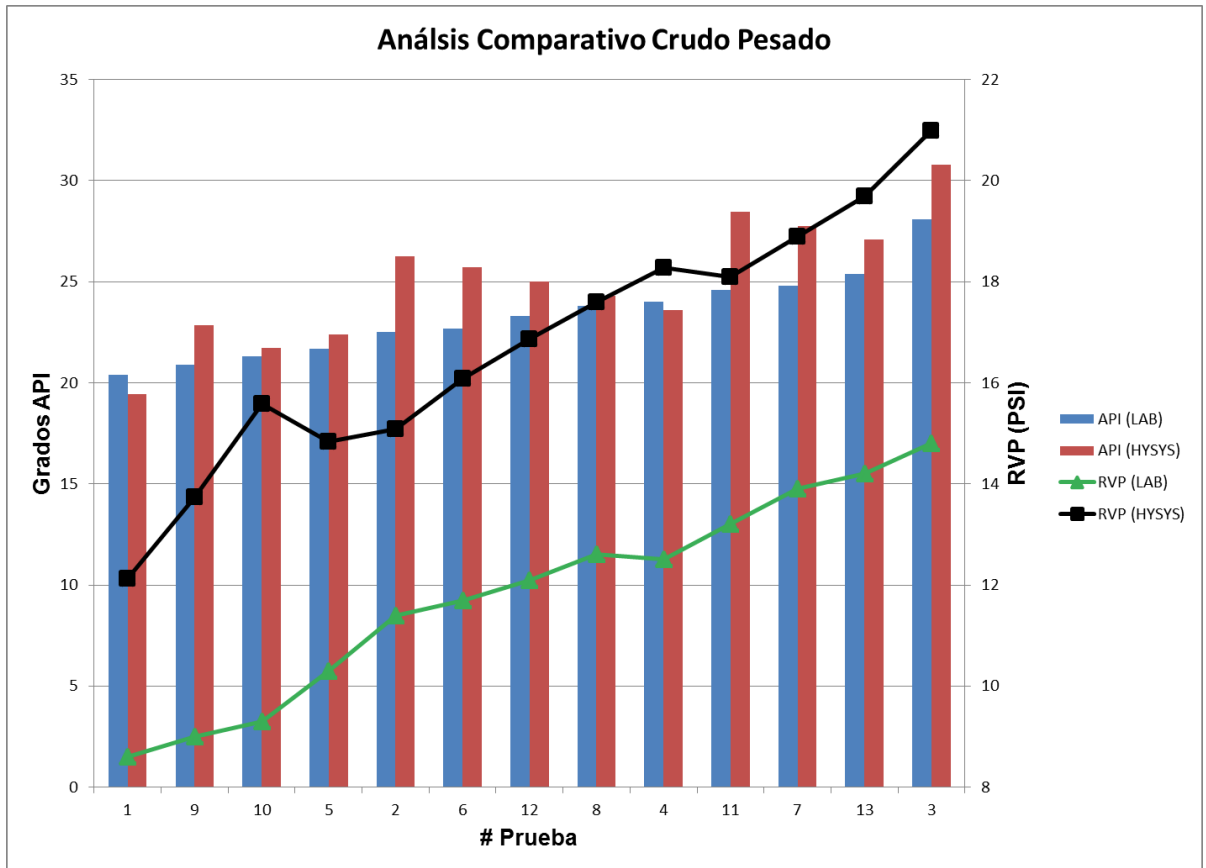


Figura E2. Análisis Comparativo para crudo liviano

