

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN SISTEMA
REGENERATIVO DE SULFOLANO PARA EL TRATAMIENTO DE
EMULSIONES EN LOS TANQUES DE ASENTAMIENTO DINÁMICO DE
LA ESTACION PRINCIPAL JUSEPIN (EPJ-2)”**

Realizado por:

Br. Guaita Livinel

C.I:17.632.016

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como
requisito parcial para obtener el título de**

INGENIERO QUÍMICO

Barcelona, Marzo de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN SISTEMA
REGENERATIVO DE SULFOLANO PARA EL TRATAMIENTO
DE EMULSIONES EN LOS TANQUES DE ASENTAMIENTO
DINÁMICO DE LA ESTACION PRINCIPAL JUSEPIN (EPJ-2)”**

Realizado por:

Br. Guaita Livinel

C.I:17.632.016

Revisado por:

Ing. Químico Shirley Marfisi, Dra

Asesor académico

Licenciada Venus Acevedo

Asesor Industrial

Barcelona, Marzo de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN SISTEMA
REGENERATIVO DE SULFOLANO PARA EL TRATAMIENTO
DE EMULSIONES EN LOS TANQUES DE ASENTAMIENTO
DINÁMICO DE LA ESTACION PRINCIPAL JUSEPIN (EPJ-2)”**

Realizado por:

Br. Guaita Livinel

C.I:17.632.016

Revisado y aprobado por:

Dra. Shirley Marfisi

Asesor académico

Ing. Químico Luis Moreno

Jurado Principal

Ing. Químico Arturo Rodulfo, M.Sc

Jurado Principal

Barcelona, Marzo de 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajo de Grado

“Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario para su aprobación”

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado en primer lugar a mi Padre Celestial y a su Hijo Jesucristo por que sin él no hubiera siquiera pensado en estudiar esta carrera, y si no fuera por la manera misteriosa y maravillosa en que él actúa no estuviera en este momento escribiendo estas palabras en esta tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Ahora sé lo que significa “todas las cosas ayudan a bien para los que aman a Dios”

A mi madre Coromoto Piamo a quien amo y quien es motivo de orgullo para mí, (Madre esto es para ti), y a mi padre Nelson Guaita porque sé que si estuviera con vida estaría orgulloso de mí.

A mis hermanos Neslivi, Nelson y Jhoedlin.

A mi futuro esposo Renier Ruiz por estar y apoyarme cuando más lo necesitaba.

A todos mis familiares, amigos y hermanos que hicieron de este sueño una realidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios en primer lugar por ser mi amparo, mi fortaleza, mi refugio en tiempo de angustias, mi Padre, mi Consolador, mi Proveedor, y porque solo Él me ha dado la oportunidad de tener a mi lado a cada una de las personas que en estos años de alguna forma me han ayudado en el cumplimiento de esta meta.

A mi madre hermosa como lo es Coromoto Piamo una mujer virtuosa, y luchadora, por la cual soy lo que soy y tengo lo que tengo, la cual a pesar de los obstáculos de la vida nunca se rindió y logró criarnos con todo lo que necesitábamos, a la cual le debo todo porque sin ella y sin su apoyo incondicional tanto en lo emocional como en lo económico no estuviera logrando esta meta en mi vida, gracias madre TE AMO.

A mis hermanos Nelson, Jhoedlin, y en especial a Neslivi Guaita porque siempre me animó a seguir adelante y a nunca rendirme, por ser motivo de inspiración para culminar esta carrera porque siempre me decía TU PUEDES, y porque en el periodo de mi pasantías me apoyo en todo, y también a Jesús Palacios por darme hospedaje en este tiempo.

A mis abuelos Olivia, Rosa y José por apoyarme y proveerme de un hogar y alimento los primeros años de mi carrera y siempre que pudieron.

A mi futuro esposo Renier Ruiz por estar estos 5 años a mi lado siendo más que mi novio mi amigo, mi compañero de clase y de residencia, por amarme y soportarme a pesar de que se que no soy nada fácil, por estar conmigo y ayudarme en los

momentos en que más lo necesitaba, por apoyarme y animarme cuando yo me rendía, por muchas cosas más gracias mi príncipe TE AMO.

A Luis Felipe Vásquez por ser el instrumento que Dios utilizó para que yo estudiase esta carrera que nunca me imagine cursar.

A Eduardo Farías por regalarme mi primer celular para comunicarme con mis familiares y amigos, aunque le dí las gracias meses después, quiero que sepas que estoy muy agradecida porque ese regalo, fue indispensable para no sentirme sola y triste en esos primeros años en que me fui de mi casa a una ciudad donde no conocía nada.

A mi amiga Rubisela Castillo por ser la primera persona en esta ciudad que sin conocer nada de mí me abrió las puertas de su casa y de su corazón para brindarme su amistad.

A mi amiga Gladys Lanz por ser más que una compañera de clase una buena amiga y hermana, porque siempre estuvo allí para conversar, escucharme, aconsejarme, y hasta regañarme para que mejorara mis defectos, por todas las cosas que compartimos le doy gracias a Dios, fueron unos años de amistad maravillosa la cual espero que perdure a pesar de que estemos culminando esta etapa de nuestras vidas, éxito en todo amiga.

A mis amigos de residencia, Angela, Reyna Cadenillas y Osmael Duarte, porque ustedes fueron parte de estos años maravillosos, y gracias a ustedes pude sentirme en familia, gracias por brindarme su ayuda, apoyo y amistad en todo momento, es difícil conseguir personas agradables con quien convivir y ustedes lo fueron, también le doy gracias a la Señora Reina Arreaza por abrirme las puertas de su casa y permitir que en estos últimos años ese fuera mi hogar, y por cuidar de nosotros como unos hijos.

A mis hermanos Angel Battaglini, Arelis Blanco, María Rincones, Moisés Perdomo, Erica Pulido por que fueron un pilar importante en el crecimiento de mi fé los primeros años de mi carrera, por hacerme sentir como en casa y abrirme sus corazones para brindarme su amistad, por todos los cumpleaños y todas las oportunidades en que estuvieron conmigo, mil gracias.

A la Señora Venus Acevedo por haber confiado en mí y darme la oportunidad para llevar a cabo este proyecto de tesis, porque no me trató como una simple tesista sino como una ingeniera, por todas las responsabilidades que me delegó porque aprendí mucho en este tiempo, y porque a pesar de los quebranto de salud que presento este año no me abandonó y estuvo siempre pendiente de mí. También le doy gracias al personal de la gerencia de tecnología que me hicieron sentir parte de ellos, en especial a Carmen Mata, Geovanny Joubert, Euclymar Gómez, Leonor González, y Betzaida Marcano, gracias por brindarme más que una ayuda técnica, su amistad.

A la profesora Shirley Marfisi por asesorarme en la elaboración de mi tesis y ayudarme en todo lo que estuviera a su alcance y en lo que no también, porque si no lo sabía lo investigaba, cosa que es de admirar porque sabe reconocer cuando desconoce algo, pero no se rinde sino que lo investiga para poder ayudarme, muchas gracias profe.

Al Profesor Luis Moreno porque fue para mí más que un profesor un amigo, con el cual pude conversar, reír, quejarme y en algunos casos casi llorar, pero siempre tuvo un buen consejo que darme y una palabra de aliento para seguir adelante.

Al Profesor Lucas Álvarez, por estar dispuesto a ayudarme y aclarar mis dudas a pesar de no tener tiempo o no estar en sus planes, además por ser un profesor que te inspira a seguir adelante para cada día ser mejor.

A los amigos que conocí en este largo transitar que fue mi tesis, en especial a Eudomar González, Ricardo Loaiza, y Edinson Rodríguez, porque sin ustedes esta etapa de mi vida no hubiera tenido sentido, por todas las veces que me ayudaron y que estuvieron allí para apoyarme, animarme, consolarme o simplemente escucharme, siempre le daré gracias a Dios por regalarme su amistad y por todos los momentos vividos junto a ustedes porque son inolvidables, y sobre todo por que pudieron ser otras personas las que estuvieran a mi lado en esos 6 meses, pero como él hace todo perfecto y nunca se equivoca fueron ustedes. Y por último, pero no menos importante, le doy gracias a Yohanna Requena, Jessica , Carlos Quintal, Onnel, Karina Tovar, Lourdes, Anibel Franco, y Edgar porque a pesar del poco tiempo que pudimos compartir me demostraron que podía contar con ellos, además por la colaboración para mi cumple n° 24 que nunca olvidaré.

A los demás amigos, hermanos y familiares que fueron parte fundamental de este sueño, pero que ahorita me olvido de nombrar gracias y discúlpenme.

RESUMEN

Este trabajo consistió en una evaluación técnico - económica para conocer la factibilidad de implantar un sistema regenerativo de sulfolano para el tratamiento de emulsiones de crudo en los tanques de asentamiento dinámico de la Estación Principal Jusepín - 2 (EPJ-2). La metodología consistió en primer lugar, en recopilar la información de las características operacionales del proceso de deshidratación, pudiendo constatar la problemática de la formación de emulsiones que se presenta en los tanques de asentamiento debido a los altos porcentajes de agua que se inyectan en los pozos del campo El Furrial para la recuperación secundaria del crudo, así como también las fallas mecánicas o de mantenimiento que presentan los tanques de lavado. En segundo lugar, se realizaron dos diagramas de proceso para la regeneración de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico, el primero consta principalmente de una separación flash y el segundo de una destilación al vacío como equipos de separación sulfolano-agua, posteriormente se realizó una evaluación técnica de los mismos mediante el proceso de análisis jerárquico o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) que consiste en la comparación por pares de parámetros como costo, desempeño, facilidad de instalación e impacto ambiental y a su vez otros subparámetros, obteniendo como resultado que el proceso más factible técnicamente es la destilación flash. Luego, se realizó la simulación del proceso más factible usando el simulador PRO/II y sensibilidades de temperaturas dentro de un rango de 100 y 220 °C, para saber las condiciones que permiten recuperar mayor cantidad de sulfolano las cuales fueron 170°C y 5 psig, logrando recuperar un 96,30% del sulfolano que sale del tanque de lavado . Por último, se realizó el estimado de costo para la evaluación económica, mediante el uso del Sistema de Evaluaciones Económicas (SEE), para así determinar la tasa interna de retorno (TIR), y el valor presente neto (VPN) necesario para implantar el sistema, cuyos valores fueron

45,26% y 6.728,59 M\$ respectivamente y en comparación con el método usado actualmente para el rompimiento de las emulsiones la implantación del sistema regenerativo mediante destilación flash es factible, seguro y rentable con un tiempo de pago de 2,38 años, que representa 2 años de desemulsionante, en el cual se recuperaría la inversión.

CONTENIDO

	Pág
RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	x
CONTENIDO	xii
LISTA DE TABLAS	xvi
LISTA DE FIGURAS	xvii
CAPITULO I	19
INTRODUCCIÓN	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.2 OBJETIVOS	24
1.2.1. Objetivo general	24
1.2.2. Objetivos específicos	25
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	25
1.4. DELIMITACION DE LA INVESTIGACIÓN	26
CAPITULO II	27
MARCO TEÓRICO	27
2.1 ANTECEDENTES	27
2.2 EMULSIÓN	28
2.2.1 Fases de una emulsión	29
2.2.2 Formación de las emulsiones	30
2.2.3 Requisitos esenciales para la formación de emulsiones	30
2.2.4. Tipos de emulsiones	31
2.2.5. Propiedades que intervienen en la estabilidad de las emulsiones....	33
2.3 DESHIDRATACIÓN DE CRUDO	36

2.3.1. Métodos utilizados en la deshidratación de crudo	36
2.3.1.1. Método químico	36
2.3.1.2. Método mecánico	38
2.3.1.3. Método eléctrico	42
2.3.1.4. Método térmico.....	45
2.4. PROCESO DE DESHIDRATACION EN LA ESTACION PRINCIPAL JUSEPIN (EPJ-2).....	46
2.5. PROCESOS DE SEPARACIÓN DE MEZCLAS LIQUIDAS.....	49
2.5.1. Destilación	49
2.5.1.1. Tipos de destilación	49
2.5.1.2. Equipos empleados en la destilación	52
2.5.2. Adsorción.....	52
2.5.3. Extracción	52
2.5.3.1. Tipos de extracción.....	52
2.5.3.2. Equipos empleados en la extracción.....	53
2.6. SULFOLANO	53
2.6.1. Propiedades químicas del sulfolano	54
2.6.2. Síntesis.....	54
2.6.3. Usos	55
2.7. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS	56
2.7.1. Tipos de estimados de costos.....	57
2.7.2. Métodos de evaluación económica.....	59
2.7.2.1. Período de recuperación de la inversión.....	60
2.7.2.2. Tasa de rendimiento sobre la inversión (Tasa de rendimiento) 60	
2.7.2.3. Costo anual equivalente.....	60
2.7.2.4. Costo anual equivalente y valor de salvamento.....	60
2.7.2.5. Valor presente neto (VPN)	60
2.7.2.6. Relación Beneficio-Costo (B/C).....	61
2.7.2.7. Tasa Interna de Retorno (TIR).....	62

2.8. MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y DECISIÓN MULTICRITERIO...	63
2.8.1. Proceso de análisis jerárquico.....	65
2.8.1.1 Pasos para la construcción del modelo jerárquico.....	66
2.8.1.2 Evaluación del modelo jerárquico	67
2.8.1.3. Matriz de comparación por pares	70
2.8.1.4 Matriz de prioridades.....	72
2.8.1.5 Consistencia de una matriz	74
2.9. PROGRAMAS DE SIMULACION.....	78
CAPITULO III	80
DESARROLLO DEL PROYECTO	80
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	80
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	80
3.3. TÉCNICAS UTILIZADAS	81
3.4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	81
3.4.1. Recopilación de información de las características operacionales actuales del proceso de deshidratación en la Estación Principal Jusepín-2	82
3.4.2. Realización de los diagramas de proceso para la regeneración de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico.....	84
3.4.3. Evaluación técnica de los esquemas de regeneración de sulfolano propuestos	87
3.4.4. Simulación del proceso de regeneración de sulfolano más factible	95
3.4.5. Evaluación económica de la factibilidad del sistema regenerativo de sulfolano.....	100
3.5 EQUIPOS, MATERIALES, HERRAMIENTAS Y SUSTANCIAS UTILIZADAS.....	106
3.5.1. Equipos	106
3.5.2. Materiales de laboratorio	106
3.5.3. Sustancias	107
3.5.4. Herramientas.....	107

CAPITULO IV	109
RESULTADOS, CONCLUSIONES.....	109
Y RECOMENDACIONES.....	109
4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES ACTUALES DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN EN LA ESTACIÓN PRINCIPAL JUSEPÍN-2.....	109
4.1.1. Características operacionales actuales del proceso de deshidratación en la Estación Principal Jusepín-2	109
4.1.2. Características operacionales de los tanques de asentamiento	111
4.1.3. Características de los deshidratadores electrostáticos	115
4.1.4. Características del tratamiento desemulsionante.....	118
4.1.5. Análisis de las curvas del portafolio de oportunidades (PDO 2008-2027)	119
4.2. REALIZACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE PROCESO PARA LA REGENERACIÓN DE SULFOLANO A NIVEL DE LOS TANQUES DE ASENTAMIENTO DINÁMICO	121
4.3. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS ESQUEMAS DE REGENERACIÓN DE SULFOLANO PROPUESTOS	122
4.4 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE REGENERACIÓN DE SULFOLANO MÁS FACTIBLE	124
4.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA FACTIBILIDAD DEL SISTEMA REGENERATIVO DE SULFOLANO.....	127
4.6 CONCLUSIONES.....	129
4.7 RECOMENDACIONES	131
BIBLIOGRAFIA	132
APÉNDICE	¡Error! Marcador no definido.
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:	135

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1. Escala de medidas de Saaty	33
Tabla 2.2. Índice de consistencia aleatoria	39
Tabla 3.1. Matriz de comparación por pares del primer nivel.	49
Tabla 3.2. Matriz de comparación por pares del primer nivel con los valores totales.	49
Tabla 3.3. Matriz de comparación por pares del primer nivel con el promedio.	50
Tabla 3.4 Factores asociados a la procura de los equipos del sistema regenerativo de sulfolano.	57
Tabla 4.1 Características de los equipos de la planta de deshidratación de crudo de la estación principal jusepin-2 (EPJ-2), antes de la expansión.	62
Tabla 4.2 Características de los equipos de la planta de deshidratación de crudo de la estación principal jusepin-2 (EPJ-2) proyecto de expansión.	63
Tabla 4.3 Características a las que operan los deshidratadores electrostáticos en la EPJ-2.	67
Tabla 4.4 Características físicas y químicas del producto desemulsionante	68
Tabla 4.5. Resultados de la evaluación técnica mediante el método AHP	71
Tabla 4.6. Características de cada una de las corrientes de la simulación	72
Tabla 4.7. Estimado de costos clase V para la opción destilación flash.	73
Tabla 4.8. Indicadores económicos para el proyecto de regeneración de sulfolano.	74

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Ubicación geográfica del campo petrolero El Furrial.	3
Figura 2.1. Microfotografía de una emulsión agua en petróleo	7
Figura 2.2. Fases presentes en una emulsión W/O	9
Figura 2.3. Fases presentes en una emulsión O/W	9
Figura 2.4. Fases presentes en una emulsión W/O/W	9
Figura 2.5. Fases presentes en una emulsión O/W/O	10
Figura 2.6. Separación de las fases de una emulsión según la gravedad diferencial.	14
Figura 2.7. Estructura del tanque de lavado	15
Figura 2.8. Partes de un deshidratador electrostático	17
Figura 2.9 Esquema del proceso de la Estación Principal Jusepin (EPJ-2).	19
Figura 2.10 Esquema general de la planta de deshidratación de crudo de la EPJ-2.	20
Figura 2.11 Estructura molecular del sulfolano	24
Figura 2.12 Síntesis del sulfolano	24
Figura 3.1. Imágenes de las visitas e inspección visual de los equipos en la EPJ-2.	42
Figura 3.2 Vista general de la planta de deshidratación de crudo de la Estación Principal Jusepin-2 (EPJ-2).	43
Figura 3.3 Diagrama de proceso propuesto para la deshidratación de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico de la EPJ-2, mediante la destilación al vacío.	45
Figura 3.4 Diagrama de proceso propuesto para la deshidratación	46

de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico de la EPJ-2 mediante la destilación flash.

Figura 3.5 Árbol jerárquico para el proceso de regeneración de sulfolano.	47
Figura 3.6 Pantalla de bienvenida al simulador PRO/II.	52
Figura 3.7 Componentes seleccionados para la simulación.	53
Figura 3.8 Paquete termodinámico seleccionado para la simulación.	53
Figura 3.9 Diagrama del proceso para regenerar sulfolano mediante destilación flash simulado con PRO/II.	54
Figura 3.10 Flujo de cada uno de los componentes de la corriente S1 de la simulación.	55
Figura 3.11 Temperatura y presión de la corriente S1 de la simulación	55
Figura 3.12 Datos del proyecto de regeneración de sulfolano para la evaluación económica.	58
Figura 3.13 Datos de inversión del proyecto evaluado económicamente.	58
Figura 3.14 Datos de los ingresos por ahorros para el proyecto evaluado económicamente.	59
Figura 3.15 Datos de los costos fijos asumidos para la evaluación económica.	60
Figura 4.1 Características de los tanques de asentamiento dinámico de la EPJ-2.	64
Figura 4.2. Vista del deshidratador electrostático DE-501 de la EPJ-2.	66
Figura 4.3. Curva del Portafolio de Oportunidades 2008-2027 de la producción de agua en el campo Furrial Este.	68
Figura 4.4. Curva del Portafolio de Oportunidades 2008-2027 de la producción de crudo en el campo Furrial Este.	69
Figura 4.5 Factibilidad de la evaluación técnica.	70
Figura 4.6 Vista del proceso de regeneración de sulfolano simulado en PRO/II.	72
Figura 4.7 Ingresos y egresos generados con la implantación del sistema regenerativo de sulfolano para un periodo de 10 años.	74

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El campo El Furrial es uno de los campos petrolíferos de mayor producción de crudo a nivel nacional, que maneja y procesa aproximadamente 420.000 bbl/día (420 MBD) de crudo. Se encuentra ubicado a 25 km al suroeste de la ciudad de Maturín, tiene una extensión de 16 km de largo y 6 km de ancho. El campo El Furrial fue descubierto en marzo de 1986 con la perforación del pozo FUL-01 en el yacimiento Naricual Superior. Este pozo produjo en su primera prueba 7.311 BPD con una gravedad de 26,5 °API y un RGP de 988 PCN/BN. La temperatura promedio del yacimiento es de 295 °F y la presión original de 11.250 psi a nivel de referencia de 13.800 pies. Las actividades de explotación del yacimiento se iniciaron en julio de 1987, con la evaluación del pozo FUL-04, generando un potencial de producción de 4 MBPD de 26 °API. El seguimiento continuo del comportamiento de este yacimiento desde 1987 hasta 1997, mostró un agotamiento de presión, reflejado en una caída desde 11.230 hasta 6.720 psi. Debido a esta declinación acelerada de presión, la reducción de productividad de los pozos y la disminución de las reservas recuperables por mecanismos primarios, se estableció un proyecto para incrementar la presión, y de esta manera explotar racionalmente el yacimiento maximizando el recobro de hidrocarburos, a través de mecanismos de recuperación secundaria como la inyección de agua. Este proceso es aplicable desde comienzos de la explotación para mantener la presión, o bien ya iniciada la explotación. El agua a inyectar puede ser aquella que es producida junto con el petróleo que es reinyectada. En todos los casos debe ser compatible con el agua de la formación productiva, y debe ser convenientemente tratada a los efectos de evitar daños a la formación así como también al sistema de cañerías de inyección y a los pozos inyectoros. En el proceso de comercialización del crudo, el agua debe separarse del petróleo por las siguientes razones:

- En el mercado petrolero se compra y vende el crudo con un rango de 0,1 a 0,5 % volumen de agua.
- El petróleo crudo es comprado y vendido en base a la gravedad °API y un crudo con alta gravedad API es comprado a un mejor precio. El contenido de agua en el crudo baja la gravedad API y reduce su precio de venta.
- El envío y manejo de agua contenida en el crudo implica un gasto inútil de transporte y de energía.
- La viscosidad del crudo se incrementa con el aumento del contenido de agua.
- Añadiendo 1 % de agua se genera un incremento de 2 % en la viscosidad de un crudo de 30 °API y un 4 % en un crudo de 15 °API.
- El agua junto a las sales minerales presentes en la salmuera corroen el equipo de producción, ductos, y los tanques de almacenamiento de crudo.

El agua presente en el crudo puede estar en forma libre o emulsionada con el petróleo crudo. En los últimos años las emulsiones agua /aceite (W/O) han generado grandes impactos en la industria del petróleo y como resultado, el proceso de deshidratación del petróleo crudo se ha ampliado enormemente así como los esfuerzos por desarrollar, diseñar y construir nuevas tecnologías y procedimientos orientados a la gestión y tratamiento del petróleo crudo con alto contenido de agua. Los principales mecanismos utilizados para la deshidratación de crudo son deshidratadores electrostáticos y tanques de asentamiento dinámico. Estos mecanismos se combinan con tratamientos térmicos y químicos para mejorar su eficiencia y obtener el crudo bajo especificaciones para el transporte y venta; la mayoría de estos métodos de deshidratación de petróleo son muy costosos y en algunos casos el equipo es muy difícil de operar.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA) es la corporación estatal responsable del desarrollo de la industria de los hidrocarburos; así como también de planificar, coordinar, supervisar y controlar las actividades relacionadas con la exploración, explotación, refinación, transporte y comercialización de hidrocarburos y sus derivados, tanto en Venezuela como en el extranjero. Todas estas actividades realizadas por PDVSA son llevadas a cabo gracias a la gestión de diversas gerencias. La Gerencia de Exploración y Producción cumple con la finalidad de incrementar la producción y calidad de crudo para cumplir con la creciente demanda mundial.

A partir de 1992, con el fin de mantener la presión del yacimiento y obtener mayor recobro de crudo, se implantó un proceso de recuperación secundaria a través de la inyección de agua en los flancos de los yacimientos del campo El Furrial, lo cual trajo como consecuencia un incremento en el porcentaje de agua y sedimentos (%AyS) emulsionado en el crudo. Debido a que uno de los estándares de calidad con los que debe cumplir el crudo es la cantidad de agua presente en el mismo, en el año 1994 empezó a funcionar una planta de deshidratación de crudo, con capacidad de 198 MBFPD (miles de barriles de fluido por día), la cual se encuentra ubicada en las instalaciones del Complejo Jusepín al nor-occidente del estado Monagas y a 40 km de la ciudad de Maturín, cuyo objetivo fundamental es el tratamiento de crudo del Furrial, con la finalidad de llevarlo a especificaciones para su venta con respecto al porcentaje de agua y sedimentos ($\leq 0,7\%$).

El campo El Furrial está localizado en el estado Monagas, a unos 25 km hacia el oeste de la ciudad de Maturín (figura 1.1), en el área correspondiente a la cuenca oriental de Venezuela (Sub Cuenca de Maturín). Su producción es de 8.250 MMBN (millones de barriles normales) de crudo mediano.

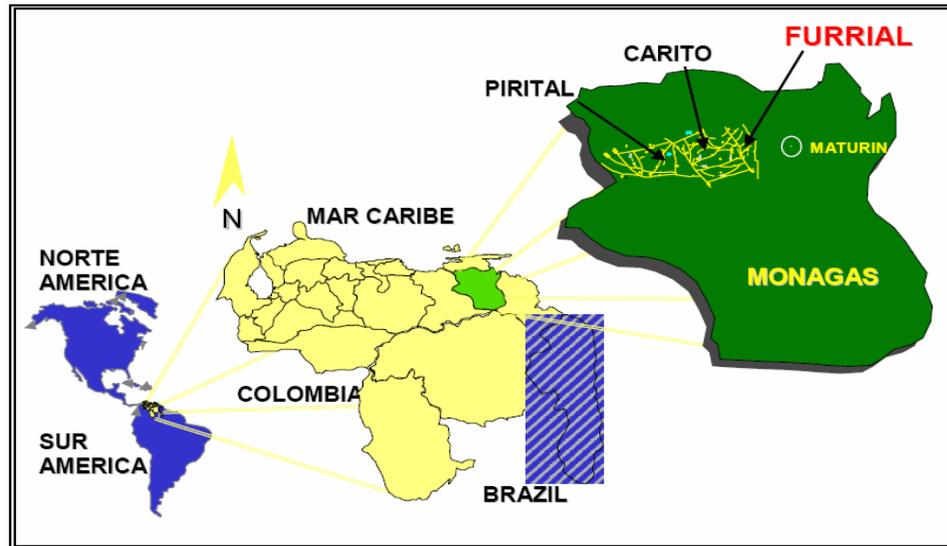


Figura 1.1 Ubicación geográfica del campo petrolero El Furrial.

Actualmente, el campo El Furrial se encuentra dividido en dos áreas: Furrial Este, cuya producción es procesada por la Estación Principal Jusepín-2 (EPJ-2) y Furrial Oeste, cuya producción es procesada en las estaciones Muri y Musipán.

La producción proveniente del área Furrial Este, El Corozo y Amarilis, es canalizada primeramente por seis puntos de convergencia inicial, que son los múltiples de campo localizados en diversos puntos estratégicos. Posteriormente, el procesamiento de esta producción se efectúa en la EPJ-2, para lo cual cuenta con 8 módulos de producción para la separación de crudo y gas. Una vez que ocurre la separación de fases (gas/líquido) en la estación, el gas separado es comprimido en el Centro Operativo Jusepín que está constituido por ocho plantas compresoras y una planta recuperadora de vapor.

En lo que respecta al crudo, cuando está desgasificado, es enfriado y trasladado a los tanques de estabilización cuando su porcentaje de agua y sedimentos es menor

que 0,7%. De allí, la producción de crudo del campo El Furrial Este es recolectada en ocho múltiples de flujo y trece líneas de recolección principales, con capacidad para manejar una producción promedio de 479 MBPD de fluido, para una relación gas/petróleo (RGP) de 1.000 millones de pies cúbicos por barriles diarios (MMPC/BD), de las cuales diez transfieren la producción hasta la EPJ-2.

La Estación Principal Jusepín-2 (EPJ-2) procesa y maneja crudo proveniente del campo El Furrial, cuya volumetría es aproximadamente 352 mil barriles brutos por día (MBBD) con un 28,24% de agua y sedimentos (AyS). Según las curvas del portafolio de oportunidades (PDO) 2008-2027 se estima que el contenido de agua irá en aumento como consecuencia del proceso de recuperación secundaria de crudo a través de la inyección de agua en los flancos de los yacimientos del campo El Furrial.

Este aumento de agua en la producción de petróleo afecta el funcionamiento óptimo del proceso de deshidratación. La presencia de agua en el crudo es indeseable, por ser una impureza sin valor, susceptible de provocar corrosión e incrustaciones en las instalaciones de transporte y refinación, por contener sales inorgánicas como cloruros, sulfatos, carbonatos de sodio, calcio o magnesio; y, además disminuye la gravedad API del crudo y por ende, su valor comercial.

El crudo contiene agua tanto en forma libre como emulsionada, por lo que es necesario que sea tratado con deshidratante para el rompimiento de las emulsiones (desemulsionante) antes de llegar a los tanques de lavado; para que finalmente sea enviado a los deshidratadores electrostáticos y así lograr las especificaciones requeridas en cuanto al porcentaje de agua y sedimentos. Los costos asociados a la inyección de desemulsionante usado actualmente son muy elevados, los cuales están por el orden de 19.440,75 BsF/día, que anualmente representan 7.095.873,75 Bs.F.

Estudios realizados recientemente por INTEVEP y personal de PDVSA, han demostrado que existe un solvente industrial llamado Sulfolano o *tetramethylene sulfona*, el cual es un líquido aceitoso, claro, y ligeramente amarillento, comúnmente utilizado en las refinerías para separar los compuestos aromáticos benceno, tolueno, y xileno, contenidos en las corrientes de reformado, resultado del reformado catalítico de la nafta virgen. Este producto posee poder deshidratante, es higroscópico y altamente soluble en agua. Con la aplicación del mismo en el proceso de deshidratación se eliminarían por completo los altos costos que conllevan la inyección de desemulsionante, además, al ser altamente estable permite que se pueda regenerar hasta casi un 90%, por lo cual se propuso en este proyecto realizar una evaluación técnico-económica de un sistema regenerativo de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico en la Estación Principal Jusepin 2 (EPJ-2) para la deshidratación de crudo del Furrial.

Esto con la finalidad de conocer si es factible la implementación de este sistema, evitando así la formación de emulsiones en los tanques de lavado, y además, obtener un crudo que cumpla con las especificaciones requeridas en cuanto al porcentaje de AyS, sin la necesidad de utilizar deshidratante. Tal alternativa permitirá garantizar la calidad de crudo para venta y reducir costos a la empresa al sustituir el deshidratante por este nuevo solvente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Evaluar técnico y económicamente un sistema regenerativo de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico de la EPJ-2, de PDVSA-EyP, Distrito Norte.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Recopilar información de las características operacionales actuales del proceso de deshidratación en la Estación Principal Jusepín-2.
2. Realizar los diagramas de proceso para la regeneración de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico.
3. Realizar una evaluación técnica de los esquemas de regeneración de sulfolano propuestos.
4. Simular el proceso del sistema de regeneración de sulfolano más eficiente.
5. Evaluar económicamente la factibilidad del sistema regenerativo de sulfolano.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El proceso de recuperación secundaria como lo es la inyección de agua implementada en los yacimientos del campo El Furrial para evitar la declinación de presión y permitir que el crudo ascienda, trae como consecuencia la formación de emulsiones agua-aceite en el mismo, afectando así su calidad, debido a que la presencia de agua disminuye su gravedad API, lo cual representa el principal parámetro a tomar en cuenta para establecer el precio, provocando una inminente rebaja en los ingresos económicos derivados de su venta, una reducción de la capacidad de transporte en oleoductos, así como también la tendencia a formar incrustaciones y corroer las tuberías, que ocasionaría graves problemas de taponamiento y oxidación de los equipos.

Para evitar estos daños en la Estación Principal Jusepin-2 se lleva a cabo la deshidratación y tratamiento de crudo, donde los principales mecanismos utilizados son los deshidratadores electrostáticos y tanques de asentamiento dinámico. Estos mecanismos se combinan con un desemulsionante para mejorar la eficiencia del

proceso y obtener el crudo bajo especificaciones para el transporte y venta, lo cual conlleva grandes costos.

El presente trabajo es de gran interés y constituye un importante beneficio para la empresa, debido a que se evaluó de manera técnica y económica un sistema de regeneración de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico que disminuya la formación de emulsiones, además de obtener un crudo que cumpla con las especificaciones requeridas en cuanto al porcentaje de AyS, que de ser factible generaría a la empresa grandes ahorros debido a que se eliminarían por completo los gastos asociados a la inyección de desemulsionante y aumentaría la eficiencia de los deshidratadores electrostáticos, generando así mayor eficiencia en el proceso y mayor producción.

1.4. DELIMITACION DE LA INVESTIGACIÓN

La elaboración de este proyecto se realizó en el área de la Estación Principal Jusepin-2 (EPJ-2), la cual se encuentra ubicada a 40 km de la ciudad de Maturín, y su objetivo fundamental es el tratamiento de crudo del campo El Furrial, específicamente se centró en la planta de deshidratación de crudo de la misma, que está constituida por los tanques de asentamiento, deshidratadores electrostáticos, bombas y líneas de flujo.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

El sulfolano es usado comúnmente como solvente industrial, sobre todo en la extracción de hidrocarburos aromáticos de mezclas de hidrocarburos y en la purificación del gas natural. La primera vez que se empleó el sulfolano a gran escala fue en el proceso de sulfinol, puesto en práctica por la Shell Oil Company en marzo de 1964, en una planta de gas cerca de la ciudad Karnes, Texas. El proceso de sulfinol purifica el gas natural quitando H₂S, CO, COS y mercaptanos del gas natural con una mezcla de alcanolamina y sulfolano. Sin embargo no se habían realizado estudios para evaluar su eficiencia en la deshidratación de crudo, sino a partir del 2005 en los trabajos que se hacen referencia a continuación:

Salazar¹ realizó un diseño conceptual de un sistema para el manejo de crudo en las nuevas instalaciones de El Furrial (NIF I) en el estado Monagas, debido a que las instalaciones existentes en El Furrial están trabajando a su máxima capacidad por el incremento de agua y gas asociado, producto de la rápida declinación de la presión del yacimiento, que desde el inicio de su explotación ha presentado el campo El Furrial.

INTEVEP² llevó a cabo la primera prueba experimental de laboratorio para evaluar la eficiencia de este producto en la deshidratación de crudo pesado de Cuba (16,8°API), a una temperatura de 70°C, caudal de 0,7 ml/min, y una relación crudo sulfolano de 1.000/3.000 ml, durante un periodo de 17 horas, obteniendo resultados muy satisfactorios en cuanto a la deshidratación del mismo.

Acevedo³ realizó una propuesta para mejorar el proceso de deshidratación de crudo del campo el Furrial con el fin de proporcionar un tratamiento químico o físico que se adaptara al proceso de deshidratación de crudo de la EPJ-2, para manejar cortes de agua superiores a los manejados actualmente y así aumentar la producción de petróleo a un corto plazo. Se concluyó que la colocación de un tanque de asentamiento dinámico adicional, con un 15% de AyS a la descarga solucionaría el problema del tiempo de residencia y se aumentaría la cantidad de agua retirada, además se propuso el sulfolano como una nueva tecnología para la deshidratación de crudo eliminando por completo la inyección de desemulsionante.

García⁴ evaluó la capacidad de deshidratación que tenía el sulfolano en crudo pesado y mediano de 13,6 y 26,4°API de Orocuál y El Furrial respectivamente, a escala de laboratorio. Obtuvo mejores resultados para el crudo mediano del Furrial donde se alcanzó una separación de agua de 97% a diferencia del crudo pesado de Orocuál donde se alcanzó tan solo una separación del 58%, además, se comprobó que es posible reducir el actual OPEX (Alto Costo Operativo) en un 32,5% y que el uso de desemulsionante no sería necesario.

2.2 EMULSIÓN

Una emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles (que no se unen), una de las cuales está dispersa en la otra (figura 2.1), y cuya estructura es estabilizada por un agente surfactante llamado emulsionante.

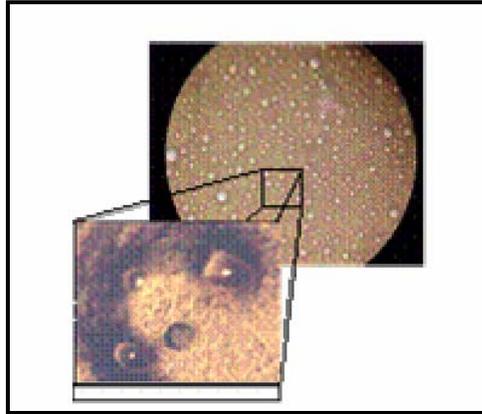


Figura 2.1. Microfotografía de una emulsión agua en petróleo⁵.

Durante el proceso de deshidratación del petróleo, es necesario utilizar químicos desemulsionantes para romper las emulsiones dentro del tiempo que exige la operación. Esencialmente, la acción del químico deshidratante se basa en lograr que las gotas de agua dispersas en el petróleo, lleguen a unirse entre sí para formar gotas más grandes que puedan separarse del crudo más fácilmente (coalescencia)⁵.

2.2.1 Fases de una emulsión

En una emulsión, el líquido que aparece en pequeñas gotas se conoce como la fase dispersa o interna, y el que rodea las gotas se llama fase continua o externa. En una emulsión de petróleo y agua la fase dispersa puede ser cualquiera de las dos (agua o petróleo), según las características del agente emulsionante, aunque en la mayoría de los casos el agua se forma en pequeñas gotas en el petróleo.

Las emulsiones pueden contener desde 0,1% hasta 80% o más de agua. Pueden ser muy estables o inestables, lo cual depende de varios factores.

2.2.2 Formación de las emulsiones

Generalmente la formación de las emulsiones se debe a la influencia de efectos mecánicos en el sistema de producción, además de la presencia de sustancias químicas.

Los efectos mecánicos están constituidos por el movimiento del crudo a través de las líneas de producción, en las cuales debido a los accesorios involucrados se producen efectos de turbulencia y agitación. En cuanto a las sustancias químicas, estas se pueden encontrar tanto en el agua asociada al crudo, como en el propio crudo (asfaltenos y parafinas), y pueden ser: solubles o insolubles.

Estas sustancias son las responsables de la estabilidad de las emulsiones, ya que son capaces de formar alrededor de las gotas dispersas una película envolvente que evita la coalescencia de la fase dispersa. Estas sustancias químicas se conocen como agentes emulsionantes.

2.2.3 Requisitos esenciales para la formación de emulsiones

Para que una emulsión pueda formarse deben cumplirse los siguientes requisitos:

- 1) Dos líquidos inmiscibles entre sí: agua y crudo.
- 2) Suficiente agitación: turbulencia o cizallamiento
- 3) Un emulsificador para estabilizar las gotas dispersas⁶.

Las emulsiones son causadas por turbulencia o agitación ya que el golpeteo dispersa una de las fases en muchas gotas pequeñas. La tensión interfacial o superficial tiende a la coalescencia de las gotas. Muchas gotas dispersas en una fase continua tienen una gran área colectiva interfacial, sin embargo, como las partículas

coalescen, el área total interfacial disminuye. La tensión superficial representa energía potencial disponible para producir un área interfacial más pequeña. Luego, la tendencia natural es que la coalescencia ocurra. Una tensión interfacial baja, disminuye la coalescencia de las gotas de la emulsión.

Dos líquidos puros inmiscibles no pueden formar una emulsión estable, sin la presencia de fuerzas estabilizadoras de la emulsión; pequeñas gotas se unirán nuevamente y decrecerá el área interfacial, la energía total de superficie y la energía libre de Gibbs del sistema. Una tercera sustancia o agente emulsionante debe estar presente para estabilizar la emulsión.

2.2.4. Tipos de emulsiones

En la mayoría de los casos en los cuales se hace una emulsión con dos líquidos inmiscibles, uno de los líquidos es una fase acuosa y el otro una fase aceite u orgánica; se usan las abreviaturas W (Agua) y O (Oíl) para dichas fases. Las emulsiones de petróleo y agua pueden encontrarse en cuatro formas diferentes⁵:

a) Emulsiones Agua-Aceite (W/O)

Son aquellas en las que la fase dispersada es el agua (W) en el crudo (O). Es una emulsión normal para los petroleros también llamada emulsión directa (figura 2.2)⁵.

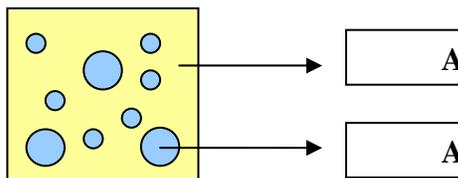


Figura 2.2. Fases presentes en una emulsión W/O.

b) Emulsiones Aceite-Agua (O/W)

Es cuando la emulsión contiene gotas de aceite (O) dispersadas en agua (W), también son llamadas emulsiones indirectas (figura 2.3)⁵.

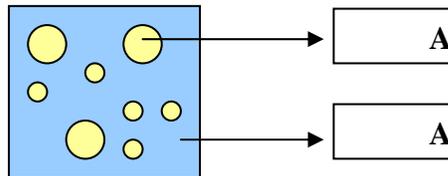


Figura 2.3. Fases presentes en una emulsión O/W.

c) Emulsiones Agua-Aceite -Agua (W/O/W)

Este tipo de emulsión la constituye una fase continua de agua, en la cual se encuentra una primera fase dispersa de petróleo, que a su vez, le sirve de fase continua a una segunda fase dispersa de agua (figura 2.4)⁵.

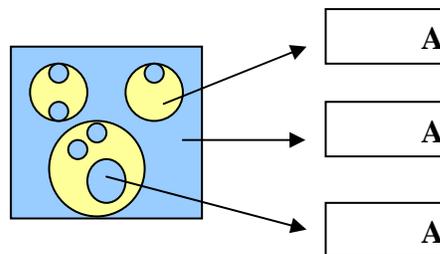


Figura 2.4. Fases presentes en una emulsión W/O/W.

d) Emulsiones Aceite-Agua-Aceite (O/W/O)

Este tipo de emulsiones no se encuentra con frecuencia, tiene una forma compleja. Está constituida por una fase continua de petróleo en cuyo seno se encuentran dispersos glóbulos de agua, los que a su vez forman una fase continua en la cual se encuentran dispersos glóbulos pequeños de petróleo (figura 2.5)⁵.

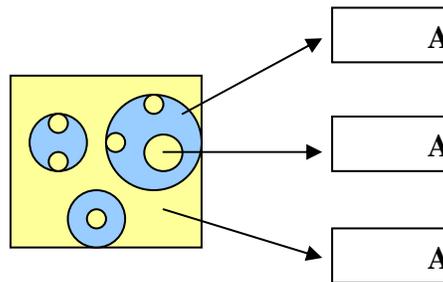


Figura 2.5. Fases presentes en una emulsión O/W/O.

2.2.5. Propiedades que intervienen en la estabilidad de las emulsiones

El rompimiento de una emulsión depende de las siguientes propiedades:

a) **Tensión interfacial.** Una reducción de la tensión interfacial no es suficiente para aumentar la estabilidad de la emulsión. Se ha encontrado recientemente que los sistemas de tensión ultra-baja producen emulsiones inestables. Estudios de tensión interfacial dinámica entre crudo y agua muestran que la tensión disminuye con el tiempo y que se requieren varias horas de contacto para obtener un valor estable⁶.

b) **Viscosidad de la fase externa.** Una viscosidad alta en la fase externa disminuye el coeficiente de difusión y la frecuencia de colisión de las gotas, por lo que se incrementa la estabilidad de la emulsión. Una alta concentración de las gotas también incrementa la viscosidad aparente de la fase continua y estabiliza la emulsión. Este efecto puede ser minimizado calentando la emulsión⁶.

c) **Tamaño de la gota.** Gotas muy pequeñas menores de 10 μm generalmente producen emulsiones más estables. Una amplia distribución de tamaños de partículas resulta en general en una emulsión menos estable⁶.

d) **Relación de volumen de fases.** Incrementando el volumen de la fase dispersa se incrementa el número de gotas y/o tamaño de gota y el área interfacial. La distancia de separación se reduce y esto aumenta la probabilidad de colisión de las gotas. Todos estos factores reducen la estabilidad de la emulsión⁶.

e) **Temperatura.** Usualmente, la temperatura tiene un efecto muy fuerte en la estabilidad de la emulsión. Incrementando la temperatura se reduce la adsorción de surfactantes naturales y disminuye la viscosidad de la fase externa, la rigidez de la película interfacial y la tensión superficial. Todos estos cambios reducen la estabilidad de la emulsión. En presencia de surfactantes aniónicos, un aumento de temperatura aumenta la afinidad de estos por la fase acuosa, mientras que lo inverso ocurre con surfactantes no-iónicos⁶.

f) **pH.** La adición de ácidos o bases inorgánicos cambia radicalmente la formación de películas de asfaltenos y resinas que estabilizan las emulsiones agua-aceite. Ajustando el pH se puede minimizar la rigidez de la película que estabiliza la emulsión y aumentar la tensión superficial. La estabilización de la tensión interfacial depende del pH de la fase acuosa, por lo cual la adsorción en la interfase presenta una histéresis que indica que las diferentes moléculas emulsionantes (surfactantes naturales que contienen grupos ácidos y bases) poseen cinéticas de equilibrio muy diferentes⁶.

g) **Envejecimiento de la interfase.** A medida que la interfase envejece la adsorción de los surfactantes se completa y debido a las interacciones laterales entre las moléculas aumenta la rigidez de la película hasta un valor estable en unas 3 a 4 horas. Esta película o piel alrededor de la gota llega a ser más gruesa, más fuerte y más dura. Además, la cantidad de agentes emulsionantes se incrementa por oxidación, fotólisis, evaporación o por la acción de bacterias⁶.

h) **Salinidad de la salmuera.** La concentración de la salmuera es un factor importante en la formación de emulsiones estables. Agua fresca o salmuera con baja concentración de sal favorecen la estabilidad de las emulsiones. Por el contrario, altas concentraciones de sal tienden a reducirla⁶.

i) **Tipo de aceite.** Los crudos con aceite de base parafínica usualmente no forman emulsiones estables, mientras que los crudos nafténicos y de base mixta forman emulsiones estables. Ceras, resinas, asfaltenos y otros sólidos pueden influenciar la estabilidad de la emulsión. En otras palabras, el tipo de crudo determina la cantidad y tipo de emulsionantes naturales⁶.

j) **Diferencia de densidad.** La fuerza neta de gravedad que actúa en una gota es directamente proporcional a la diferencia en densidades entre la gota y la fase continua. Aumentando la diferencia de densidad por incremento de la temperatura se logra aumentar la velocidad de sedimentación de las gotas y por ende, se acelera la coalescencia⁶.

k) **Presencia de cationes.** Los cationes divalentes como calcio y magnesio tienen tendencia a producir una compactación de las películas adsorbidas, probablemente por efecto de pantalla electrostática de un lado, y por otro, la precipitación de sales insolubles en la interfase⁶.

l) **Propiedades reológicas interfaciales.** Generalmente, cuando una interfase con moléculas de surfactantes adsorbidas se estira o dilata se generan gradientes de tensión. Los gradientes de tensión se oponen al estiramiento e intentan restaurar la uniformidad de la tensión interfacial. Como consecuencia, la interfase presenta una cierta elasticidad. Éste es el efecto llamado Gibbs-Marangoni. Para una interfase newtoniana las propiedades reológicas que determinan el movimiento interfacial son

la viscosidad de cizallamiento interfacial η_s , la viscosidad dilatacional interfacial η_d y el gradiente de tensión interfacial⁶.

2.3 DESHIDRATACIÓN DE CRUDO

Es el proceso mediante el cual se separa el agua asociada con el crudo, ya sea en forma emulsionada o libre, hasta lograr reducir su contenido a un porcentaje previamente especificado. Generalmente, este porcentaje es menor al 1% de agua⁶.

La deshidratación en el tratamiento de crudo tiene mucha importancia, debido a que en los pozos petroleros se producen aceites que contienen agua salada y otros materiales que deben ser removidos antes de su venta o refinación. Las principales impurezas o materiales contaminantes son: agua, sales solubles e insolubles asociadas con el agua. El agua contribuye a la corrosión y absorbe calor cuando se somete a calentamiento junto con el aceite. Por lo tanto es necesario reducir el contenido de agua a su mínimo valor.

Una parte producida por el pozo petrolero, llamada agua libre, se separa fácilmente del crudo por acción de la gravedad, tan pronto como la velocidad de los fluidos es suficientemente baja. La otra parte del agua está íntimamente combinada con el crudo en forma de una emulsión de gotas de agua dispersadas en el aceite, la cual se llama emulsión agua/aceite (W/O), y cuya estructura es estabilizada por un agente surfactante llamado emulsionante⁶.

2.3.1. Métodos utilizados en la deshidratación de crudo

2.3.1.1. Método químico

Los productos químicos que se utilizan en la deshidratación de crudos reducen la tensión superficial e interfacial de petróleo y agua, permitiendo que las diminutas

gotas de la fase dispersa se junten y decanten. Los mismos reciben el nombre de surfactantes o agentes tensoactivos y de acuerdo con su naturaleza fisicoquímica se pueden clasificar en dos grupos⁷:

➤ **Según la carga**

Los surfactantes son moléculas poliatómicas de peso molecular variable, anfífilas y tensoactivas (reducen la tensión superficial e interfacial). Según la carga se clasifican en:

- **Cationicos:** anfífilo tensoactivo cargado positivamente.
- **Aniónicos:** anfífilo tensoactivo cargado negativamente.
- **No Iónico:** anfífilo tensoactivo neutro.

➤ **Según la solubilidad en agua o aceite**

Debido a que las moléculas de surfactantes poseen un extremo con afinidad al agua y otro al aceite, los productos surfactantes se clasifican según el extremo dominante en:

- **Hidrofílicos:** su extremo dominante posee afinidad con el agua.
- **Lipofílicos:** son aquellos que poseen una afinidad dominante hacia el aceite.

Por el contrario, existen agentes emulsionantes que permiten que la emulsión se haga estable, actuando en forma de una película envolvente, son numerosos y pueden ser clasificados de la siguiente manera:

a) **Compuestos naturales surfactantes:** tales como asfaltenos y resinas conteniendo ácidos orgánicos y bases, ácidos nafténicos, ácidos carboxílicos, compuestos de azufre, fenoles, cresoles y otros surfactantes naturales de alto peso molecular⁷.

b) **Sólidos finamente divididos:** tales como arena, arcilla, finos de formación, esquistos, lodos de perforación, fluidos para estimulación, incrustaciones minerales, productos de la corrosión (por ejemplo sulfuro de hierro, óxidos), parafinas, asfaltenos precipitados. Los fluidos para estimulación de pozos pueden contribuir a formar emulsiones muy estables⁷.

c) **Químicos de producción añadidos:** tales como inhibidores de corrosión, biocidas, limpiadores, surfactantes y agentes humectantes⁷.

2.3.1.2. Método mecánico

La aplicación exclusiva de métodos mecánicos para deshidratar el crudo es bastante limitada. Sin embargo, cada día aumenta el uso de dispositivos basados en agentes mecánicos para ayudar a deshidratar el crudo con los desemulsionantes químicos. Algunos de estos se citan a continuación⁸:

➤ **Lavado.** Consiste en hacer pasar la emulsión a través de un colchón de agua, generalmente caliente, para provocar la disolución de las gotas de agua suspendidas, como es el caso de los tanques de lavado que se han utilizado desde hace muchos años en la deshidratación de petróleos emulsionados. En 1994, Allen Hazen desarrolló la teoría de un tanque de lavado ideal basada en la ley de asentamiento de Stokes que permite demostrar que en una emulsión salada en petróleo, la velocidad de asentamiento se puede incrementar de la manera siguiente:

Aumentando la diferencia de densidades en las fases.
Disminuyendo la viscosidad del petróleo.
Aumentando el diámetro de las partículas de agua salada.

La función principal de los tanques de lavado es tratar las emulsiones de agua en petróleo, mediante el principio de gravedad diferencial. Es decir, que como el agua

generalmente es más pesada que el petróleo, ella se asienta en el fondo del tanque; esto no ocurre cuando se tratan crudos extrapesados. En la figura 2.6 se puede observar la separación de las fases del crudo según la gravedad diferencial. De esta manera, el petróleo que sale del tanque de lavado generalmente cumple con las especificaciones exigidas.

El tanque de lavado tiene el siguiente propósito:

- Eliminar el agua libre.
- Tiene una función de lavado, la cual tiene lugar en la capa de agua ya que atrapa las gotas que se encuentran en suspensión con el crudo, eliminándola conjuntamente con el agua libre.
- Tiene una función de asentamiento, la cual se realiza en la capa emulsionada al caer las gotas, debido al proceso mecánico aplicado en el recorrido dentro del tanque.

Para que el asentamiento o separación por gravedad sea efectivo, la emulsión debe haber sido rota con ayuda de calor, inyección de productos químicos solubles en petróleo y auxiliares mecánicos dentro del tanque (deflectores) necesarios para acelerar la separación.

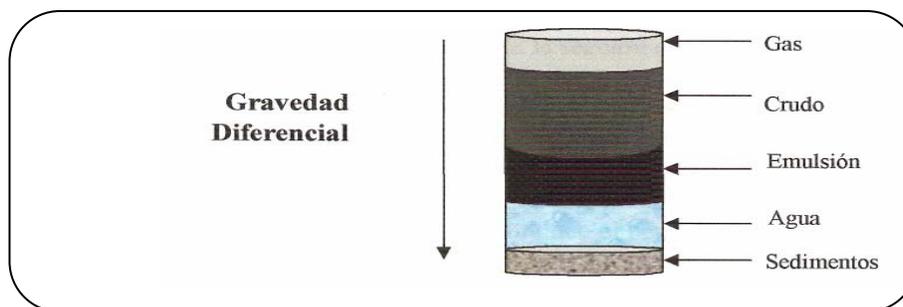


Figura 2.6. Separación de las fases de una emulsión según la gravedad diferencial⁸.

En general, el tiempo total de asentamiento necesario para una separación eficaz de ambos fluidos, dependerá de algunas variables como: viscosidad del petróleo, densidad tanto del petróleo como el agua, cantidad de agitación en el equipo de decantación, tasa del fluido que entra en el equipo y el tamaño de las partículas de agua.

En la figura 2.7 se observa la estructura de un tanque de lavado el cual se compone de cinco partes principales:

1. Línea de entrada o tubería que conduce la emulsión de agua-crudo hasta el tubo conductor.
2. Tubo conductor por el que fluye la emulsión antes de entrar al tanque.
3. Cuerpo del tanque que contiene agua de formación, sedimentos, emulsión de petróleo y capas de petróleo limpio libre de agua.
4. Válvula de descarga del agua, la cual controla la cantidad de agua en la sección de lavado. Este sistema permite mantener el nivel de agua necesario para que el proceso de deshidratación sea efectivo.
5. La línea de descarga que conduce el petróleo limpio desde el tanque de lavado hasta los tanques de almacenamiento. En la mayoría de los casos, el flujo en la línea de descarga es por gravedad. Sin embargo, cuando el tanque de almacenamiento se encuentra alejado del tanque de lavado, puede ser necesario instalar una bomba. No obstante, es preferible alterar la topografía y no usar bombas. Todo el equipo trabaja a presión atmosférica.

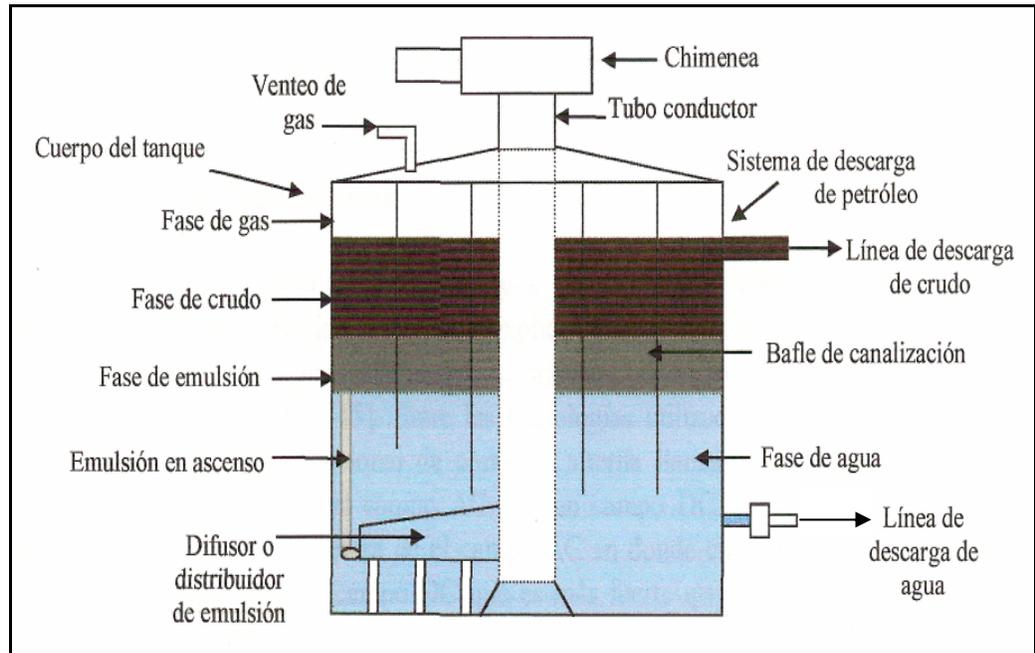


Figura 2.7. Estructura del tanque de lavado⁸.

➤ **Reposo.** Su aplicación es generalmente necesaria, pero solo en los casos de emulsiones inestables, en las cuales permite la separación del agua y del petróleo en un tiempo adecuado para las operaciones.

➤ **Agitación.** Aunque parezca contradictorio con los requisitos esenciales para formar una emulsión, este método también ayuda a romper las emulsiones.

➤ **Centrifugación.** Es posible y más eficaz cuanto mayor sea la diferencia de densidad entre el crudo y el agua.

➤ **Filtrado.** Consiste en hacer pasar la emulsión a través de un medio adecuado que retenga las partículas de agua y promueva su retención, y por consiguiente su decantamiento.

2.3.1.3. Método eléctrico

Consiste en utilizar un campo eléctrico relativamente fuerte, que induce una orientación polarizada de cargas sobre las moléculas en las superficies de las gotas de agua; los cambios de polaridad del campo eléctrico aplicado ocasionan una alta frecuencia de choque entre las gotas de agua, con lo que se acelera la coalescencia y se reduce significativamente el tiempo de reposo requerido por el crudo tratado⁸.

Esta teoría tiene su fundamento en que las gotas de agua en su forma natural son esféricas y se encuentran en su forma más baja de energía libre, por lo tanto no es dipolar. Al aplicarse un campo eléctrico se hace dipolar pasando a adoptar forma elipsoidal; cuando se produce la elongación se afecta la película superficial, lo cual permite mayor contacto con gotas vecinas y facilita la coalescencia.

Las gotas de agua son obligadas a combinarse por la acción de tres fenómenos físicos:

1. Las gotas de agua se polarizan y tienden a alinearse con la fuerza eléctrica. Esto hace que los polos negativos y positivos generados en los extremos de las gotas se ubiquen adyacentes unos con otros. La atracción eléctrica resultante hace que las gotas se junten y cause la coalescencia.

2. Las gotas de agua son atraídas hacia los electrodos debido a una carga inducida. En el campo AC (corriente alterna) por causa de la inercia, las pequeñas gotas tienen una mayor longitud de vibración que las grandes, lo que causa la coalescencia. En el campo DC (corriente continua) las gotas tienden a juntarse en los electrodos formando cada vez gotas mas grandes hasta que se sedimentan por gravedad.

3. El campo eléctrico tiende a distorsionar y así debilitar la película de emulsionante que rodea las gotas de agua.

Cualquiera que sea el mecanismo, el campo eléctrico causa el rápido movimiento de las gotas en direcciones aleatorias, lo cual incrementa la colisión con otras gotas. Cuando las gotas chocan con la velocidad justa, ocurre la coalescencia.

Los deshidratadores electrostáticos son los equipos utilizados para la deshidratación de crudo mediante el método eléctrico, como se explico anteriormente. Estos equipos operan sometiendo la emulsión a un campo eléctrico intenso, generado por la aplicación de alto voltaje entre los electrodos. Entre las tecnologías utilizadas en los deshidratadores electrostáticos esta la convencional de corriente alterna (AC) y la tecnología de polaridad dual que combina el campo AC con un campo de corriente continua (DC). En un deshidratador con tecnología dual, la emulsión entra en el campo AC en donde coalece gran parte del agua dispersa, para luego pasar al campo DC que es más fuerte que el AC y que actúa como sección de pulitura separando las gotas más pequeñas que no pudieron coalescer en el campo AC. La tecnología dual provee temperaturas de operación más bajas, y aumenta la capacidad del equipo. Es decir, que con un equipo del mismo tamaño se puede manejar un mayor volumen de crudo, garantizando la salida de crudo bajo las especificaciones de agua requeridas⁸.

Los deshidratadores electrostáticos están compuestos por:

➤ **Electrodos (usualmente denominados rejillas)**

Generalmente se colocan en una posición cercana al tope del envase. Ellos deben estar orientados de tal forma que la emulsión en ascenso pueda permanecer la mayor parte del tiempo en el campo eléctrico de alto voltaje (figura 2.8).

El voltaje debe ser ajustado fácilmente en la parte externa del envase. Una de las rejillas de electrodos está conectada a tierra. Generalmente la rejilla energizada, la cual está conformada por electrodos de acero inoxidable distantes 4 a 6 pulgadas entre sí, se encuentra fija en la parte inferior, mientras la rejilla aterrada

esta directamente sobre la rejilla energizada y separada de ella una distancia ajustable, de entre 2,5 a 12 pulgadas. El electrodo de alto voltaje se debe aislar eléctricamente de tierra. La conexión con el electrodo de alto voltaje debe estar perfectamente aislada del envase, ya que esta es una de las normas fundamentales en la parte operacional. Usualmente, el teflón se usa como material aislante.

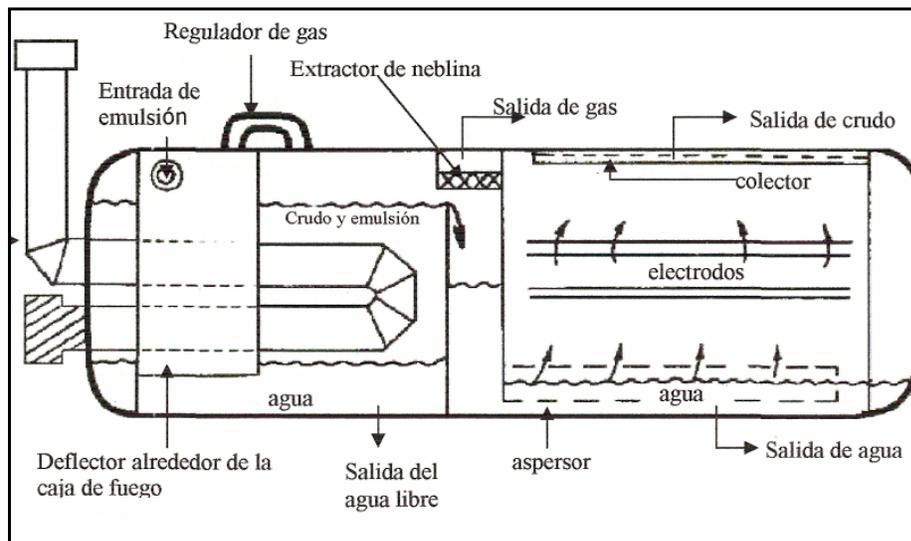


Figura 2.8. Partes de un deshidratador electrostático⁸.

➤ Transformadores

Es necesario suplir un voltaje constante. Esto se logra mediante transformadores autoajustables. Generalmente, se colocan en la parte superior del envase.

El transformador convierte la corriente eléctrica (CA, fase simple, 220-440 voltios, 50 o 60 Hz) a la corriente requerida que puede estar entre 18.000 a 20.000 voltios. La corriente eléctrica alimentada a través de un conductor aislado, inmerso en aceite y sellado a presión, entra al recipiente a través de un buje aislante y se conecta a la rejilla de electrodos cargados⁸.

➤ **Interruptor de seguridad**

El deshidratador debe operar lleno de líquido cuando se suministra el alto voltaje, de lo contrario, existe un interruptor que corta el suministro, lo cual ocurre cuando el volumen del envase es parcialmente ocupado por gas. Por lo tanto, la emulsión debe estar desgasificada al entrar al envase donde se encuentran los electrodos. Esto evita caída de voltaje por presencia de gas⁸.

➤ **Drenaje del crudo**

El drenaje del crudo se debe colocar por encima de los electrodos y cubriendo la longitud efectiva del envase. De esta manera, se evita la canalización del crudo hacia una zona dada del electrodo. Para lograr el drenaje del crudo de una manera adecuada, se hace necesario que el colector cubra la mayor parte de la longitud del deshidratador⁸.

➤ **Sistema de drenaje de lodo**

En operaciones normales el lodo que acompaña a la emulsión se elimina con el agua drenada del deshidratador. Sin embargo, algunos crudos contienen exceso de sedimentos, lo cual disminuye la capacidad de residencia del agua. Cuando esto ocurre, se debe incorporar al envase un sistema de lavado de lodo. Con este sistema se logra agitar el lodo de tal forma que pueda ser eliminado con el agua de drenaje. La agitación se puede efectuar con inyección de vapor o mediante un efecto de movimiento mecánico. Cuando se usa vapor, es necesario inyectarlo a una presión ligeramente superior a la del envase⁸.

2.3.1.4. Método térmico

Cuando los crudos son altamente viscosos, se usa un proceso de calentamiento para disminuir la viscosidad del petróleo y la tensión superficial de la película interfacial. El calor también aumenta el movimiento browniano que poseen las partículas pequeñas en suspensión de la fase dispersa, produciendo con este mayor

numero de choques entre las partículas, obteniendo como resultado la coalescencia y floculación de las mismas. Por este motivo los tratadores térmicos se emplean para separar emulsiones de crudo-agua en sus componentes a fin de obtener crudo limpio, muchas veces este método es acompañado con el método mecánico⁸.

2.4. PROCESO DE DESHIDRATAACION EN LA ESTACION PRINCIPAL JUSEPIN (EPJ-2)

El crudo bifásico (fase líquida crudo y agua, y fase gas) que se procesa en la Estación Principal Jusepín-2, proveniente de la explotación de los yacimientos del campo El Furrial, viene a unas condiciones de presión de 135 psi y a una temperatura de 181°F, con gravedad API entre 28 y 30°.

Este crudo bifásico es enviado desde los pozos a los múltiples de producción para luego ser procesado en las etapas de separación de crudo y gas de dicha estación (figura 2.9). El crudo una vez que entra a la etapa de separación a dichas condiciones, previamente y durante las inter-etapas, es tratado con inyección de químicos (antiespumante, dispersante de asfaltenos) en virtud de disminuir la formación de espuma para las siguientes etapas del proceso y evitar la formación de asfaltenos. Adicionalmente, en los múltiples de recolección (múltiple 1 y 4) es inyectado un desemulsionante para disminuir la emulsión presente en el crudo. De la corriente de gas obtenida de estas etapas de separación, parte es enviada a las plantas compresoras⁹.

El crudo es enviado a los tanques de estabilización de 10.000 barriles (TK10001 al TK10006), donde parte del gas es recuperado y enviado a las recuperadoras de vapor (REVAS). El crudo pseudoestabilizado es enviado a la planta de deshidratación de crudo de la EPJ-2 (figura 2.10). Este crudo (aprox. 420 MBPD)

con alto contenido de agua (27%), se recibe en unos tanques de lavado (TK 55004 y TK55005) a una presión de 35 psi, y una temperatura entre 145 – 147°F.

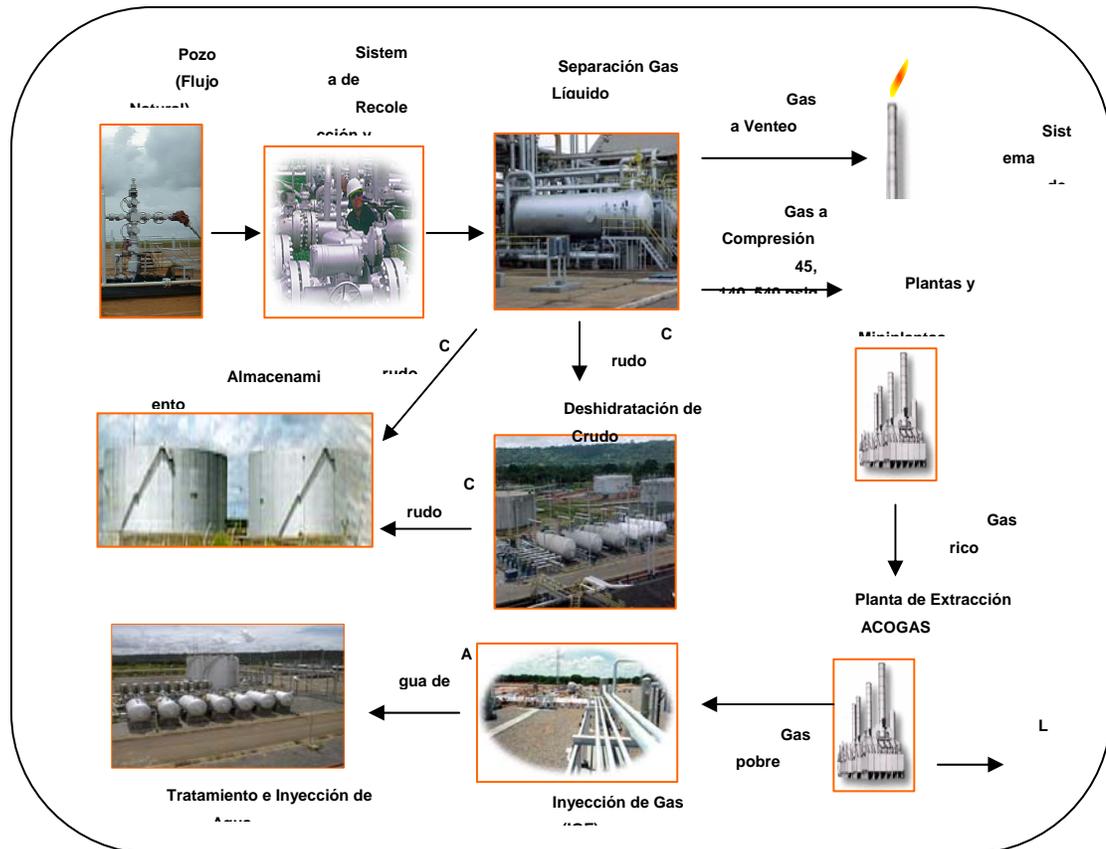


Figura 2.9 Esquema del proceso de la Estación Principal Jusepin (EPJ-2)⁹.

En los tanques de lavado ocurre una deshidratación parcial donde se separa el 60% del agua libre del crudo húmedo. El agua libre es transferida por gravedad hacia el sistema de bombeo de transferencia de agua (P-02 A/B/C/D y F), de donde es enviada a las plantas de tratamientos SAEN I y SAEN II, a una presión de 125 psi y a una temperatura de 145 °F. Por otra parte el crudo es transferido por gravedad hacia el sistema de bombeo de crudo (P-01A/B/C/D/E/F/G/H), de donde es enviado a los deshidratadores electrostáticos (DE- 101/201/301/401/501/601 y 701), los cuales se

encuentran instalados en paralelo. Los equipos DE-101/201 y DE-301 están diseñados para procesar 60 MBPD de crudo húmedo cada uno con un corte de agua máximo de 30% p/v, y los DE-401 y DE-501 de capacidad nominal 80 MBPD de crudo húmedo cada uno con un corte de agua máximo de 30% p/v, todos a una temperatura de 145 °F y presión promedio de 60 psig.

El agua, que es separada en los deshidratadores electrostáticos, se recircula nuevamente a los tanques de lavado, y no debe exceder de 300 ppm (partes por millón) de crudo insoluble suspendido, a la salida de los mismos. Esta operación reduce el riesgo de transferir crudo hacia las plantas de tratamientos (SAEN I/II), ante una pérdida del nivel del agua en los deshidratadores.

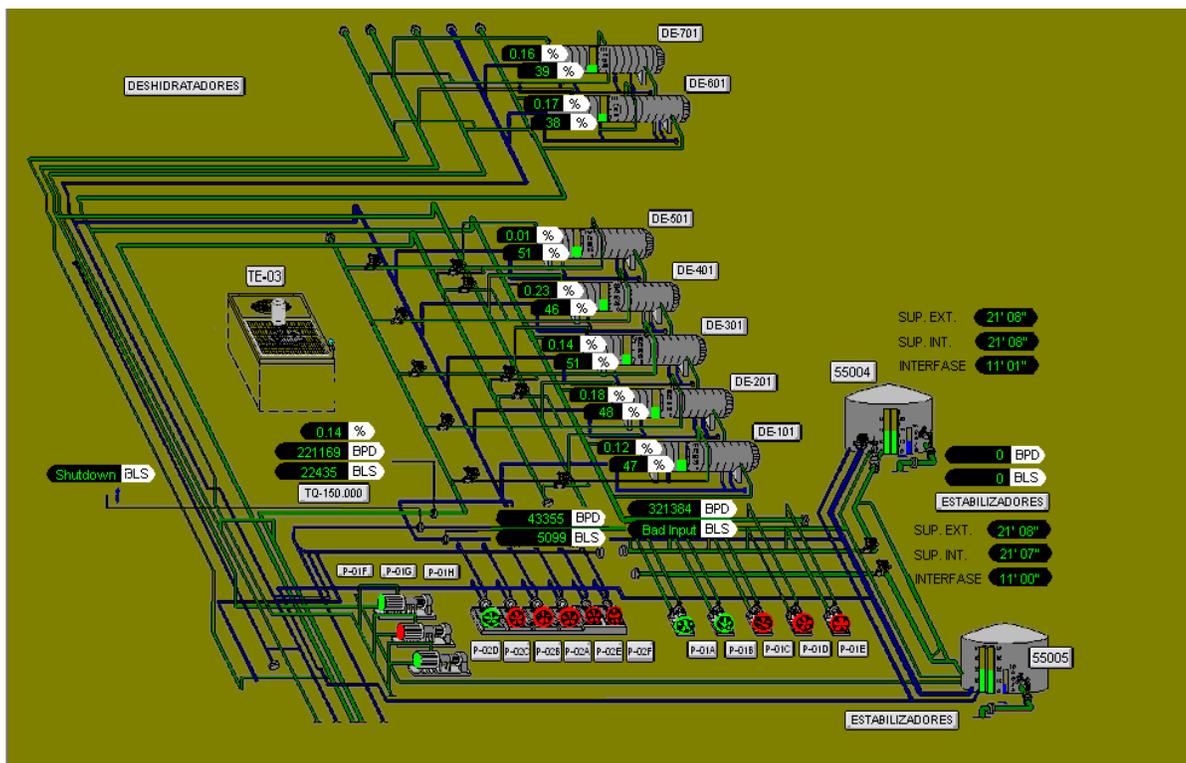


Figura 2.10 Esquema general de la planta de deshidratación de crudo de la EPJ-2.

El crudo deshidratado que sale por el tope, tiene un contenido de agua y sedimentos menor al 0,7% AyS, medido por el método de centrifugación, a una presión de operación de 60 psig, una temperatura de 140°F y una gravedad API entre 28 y 30°, y finalmente es enviado a los tanques de almacenamiento de crudo del Centro de Almacenamiento y Transferencia de Crudo Jusepín.

2.5. PROCESOS DE SEPARACIÓN DE MEZCLAS LIQUIDAS

Existen diversos procesos de separación, a continuación se mencionan los procesos más usados en la industria para separar mezclas de componentes líquidos.

2.5.1. Destilación

Es el método más utilizado en ingeniería química y consiste en separar 2 o más componentes de una mezcla líquida aprovechando sus diferencias en cuanto a la presión de vapor. Parte de las moléculas de una sustancia rompen la atracción de las moléculas del líquido y pueden pasar a la fase gaseosa. Aquellas moléculas de la fase gaseosa con menor energía podrán ser atrapadas por el líquido y se tendrá una situación de equilibrio entre el líquido y el gas. Las sustancias más volátiles o con menor punto de ebullición son las que tienen mayor tendencia a pasar a la fase gas, y por el contrario las menos volátiles o con mayor punto de ebullición tienen menor tendencia¹¹.

2.5.1.1. Tipos de destilación

- **Destilación simple**

La destilación es la operación de separar, mediante calor, los diferentes componentes líquidos de una mezcla, aprovechando los diferentes puntos de ebullición de las sustancias a separar. El aparato utilizado para la destilación en el laboratorio es el alambique. Consta de un recipiente donde se almacena la mezcla a la

que se le aplica calor, un condensador donde se enfrían los vapores generados, llevándolos de nuevo al estado líquido y un recipiente donde se almacena el líquido concentrado.

En la industria química se utiliza la destilación para la separación de mezclas simples o complejas¹¹.

- **Destilación fraccionada**

La destilación fraccionada es una variante de la destilación simple que se emplea principalmente cuando es necesario separar líquidos con punto de ebullición cercanos.

La principal diferencia que tiene con la destilación simple es el uso de una columna de fraccionamiento. Ésta permite un mayor contacto entre los vapores que ascienden con el líquido condensado que desciende, por la utilización de diferentes "platos". Esto facilita el intercambio de calor entre los vapores (que ceden) y los líquidos (que reciben). Ese intercambio produce un intercambio de masa, donde los líquidos con menor punto de ebullición se convierten en vapor, y los vapores con mayor punto de ebullición pasan al estado líquido¹¹.

- **Rectificación**

La destilación con reflujo se llama rectificación. Es uno de los tipos más importantes de destilación, donde el vapor que abandona la cabeza de la columna se condensa y una fracción del líquido condensado se devuelve a la columna fracción que constituye el reflujo y el resto se retira como producto destilado. En el interior de la columna se pone en contacto el vapor ascendente con el líquido descendente. En un nivel dado de la columna, estas dos corrientes no están en equilibrio entre sí, por lo que hay una transferencia de materia, pasan los componentes más volátiles del líquido al vapor y los componentes menos volátiles del vapor al líquido. Esta transferencia provoca que el vapor se enriquezca en los componentes más volátiles a medida que asciende por la columna¹¹.

- **Destilación azeotrópica**

En química, la destilación azeotrópica es una de las técnicas usadas para romper un azeótropo en la destilación. Una de las destilaciones más comunes con un azeótropo es la de la mezcla etanol-agua¹¹

- **Destilación al vacío**

La destilación a vacío es la operación complementaria de destilación del crudo procesado en la unidad de destilación atmosférica, que no se vaporiza y sale por la parte inferior de la columna de destilación atmosférica. El vaporizado de todo el crudo a la presión atmosférica necesitaría elevar la temperatura por encima del umbral de descomposición química y eso, en esta fase del refinado de petróleo, es indeseable.

El residuo atmosférico o crudo reducido procedente del fondo de la columna de destilación atmosférica, se bombea a la unidad de destilación a vacío, se calienta generalmente en un horno a una temperatura inferior a los 400 °C, similar a la temperatura que se alcanza en la fase de destilación atmosférica, y se introduce en la columna de destilación. Esta columna trabaja a vacío, con una presión absoluta de unos 20 mm de Hg, por lo que se vuelve a producir una vaporización de productos por efecto de la disminución de la presión, pudiendo extraerle más productos ligeros sin descomponer su estructura molecular¹¹.

- **Destilación por arrastre de vapor**

Se inyecta vapor de agua recalentado a la mezcla binaria que se quiere separar, sobre todo cuando uno de los componentes se degrada con el vapor. Este vapor reduce la presión parcial de los componentes a destilar con lo que la temperatura de vaporización es menor. El agua no llega a condensar y por lo tanto sale de la columna acompañando al destilado y por lo tanto se requiere una posterior separación del destilado del agua¹¹.

2.5.1.2. Equipos empleados en la destilación

- Columnas de destilación.
- Columnas de platos (contacto por etapas).
- Columnas de relleno.

2.5.2. Adsorción

Es una operación unitaria física regida por la transferencia de materia. Consiste en la eliminación de algún componente de una fase fluida mediante un sólido que lo retiene. El fluido puede ser un líquido o un gas. La adsorción es un fenómeno de superficie. En la superficie del sólido se dan interacciones que hacen que las moléculas del fluido queden retenidas. Si son retenidas mediante un enlace químico fuerte se denomina quimisorción. Si son retenidas mediante una interacción débil se denomina fisisorción. El fenómeno contrario a la adsorción se denomina desorción¹¹.

2.5.3. Extracción

Está basada en la disolución de uno o varios componentes de una mezcla en un disolvente selectivo. La mezcla puede ser líquida o sólida:

2.5.3.1. Tipos de extracción

- **Extracción líquido-líquido**

Se requiere que los dos líquidos que se ponen en contacto sean inmiscibles. Representa una solución ventajosa con relación a la destilación porque permite extraer varias sustancias que tengan un grupo funcional parecido. Para no utilizar la destilación con arrastre de vapor se emplea este método.

- **Extracción sólido-líquido**

También llamada lavado, lixiviación, percolación, o si se trata de un componente no deseado de un sólido se denomina lavado. Lixiviación se emplea cuando se desea extraer un componente valioso. Percolación se emplea para indicar que existe el vertido de un líquido sobre un sólido.

El fundamento de la extracción líquido-líquido requiere que los dos líquidos no sean miscibles, por ello la extracción depende del coeficiente de reparto. Cuando un soluto se disuelve en dos líquidos no miscibles en contacto entre sí, dicho soluto se distribuirá en cada uno de los líquidos en proporción a la solubilidad en cada uno de ellos¹¹.

2.5.3.2. Equipos empleados en la extracción

- Columnas de relleno
- Columnas pulsadas
- Columnas pulsadas horizontales
- Tanques agitadores

2.6. SULFOLANO

El sulfolano (también *tetramethylene sulfona*, ó 2,3,4,5-tetrahidrotiofeno - 1,1-dióxido) es un líquido aceitoso, claro, ligeramente amarillento, comúnmente utilizado en la industria química, mayormente en las refinerías para separar los compuestos aromáticos benceno, tolueno, y xileno, contenidos en las corrientes como resultado del reformado catalítico de nafta virgen, siendo estos productos importantes para la industria petroquímica¹².

Especialmente el sulfolano presenta una alta selectividad por los aromáticos, alta solubilidad con el agua y alto punto de ebullición con respecto a los demás componentes. El sulfolano fue desarrollado originalmente por la empresa Shell Oil Company en 1960 como disolvente para purificar butadieno. Su estructura molecular se observa en la figura 2.11.

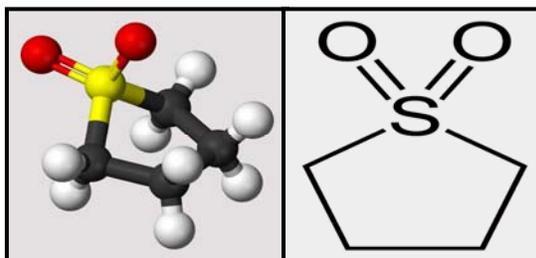


Figura 2.11 Estructura molecular del sulfolano¹².

2.6.1. Propiedades químicas del sulfolano

El sulfolano está clasificado como una sulfona, un grupo de compuestos que contienen un grupo funcional sulfonil. El grupo es un sulfonil azufre átomo doble en régimen de servidumbre a dos átomos de oxígeno. El doble enlace azufre - oxígeno es muy polar, lo que permite su alta solubilidad en agua, mientras que los cuatro enlaces de carbono no polares proporcionan estabilidad.

Estas propiedades le permiten ser miscible en el agua y los hidrocarburos, su uso generalizado es como solvente para purificar mezclas de hidrocarburos¹².

2.6.2. Síntesis

El método original desarrollado por la empresa Shell Oil Company fue permitir la primera reacción butadieno con el dióxido de azufre. Esto produce

sulfolene o 2,5 dihidrotiofeno-1,1-dioxido, que fue hidrogenado utilizando como catalizador níquel Raney para dar sulfolano (figura 2.12).

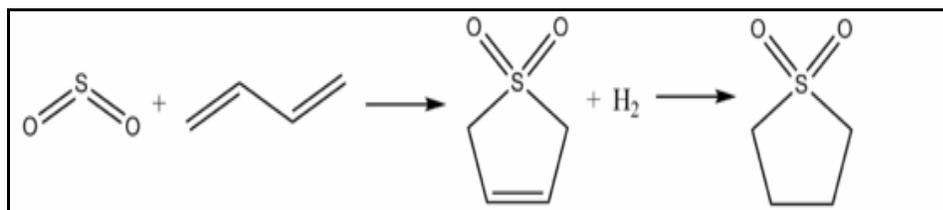


Figura 2.12 Síntesis del sulfolano¹².

Poco después, se descubrió que tanto el producto de rendimiento y la vida útil del catalizador se puede mejorar mediante la adición de peróxido de hidrógeno y, neutralizando a un pH entre 5 y 8 antes de la hidrogenación.

Ha seguido la evolución en los últimos años, incluso en el catalizador utilizado. Recientemente, se constató que Ni-B/MgO mostró una actividad catalítica superior a la de níquel Raney y otros catalizadores comunes que se han utilizado en la hidrogenación del sulfolano¹².

2.6.3. Usos

El sulfolano se utiliza ampliamente como un solvente industrial, especialmente en la extracción de aromáticos de hidrocarburos y para purificar el gas natural.

El primer uso comercial a gran escala del sulfolano, fue en el proceso Sulfinol, aplicado por primera en marzo de 1964.

Poco después del proceso Sulfinol se constato que el sulfolano era mucho más eficaz en la separación de alta pureza de compuestos aromáticos de hidrocarburos. Este proceso todavía se utiliza ampliamente hoy en día en las refinerías y en la

industria petroquímica. El sulfolano es la tecnología de solvente industrial para purificar compuestos aromáticos, que operan en el límite más bajo de disolvente, haciéndolo altamente rentable.

El sulfolano es muy estable y, por consiguiente, puede reutilizarse muchas veces, y finalmente se descomponen en ácidos derivados. Una serie de medidas se han desarrollado para eliminar estos subproductos, permitiendo que el sulfolano sea reutilizado y sea aumentando la vida útil de un suministro dado¹².

2.7. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS

Cualquier proyecto de inversión, se inicia planteándose las siguientes interrogantes: ¿cuál es el monto de recursos requerido para iniciar el proyecto? y ¿cuál será la aplicación de tales recursos financieros?; por lo tanto, se debe determinar, el tipo y monto del flujo inversión que la empresa o inversionista necesita para iniciar las operaciones, y mantener dicha operación durante el tiempo que se tenga previsto, así como para llevar a efecto el proceso de recuperación de la inversión al finalizar el horizonte de planeación. Para recuperar parte de la inversión realizada o bien reemplazar los activos adquiridos, se deberán calcular los costos asociados a la misma, es decir, los gastos de depreciación y amortización (también llamados gastos virtuales), porque derivan del desgaste de los activos fijos y diferidos¹³.

La inversión inicial comprende la adquisición de todos los activos fijos o tangibles y diferidos o intangibles necesarios para iniciar las operaciones de la empresa, con excepción del capital de trabajo.

Se entiende por activo tangible o fijo (que se puede tocar), los bienes propiedad de la empresa, como terrenos, edificios, maquinaria, equipo, mobiliario, vehículos de

transporte, herramientas y otros. Se le llama fijo porque la empresa no puede desprenderse fácilmente de él sin que ello ocasione problemas a sus actividades productivas (a diferencia del activo circulante).

Se entiende por activo intangible o diferido (que no se puede tocar), el conjunto de bienes propiedad de la empresa necesarios para su funcionamiento, y que incluyen: patentes de invención, marcas, diseños comerciales o industriales, nombres comerciales, asistencia técnica o transferencia de tecnología, gastos previos a las operaciones del proyecto, de instalación y puesta en marcha, contratos de servicios (como luz, teléfono, agua, corriente trifásica y servicios notariales), estudios que tiendan a mejorar en el presente o en el futuro el funcionamiento de la empresa, como estudios administrativos o de ingeniería, estudios de evaluación, capacitación de personal dentro y fuera de la empresa, etc. En el caso del costo de equipo y de maquinaria, debe verificarse si éste incluye fletes, instalación y puesta en marcha.

Para efectos de formular y evaluar proyectos de inversión, los activos requeridos se clasifican en tres grandes grupos de inversión: inversión de capital fija, inversión de capital diferida y capital de trabajo; todo esto sumado no es más que la inversión total de capital¹³.

2.7.1. Tipos de estimados de costos

El tipo de estimado para cada fase del proyecto depende del grado de precisión. En la medida que se avanza en el proyecto, se va obteniendo más información y, por ende, se va precisando más el estimado de la inversión.

➤ **Clase V (Orden de Magnitud).** Con un error de precisión por encima de + / - 30 %. Este tipo de estimado es usado en estudios de factibilidad muy preliminares y para la toma de decisiones básicas, haciendo uso de correlaciones capacidad vs costo

y escalación en tiempo de cotizaciones históricas (estadísticas en proyectos parecidos), tamaño y ubicación preliminares.

➤ **Clase IV (Estudio).** Con un error de precisión entre el $+ / - 30 \%$. Aquí se tiene la capacidad definida, listado de equipos mayores y diagrama de bloques básico. Se usan técnicas de prorrateo (reparto proporcional de una cantidad), y se combinan técnicas de estimación del "Orden de Magnitud" con factores específicos del trabajo (localización, productividad, desarrollo del sitio, etc.

➤ **Clase III (Preliminar).** Con un error de precisión entre el $+ / - 20 \%$, se establecen bases para preparación de presupuesto, se tienen bases de diseño completas (ingeniería básica), diagrama de flujo de procesos preliminares y equipos principales definidos.

➤ **Clase II (Definitivo).** Con un error de precisión entre el $+ / - 10 \%$. Aquí se divide la inversión en mayores detalles, la ingeniería de detalle está completada, así como también se disponen de las cotizaciones de equipos mayores, la planimetría y el análisis de riesgos.

➤ **Clase I (Detallado).** Con un error de precisión entre el $+ / - 5 \%$. Este tipo de estimado, es la herramienta para la planificación y control, donde están definidos servicios auxiliares, ofertas firmes de contratistas y vendedores, organigrama para la ejecución del proyecto, cronograma de desembolsos y la estructura civil en planos definitivos.

Definir el capital requerido para poner en marcha un proyecto se presenta como un factor clave ante la decisión de su realización, para cuantificar criterios ante su aceptación o rechazo.

Sin embargo, en las fases de evaluación preliminar de un proyecto, no se dispone como referencia de bases de datos completas y actualizadas: los potenciales proveedores no están dispuestos a proporcionar sus costos, a menos que tengan alguna garantía de que finalmente serán seleccionados; el desarrollo del proceso puede no estar optimizado; los propios costos de llevar a cabo estimaciones precisas resultan elevados, porque entre otras circunstancias requieren un equipo de especialistas y un conocimiento acabado de procesos y equipos involucrados. Estas situaciones se agudizan en las pequeñas y medianas empresas, ya sea por falta de recursos o por su idiosincrasia.

La dinámica que caracteriza la realidad económica obliga a las empresas vinculadas a la fabricación y comercialización de equipamiento industrial a estimar el valor de los equipos de forma rápida y razonablemente precisa, empleando metodologías que les permitan minimizar dos aspectos críticos: tiempo disponible y costo de las estimaciones. Si bien el resultado de una cotización no siempre se traduce en una orden de compra, es necesario elaborar cotizaciones si se pretende la permanencia en el mercado¹³.

2.7.2. Métodos de evaluación económica

Para evaluar la viabilidad de un proyecto de inversión los indicadores más utilizados por los expertos son: valor actual neto, tasa interna de retorno, coeficiente beneficio costo, y periodo de recuperación. Estos indicadores de evaluación permiten dar una medida, más o menos ajustada, de la rentabilidad que se puede obtener con el proyecto de inversión, antes de ponerlo en marcha; también nos permiten realizar comparaciones con otros proyectos similares, y, en su caso, realizar los cambios en el proyecto que se consideren oportunos para hacerlo más rentable¹³.

Entre los métodos básicos, tradicionales, para evaluar decisiones económicas se mencionan los siguientes indicadores:

2.7.2.1. Período de recuperación de la inversión

El período de recuperación de la inversión, es el lapso necesario para que los ingresos cubran los egresos. Es equivalente conceptualmente al punto de equilibrio.

2.7.2.2. Tasa de rendimiento sobre la inversión (Tasa de rendimiento)

Mide el rendimiento medio anual sobre la inversión y su cálculo se hace de la siguiente forma:

$$TR = \frac{\text{Ingreso total/año de vida útil}}{\text{Egreso total del proyecto}} \times 100 \quad (\text{Ec 2.1})$$

2.7.2.3. Costo anual equivalente

Es un método para la evaluación financiera de proyectos que convierte los ingresos y los costos de estos en una suma anual equivalente, descontada a la tasa de retorno requerida. Al comparar dos opciones será más atractiva aquella cuyo costo anual sea menor, o cuyos ingresos sean mayores¹³.

2.7.2.4. Costo anual equivalente y valor de salvamento

El valor de salvamento o de recuperación (L) es el valor real o estimado de un activo al final de los períodos considerados o al final de su vida útil. Al comparar dos opciones será más atractiva aquella cuyo costo anual sea menor, o cuyos ingresos sean mayores, tomando en cuenta el valor de salvamento (L) y las demás consideraciones para el método del costo anual equivalente¹³.

2.7.2.5. Valor presente neto (VPN)

Se puede definir como el valor presente del conjunto de flujos de fondos que derivan de una inversión, descontados a la tasa de retorno requerida de la misma al momento de efectuar el desembolso de la inversión, menos esta inversión inicial, valuada también en ese momento. La regla es aceptar toda inversión cuyo valor

presente neto (VPN) sea mayor que cero, expresado matemáticamente de la siguiente forma:

$$\text{VPN} = \underbrace{\sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+K)^j}}_{\text{Valor Actual Neto}} - F_0 > 0 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

F_j = flujos netos por períodos.

F₀ = inversión inicial.

K = tasa de interés anual.

n = períodos.

2.7.2.6. Relación Beneficio-Costo (B/C)

Es la relación que se obtiene cuando el valor actual de la corriente de beneficios se divide por el valor actual de la corriente de costos. Se aceptan proyectos con una relación mayor que 1.

$$\text{B/C} = \text{Valor Actual Neto} / \text{Inversión} = \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+K)^j} / F_0 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Criterios de aceptación en el análisis costo beneficio:

- Cuando el valor es superior a la unidad, significa que VPN de los ingresos es superior al VPN de los egresos. Es decir que el VPN de todo el proyecto es positivo y en consecuencia el proyecto es positivo.
- Cuando el valor es igual a la unidad, significa que VPN de los ingresos es igual al VPN de los egresos. Es decir que el VPN de todo el proyecto es igual a cero y en

consecuencia el proyecto es indiferente y la tasa de interés utilizada en los cálculos es la TIR (siguiente indicador).

➤ Cuando el valor es inferior a la unidad, significa que VPN de los ingresos es inferior al VPN de los egresos. Es decir que el VPN de todo el proyecto es negativo y en consecuencia el proyecto no es atractivo.

2.7.2.7. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno es un método para la evaluación financiera de proyectos que iguala el valor presente de los flujos de caja esperados con la inversión inicial. La TIR equivale a la tasa de interés producida por un proyecto de inversión con pagos (valores negativos) e ingresos (valores positivos) que ocurren en períodos regulares. También se define como la tasa (TIR), para la cual el valor presente neto es cero, o sea aquella tasa (TIR), a la cual el valor presente de los flujos de caja esperados (ingresos menos egresos) se iguala con la inversión inicial. Matemáticamente se expresa, como la tasa K requerida en la ecuación para que la siguiente expresión sea cero:

$$VPF_i = \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+k)^j} - F_0 = 0 \quad \begin{array}{l} F_0 = \text{Inversión Inicial} \\ F_j = \text{Flujos netos por período} \end{array} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

En otras palabras el TIR "representa la tasa de interés más alta que un inversionista podría pagar sin perder dinero" Una vez que se ha determinado correctamente los flujos de efectivo del negocio o proyecto, se necesita aplicar algún método para relacionar estos flujos y determinar si el negocio o proyecto es rentable y, de ser así, ver qué tan rentable es. El mejor método para evaluar los flujos de efectivo del negocio o proyecto es el del valor presente neto. Sin embargo, puede ser conveniente complementar dicha evaluación con el método de la tasa interna de

rendimiento y con el del tiempo de recuperación ajustado. Todos estos métodos utilizan el concepto del valor del dinero en el tiempo¹².

2.8. MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y DECISIÓN MULTICRITERIO

La búsqueda de la eficiencia, la productividad y la competitividad por parte de las empresas está contribuyendo a la búsqueda de metodologías de apoyo a la toma de decisiones complejas en escenarios de múltiples criterios de selección. Para el tratamiento y el análisis apropiado de este tipo de problemas se han desarrollado, en las últimas décadas, un gran número de métodos de Decisión Multicriterio, todos ellos de gran interés y de importante aplicación en la práctica. Estos métodos persiguen eliminar las conjeturas improvisadas, el pensamiento no explicado, injustificado e intuitivo que en ocasiones acompaña a la mayoría de las decisiones que se toman con respecto a problemas complejos. Son utilizados en el campo de la economía, la política, las finanzas, la gestión medioambiental, la ingeniería civil, para ayudar al decisor a elegir una buena opción ante situaciones complejas. Estos procedimientos permiten considerar tanto criterios cuantitativos monetarios y cuantitativos no monetarios como criterios cualitativos¹².

En la Decisión Multicriterio un elemento clasificador es el número de alternativas a tener en cuenta en la decisión, que puede ser finito o infinito. Dependiendo de esta situación existen diferentes métodos. Cuando el número de alternativas tiene un número infinito de valores posibles del problema se llama Decisión Multiobjetivo. Por el contrario cuando el número de alternativas es finito se denominan Decisión Multicriterio Discreta.

Estos problemas son más comunes en la realidad y se utilizan para realizar una evaluación y decisión respecto a problemas que por naturaleza o diseño, admiten un número finito de alternativas de solución a través de:

- Una familia de criterios de evaluación (atributos, objetivos) que permiten evaluar cada una de las alternativas (analizar sus consecuencias), conforme a los pesos o ponderaciones asignadas por el agente decisor y que reflejan la importancia preferida relativa de cada criterio.
- Un conjunto de alternativas estables, generalmente finito (soluciones factibles que cumplen con las restricciones posibles o previsibles), se asumen que cada una de ellas es perfectamente identificada, aunque no son necesariamente conocidas en forma exacta y completa todas sus consecuencias de forma cuantitativa y cualitativa.
- Una matriz de decisión o de impactos que resume la evaluación de cada alternativa conforme a cada criterio, una valoración (precisa o subjetiva) de cada una de las soluciones a la luz de cada uno de los criterios, la escala de medida de las evaluaciones puede ser cuantitativa o cualitativa, y los medios pueden expresarse en escala cardinal (razón o intervalo), ordinal, nominal y probabilísticas.
- Una metodología o modelo de agregación de preferencias en una síntesis global, ordenación, clasificación, participación, jerarquización de dichos juicios para determinar la solución que globalmente recibe las mejores evaluaciones.
- Un proceso de toma de decisiones (contexto de análisis) en el cual se lleva a cabo una negociación consensual entre los actores o interesados (analista experto, decisor y usuario).

Los métodos de evaluación y decisión multicriterios discretos son: ponderación lineal (scoring), utilidad multiatributo (MAUT), relaciones de superación y análisis jerárquico (AHP) "Analytic Hierarchy Process" o Proceso Analítico Jerárquico), precisamente este último será aplicado en el presente trabajo.

2.8.1. Proceso de análisis jerárquico

El proceso de análisis jerárquico o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) es una herramienta de soporte en los procesos de toma de decisiones de tipo multicriterio discreto, que se basa en la construcción de un modelo de jerarquías, el cual permite organizar la información de un problema complejo de forma gráfica y eficiente, de modo tal que se pueda descomponer y analizar por partes.

El método AHP fue desarrollado por el Doctor en Ciencias Matemáticas Thomas Saaty a fines de la década de los ochenta, para resolver el tratado de reducción de armamento estratégico entre Estados Unidos y la Unión Soviética. Según el creador de éste método: "El AHP desmenuza un problema en subproblemas y luego une todas las soluciones de estos en una conclusión". El propósito del método es el de permitir que el decisor pueda estructurar un problema multicriterio de forma visual, mediante la construcción de un modelo jerárquico, que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas. Una vez construido el modelo jerárquico, se realizan las comparaciones por pares entre dichos elementos (criterios, sub-criterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por los decisores, entregando una síntesis de las mismas mediante la agregación de esos juicios parciales. El fundamento del proceso de Saaty descansa en el hecho que permite dar valores numéricos a los juicios dados por los decisores, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende, llegando a obtener una síntesis como resultado final, que da una noción al decisor de la alternativa que debería de elegir, como también un análisis de la sensibilidad de los datos, para prever una posible variación en los juicios dados por los decisores¹².

2.8.1.1 Pasos para la construcción del modelo jerárquico

a) Definición del problema

Es la detección del motivo principal por el cual se quiere tomar una decisión, que va a ser solucionada con el AHP y que por consiguiente mejorará el proceso que esté relacionado con ello.

b) Formulación del objetivo

Es la acción primordial que va a tomar el decisor en base al problema presentado, para que mejore el funcionamiento de un proceso y/o situación presentada. Para cumplir el objetivo del decisor, el AHP trabaja con criterios que le van a permitir evaluar las alternativas existentes.

c) Identificación de criterios

Es la detección de las características genéricas más relevantes de las alternativas existentes. Los criterios influyen de manera directa sobre el objetivo, por ende el decisor o grupo decisor tiene que concertar bien que criterios son los más importantes, exceptuando aquellos que sean importantes pero a la vez sean complejos por su definición y medición.

Existen criterios de tipos cualitativos y cuantitativos; los criterios cualitativos están relacionados con las preferencias, experiencias y demás características genéricas de las alternativas, mientras que los criterios cuantitativos están relacionados con los datos históricos, puntuaciones y demás información numérica que posean en común las alternativas.

d) Identificación de alternativas

Es la detección de las opciones que tiene el decisor para cumplir su objetivo, las cuales deben de pertenecer a un mismo rubro, para poder considerar características en común.

e) Árbol de jerarquías

Es un tipo de grafico, que permite tener una visión panorámica del modelo jerárquico, es decir, poder apreciar la meta global u objetivo, criterios, sub criterios en caso que existan, y alternativas.

2.8.1.2 Evaluación del modelo jerárquico

Una vez construida la estructura jerárquica del problema se da paso a la segunda etapa del proceso de AHP: la valoración de los elementos. El decisor debe emitir sus juicios de valor o preferencias en cada uno de los niveles jerárquicos establecidos. Esta tarea consiste en una comparación de valores subjetivos "por parejas" (comparaciones binarias); es decir, el decisor tiene que emitir juicios de valor sobre la importancia relativa de los criterios y de las alternativas, de forma que quede reflejado la dominación relativa, en términos de importancia, preferencia o probabilidad, de un elemento frente a otro, respecto de un atributo, o bien, si se está en el último nivel de la jerarquía, de una propiedad o cualidad común.

El AHP permite realizar las comparaciones binarias basándose tanto en factores cuantitativos (aspectos tangibles) como cualitativos (aspectos no tangibles), ya que presenta su propia escala de medida: mediante la escala 1-9 propuesta por Saaty (tabla 2.1.). El decisor puede expresar sus preferencias entre dos elementos verbalmente y representar estas preferencias descriptivas mediante valores numéricos. De esta forma cuando dos elementos sean igualmente preferidos o importantes el decisor asignará al par de elementos un 1; moderadamente preferido se representa por

3, fuertemente preferido por 5 y extremadamente preferido por 9. Los números pares (2, 4, 6 y 8) se utilizan para expresar situaciones intermedias. La escala verbal utilizada en el AHP permite al decisor incorporar subjetividad, experiencia y conocimiento en un camino intuitivo y natural. Esta escala está justificada teóricamente y su efectividad ha sido validada empíricamente aplicándola a diferentes situaciones reales con aspectos tangibles para los que se ha comportado adecuadamente.

Tabla 2.1. Escala de medidas de Saaty¹²

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad y criterio
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro
5	Fuertemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en practica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud
2,4,6,8	Medianamente más importante que otro	Se utiliza para expresar situaciones intermedias

El resultado de estas comparaciones es una matriz cuadrada, recíproca y positiva, denominada "matriz de comparaciones pareadas", de forma que cada uno de sus componentes reflejen la intensidad de preferencia de un elemento frente a otro respecto del atributo considerado.

Es interesante observar que para aplicar el método AHP no hace falta información cuantitativa sobre los resultados que alcanza cada alternativa según cada uno de los criterios considerados, sino tan solo los juicios de valor del decisor. Una vez formadas las matrices de comparación, el proceso deriva hacia la tercera etapa, la fase de priorización y síntesis.

El objetivo de esta etapa es calcular la prioridad de cada elemento, entendida esta prioridad tal y como la define Saaty: «Las prioridades son rangos numéricos medidos en una escala de razón. Una escala de razón es un conjunto de números positivos cuyas relaciones se mantienen igual si se multiplican todos los números por un número arbitrario positivo. El objeto de la evaluación es emitir juicios concernientes a la importancia relativa de los elementos de la jerarquía para crear escalas de prioridad de influencia». En un problema jerarquizado se pueden definir distintos tipos de prioridades: locales, globales y totales.

Las prioridades locales son las que se calculan directamente a partir de la información recogida en las matrices de comparación. Existen distintos procedimientos matemáticos para calcular un vector de pesos relativos asociado a un nivel, vector que debe expresar la importancia relativa de los elementos considerados en ese nivel. El procedimiento propuesto por Saaty para su obtención es el método del autovector principal por la derecha. Las prioridades globales son las prioridades de cada nodo de la jerarquía respecto al nodo inicial (objetivo). El AHP las calcula utilizando el principio de composición jerárquica. Por último, la prioridad total de las

alternativas comparadas se obtiene mediante la agregación de las prioridades globales (forma lineal multiaditiva).

La prioridad total permitirá realizar la síntesis del problema, esto es, ordenar el conjunto de alternativas consideradas y seleccionar las más indicadas para conseguir el objetivo propuesto. Un aspecto que se debe cuidar es que el resultado debe ser consistente con las preferencias manifestadas por el decisor, ya que ésta es una cuestión que afecta directamente a la calidad de la decisión final. El AHP permite evaluar la consistencia del decisor a la hora de introducir los juicios de valor en la matriz de comparaciones pareadas mediante el indicador razón de consistencia de Saaty.

La última etapa de este proceso es el denominado análisis de sensibilidad, el resultado al que se llega en la etapa anterior es altamente dependiente de la jerarquía establecida por el decisor y por los juicios de valor que realiza sobre los diversos elementos del problema; cambios en la jerarquía sobre estos juicios pueden conducir a cambios en los resultados¹².

2.8.1.3. Matriz de comparación por pares

Esta matriz posee las siguientes características:

- Sea A una matriz, de dimensiones $n \times n$ (" n " filas y " n " columnas), es decir, una matriz cuadrada.
- Sea a_{ij} un elemento de la matriz A (donde $i = 1, 2, 3, \dots, n$ y $j = 1, 2, 3, \dots, n$); que representa la preferencia de un criterio y/o alternativa " i " (fila) sobre otro criterio y/o alternativa " j " (columna).
- Cuando $i = j$, el valor de $a_{ij} = 1$, debido a que se están comparando dos criterios y/o alternativas iguales.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

El producto de $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$, lo cual está sustentado en los siguientes axiomas:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Axioma N° 1: referente a la condición de juicios recíprocos; la intensidad de preferencia de a_i/a_j es inversa a la preferencia de a_j/a_i .

Axioma N° 2: referente a la condición de homogeneidad de los elementos; los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud.

Axioma N° 3: referente a la condición de estructura jerárquica o estructura dependiente de reaprovechamiento; dependencia en los elementos de dos niveles consecutivos en la jerarquía y dentro de un mismo nivel.

Axioma N° 4: referente a la condición de expectativas de orden de rango; las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas. Una vez obtenidas las matrices de comparación por pares, se procede a

calcular las prioridades de cada criterio y/o alternativa comparada. El proceso matemático de calcular las prioridades es llamada síntesis, el cual implica el cálculo de valores y vectores característicos.

La manera de sintetizar juicios es la siguiente:

- Primero se suman todos los valores en cada columna de la matriz de comparación por pares.
- Luego se divide cada valor de la matriz entre la sumatoria resultante obtenida en cada columna correspondiente a dicho valor. El resultado de esta división produce la llamada matriz de comparación por pares normalizada.
- Por último, se calcula el promedio aritmético con los valores presentes de cada fila de la matriz normalizada. De esa manera se obtiene una matriz con las prioridades de cada criterio y/o alternativa.

2.8.1.4 Matriz de prioridades

Es una matriz que expresa las prioridades de cada criterio en función a la meta global.

$$\begin{array}{c}
 \text{Meta} \\
 \text{Global} \\
 \text{Criterio 1} \\
 \text{Criterio 2} \\
 \dots \\
 \text{Criterio } m
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 P'_1 \\
 P'_2 \\
 \dots \\
 P'_m
 \end{pmatrix}$$

Donde:

m : número de criterios.

P'_m : prioridad del criterio "i" respecto a la meta global.

$i = 1, 2, 3, \dots, m$ criterios.

La matriz de prioridades también expresa las prioridades de cada alternativa, en función a cada criterio.

$$\begin{array}{c}
 \text{Criterio 1} \quad \text{Criterio 2} \quad \dots \quad \text{Criterio } m \\
 \left. \begin{array}{l}
 \text{Alternativa 1} \\
 \text{Alternativa 2} \\
 \dots \\
 \text{Alternativa } n
 \end{array} \right\} \begin{pmatrix}
 P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\
 P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm}
 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Donde:

P_{ij} : prioridad de la alternativa "i", respecto al criterio "j".

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ alternativas y $j = 1, 2, 3, \dots, m$ criterios.

Ya obtenidas las matrices de prioridad de los criterios respecto a la meta global y de las alternativas respecto a los criterios, se procede a calcular la matriz de prioridad global:

$$\begin{pmatrix}
 P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\
 P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm}
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 P'_1 \\
 P'_2 \\
 \dots \\
 P'_m
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 P_{g1} \\
 P_{g2} \\
 \dots \\
 P_{gn}
 \end{pmatrix}$$

Donde:

P_{gn} : prioridad global respecto a la meta global de la alternativa i . (" $i=1,2,3,\dots,n$ alternativas).

Para darle confiabilidad a los resultados brindados por la síntesis, se debe proceder a verificar la consistencia de las matrices de comparación por pares.

2.8.1.5 Consistencia de una matriz

La consistencia de una matriz de comparación por pares expresa el correcto juicio del decisor al momento de construir la matriz, ya que en el caso de que la matriz resulte inconsistente, el decisor deberá de replantear sus juicios.

Matemáticamente, una matriz $A_{n \times n}$ es consistente si $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ (" $i, j, k = 1,2,3, \dots, n$ "); lo cual es indispensable para que la matriz sea linealmente dependiente.

En el caso general, se conoce que si la matriz $A_{n \times n}$ es consistente, entonces genera una matriz $N_{n \times n}$ la cual está normalizada (conmuta con su traspuesta) de elementos w_j (" $j = 1,2,3, \dots, n$ ") de modo tal que todas las columnas son idénticas.

$$N = \begin{pmatrix} w_1 & w_1 & \dots & w_1 \\ w_2 & w_2 & \dots & w_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n & w_n & \dots & w_n \end{pmatrix}$$

Ahora, se puede determinar la matriz A en función de N , de la siguiente manera:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_h \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_h \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_h/w_1 & w_h/w_2 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Dividiendo los elementos de la columna i entre w_j .

En base a lo dicho anteriormente, A se desglosa:

$$\begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_h \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_h \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_h/w_1 & w_h/w_2 & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ \vdots \\ nw_h \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_h \end{pmatrix}$$

Es decir:

$$AW = nW \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde W es el vector columna de pesos relativos w_j que se aproxima con los n elementos de las filas en la matriz normalizada N .

Haciendo el estimado W calculado, se puede notar que:

$$AW = n_{\max} W \quad (\text{Ec.2.6})$$

Donde $n_{\max} \geq n$, es decir, mientras más próximo este de n_{\max} a n , la matriz de comparación por pares A , será más consistente.

Como resultado, el AHP calcula la razón de consistencia (RC), que se expresa como el cociente entre índice de consistencia de la matriz A y el índice de consistencia aleatorio (RI).

$$RC=IC/RI \quad (\text{Ec.2.7})$$

Donde IC es el índice de consistencia de la matriz A, calculándose de la siguiente manera:

$$IC=(n_{\max}-n)/(n-1) \quad (\text{Ec.2.8})$$

El valor de n_{\max} se calcula de $A \times W = n_{\max} \times W$, notando que la i -ésima ecuación es:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \bar{w}_j = n_{\max} \bar{w}_i \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Dado que:

$$\sum_{i=1}^n \bar{w}_i = 1 \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Entonces se obtiene:

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \bar{w}_j \right) = n_{\max} \sum_{i=1}^n \bar{w}_i \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Es decir, el valor de n_{\max} se determina al calcular primero el vector columna de la matriz A y luego sumando sus elementos.

El índice de consistencia aleatoria (RI) es el índice de consistencia de una matriz de comparación por pares, generada de forma aleatoria como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.2. Índice de consistencia aleatoria¹³

N° de elementos comparados	Índice Aleatorio
3	0,58
4	0,89
5	1,11
6	1,24
7	1,32
8	1,40
9	1,45
10	1,49

Algunos autores sugieren el uso de la siguiente fórmula para la estimación del RI:

$$IA = 1,98 (n-2)/n \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Una vez obtenidos el índice de consistencia y el índice de consistencia aleatorio, ya se puede determinar la consistencia de una matriz, mediante el cálculo de la razón de consistencia (RC). Si la razón de consistencia resulta menor o igual a 0,10, entonces la matriz de comparación por pares es consistente. Si la razón de

consistencia resulta estrictamente mayor que 0,10; entonces la matriz de comparación por pares es inconsistente, lo que llama a la reflexión del decisor, para que replantee sus juicios en base a las comparaciones de los criterios y/o alternativas que había hecho.

Un caso excepcional se da cuando la matriz de comparación por pares es de 2x2, ya que al momento de calcular la razón de consistencia, resulta un valor indeterminado (en la mayoría de textos relacionados con este tema, indican que cuando el número de elementos comparados es igual a 2, el RI =0, por consiguiente la RC resulta indeterminada). Entonces para solucionar este problema, sólo en este caso, la consistencia de la matriz se basa en la dependencia lineal, por lo que resulta que toda matriz de comparación por pares de 2x2 es consistente¹³.

2.9. PROGRAMAS DE SIMULACION

Los programas de simulación son una herramienta de gran utilidad para los ingenieros de las industrias petroleras, químicas y de gas natural. A través de ellos se pueden simular procesos ya existentes o en diseño, con la finalidad de pronosticar el comportamiento de los sistemas al variar ciertos factores o variables del mismo.

Estos modelos están basados en ecuaciones teóricas y/o semiempíricas desarrolladas, que en la mayoría de los casos resultan demasiado tediosas de resolver manualmente, por lo cual se usan programas de simulación, los cuales ya contienen las ecuaciones generalmente más aceptadas para la representación de procesos, pudiendo así agilizar su solución y proporcionar cierto nivel de detalle, de acuerdo al objetivo del trabajo.

En general, la simulación de un proceso mediante un modelo matemático con cierta exactitud de respuesta ofrece las siguientes ventajas¹⁴:

- **Experimentación de bajo costo.** Es posible estudiar procesos existentes de una forma más rápida, económica y completa que en la planta real.
- **Extrapolación.** Con un modelo matemático adecuado se puede realizar ensayos en los intervalos extremos de las condiciones de operación, lo cual no puede ser práctico o ni siquiera posible en la planta real.
- **Evaluación de planes alternos.** La simulación permite comparar con rapidez y minuciosidad distintos procesos, modificaciones o diseños que se desean poner en operación. Permite también ensayar hipótesis sobre sistemas o procesos antes de llevarlos a la práctica. Esto da como resultado que se puedan tomar en consideración un mayor número de alternativas de procesos y obtener así diseños de mejor calidad y menor costo.
- **Estudio de sensibilidad:** Se pueden analizar la sensibilidad de los parámetros básicos del sistema según un porcentaje de variación ($\pm 10\%$), que no tiene efecto importante en el funcionamiento del sistema.

CAPITULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para alcanzar los objetivos establecidos en esta investigación se recopiló la información teórica realizando la revisión de manuales, informes técnicos, tesis, entre otros documentos relacionados con el tema, debido a esto se puede decir que esta investigación fue de tipo documental.

Además, se tomaron datos directamente de la planta de deshidratación de la EPJ-2, observados en la sala de control SCADA, así como también en cada uno de los equipos presentes en la planta (deshidratadores, bombas y tanques), catalogando esta investigación de campo.

Aunado a esto la investigación se considera de tipo descriptiva, porque se describen las características y condiciones del proceso de la estación y de cada uno de los equipos presentes en la misma. Así como también, de tipo explicativa debido a que se analizaron las condiciones del proceso para justificar el comportamiento y el problema presentado en el mismo.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

La elaboración de este proyecto se realizó en el área de la Estación Principal Jusepín-2 (EPJ-2), la cual se encuentra ubicada a 40 km de la ciudad de Maturín, específicamente se centró en los tanques de asentamiento dinámico 55004 y 55005 de la planta de deshidratación de crudo.

3.3. TÉCNICAS UTILIZADAS

- a) **Revisión documental.** Esta técnica permitió recabar la información referente a conceptos básicos que se necesitaban conocer del proceso de deshidratación de crudo en la EPJ-2, a fin de dominar la base que lo fundamentan y los factores que afectan la eficiencia del mismo, así como también las bases teóricas del sulfolano, para conocer sus beneficios, usos actuales y posibles alcances.

- b) **Observación directa mediante visitas de campo.** Esta técnica se utilizó para conocer el estado en que se encontraban los equipos presentes en la planta donde se llevó a cabo el estudio, a fin de conocer las características y condiciones a las que operan cada uno de los mismos, además de comprender y dominar el proceso en su totalidad.

- c) **Entrevistas no estructuradas.** Se empleó para adquirir información mediante entrevistas informales realizadas a personas que posean conocimientos relacionados con el tema y al personal que opera en la estación, con el fin de conocer detalladamente las condiciones de operación, los inconvenientes que se presentan en el campo y/o las deficiencias que puede tener el proceso.

3.4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

En esta etapa se describe de manera detallada y minuciosa los pasos a seguir para el cumplimiento y desarrollo de cada uno de los objetivos planteados, con la finalidad de lograr el objetivo general, los cuales se describen a continuación:

3.4.1. Recopilación de información de las características operacionales actuales del proceso de deshidratación en la Estación Principal Jusepín-2

Para lograr este objetivo se realizaron visitas guiadas a la planta de deshidratación junto al personal que opera en la misma, a quienes se les hizo una serie de entrevistas no estructuradas para conocer el funcionamiento de las instalaciones, y las condiciones operacionales de cada uno de los equipos que la componen, logrando así conocer las características operacionales actuales como lo son temperatura, presión, flujo, capacidad (figura 3.1). Además, se revisaron manuales técnicos como el Manual de Manejo y Procesamiento de Fluidos EPJ-2, tesis relacionadas con el tema, y las curvas del Portafolio de Oportunidades 2008-2027 (PDO) para conocer la producción de agua y de crudo estimado para este período y calcular el porcentaje de agua y sedimentos.



Figura 3.1. Imágenes de las visitas e inspección visual de los equipos en la EPJ-2.

Por otra parte se pudo observar directamente en las pantallas de la sala de control SCADA (Sistema de Control de Adquisición de Datos), el diagrama del proceso general de deshidratación y de las variables (presión, temperatura, nivel de

interfase y flujo), de los equipos de la planta como lo son los deshidratadores, los tanques y las bombas, como se muestra en la figura 3.2.

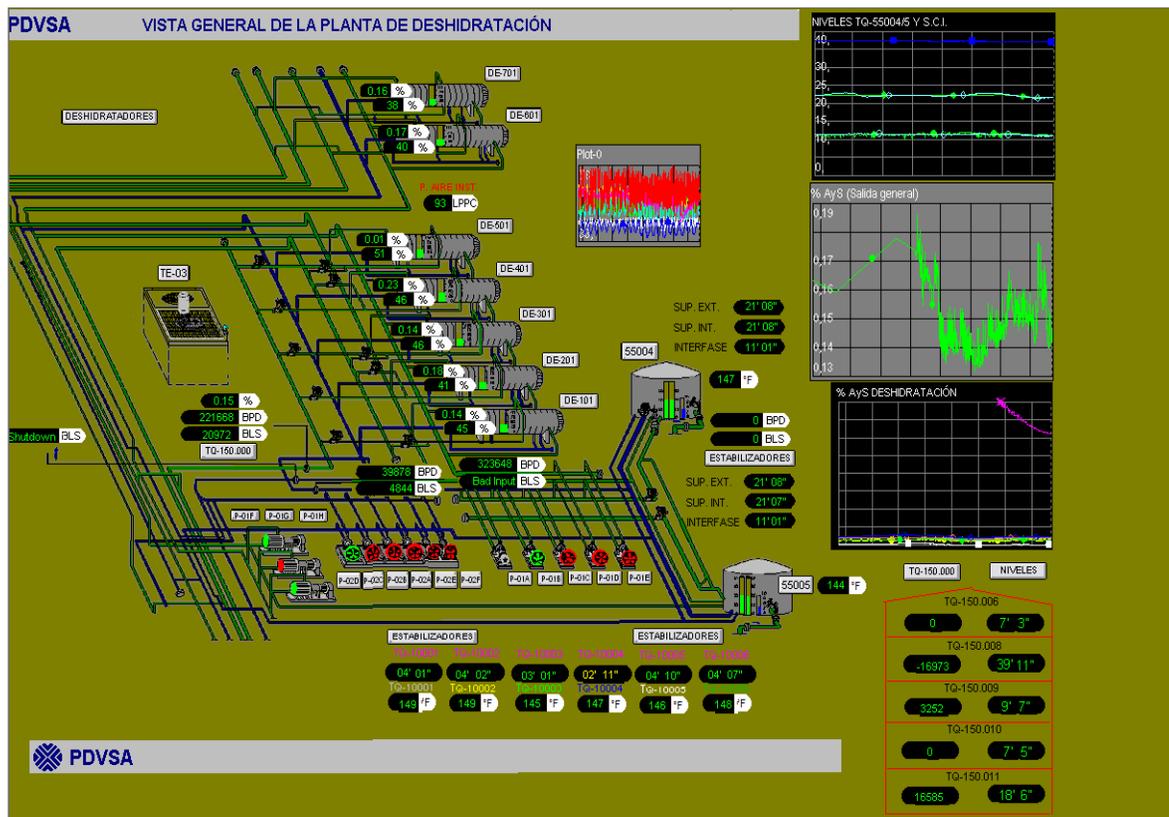


Figura 3.2 Vista general de la planta de deshidratación de crudo de la Estación Principal Jusepin-2 (EPJ-2).

Por último se consultó la casa comercial que provee el producto químico aplicado para el rompimiento de las emulsiones para conocer las propiedades físico-químicas (Apéndice A) y la dosificación aplicada. Para calcular el costo de desemulsionante que se utiliza en un año (365 días), tomando en cuenta que el litro de desemulsionante cuesta actualmente 10,58 Bs.F y que se utilizan diariamente un aproximado de 490 galones cuya conversión a litros es 3,75 se aplico la siguiente ecuación:

$$CDA = CD \times 3,75 \times GD \times 365 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

CDA: costo de producto desemulsionante anual.

CD: costo de 1 litro de desemulsionante.

GD: galones de desemulsionante inyectados diariamente.

Sustituyendo los valores antes mencionados en la ecuación 3.1 se obtuvo el siguiente resultado

$$\text{Costo de producto anual} = 0,58 \text{ Bs.F/litros} \times \frac{3,75 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} \times \frac{490 \text{ galones/día}}{1} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

$$\text{Costo de producto desemulsionante anual} = 7.095.873,75 \text{ Bs.F/año}$$

3.4.2. Realización de los diagramas de proceso para la regeneración de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico

Una vez conocidas las condiciones a las que opera la planta de deshidratación y el funcionamiento de la misma, se realizaron dos diagramas de proceso a partir de los tanques de lavado, siguiendo la nomenclatura que representa cada uno de los equipos establecidos.

Para ello, se tomaron en cuenta conocimientos previos de diseño de planta, diseño de equipos, y operaciones unitarias, además de buscar información en tesis relacionadas con el tema.

Los dos diagramas de proceso propuestos para regenerar el sulfolano fueron los siguientes:

- **Opción 1:** destilación al vacío.
- **Opción 2:** destilación flash.

Opción 1: destilación al vacío

Esta opción contempla una torre de destilación al vacío como unidad para la separación agua- sulfolano, un intercambiador de calor, un condensador, cuatro bombas de agua y un tanque de almacenamiento, además de válvulas y líneas de flujo correspondientes (figura3.3). Cuando el sulfolano se encuentre saturado a un 60% de agua es enviado a la torre, donde es separada la fase vapor y líquida que se obtuvo una vez que se elevó la temperatura del agua en el intercambiador de calor, por el tope del separador sale el vapor de agua, que es enviado a un condensador para obtener nuevamente agua líquida que será enviada a la planta SAEN y el sulfolano presente en esa corriente es enviado nuevamente a la torre, a su vez por el fondo de la torre sale el sulfolano líquido y libre de agua que es bombeado a un tanque donde se almacenará hasta que comience nuevamente el ciclo de deshidratación del sulfolano que se encuentre en el tanque de asentamiento dinámico (tanque de lavado).

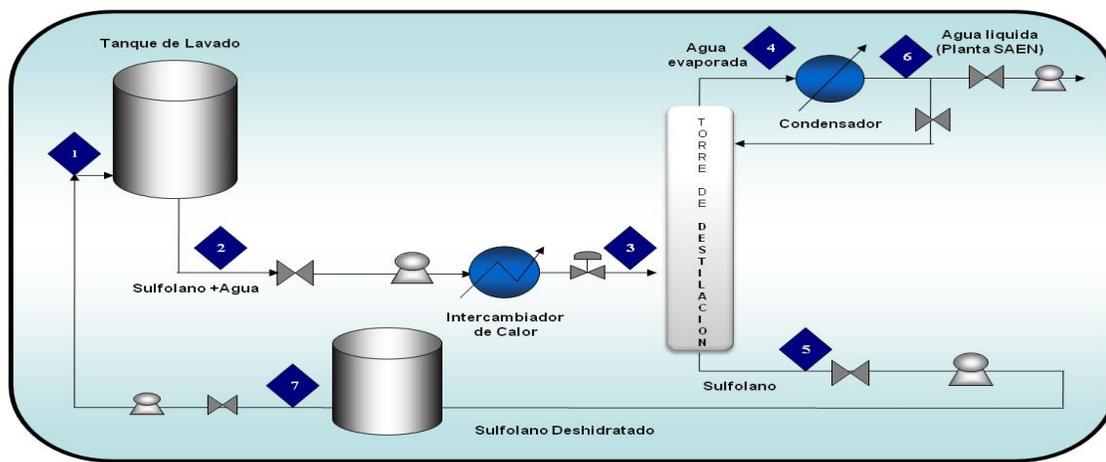


Figura 3.3. Diagrama de proceso propuesto para la deshidratación de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico de la EPJ-2, mediante la destilación al vacío.

Opción 2: destilación flash

Esta propuesta consiste en un proceso para regenerar el sulfolano que sale del tanque de lavado y se encuentra haciendo el papel del agua de lavado, para que una vez que esté en contacto con el crudo absorba el agua asociada al mismo ya sea en forma libre o emulsionada y al saturarse hasta un 60 % (porcentaje al cual deja de ser eficiente), sea bombeado a un intercambiador de calor donde se eleva la temperatura de la mezcla y el agua cambia de fase líquida a vapor por alcanzar su punto de ebullición, posteriormente es enviada junto con el sulfolano al equipo de destilación, en el cual por diferencia de puntos de ebullición y volatilidades son separados, el más volátil (agua) ascenderá y el menos volátil (sulfolano) descenderá por la torre.

El sulfolano que desciende por el fondo de la torre es bombeado a un tanque de almacenamiento donde se mantendrá hasta que el sulfolano que se encuentra en el tanque de asentamiento se sature nuevamente hasta el nivel en que deja de ser eficiente para volver a regenerarse, y así el sulfolano deshidratado en el tanque se pueda introducir en el tanque de asentamiento dinámico para comenzar nuevamente el ciclo de la deshidratación, como se muestra en la figura 3.4.

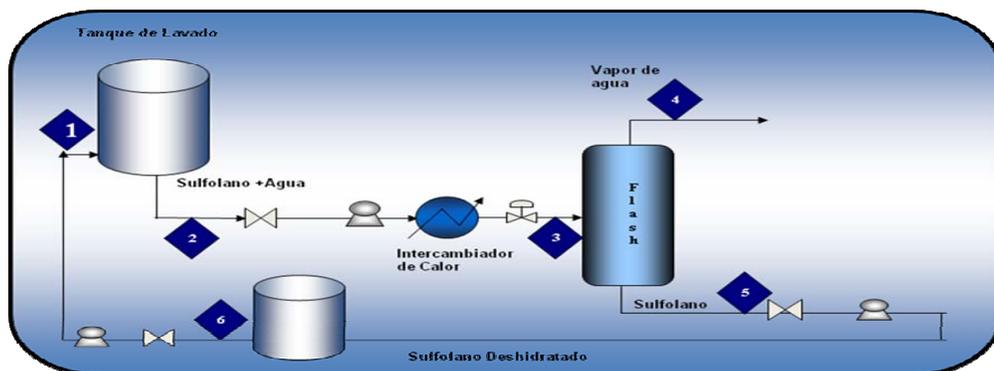


Figura 3.4 Diagrama de proceso propuesto para la deshidratación de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico de la EPJ-2 mediante la destilación flash.

3.4.3. Evaluación técnica de los esquemas de regeneración de sulfolano propuestos

Para el cumplimiento de este objetivo y con el fin de lograr una selección del mejor proceso para la separación agua-sulfolano se realizó la evaluación técnica por medio del proceso de Análisis Jerárquico o método AHP (*Analytic Hierarch Process*), para conocer cual de los dos procesos propuestos para la regeneración del sulfolano es técnicamente más factible, llevando a cabo la siguiente metodología:

1) En primer lugar se definió el problema, el cual es “los altos costos asociados a la química desemulsionante utilizada actualmente en la EPJ-2 para el rompimiento de emulsiones en el crudo”.

2) Luego se formuló el objetivo que se quería alcanzar con la evaluación, que es “conocer cuál de los dos procesos planteados en los sistemas para la regeneración de sulfolano es técnicamente más factible”.

3) Se establecieron los parámetros a evaluar para cada una de las opciones, los cuales fueron cuatro parámetros o criterios relacionados directamente con el objetivo que se quiere alcanzar, los cuales son: costos, desempeño, facilidad de instalación, impacto ambiental.

4) Se establecieron los subcriterios a evaluar para cada una de las opciones, los cuales se encuentran íntimamente vinculados a los mismos y son de suma importancia para evaluarlos de manera detallada, (figura 3.5) excepto el criterio impacto ambiental el cual se vinculo directamente a las opciones establecidas.

5) Se establecieron las posibles opciones para la solución del problema, la primera opción consta de una torre de destilación al vacío y la segunda de un equipo de separación flash como se muestra en la figura 3.5.

6) Por último, se creó el árbol de jerarquías una vez identificados cada uno de los parámetros anteriores (figura 3.5), donde se establecen los niveles de la evaluación técnica, para posteriormente construir las matrices de comparación por pares para cada nivel.

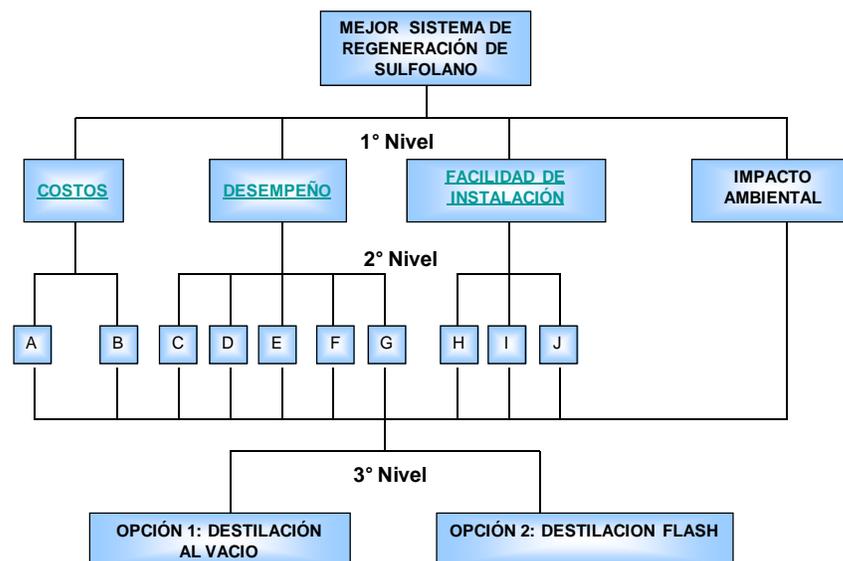


Figura 3.5 Árbol jerárquico para el proceso de regeneración de sulfolano.

A continuación se describen los subcriterios de cada nivel del árbol jerárquico:

A: Costos fijos

Son aquellos costos que no sufren alteración alguna, son constantes, aún cuando se presentan grandes fluctuaciones en el volumen de producción, entre los cuales se tienen: energía necesaria para el funcionamiento de los equipos, materia prima, mano de obra, entre otros¹⁵.

B: Costos variables

Son aquellos costos que no son constantes en función del tiempo, es decir no van a ser fijos pueden variar fácilmente, como el costo por mantenimiento¹⁵.

C: Mantenimiento preventivo

Este subcriterio engloba todas las actividades programadas de inspecciones, tanto de funcionamiento como de seguridad, ajustes, reparaciones, análisis, limpieza, lubricación, calibración, que deben llevarse a cabo en forma periódica en base a un plan establecido. El propósito es prever averías o desperfectos en su estado inicial y corregirlas para mantener la instalación en completa operación a los niveles y eficiencia óptimos. El mantenimiento preventivo permite detectar fallos repetitivos, disminuir los puntos muertos por paradas, aumentar la vida útil de equipos, disminuir costos de reparaciones, detectar puntos débiles en la instalación, entre una larga lista de ventajas¹⁶.

D: Mantenimiento correctivo

Este subparámetro está referido a la reparación una vez se ha producido una falla o el paro súbito de la máquina o equipo. Dentro de este tipo de mantenimiento se contemplan dos tipos de enfoques: el no planificado donde se debe actuar lo más rápido posible con el objetivo de evitar costos y daños materiales y/o humanos mayores, y el planificado donde se sabe con anticipación qué es lo que debe hacerse, de modo que cuando se pare el equipo para efectuar la reparación se disponga del personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente¹⁶.

E: Otras problemáticas

Aquí se toman en cuenta cualquier otro inconveniente o problema que afecte el buen desempeño de los equipos como averías en las tuberías, válvulas, problemas de corrosión etc.

F: Cambios en variables

Estos cambios corresponden a las variaciones que pueden existir en el proceso en cuanto a temperatura, volumen, flujo entre otras las cuales afecten las condiciones de operación.

G: Seguridad

Desde el punto de vista operacional, en este parámetro se consideran los posibles riesgos operacionales que pueda presentar el equipo, respondiendo una pregunta clave ¿es seguro o no de operar?

H: Sistema eléctrico y mecánico

Este subcriterio abarca la facilidad de instalar el sistema eléctrico y mecánico que engloba el proceso como lo son: las líneas de transporte de energía eléctrica, los medidores de nivel o sensores, el montaje de equipos dinámicos, como bombas, entre otros.

I: Facilidad de construcción

Este parámetro considera las facilidades de acceso, y constructibilidad de las nuevas instalaciones propuestas en las que se tienen instaladas actualmente.

J: Ubicación

Aquí se evalúa la disposición y los requerimientos del espacio físico necesario para la instalación del proceso o sistema.

Luego de definir el problema, el objetivo, los parámetros y subparámetro a evaluar y realizar el árbol jerárquico para la evaluación técnica de los procesos propuestos, se procedió a construir las matrices para evaluar cada uno de los parámetros según la metodología descrita en el capítulo 2, utilizando la ponderación que se muestra en la tabla 2.1. Estas matrices se ponderaron según lo discutido en mesas de trabajos y tormentas de ideas realizadas con el apoyo de un equipo

multidisciplinario, además para constatar la veracidad o buen juicio de la ponderación dada, se calculó el índice de consistencia para conocer si las mismas tenían un valor lógico.

En primer lugar se construyó una matriz de comparación entre los criterios del primer nivel del árbol jerárquico (costos, desempeño, facilidad de instalación e impacto ambiental) como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Matriz de comparación por pares del primer nivel.

Mejor Equipo	Costos	Desempeño	Facilidad de instalación	Impacto ambiental
Costos	1	1/3	3	1/3
Desempeño	3	1	7	1
Facilidad de instalación	1/3	1/7	1	1/5
Impacto ambiental	3	1	5	1

Para esta matriz se consideró que el criterio del impacto ambiental es moderadamente más importante que el costo, dándole una ponderación de 3 y este con respecto al impacto ambiental es inversamente proporcional, dándole una ponderación de 1/3. El valor de la diagonal es 1 debido a que se están comparando los mismos parámetros. De igual manera se evaluó cada uno de los parámetros de la fila verde con cada uno de los de la columna azul.

Luego se realizó la sumatoria de los parámetros de forma vertical, y se colocó en la fila de los totales, el valor correspondiente para los costos es 7,333 como se muestra en la tabla 3.2

Según la evaluación de esta matriz el desempeño de un equipo es fuertemente mas importante que la facilidad de instalación, dándole una ponderacion de 7; el

impacto ambiental y el desempeño son igualmente importante al momento de escoger un equipo por lo que la ponderación dada es 1.

Tabla 3.2. Matriz de comparación por pares del primer nivel con los valores totales.

Mejor Equipo	Costos	Desempeño	Facilidad de instalación	Impacto ambiental
Costos	1	1/3	3	1/3
Desempeño	3	1	7	1
Facilidad de instalación	1/3	1/7	1	1/5
Impacto ambiental	3	1	5	1
Totales	7,333	2,476	16,000	2,533

Posteriormente, se dividió cada valor ponderado al relacionar cada criterio entre la suma total; en el caso de los costos se divide cada valor de esa columna entre 7,333 y se halla el promedio de cada uno de ellos de forma horizontal (tabla 3.3) cuyo valor es 0,148.

Tabla 3.3. Matriz de comparación por pares del primer nivel con el promedio.

Mejor Equipo	Costos	Desempeño	Facilidad de instalación	Impacto ambiental	Promedio
Costos	0,136	0,135	0,188	0,132	0,148
Desempeño	0,409	0,404	0,438	0,395	0,411
Facilidad de instalación	0,045	0,058	0,063	0,079	0,061
Impacto ambiental	0,409	0,404	0,313	0,395	0,380
Totales	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Por último se calculó el índice de consistencia, y el índice aleatorio para sustituir su valor en la ecuación 2.7 de relación de consistencia, y así conocer si la matriz es consistente o se deberían replantear los valores ponderados, como se muestra a continuación:

$$0,148 \times \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 1/3 \\ 3 \end{pmatrix} + 0,411 \times \begin{pmatrix} 1/3 \\ 1 \\ 1/7 \\ 1 \end{pmatrix} + 0,061 \times \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ 1 \\ 5 \end{pmatrix} + 0,380 \times \begin{pmatrix} 1/3 \\ 1 \\ 1/5 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,590 \\ 1,645 \\ 0,245 \\ 1,520 \end{pmatrix}$$

Se dividen cada uno de los parámetros de la suma de los valores de los parámetros de forma horizontal entre el promedio, para encontrar los valores de n , para los costos se tiene que la suma es ($0,136 + 0,135 + 0,188 + 0,132 = 0,590$) y se divide entre el promedio o la media que es 0,148, de igual manera se realiza para cada uno de los parámetros como se muestra a continuación:

$$n = (0,590 / 0,148) = 3,986$$

$$n = (1,645 / 0,411) = 4,002$$

$$n = (0,245 / 0,061) = 4,016$$

$$n = (1,520 / 0,380) = 4$$

Se calcula el n_{max} , el cual es el promedio de los n como se muestra a continuación:

$$n_{max} = (3,986 + 4,002 + 4,016 + 4) / 4$$

$$n_{\max} = 4,001$$

Se calcula el índice de consistencia aplicando la ecuación 2.8 de la siguiente manera:

$$I.C = (n_{\max} - n)/(n-1)$$

$$I.C = (4,001-4)/(4-1)$$

$$I.C = 0,0003$$

Tomando el valor de RI (índice aleatorio) igual a 0,89 según la tabla 2.2 correspondiente a 4, que es el número de elementos comparados, se calcula la relación de consistencia (RC):

$$RC = (IC/RI)$$

$$RC = (0,0003/0,89)$$

$$RC = 0,0004$$

Una vez realizadas las matrices de comparación y hallar la consistencia de las matrices por pares del primer nivel se realizó el mismo procedimiento para las matrices de segundo y tercer nivel comparando cada uno de los parámetros y subparámetros para conocer cual de las dos alternativas es la mas factible técnicamente, cuyos resultados se muestran en el Apendice B.

Cabe destacar que se ponderó con mayor puntaje al equipo que según la experiencia operacional presenta menor costo, al cual se le pueda realizar con mayor facilidad un mantenimiento tanto preventivo como correctivo, que sea seguro de operar, que requiera poco espacio físico para instalar y cuya instalación o construcción fuera menos compleja, y por último, pero no menos importante y debido

a la problemática que se está presentando actualmente a nivel mundial, aquél que causara menor impacto ambiental.

Una vez comparados los parámetros y subparámetros del primer, segundo y tercer nivel se calcularon los resultados para conocer cuál de las dos opciones es más factible, de la siguiente manera:

Primero al lado de cada uno de los criterios se colocó el valor del promedio de las matrices del primer nivel (tabla 3.3). Por ejemplo para los costos es 0,148 (Apéndice B.1.2), luego se colocó el valor del promedio en cada uno de los subcriterios evaluados en el segundo nivel. Por ejemplo para los costos fijos como se muestra en el Apéndice B.2.2 es 0,667, y en las alternativas se coloca el valor de las matrices de tercer nivel de acuerdo al subparámetro evaluado y la opción correspondiente.

Por ejemplo para los costos fijos en la alternativa de la destilación al vacío el valor es 0,667 y en la destilación flash 0,333 (Apéndice B.3.2), luego se obtienen los subtotales sumando el producto del valor del subcriterio por el de la alternativa, por ejemplo para el costo fijo y la destilación al vacío sería $[(0,667 \times 0,667) + (0,333 \times 0,667)]$ cuyo resultado es 0,667, y por último se obtiene el resultado final de la sumatoria del valor de cada criterio por los subtotales, por ejemplo para la destilación al vacío queda $[(0,15 \times 0,667) + (0,41 \times 0,222) + (0,06 \times 0,202) + (0,38 \times 0,75)]$, cuyo resultado es 0,487.

3.4.4. Simulación del proceso de regeneración de sulfolano más factible

Una vez evaluadas las dos opciones mediante el método AHP se procedió a realizar la simulación del sistema o proceso que resultó más factible, mediante el simulador de procesos PRO/ II versión 7.1.

Al iniciar el programa apareció una ventana que da la bienvenida y unas breves instrucciones de lo que indica cada uno de los colores que puedan aparecer cuando se introduce algún dato o al arrojar un resultado, se da click al botón **OK** (figura 3.6).

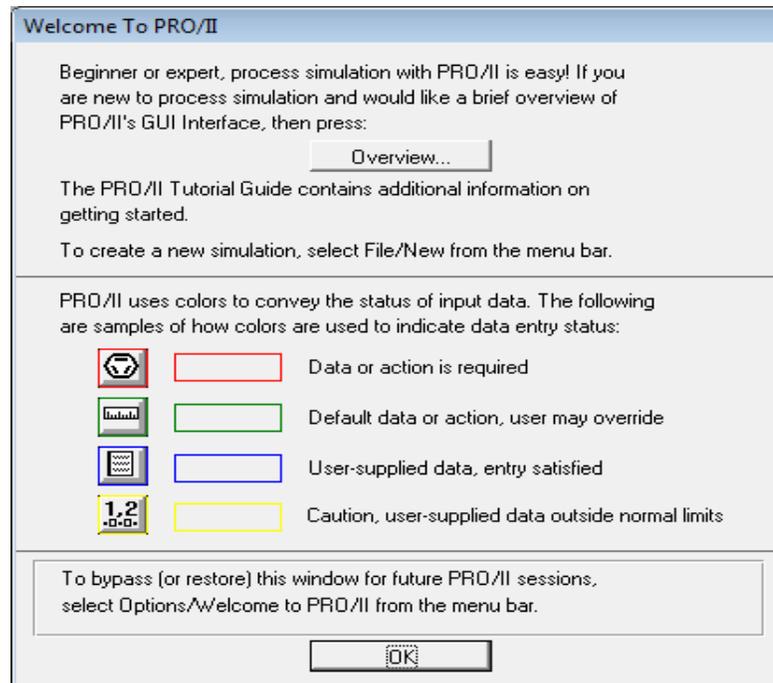


Figura 3.6. Pantalla de bienvenida al simulador PROII.

Luego se inició con la simulación dando click a la palabra **File** y una vez desglosada las opciones se seleccionó **New** para empezar la nueva simulación. Una vez mostrada la pantalla se introdujeron los componentes presentes en la corriente a la salida de los tanques de asentamiento (agua y sulfolano) como se muestra en la figura 3.7, y el paquete termodinámico a usar (SRK) Soave Redlich Kwong para la fase vapor y NRTL para la fase líquida (figura 3.8) seleccionados en los iconos  y  respectivamente, luego se insertaron los equipos propuestos en el diagrama del proceso de destilación flash que fue el que resultó más factible, y cada una de las

corrientes que representan las líneas de flujo que unen a los equipos, los cuales fueron seleccionados en la paleta PFD (figura 3.9).

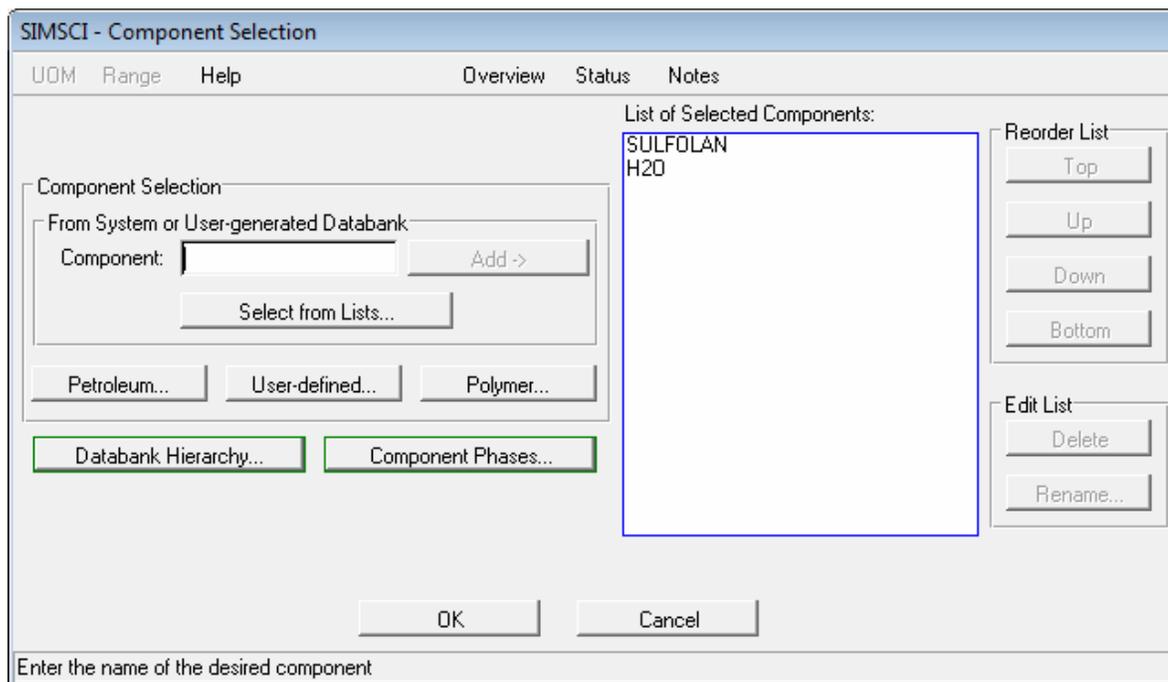


Figura 3.7 Componentes seleccionados para la simulación.

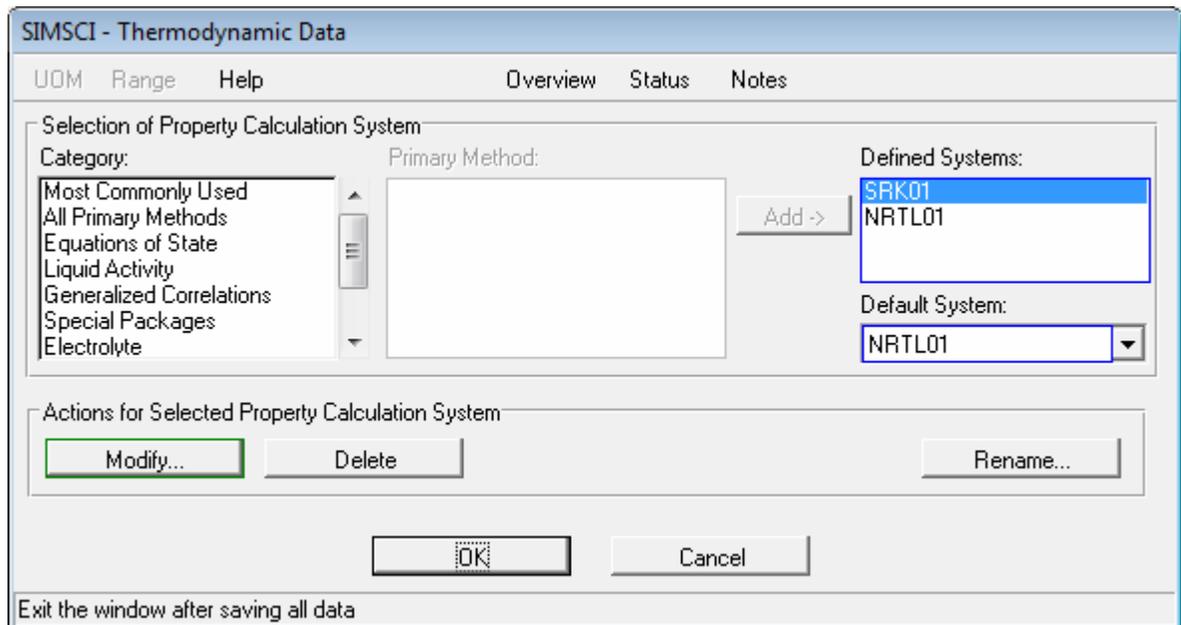


Figura 3.8 Paquete termodinámico seleccionado para la simulación.

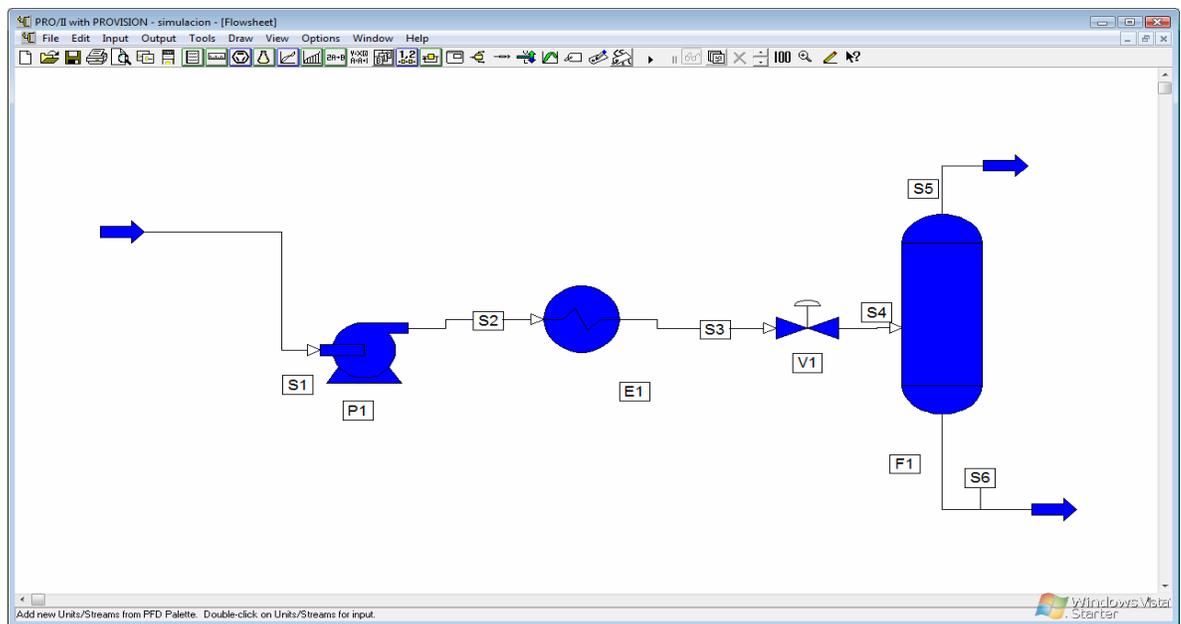


Figura 3.9 Diagrama del proceso para regenerar sulfolano mediante destilación flash simulado con PRO/II.

Posteriormente, se agregó la corriente **S1** en barriles por día (BPD), la cual representa la corriente de salida de los tanques de asentamiento dinámico hacia la bomba (P1), la misma está compuesta por 18000 bls/día de sulfolano lo que representa el volumen del colchón de agua que se utiliza actualmente en los tanques de lavado para el tratamiento de las emulsiones, y 10800 bls/día de agua que representa el 60% (porcentaje de saturación del sulfolano), es decir, la máxima cantidad que puede absorber el sulfolano sin dejar de ser eficiente (figura 3.10), así como también la presión y temperatura de la misma (figura 3.11).

Luego, se caracterizaron cada uno de los equipos y corrientes según los datos requeridos para correr la simulación como temperaturas y presiones. Por último, se realizaron sensibilidades de temperatura en un rango comprendido entre 100 y 220 °C, y así conocer cuál es la temperatura más óptima para recuperar mayor cantidad de sulfolano muestra en el apéndice C.1.

Stream Data - Flowrate and Composition

UOM Range Help Tag

Specify flowrate and composition for stream S1

Fluid Flowrate Specification

Total Fluid Flowrate: lb-mol/hr

Individual Component Flowrates

Copy	Component	Component Flowrate
Paste	SULFOLAN	18000.
	H2O	10800.

Clear Compositions Total: 28800. Normalize Component Flowrates Based on Specified Fluid Flowrate

OK Cancel

Exit the window after saving all data

Figura 3.10 Flujo de cada uno de los componentes de la corriente S1 de la simulación.

PRO/II - Stream Data

UOM Range Help Tag Overview Status Notes

Stream: S1 Description:

To Unit: P1

Stream Type

- Composition Defined
- Petroleum Assay
- Referenced to Stream
- Solids Only Stream

Flowrate and Composition...

Stream Solids Data...

Stream Polymer Data...

Thermal Condition

First Specification:

Temperature 145.00 F

Second Specification:

Pressure 125.00 psia

Thermodynamic System: Determined From Connectivity

OK Cancel

Exit the window after saving all data

Figura 3.11 Temperatura y presión de la corriente S1 de la simulación

3.4.5. Evaluación económica de la factibilidad del sistema regenerativo de sulfolano

Para desarrollar este objetivo se solicitó un estimado de costos clase V a la Superintendencia de Ingeniería de Costos de PDVSA, contemplando las siguientes premisas:

- El contrato se registrará bajo la contratación colectiva petrolera vigente.
- El estimado incluye la construcción del tanque de 50.000 barriles para almacenar el sulfolano.

- Se incluye en la procura, los equipos especificados en el diagrama propuesto para regenerar el sulfolano mediante la destilación flash.

Además se fundamentó en las siguientes bases y parámetros:

Bases:

El estimado se realizó de acuerdo al alcance de la documentación técnica suministrada por la gerencia de producción, con base a valores constante de diciembre de 2009 y paridad cambiaria 2,15 Bs.F/1US\$.

- Ubicación de la obra: los trabajos se realizarán en la Estación Principal Jusepín-2, estado Monagas, PDVSA Oriente.
- La obra será ejecutada bajo la contratación colectiva petrolera vigente.
- Se consideran jornadas normales de trabajo (40 horas por semana), 8 horas diarias.
- Los costos se estimaron en moneda nacional (Bs.F) y extranjera (US\$).

Parámetros de estimación

A) Base de información

- Datos históricos de proyectos similares.
- Manuales corporativos de estimados presupuestarios (INTEVEP)
- Manual de estimación de costos, sección mecánica.
- Manuales de ingeniería de costos Richardson.
- Lita de materiales de proveedores de la industria petrolera.
- Sistema corporativo de ingeniería de costos Sicost.
- Sistema corporativo de estimación de costos Kbase.

B) Alcance del estimado

El proyecto se refiere a la implantación de un sistema regenerativo de sulfolano en la planta de deshidratación de la Estación Principal Jusepín (EPJ-2), para el tratamiento de emulsiones en los tanques de asentamiento y eliminando los costos de desemulsionante.

C) Ingeniería

El costo de la ingeniería contempla el desarrollo de la ingeniería básica y de detalle, se consideró una tarifa promedio de 99,70 Bs.F/HH (honorario más estipendio).

D) Procura

El estimado de costo contempla los costos de la procura de los siguientes equipos mayores:

- 01 bomba de agua.
- 02 bombas para envío de sulfolano a los tanques.
- 01 intercambiador de calor.
- 04 válvulas para tubería 20"
- 01 tanque de almacenamiento de sulfolano deshidratado de 50.000 barriles.
- 01 torre de destilación flash.

Se tomaron en cuenta los factores asociados a la procura foránea mostrados en la tabla 3.4

Tabla 3.4 Factores asociados a la procura de los equipos del sistema regenerativo de sulfolano. (Fuente PDVSA)

PDVSA Servicios	2,5%
Seguros y fletes	10%
Impuestos de nacionalización	18%
Transporte nacional	2,5%
Inspector en taller	3%

E) Construcción

Para la construcción, se determinó las horas hombres (HH) de labor directa requeridas para realizar el proyecto, basado en datos históricos de costos de proyecto similares, utilizando software corporativo (Sicost) y el manual de estimación de costos, sección mecánica. Se consideró una tarifa promedio de 134,40 Bs.F./HH.

F) Gestión

La gestión se estimó con una tarifa promedio, del personal propio de PDVSA, de 78,12 Bs.F./HH.

G) Contingencia

Para el cálculo del estimado se consideró una contingencia de 25%, con la finalidad de cubrir las posibles variables no identificadas durante el proceso de estimación, debido al nivel de información suministrada.

Una vez obtenido el estimado de costo clase V se realizó una evaluación de menor costo entre la implantación del sistema regenerativo y el uso de desemulsionante, utilizando el programa interno de PDVSA de Evaluaciones Económicas (SEE), y posteriormente, la opción más rentable se evaluó económicamente para conocer el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de

retorno (TIR) y de esa manera justificar la rentabilidad o factibilidad de implementar la opción seleccionada.

Para realizar esta evaluación primero se introdujeron los datos del proyecto: nombre, horizonte económico (10 años) y paridad cambiaria, como se muestra en la figura 3.12. Después se colocó el monto de la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto según el estimado de costo clase V realizado por PDVSA (figura 3.13), así como también los ingresos por ahorro representados por el costo de desemulsionante anual (figura 3.14) y los costos fijos por mantenimiento que se asumieron en un 3% (figura 3.15).

Datos del Proyecto - Programas o Proyectos

Número de Renglón: 201091311 01 Año Ejercicio: 2010
 Nombre del Proyecto: PLANTA DE REGENERACION DE SULFOLANO Activo:

Datos de la Alternativa

Nombre de la Alternativa: PLANTA DE REGENERACION DE SULFOLANO
 Plan de Negocio: Escenario de Precios 2009-2021 (OFICIAL - CASO BAJO)
 Plan de Rangolista: Plan Rangolista 2010

Publicar:

Paridad Cambiaria (Bs.F./US\$) 2,15
 Avance Físico (%):
 Comentarios:

Horizonte Económico

Año de Aprobación: 2010
 Año Base: 2010
 Año Moneda: 2010
 Año Inicio Operaciones: 2010
 Cantidad de Años: 10

Lineamientos Económicos de la Alternativa

Impuestos Municipales (%): 0,00 Tasa de Descuento para el perfil de VPN (%)
 Aporte Legal (%): 0,00 Base: 12,00 15,00
 Impuesto Sobre la Renta (%): 50,00 20,00 25,00
 Regalías Gas (%): 20,00 Tasas para la TIR Modificada (%)
 Regalías Crudo (%): 30,00 Tasa de Financiamiento (%): 9,00
 Tasa de Reinversión (%): 12,00

Datos del Gas

Poder Calorífico Gas Combustible: 1000 BTU/PC
 Poder Calorífico Gas Producido: 1157 BTU/PC
 Poder Calorífico Gas Inyectado: 1000 BTU/PC
 Consumo de Gas Operaciones: 5 %
 Factor de Merma por Gas: 1 %

Nuevo Guardar Eliminar Imprimir Cancelar ? Anterior Siguiente Regresar

Figura 3.12 Datos del proyecto de regeneración de sulfolano para la evaluación económica.

Inversiones

Año de la Inversión Actual: 2010 Descripción: INVERSION 2010 Inversión 1 / 1

Descripción del Detalle	Nº de Unidades	Desembolsos	Costos Directos	Costos Indirectos	Contingencia (%)	Tipo de Depreciación
Infraestructura para regenerar el sulfolano	1	MBs.F. Puros	11.051,56	0,00	0,00	LINEAL
		MUSS Puros	0,00	0,00	0,00	
TOT. DETALLE (MUSS)	5.140,26	SUB-TOTALES (MUSS)	5.140,26	0,00	0,00	% Respecto

TOTALES		MUSS	
Total Costos Directos			5.140,26
Total Costos Indirectos			0,00
Total Contingencia			0,00
Costos de Arranque	3-5% Inversión D.	0,00	0,00
Licencias	Bolvares Fuertes (MBs.F.)	0,00	0,00
Otras Inversiones	Bolvares Fuertes (MBs.F.)	0,00	0,00
TOTAL INVERSION:			5.140,26

Listo.

Figura 3.13 Datos de inversión del proyecto evaluado económicamente.

Ingresos

Tipo de Ingreso: Ingresos por AHORROS

Datos del Ingreso			Distribución de Ingresos -		
Nombre del Producto	Cantidad	Moneda	Año	% Distribución	Mo MB
QUIMICA DESMULSIFICANTE	7.066,91	Bolvares Fuertes (MBs.F.)	2010	100,00	
			2011	100,00	
			2012	100,00	
			2013	100,00	
			2014	100,00	
			2015	100,00	
			2016	100,00	
			2017	100,00	
			2018	100,00	
			2019	100,00	
			2020	100,00	

Cierra la ventana actual

Figura 3.14 Datos de los ingresos por ahorros para el proyecto evaluado económicamente.

Costos

Tipo de Costo: OTROS Costos Fijos

Datos del Costo			Distribución de Costos de		
MANTENIMIENTO	3,00	% Sobre Inversión Directa (3 - 5 %)	Año	% Distribución	Monto Di (M)
SEGUROS	0,00	% Sobre Inversión Directa	2010	100,00	
OVERHEAD	0,00	% Sobre Costo de Labor	2011	100,00	
CONTINGENCIA	0,00	% Sobre Subtotal Costos de Operación	2012	100,00	
			2013	100,00	
			2014	100,00	
			2015	100,00	
			2016	100,00	
			2017	100,00	
			2018	100,00	
			2019	100,00	
			2020	100,00	

El monto de cada uno de los costos fijos es calculado de acuerdo al porcentaje de cada uno tomando en consideración la distribución establecida para cada año. Si desea visualizar los valores consulte el reporte de flujo de caja.

Nuevo Guardar Eliminar Cancelar Regresar

Listo.

Figura 3.15 Datos de los costos fijos asumidos para la evaluación económica.

3.5 EQUIPOS, MATERIALES, HERRAMIENTAS Y SUSTANCIAS UTILIZADAS

3.5.1. Equipos

- Computadora portátil, marca: Lenovo, modelo: N500, procesador: Intel Pentium Dual Core, Memoria RAM: 2,00 Gb
- Impresora marca: HP, modelo: Deskjet F380

3.5.2. Materiales de laboratorio

No se usaron

3.5.3. Sustancias

No se usaron.

3.5.4. Herramientas

Se emplearon algunas herramientas para el desarrollo de investigación que se encuentran disponibles en las instalaciones de las oficinas de PDVSA, ubicadas en Campo Rojo (Punta de Mata) y en el edificio sede de exploración Maturín (ESEM Maturín), las mismas se mencionan a continuación:

- a) **Aplicaciones de Microsoft:** Word 2007, Excel 2007, Power Point 2007, Internet Explorer 6.0.
- b) **Aplicaciones Adobe:** Adobe Reader 7.0.
- c) **Sistema de Control de Adquisición de Datos: SCADA**
- d) **Simulador de Procesos:** PRO/II versión 7.1.
- e) **Sistema de Evaluaciones Económicas:** SEE Plus.

➤ **Sistema de Control de adquisición de Datos (SCADA).** Esta herramienta corresponde a un sistema interno de la empresa PDVSA en el cual se pueden visualizar las variables operacionales como temperatura, presión, flujo, porcentaje de agua y sedimentos, entre otras, además de las condiciones del proceso mediante instrumentos de medición dispuestos directamente en las líneas de flujo que por medio de transmisores emiten la señal que puede visualizarse al momento en las pantallas de la sala de control mediante el sistema operativo. Esta herramienta disponible en la Sala de Control de la EPJ-2 donde se llevó a cabo el estudio, es de suma utilidad debido a que se pueden conocer las condiciones reales del proceso en un momento determinado.

➤ **PRO II Versión 7.1.** Esta herramienta es un simulador de procesos comercial que sirve para obtener las condiciones de presión, temperatura y flujo volumétrico,

entre otras, de cada uno de los equipos establecidos en el proceso propuesto para regenerar el sulfolano. El simulador PRO/II utiliza para sus cálculos correlaciones generalizadas, y ecuaciones de estado que son expresiones matemáticas que relacionan la densidad, temperatura, presión y composición de un fluido. La ecuación de estado utilizada en este trabajo es la de SRK para la fase vapor y NRTL para la fase líquida.

CAPITULO IV

RESULTADOS, CONCLUSIONES

Y RECOMENDACIONES

4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES ACTUALES DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN EN LA ESTACIÓN PRINCIPAL JUSEPÍN-2

4.1.1. Características operacionales actuales del proceso de deshidratación en la Estación Principal Jusepín-2

De acuerdo a la información recopilada en la planta de deshidratación, ubicada en la EPJ-2, justo al lado de patio de tanques Jusepín 1, se procesa el crudo proveniente del sistema de bombeo de los tanques de estabilización 10.001/2/5 y 6, mediante una conexión a la línea de descarga de las bombas P-100 y P-300 (A/B/C/D/E y auxiliar).

Esta planta actualmente maneja una capacidad de 420 MBD de crudo aproximadamente y 120 MBD de agua, distribuido uniformemente en 7 deshidratadores electrostáticos, 5 con capacidad de 80 MBD y 2 con capacidad de 86 MBD de crudo (los cuales se colocaron en el proyecto de expansión de la planta); cuenta además con 2 tanques de lavado con capacidad de 55.000 barriles cada uno (55.004/05), 14 bombas centrífugas, de las cuales 8 manejan crudo y las restantes manejan agua (tablas 4.1 y 4.2).

Tabla 4.1 Características de los equipos de la planta de deshidratación de crudo de la Estación Principal Jusepín-2 (EPJ-2), antes de la expansión.

Cantidad	Descripción	Tipo	Fabricante	Capacidad	Cond.operc.
5	Deshidratador electrostático	Desalador	NATCO	80 MBPD c/u	P= 60 psig T= 140 °F
2	Tanque de lavado	Concéntrico	_____	55 MBls c/u	Altura Oper.= 21' Altura Interf.= 7'
8	Bomba crudo emulsionado	Centrífuga	Goulds	72 MBPD c/u	200 HP 1.800 RPM
6	Bomba para agua	Centrífuga	Goulds	13 MBPD c/u	50 HP 3.600 RPM
3	Motor de bomba	Eléctrico	U.S. Electrical motors	200 HP c/u	1.781 RPM
2	Motor de bomba	Eléctrico	U.S. Electrical motors	50 HP c/u	1.300 RPM

Tabla 4.2 Características de los equipos de la planta de deshidratación de crudo de la Estación Principal Jusepín -2 (EPJ-2) proyecto de expansión.

Cantidad	Descripción	Tipo	Fabricante	Capacidad	Cond.operc.
2	Deshidratador electrostático	Doble polaridad	NATCO	86 MBPD c/u	P= 60 psig T= 140 °F
2	Bomba crudo emulsionado	Centrífuga	Goulds	72 MBPD c/u	P.descarga = 95.6 psig
4	Bomba para agua	Centrífuga	Goulds	50 MBPD c/u	P.descarga = 104.4 psig
2	Motor de bomba	Eléctrico	U.S. Electrical Motors	200 HP c/u	1.800 RPM
2	Motor de bomba	Eléctrico	U.S. Electrical Motors	154 HP c/u	1.800 RPM

Como se muestra en la tabla 4.2 en el proyecto de expansión de la planta se agregaron equipos mayores, deshidratadores electrostáticos, y bombas para el manejo de crudo emulsionado, lo cual permitió incrementar su capacidad de procesamiento a 420 MBPD de crudo emulsionado, debido a que la planta fue diseñada en un principio para cubrir los requerimientos desde 1994 hasta 1999 y tomando en cuenta además que la irrupción de agua en los pozos del campo El Furrial ha sido gradual a través del tiempo por la inyección de agua como recuperación secundaria.

4.1.2. Características operacionales de los tanques de asentamiento

El proceso de deshidratación en la EPJ-2 se inicia en los tanques de lavado, los cuales están compuestos a su vez, por un tanque concéntrico. El espacio anular entre

estos dos tanques mantiene un colchón de agua en la parte inferior, a través del cual ingresa la mezcla de petróleo y agua proveniente de los tanques de estabilización (10.001/2/5 y 6) con la finalidad de lavar el crudo. El principio fundamental de la separación es debido a que por densidad el crudo sube, mientras que por gravedad el agua baja, y de esta manera el petróleo al subir desborda las paredes del tanque interno, lo llena, y se despoja del agua libre, la cual queda en el colchón de agua y es drenada posteriormente por la parte inferior del tanque externo.

El nivel de crudo en el tanque externo es controlado con el caudal procesado en los deshidratadores mediante la regulación de la velocidad de las bombas P-01A/B/C/D/E, manteniendo el nivel de operación del tanque (externo e interno) en 22 pies. El nivel de la interfase (agua-petróleo) es controlado por las bombas P-02-A/B/C/D/E/F manualmente o de forma remota desde la sala de control de deshidratación, y se mantiene su nivel de operación en un rango de 5 a 10 pies como cotas mínimas y máximas; y 7 pies como nivel de operación. El arranque, parada y regulación de la frecuencia de las bombas se hace de forma automática, o bien, de forma manual a través de pulsadores locales, localizadas en la sala de operadores de la planta de deshidratación. Las características de los tanques se muestran en la figura 4.1.

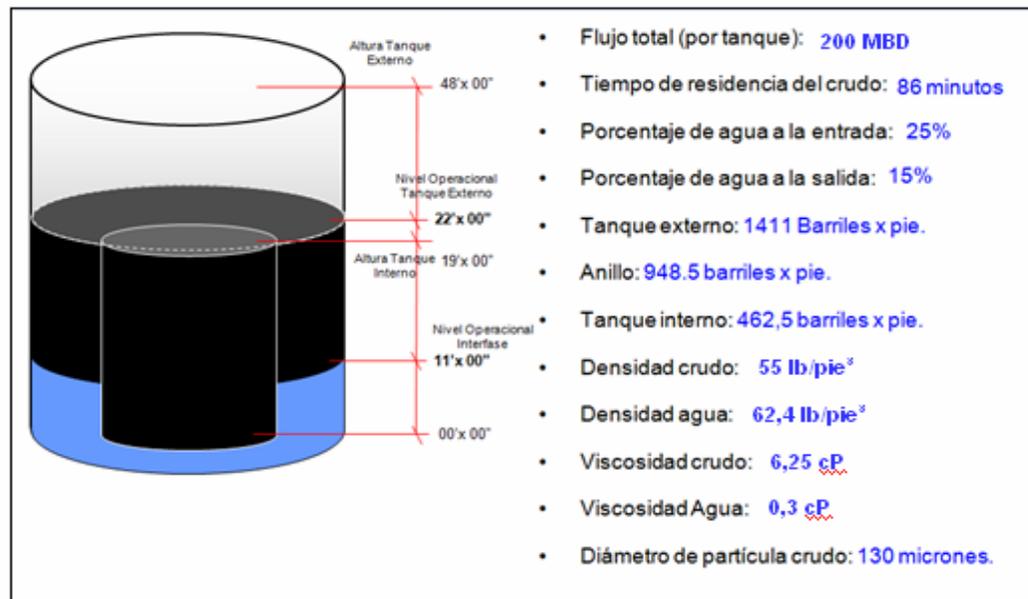


Figura 4.1 Características de los tanques de asentamiento dinámico de la EPJ-2.

Del tanque 55.005 y 55.004 salen dos líneas, una de agua y otra de crudo:

- **Línea de crudo emulsionado.** Línea de 20” de diámetro que sale del tanque interno de los tanques de lavado hacia los cinco deshidratadores electrostáticos (DE-101, DE-201 y DE-301, DE-401 y DE-501) mediante ocho bombas centrífugas (P-01 A/B/C/D/E/F/G/H) de iguales características de funcionamiento y con capacidad cada una para manejar hasta 72 MBD de crudo emulsionado. El %AyS del crudo que entra a los deshidratadores es 17 a 20 % y sale con 0,2 a 0,4 %, en condiciones normales de operación.
- **Línea de agua.** Línea de 20” de diámetro que sale del tanque interno de los tanques de lavado y los deshidratadores hacia la planta de tratamiento de agua (SAEN), mediante seis bombas centrífugas con capacidad de manejo de 13 MBD cada una.

Gracias a lo observado en las visitas de campo se pudo verificar que los tanques de asentamiento 55004 y 55005 poseen sensores para medir el nivel de crudo a la altura de la interfase, que permiten supervisar estas variables. Estos se han visto afectados debido a la presencia de emulsiones arrojando valores que no corresponden al valor real.

El tanque 55004 presenta el siguiente comportamiento: en caso de presencia de emulsión (espesor de la capa > 30 cm) la señal de interfase indicada por el transmisor de nivel oscila entre la capa de emulsión (altura máxima y mínima del colchón); y cuando el nivel de crudo del tanque externo e interno es menor a 20'', la turbulencia producida por la entrada del crudo al tanque interno trae como consecuencia que el transmisor indique un nivel de interfase igual al nivel de crudo.

En el tanque 55005 se observa que en caso de presencia de emulsión la señal de interfase indicada por el transmisor de nivel es aproximadamente la altura máxima del colchón de emulsión. En vista de que la señal no fluctúa ni presenta ningún indicativo de error, la única forma de saber que existe presencia de emulsión dentro del tanque o que la señal está errada es comparando el valor generado con la medida resultante del aforo del tanque.

De acuerdo a la información obtenida en conversación con personal del complejo Jusepín, esta interfase irregular con apariencia de emulsión no es nueva, algunos operadores afirman que siempre ha existido (por lo menos desde hace 10 años), sólo que no es continua su formación sino que aparece en los tanques de lavado en ciertos períodos y que nunca ha afectado el proceso de deshidratación ni el buen funcionamiento de las celdas electrostáticas, obteniéndose crudo dentro de especificaciones; sin embargo, los nuevos equipos instalados en los tanques de lavado para la detección de niveles, nombrados anteriormente, se han visto afectados.

Por otra parte, se constató según informes que los tanques de asentamiento no están cumpliendo con el tiempo de residencia (86 minutos) necesario para despojar el 60% de agua libre del crudo según las condiciones de diseño establecidas como se muestran en la figura 4.1, y están actuando prácticamente como una tubería ya que la diferencia del porcentaje de agua presente en el crudo que entra al tanque con respecto al que sale no es significativo. Se puede decir que la emulsión en los tanques de asentamiento es inconstante, y es mantenida sólo por la turbulencia que se produce al entrar los 200 mil barriles de crudo y agua al tanque, la emulsión original (previo a la inyección de desemulsionante) es bastante estable, pero gracias a que la inyección de desemulsionante se realiza en los múltiples del campo el recorrido hasta la entrada de los tanques permite que al llegar el crudo ya exista cierta separación de fases en la corriente.

4.1.3. Características de los deshidratadores electrostáticos

Los deshidratadores trabajan con corriente alterna (AC) y directa (DC) y tienen una capacidad de manejo de fluido de 86 MBPD, 60 MB de crudo y 26 MB de agua, a una temperatura de 140 °F. El deshidratador posee un transformador en su parte superior que se encarga de llevar el voltaje al nivel de consumo del equipo, un banco de válvulas toma muestras conectadas a diferentes alturas del deshidratador, en los que se extraen los fluidos de la emulsión. La diferencia de alturas permite tomar muestras de la emulsión de crudo y agua en diferentes fases del proceso, desde la muestra a la entrada del proceso hasta la de las dos salidas. En la figura 4.2 se observa una vista previa de un deshidratador desde la sala de control del sistema SCADA.

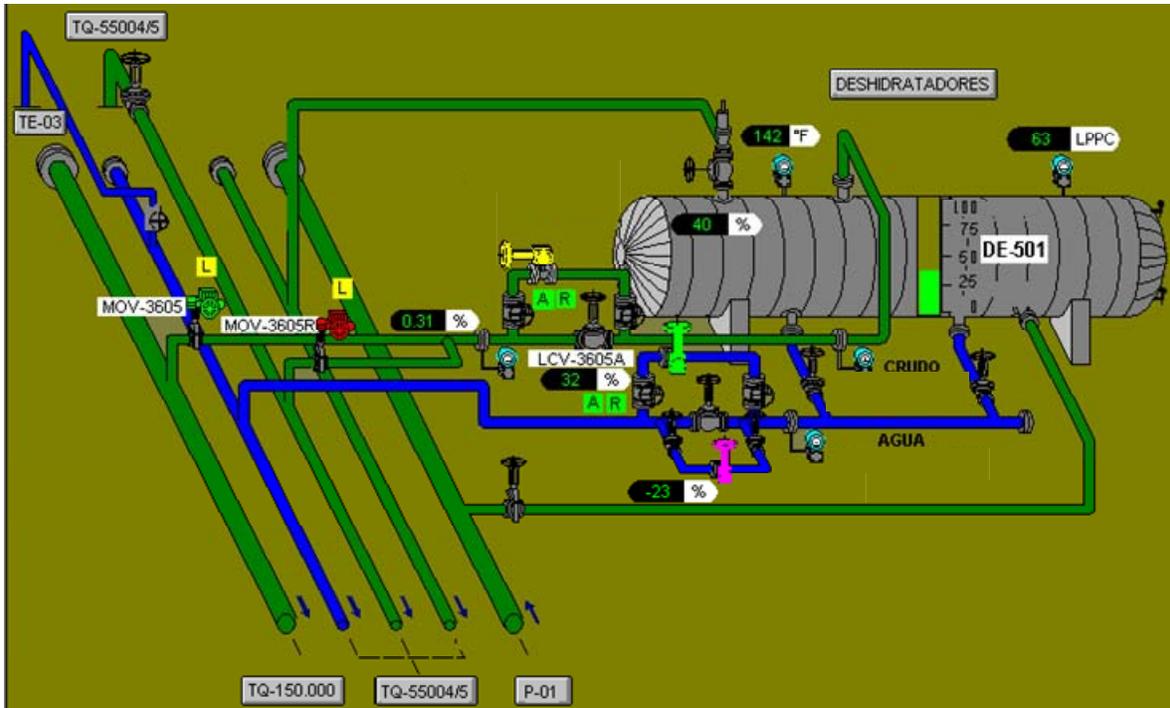


Figura 4.2. Vista del deshidratador electrostático DE-501 de la EPJ-2.

A pesar de que el crudo obtenido a la salida de los deshidratadores cumple con las especificaciones exigidas para la venta ($\leq 0,7\%$ AyS) como se muestra en la tabla 4.3, debido a que los tanques de asentamiento no cumplen con el tiempo de residencia necesario para despojar el 60 % de agua presente en el crudo como lo establece las condiciones de diseño, la corriente de crudo a la entrada de los deshidratadores contiene gran porcentaje de agua.

Como se observa en la tabla 4.3 los deshidratadores trabajan con un nivel de crudo aproximado a un 50%, cuando debería estar por debajo del 30%, afectando así con el transcurrir del tiempo su eficiencia y desempeño, ya que si el nivel de agua es muy alto puede crear corto circuito con los electrodos presentes en la parte superior del deshidratador disminuyendo también su tiempo de vida útil.

Además, se pueden observar las temperaturas, presiones, y barriles que manejan, así como también el porcentaje de agua y sedimento a la salida de los

mismos, los cuales están por debajo del 0,3%, es decir, menor al porcentaje exigido para la venta (0,7%), por lo cual los deshidratadores electrostáticos realizan la mayor parte del trabajo de la planta para deshidratar el crudo.

Es importante resaltar que el agua que sale del deshidratador es recirculada hacia los tanques 55.005 y 55.004 para separarse del crudo remanente que aún pueda contener y de allí se dirige hacia la planta de tratamiento de aguas efluentes (SAEN). Aunque esto se considera una mala práctica, se utilizó como medida para obtener el agua bajo las condiciones exigidas por la planta SAEN, debido a que el agua no salía según las especificaciones requeridas por la misma.

Tabla 4.3 Características a las que operan los deshidratadores electrostáticos en la EPJ-2.

DESHIDRATADOR	% AyS	PRESION (psi)	NIVEL	TEMPERATURA (°F)	FLUJO DE CRUDO (BPD)
DE-101	0,11	58	47	146	28.314
DE-201	0,18	63	50	145	30.354
DE-301	0,14	61	52	146	32.042
DE-401	0,22	58	45	147	50.839
DE-501	0,01	58	46	144	63.065
DE-601	0,17	59	38	144	54.471
DE-701	0,16	58	40	142	60.195

Los deshidratadores tienen una salida directa a SAEN, pero sólo es utilizada en casos de emergencia o por motivos de cambios operacionales. Esta maniobra operacional requiere de la supervisión continua por parte de los custodios de la

planta, en vista a que se podrían estar enviando residuos de crudo y contaminar el agua que se bombea hacia SAEN.

4.1.4. Características del tratamiento desemulsionante

Trabajos realizados por INTEVEP y la empresa que suministra el desemulsionante pudieron corroborar que el producto químico utilizado para el rompimiento de las emulsiones es eficiente y compatible con los demás productos utilizados para el tratamiento de crudo como antiespumante y dispersante de asfaltenos, sin embargo es sumamente lento en su acción de romper las emulsiones. Las propiedades fisicoquímicas se muestran en la tabla 4.4 y la información general en el apéndice A.

Por otra parte según el cálculo realizado en el capítulo 3 sección 3.4.1, el costo de desemulsionante del año 2009 fue 7.095.873,75, cuyo valor varía según los galones que se inyecten diariamente, siendo éstos proporcionales a la producción de crudo y agua manejada, es decir, mientras mayor es la producción, mayor es la cantidad de desemulsionante necesaria para el tratamiento de emulsiones en el mismo.

Tabla 4.4 Características físicas y químicas del producto desemulsionante

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICA
Estado físico	Líquido
Color	Amarillo claro o pardo
Olor	Característico a hidrocarburos aromáticos
Punto de inflamación	Mayor a 42°C
Temperatura de ignición	Sin determinar
Presión de vapor	Sin determinar
Densidad	0,8 y 0,9 g/cm ³ (20°C)
Solubilidad en agua	Prácticamente insoluble
Composición	Polímero de bloque, reticulado PO-EO y resina oxialquilatada en una mezcla de solventes aromáticos.

4.1.5. Análisis de las curvas del portafolio de oportunidades (PDO 2008-2027)

En las curvas del portafolio de oportunidades (PDO) se observó la producción de agua en el campo Furrial Este, estimada para el período 2008-2027 (figura 4.3), y también lo que se tenía estimado en el período 2006-2025, pudiendo constatar que la proyección realizada para este último período no se cumplió debido a que el aumento de agua es cada vez mayor a causa de la inyección de agua en los flancos de los yacimientos del campo El Furrial para obtener una mayor producción de crudo por el método de recuperación secundaria.

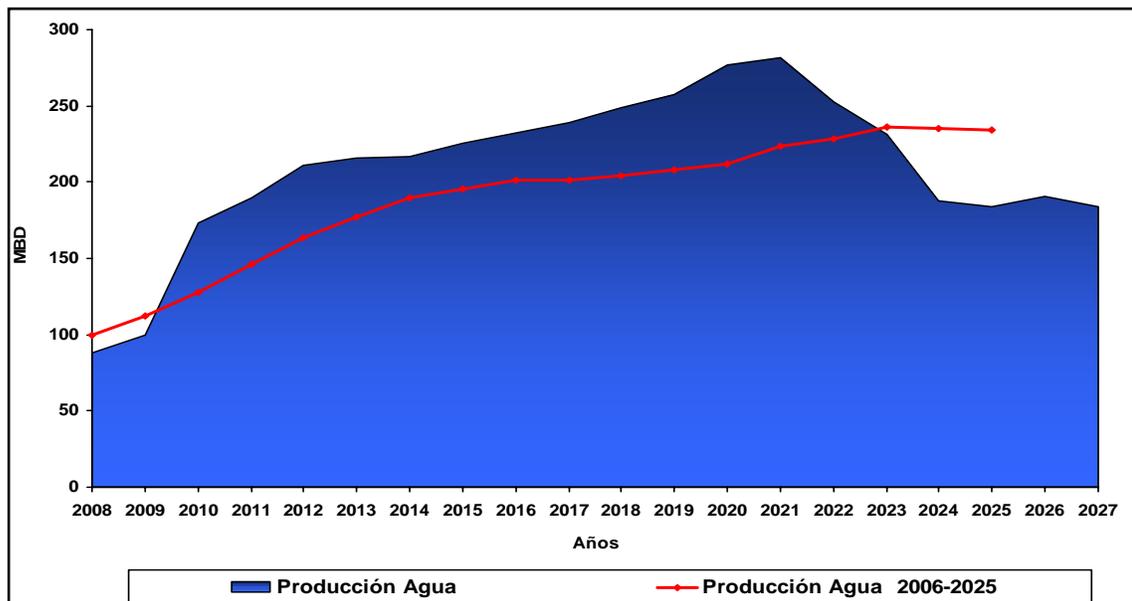


Figura 4.3. Curva del Portafolio de Oportunidades 2008-2027 de la producción de agua en el campo Furrial Este.

De acuerdo a la proyección realizada durante el período 2008- 2027 se puede notar que la mayor producción de agua se alcanzará en el año 2021 con un estimado de 282 mil barriles diarios, lo que conllevará a que el crudo presente un mayor porcentaje de agua y una mayor tendencia a formar emulsiones y a su vez, como se mencionó anteriormente, la cantidad de desemulsionante a utilizar será mayor.

Por el contrario, en las curvas del PDO estimadas para la producción de crudo en el campo Furrial Este para el período 2008-2027 se observa que la producción es inferior comparado con lo que se había estimado para el período 2006-2025, es decir la producción de crudo ha disminuido en gran manera a pesar de los esfuerzos y los métodos realizados para su recuperación, además irá en descenso a través del tiempo, y la mayor producción se estima para este año 2009 con una producción de 353 mil barriles por día, luego se presenta un descenso hasta el año 2027 con 105 mil barriles diarios como se observa en la figura 4.4.

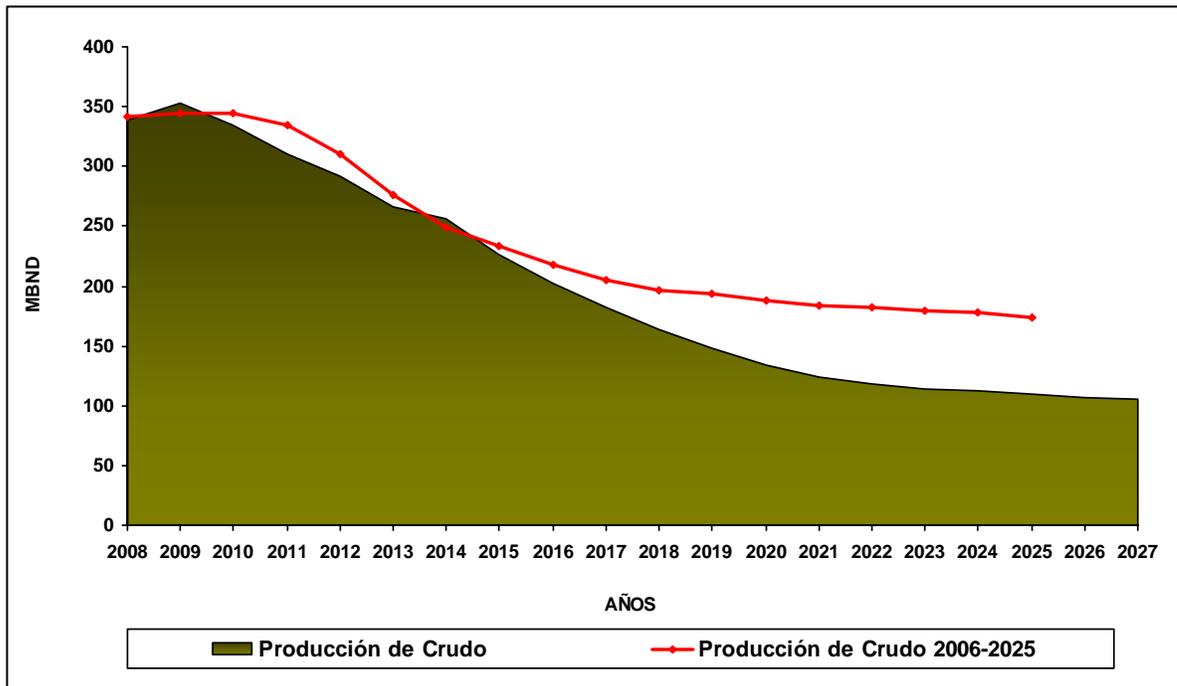


Figura 4.4. Curva del Portafolio de Oportunidades 2008-2027 de la producción de crudo en el campo Furrial Este.

4.2. REALIZACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE PROCESO PARA LA REGENERACIÓN DE SULFOLANO A NIVEL DE LOS TANQUES DE ASENTAMIENTO DINÁMICO

Los sistemas propuestos para regenerar el sulfolano se diferencian principalmente en el equipo utilizado para separar la solución agua- sulfolano que sale de los tanques de asentamiento, para que una vez éste se encuentre libre de agua se pueda reenviar nuevamente a los tanques para actuar como deshidratante del crudo.

El primer proceso contempló una torre de destilación al vacío, es decir, a presiones menores a 1 atm basado en los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio realizadas por INTEVEP, además para evitar alguna degradación térmica

del sulfolano cuando se trabaja con temperaturas altas, siendo esto muy poco probable. En el segundo proceso se propuso un equipo de separación flash considerándose como una buena propuesta debido a la diferencia existente entre los puntos de ebullición de los dos líquidos, que permite que se puedan separar con facilidad al entrar al equipo.

Cabe destacar que se estudió la posibilidad de plantear otros equipos para la separación líquido-líquido como los hidrociclones, siendo descartados debido a que el sulfolano y el agua no tienen mucha diferencia entre sus densidades, las cuales son 1,2 y 1,0 g/cm³ respectivamente y este equipo se basa en la diferencia de densidades para que mediante la fuerza centrífuga se pueda separar los componentes de la mezcla. Además, el sulfolano se encuentra totalmente soluble o en solución con el agua, por lo que con un equipo de separación mecánica como éste no se lograría jamás realizar la separación.

El diseño de los procesos para la regeneración de sulfolano se realizó a partir de los tanques de asentamiento dinámico como se mostró en el capítulo 3, debido a que es allí donde se presenta el problema de las emulsiones, además es el primer equipo empleado para la deshidratación de crudo que no está cumpliendo con su objetivo.

4.3. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS ESQUEMAS DE REGENERACIÓN DE SULFOLANO PROPUESTOS

Los resultados obtenidos de la evaluación técnica siguiendo la metodología AHP se muestran en la siguiente figura.

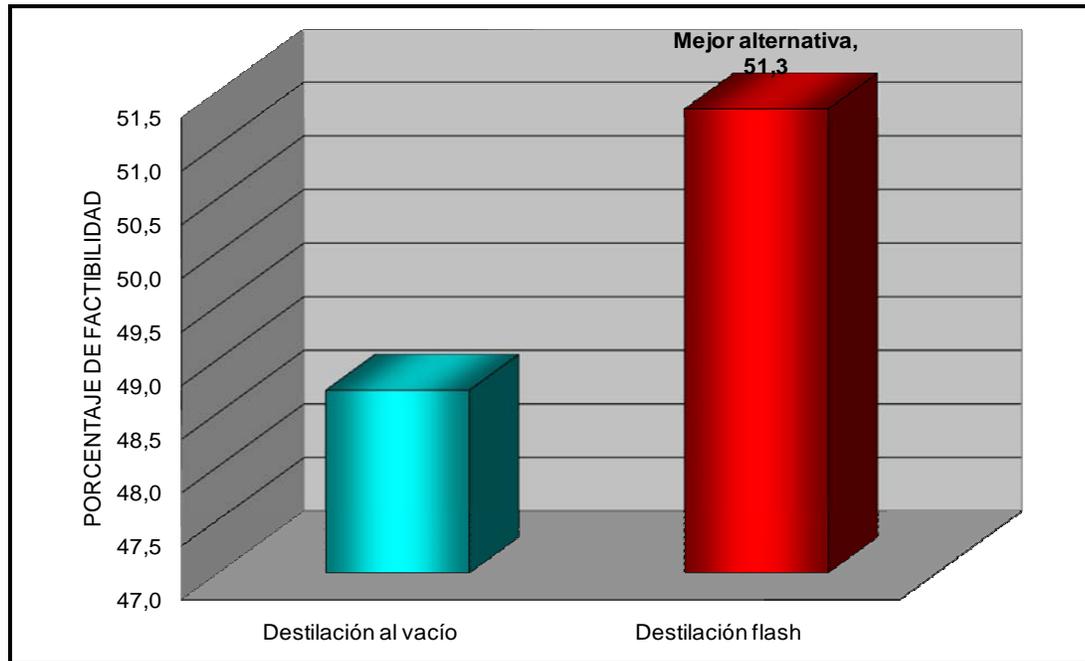


Figura 4.5 Factibilidad de la evaluación técnica.

Como se puede observar en la figura 4.5 mediante un diagrama de barras, la destilación flash resultó la opción más factible en un 51,3% en comparación con la destilación al vacío que obtuvo un 49,7 %. Además, cabe destacar que es la opción que cumple con las expectativas establecidas de menor costo, mayor desempeño, mayor facilidad de instalación, y poco impacto ambiental, en un 33,3, 77,9, 79,8 y 25% respectivamente, como se muestra en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Resultados de la evaluación técnica mediante el método AHP.

Criterios		Subcriterios		OPCIONES	
				Destilación al vacío	Destilación flash
Costos	0,15	Fijos	0,667	0,667	0,333
		Operacionales	0,333	0,667	0,333
		Subtotal		0,667	0,333
Desempeño	0,41	Preventivo	0,429	0,25	0,75
		Correctivo	0,283	0,17	0,83
		Otros problemas	0,045	0,25	0,75
		Cambios en variables	0,122	0,25	0,75
		Seguridad	0,122	0,2	0,8
		Subtotal		0,222	0,779
Facilidad de Instalación	0,06	Sistema eléctrico y mecánico	0,655	0,25	0,75
		Construcción	0,187	0,1	0,9
		Ubicación	0,158	0,125	0,875
		Subtotal		0,202	0,798
Impacto ambiental	0,38	Subtotal		0,75	0,25
Resultados				0,487	0,513
Porcentaje				48,7	51,3

4.4 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE REGENERACIÓN DE SULFOLANO MÁS FACTIBLE

El diagrama del proceso simulado se muestra en la figura 4.6, donde se observa que la corriente S1 es la que sale del tanque de asentamiento, y la S6 es la que envía el sulfolano separado del agua al tanque de almacenamiento para que una vez saturado al 60% en el tanque de asentamiento dinámico comience el ciclo de regeneración nuevamente, como se mostró en la figura 3.4.

De acuerdo al análisis de sensibilidades de temperaturas realizado, la temperatura más óptima para lograr la separación agua- sulfolano en el equipo de destilación flash es 170 °C o 338°F a la salida del intercambiador, ya que es a la cual se obtiene la mayor cantidad de sulfolano en la corriente S6 recuperándose 2668,738lbmol/h que representa un 96,30% del sulfolano de la corriente S1. Además se observó que a medida que se aumentaba la temperatura se obtenía una corriente con mayor fracción molar de sulfolano más no con mayor flujo o caudal del mismo. Este comportamiento es debido a que a altas temperaturas el sulfolano se iba acercando más a su punto de ebullición y su temperatura de descomposición (apéndice C.1).

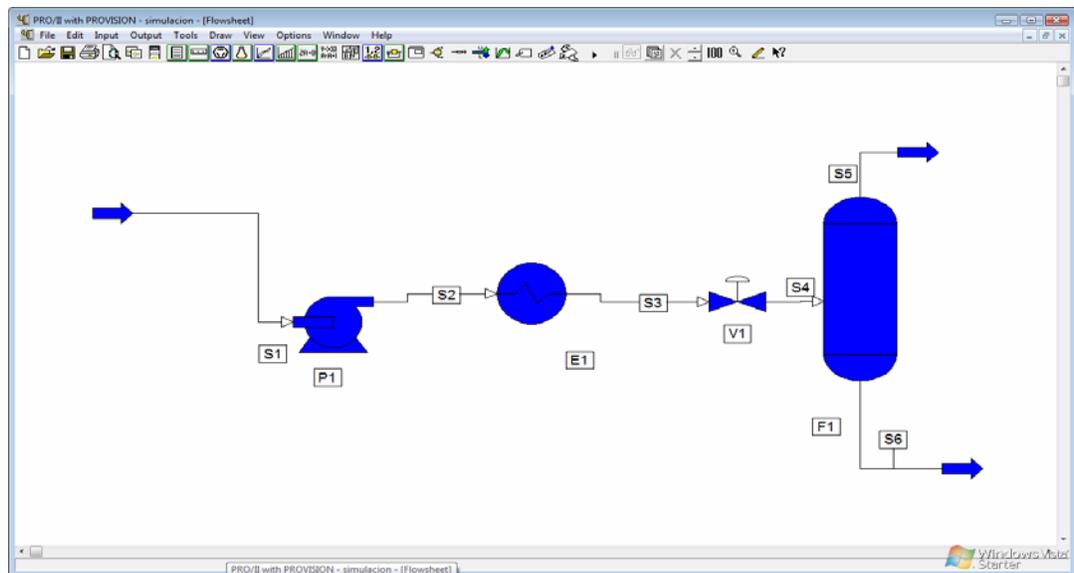


Figura 4.6 Vista del proceso de regeneración de sulfolano simulado en PRO/II.

Como se muestra en la tabla 4.6, además de la presión y temperatura de cada una de las corrientes simuladas, se puede observar el flujo y fracciones molares de cada uno de los componentes presentes en las corrientes (agua y sulfolano). Cabe destacar que en la corriente S6, que representa el fondo de la torre, sale el sulfolano

que se va a recuperar en estado líquido por ser el componente más denso, cuya fracción molar de sulfolano es 0,8912 y de agua es 0,1088.

Por otra parte, en la corriente S5, que representa el tope de la torre, sale el agua en forma de vapor porque se calentó previamente hasta su punto de ebullición, además por ser el componente más liviano en esta corriente, la fracción molar de sulfolano es 0,0120 y de agua 0,9880.

Tabla 4.6. Características de cada una de las corrientes de la simulación.

COMPOSICIÓN DE LAS CORRIENTES							
Corriente	Nombre	S1	S2	S3	S4	S5	S6
e	Fase	Líquida	Líquida	Mezcla	Mezcla	Vapor	Líquida
Temperatura (°F)		145,000	145,186	338,000	298,465	298,465	298,465
Presión (psig)		0,000	40,000	40,000	5,000	5,000	5,000
Flujo molar (lbmol/hr)	Sulfolano	2.771,174	2.771,174	2.771,174	2.771,174	102,437	2668,738
	Agua	8.742,834	8.742,834	8.742,834	8.742,834	8416,917	325,916
Flujo total (lbmol/hr)		11.514,08	11.514,08	11.514,08	11.514,08	8519,354	2994,654
Fracción molar	Sulfolano	0,2407	0,2407	0,2407	0,2407	0,0120	0,8912
	Agua	0,7593	0,7593	0,7593	0,7593	0,9880	0,1088

4.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA FACTIBILIDAD DEL SISTEMA REGENERATIVO DE SULFOLANO

La superintendencia de ingeniería de costos de PDVSA se encargó de realizar un estimado de costos clase V; dicha metodología parte de los costos de los equipos mayores para el cual se tomaron las bases y premisas descritas en el capítulo anterior. En el mismo no se incluyen los costos por sustancias químicas, instalaciones externas de la planta, servicios industriales, escalamiento, ni la preparación del sitio donde se va a ubicar la planta, debido a que es un estimado de costos clase V; además, no es considerado en los proyectos en fase de ingeniería conceptual. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Estimado de costos clase V para la opción destilación flash.

TOTALES	Bs.F	\$
Ingeniería	247.608,00	115.166,51
Procura	3.651.514,07	1.698.378,64
Construcción	4.602.080,00	2.140.502,33
Gestión	340,048.00	158.161,86
Contingencia	2.210.313,20	1.028.052,65
TOTAL	11.051.563,27	5.140.261,99

Como se muestra en la tabla 4.7, el monto para el mes de diciembre 2009 de la inversión para la implantación del proceso de regeneración de sulfolano mediante la destilación flash es de once millones cincuenta y un mil quinientos sesenta y tres bolívares con 27/100 céntimos (11.051.563,27 Bs.F). Cabe destacar que esto es sólo el costo de ingeniería, procura, construcción, gestión y contingencia que asociado a los equipos mayores, por lo tanto este valor no tiene una confiabilidad definida sino que ésta depende de la calidad de la información disponible de proyectos similares ya

completados o que estén en desarrollo y de la pericia con que se evalúen. Posee un error de precisión por encima de $\pm 30\%$.

En base al resultado obtenido en el estimado de costo clase V, y el cálculo del costo de desemulsionante utilizado anualmente, se evaluó la factibilidad de implantar el sistema regenerativo de sulfolano para conocer la tasa interna de retorno (TIR), el valor presente neto (VPN) la eficiencia de la inversión (EI) y el tiempo de pago. Los resultados son los mostrados en la tabla 4.8; donde se puede observar que implantar el proceso de regeneración de sulfolano posee un VPN de 6.728,59 M\$ indicando que los ingresos son mayores que los egresos, además de que es un proyecto rentable por tener un valor positivo, una TIR de 45,26% que indica que esta es la mayor tasa que puede pagar el inversionista sin perder dinero.

Tabla 4.8 Indicadores económicos para el proyecto de regeneración de sulfolano.

INDICADORES ECONÓMICOS	VALOR
VPN (M\$)	6.728,59
TIR (%)	45,26
EI (%)	2,31
TP (Años)	2,38

Cabe destacar que el valor de la TIR se encuentra por encima del 15% que es el valor que considera la empresa como óptimo al momento de evaluar un proyecto como rentable.

Por último se observa que el tiempo de pago sería de 2,38 años en comparación con los costos de desemulsionante utilizado anualmente, y la inversión de implantar

la planta representa el gasto de 2 años de inyección de químico ($\pm 30\%$), por lo que se puede decir que a pesar del margen de error del estimado de costo, la implantación de la planta de sulfolano es factible a pesar del alto costo que se tiene que invertir, cuyo desembolso sería el primer mes y los otros meses en un periodo de 10 años los ingresos serían mayores que los egresos como se muestra en la figura 4.7.



Figura 4.7 Ingresos y egresos generados con la implantación del sistema regenerativo de sulfolano para un período de 20 años.

Además en el apéndice D se muestran los resultados arrojados por un estudio de sensibilidad realizado por el sistema de evaluaciones económicas (SEE) en base al VPN y la TIR, donde se puede observar que el proyecto es factible, seguro y rentable por no poseer ningún tipo de riesgo.

4.6 CONCLUSIONES

- Según la información obtenida de las características operacionales actuales del proceso de deshidratación en la Estación Principal Jusepín-2, los tanques de

asentamiento dinámico no cumplen con el tiempo de residencia suficiente para separar el agua del crudo según las especificaciones de diseño, y los deshidratadores electrostáticos están trabajando a condiciones por encima de lo normal debido al alto porcentaje de agua presente en el crudo.

- Los procesos propuestos para la regeneración de sulfolano en los tanques de asentamiento dinámico tales como: destilación flash y destilación al vacío, reducirán el porcentaje de emulsiones presente en el crudo así como también despojará al crudo de mayor cantidad de agua permitiendo que los deshidratadores trabajen con mayor eficiencia y tenga mayor tiempo de vida útil.
- De acuerdo a la evaluación técnica, el proceso más factible es la destilación flash en comparación con la destilación al vacío, por presentar menor costo e impacto ambiental y mayor facilidad de instalación y desempeño.
- En la simulación realizada la temperatura y presión a la cual se obtiene mayor cantidad de sulfolano a la salida del equipo de destilación flash es de 388°F y 5 psig respectivamente, recuperándose un 96,30% de sulfolano.
- La inversión estimada del proceso regenerativo propuestos es de 5.140,26 MU\$ o 11.051,56 Bs.F, sin incluir el costo de los galones de sulfolano y con un margen de error de $\pm 30\%$, cuyo tiempo de pago sería de 2,38 años.
- El proyecto para regenerar el sulfolano es más rentable que la inyección de desemulsionante, por presentar un VPN de 6.728,59 M\$, una TIR 45,26%, lo que indica que es un proyecto factible, seguro y sin riesgos a pérdidas.

4.7 RECOMENDACIONES

- Realizar estudios a escala piloto para conocer con mayor exactitud el porcentaje de eficiencia del sulfolano para la desemulsión del crudo.
- Evaluar la factibilidad de otros procesos de separación líquido-líquido para la regeneración del sulfolano, tal como la absorción, extracción líquido- líquido entre otros.
- Realizar estudios tomando en cuenta la precipitación de las sales presentes en el agua.

BIBLIOGRAFIA

1. Salazar, G. “**Diseño conceptual de un sistema para el manejo de crudo en las nuevas instalaciones el Furrial (NIF-1) estado Monagas**” Tesis de Grado, Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Barcelona –Venezuela. (2005).
2. INTEVEP. “**Prueba experimental de laboratorio del sulfolano en muestras de crudo pesado de cuba sobre las base de la técnica tradicional de tanques de lavado**” Informe Técnico, Caracas- Venezuela (2005).
3. Acevedo, F. “**Mejoramiento del proceso de deshidratación de petróleo del campo el furrial del distrito norte, división oriente – PDVSA**” Universidad de Carabobo, Escuela de Ingeniería Química, Valencia – Venezuela. (2008).
4. Garcia, M “**A novel approach to enhance crude oil treatment in venezuelan fields**” Master of Science in Petroleum Production Engineering at The Robert Gordon University, Aberdeen (2008).
5. Marfisi, S. y Salager, J. “**Deshidratación de crudo. principios y tecnología**” Cuaderno FIRP S853-PP. Modulo de Enseñanza, Universidad de los Andes, Laboratorio FIRP, Mérida-Venezuela (2004).
6. Salager, J. “**Emulsiones, propiedades y formulación**” Cuaderno FIRP 231 Modulo de Enseñanza, Universidad de los Andes, Laboratorio FIRP, Mérida-Venezuela (1993).

7. Bogarin, B. **“Adecuación de la infraestructura de deshidratación de crudos para el incremento del volumen de agua asociada a la producción de la estación de flujo Musipán - PDVSA”** Tesis de Grado, Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Barcelona –Venezuela. (2008).
8. Reinales, S. **“Evaluación del sistema de deshidratación de crudo liviano/mediano en la estación de descarga Elias-17”** Tesis de grado, Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Barcelona – Venezuela (2000).
9. Mora, J **“Determinación de los factores que estabilizan la emulsión agua en crudo en los módulos de producción de EPJ-2”** Tesis de Grado, Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Barcelona –Venezuela (2006).
10. PDVSA, **“Distrito norte estrategias corto plazo campo el Furrial”** Informe Técnico, Puerto la Cruz- Venezuela (2004).
11. **Operaciones Unitarias de transferencia de materia**, Disponible en: http://www.fisicanet.com.ar/quimica/industrial/ap07_operaciones_unitarias.php
12. **Definición, usos y síntesis del sulfolano**, Disponible en: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sulfolane>
13. Salas, J **“Evaluación de tecnologías para el control de incrustaciones de CaCO₃ en los pozos productores de crudo FUL-51 y FUL-68 del campo**

El Furrial PDVSA” Tesis de Grado, Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería y Cs. Aplicadas, Barcelona- Venezuela (2008).

14. Sifontes, J “**Manual de curso introductorio del programa de simulación PRO/II**”

15. **Costos y tipos de costos,** Disponible en:
<http://www.promonegocios.net/costos/tipos-costos.html>

16. **Mantenimiento preventivo y correctivo,** Disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos15/mantenimiento-industrial/mantenimiento-industrial.shtml>

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

TÍTULO	Evaluación técnico-económica de un sistema regenerativo de sulfolano para el tratamiento de emulsiones en los tanques de asentamiento dinámico de la Estación Principal Jusepín (EPJ-2)
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CVLAC / E MAIL
Guaita P, Livinel.	CVLAC: 17.632.016

	E MAIL: guaitapl@gmail.com
--	---

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:AguaCrudoDeshidrataciónEmulsionesSulfolanoTanques de asentamiento

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUB ÀREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

Este trabajo consistió en una evaluación técnico - económica para conocer la factibilidad de implantar un sistema regenerativo de sulfolano para el tratamiento de emulsiones de crudo en los tanques de asentamiento dinámico de la Estación Principal Jusepín - 2 (EPJ-2). La metodología consistió en primer lugar, en recopilar la información de las características operacionales del proceso de deshidratación, pudiendo constatar la problemática de la formación de emulsiones que se presenta en los tanques de asentamiento debido a los altos porcentajes de agua que se inyectan en los pozos del campo El Furrrial para la recuperación secundaria del crudo, así como también las fallas mecánicas o de mantenimiento que presentan los tanques de lavado. En segundo lugar, se realizaron dos diagramas de proceso para la regeneración de sulfolano a nivel de los tanques de asentamiento dinámico, el primero consta principalmente de una separación flash y el segundo de una destilación al vacío como equipos de separación sulfolano-agua, posteriormente se realizó una evaluación técnica de los mismos mediante el proceso de análisis jerárquico o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) que consiste en la comparación por pares de parámetros como costo, desempeño, facilidad de instalación e impacto ambiental y a su vez otros subparámetros, obteniendo como resultado que el proceso más factible técnicamente es la destilación flash. Luego, se realizó la simulación del proceso más factible usando el simulador PRO/II y sensibilidades de temperaturas dentro de un rango de 100 y 220 °C, para saber las condiciones que permiten recuperar mayor cantidad de sulfolano las cuales fueron 170°C y 5 psig, logrando recuperar un 96,30% del sulfolano que sale del tanque de lavado . Por último, se realizó el estimado de costo para la evaluación económica, mediante el uso del Sistema de Evaluaciones Económicas (SEE), para así determinar la tasa interna de retorno (TIR), y el valor presente neto (VPN) necesario para implantar el sistema, cuyos valores fueron 45,26% y 6.728,59 M\$ respectivamente y en comparación con el método usado actualmente para el rompimiento de las emulsiones la implantación del sistema regenerativo mediante destilación flash es factible, seguro y rentable con un tiempo de pago de 2,38 años, que representan 2 años de desemulsionante, en el cual se recuperaría la inversión.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Marfisi, Shirley	ROL	CA	AS x	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL	shirleymarfisi@yahoo.com			
	E_MAIL				
Acevedo Venus	ROL	CA	AS x	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL	acevedovenus@gmail.com			
	E_MAIL				
Moreno, Luis	ROL	CA	AS	TU	JU x
	CVLAC:				
	E_MAIL	morenoluisg@cantv.net			
	E_MAIL				
Rodulfo, Arturo	ROL	CA	AS	TU	JU x
	CVLAC:				
	E_MAIL	Rodulfoarturo99@cantv.net			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	03	19
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.Proceso regenerativo de sulfolano.doc	Application/ msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K
L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y
z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo Anzoátegui.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el conocimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién lo participará al Consejo Universitario

Livinel Guaita

AUTOR

Dra. Shirley Marfisi,
M.Sc

TUTOR

Ing. Luis
Moreno

JURADO

Ing. Arturo Rodulfo,
M.Sc

JURADO

POR LA SUBCOMISION DE TESIS

Ing. Yraima Salas