

**DISEÑO OPTIMIZADO A ESCALA PILOTO DE FACILIDADES PARA LA  
INYECCIÓN DE POLÍMERO COMO MÉTODO DE RECOBRO MEJORADO EN  
ECOPETROL S. A**

**GAUDY VANESSA CÁCERES BLANCO  
MICHEEL FABIÁN GARCÍA NIÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

**DISEÑO OPTIMIZADO A ESCALA PILOTO DE FACILIDADES PARA LA  
INYECCIÓN DE POLÍMERO COMO MÉTODO DE RECOBRO MEJORADO EN  
ECOPETROL S. A**

**GAUDY VANESSA CÁCERES BLANCO  
MICHEEL FABIÁN GARCÍA NIÑO**

**Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos**

**Director:**

**EIDER NIZ VELÁSQUEZ**

**Ph. D., en Ingeniería Química y de Petróleos**

**Codirector:**

**RÓBINSON JIMÉNEZ DÍAZ**

**M. Sc. en Ingeniería Énfasis en Hidrocarburos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

A Dios por mantenerme firme en este mundo y darme las capacidades suficientes para hacer todo aquello que me proponga.

A mis padres Carlos Eduardo y Alba Lucia por su amor, compromiso y berraquera lo cual fue fundamental para que este sueño se hiciera realidad, son mi motor de vida y los que me inspiran a seguir creciendo personal y profesionalmente. LOS AMO INMENSAMENTE.

A mi hermana Laura Daniela por ser mi compañía durante este tiempo y hacerme sentir como si estuviera siempre en casa. En general a toda mi familia por su respaldo en este proceso y como dice la canción de Ruben Blades “familia es familia y cariño es cariño”.

A mis amigas Rosita y Vanesa por hacer de esta experiencia universitaria de principio a fin “única”.

A Fabián por la paciencia que me tuvo en el desarrollo de este trabajo y enseñarme que la vida es mas bonita si trabajas en ella con amor y tranquilidad.

**Vanessa Cáceres**

## **DEDICATORIA**

A Dios y a la vida por brindarme la posibilidad de cumplir esta meta.

A mis padres Berenise Niño y Carlos García por ser los principales promotores de este sueño. Gracias padres por su dedicación, amor y perseverancia, los amo demasiado.

A mi familia y principalmente a mi abuela Maria que es mi segunda madre. Gracias abuelita por toda la comida que me dabas en vacaciones para volver repuestico a la universidad y afrontar cada semestre de la mejor manera.

A mis amigos Andrea, Elkin, Juan Camilo, Omar y Richard y a todos aquellos que estuvieron presentes durante mi formación como profesional he hicieron que este proceso fuese más vacano y sencillo.

A Gaudy Cáceres por ser mi compañera de tesis, por tanto aguante y por ser mi apoyo incondicional. Espero siempre contar contigo.

**Micheel García**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos al ingeniero Eider Niz Velásquez por ser nuestro director de tesis, y permitir el desarrollo de este proyecto en asociación con el instituto colombiano de petróleo (ICP).

Al ingeniero Róbinson Jiménez Díaz por su acompañamiento en el transcurso de esta investigación y permitirnos visitar la planta de inyección de polímero implementada en un campo lo que permitió tener un mayor entendimiento del funcionamiento de esta.

A cada uno de los ingenieros del ICP y supervisores de las diferentes plantas de inyección de polímero que nos brindaron información fundamental para poder llevar a cabalidad nuestro trabajo.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	25
1. GENERALIDADES DE UN PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS .....	27
1.1 PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS .....	27
1.2 POLÍMEROS UTILIZADOS EN LA INYECCIÓN .....	29
1.3 ESTABILIDAD DEL POLÍMERO.....	31
1.3.1 Degradación biológica .....	32
1.3.2 Degradación mecánica .....	32
1.3.3 Degradación química .....	32
1.3.4 Degradación térmica.....	33
1.4 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL POLÍMERO IMPLEMENTADO EN LA ALTERNATIVA DE DISEÑO DE INYECCIÓN .....	33
2. SELECCIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES PARA EL DISEÑO DE LAS FACILIDADES DE UN PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS A ESCALA PILOTO.....	36
2.1 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES .....	36
2.1.1 Concentración del polímero .....	36
2.1.2.1 Salinidad del agua .....	38
2.1.2.2 Concentración de hierro.....	38
2.1.2.3 Concentración de oxígeno en el agua .....	39
2.1.2.4 Iones Divalentes .....	39
2.1.2.5 Bacterias .....	39
2.1.2.6 Sólidos en suspensión .....	40
2.1.3 Tasa de inyección .....	40
2.1.4 Tamaño del bache .....	41
2.1.5 Espacio físico disponible.....	42

2.1.5.2 Unidad multifuncional.....	43
2.1.5.3 Unidad permanente o semipermanente .....	44
2.1.6 Disolución del polímero.....	45
2.1.7 Velocidad de la mezcla .....	46
2.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES DE INYECCIÓN .....	46
2.3 CASOS DE CAMPOS DONDE SE HA IMPLEMENTADO LA INYECCIÓN DE POLÍMERO A ESCALA PILOTO .....	47
2.3.1 Campo Corcobo Norte .....	47
2.3.2 Campo Mangala.....	48
3. DEFINICIÓN DE LOS EQUIPOS Y ACCESORIOS REQUERIDOS PARA EL PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMERO SEGÚN LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS .....	51
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMERO.....	51
3.2 FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE INYECCIÓN IMPLEMENTADA EN EL CAMPO A.....	54
3.3 NORMATIVIDAD UTILIZADA PARA LA PROPUESTA DE DISEÑO .....	56
3.3.1 Normatividad para líneas de flujo.....	57
3.3.2 Normatividad para bombas .....	63
3.3.3 Normatividad para tanques .....	65
3.4 EQUIPOS Y ACCESORIOS IMPLEMENTADOS EN LA ALTERNATIVA DE DISEÑO .....	66
3.4.1 Tanques de almacenamiento.....	66
3.4.2 Bombas centrífugas .....	67
3.4.3 Filtros .....	68
3.4.4 Sistema de disolución de polímero .....	70
3.4.5 Tanques de maduración .....	71
3.4.6 Bombas de cavidades progresivas .....	72
3.4.7 Mezclador estático .....	73
3.4.8 Bombas tríplex .....	74
3.4.9 Contenedor .....	75

3.4.10 Líneas de flujo y accesorios.....	76
3.5 RANGOS OPERACIONALES DE LOS EQUIPOS IMPLEMENTADOS .....	78
3.5.1 Bombas centrífugas .....	78
3.5.2 Bombas de cavidades progresivas .....	79
3.5.3 Bombas tríplex .....	79
3.5.4 Tanques de mezcla de polímero.....	80
3.5.5 Sistema de filtración.....	80
3.6 DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS PARA UN PLANTA DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS.....	81
3.7 SIMULACIÓN.....	82
3.7.1 Simuladores de procesos.....	83
3.7.2 Aspen Hysys .....	83
3.7.3 Simulación bombas centrífugas .....	85
3.7.4 Simulación bombas de cavidades progresivas .....	86
3.7.5 Simulación bombas tríplex .....	86
4. ESTUDIO FINANCIERO DE LA ALTERNATIVA DE DISEÑO PROPUESTA ...	89
4.1 COSTOS DE ADQUISICIÓN DE LA ALTERNATIVA DE DISEÑO .....	89
4.2 UNIDAD DE INYECCIÓN DE LA EMPRESA PRESTADORA DE SERVICIOS .....	97
4.3 EVALUACIÓN FINANCIERA .....	98
4.3.1 Valor presente neto (VPN).....	98
4.3.2 Tasa interna de interés de oportunidad (TIO) .....	98
4.3.3 Flujo de caja.....	99
4.3.3.1 Ingresos .....	99
4.3.3.2 Egresos.....	99
4.4 DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA .....	100
4.4.1 Análisis de ingresos .....	101
4.4.2 Análisis de egresos.....	102
4.4.3 Flujo de caja.....	103
4.4.4 Análisis y comparación del valor presente neto (VPN) .....	104

5. CONCLUSIONES .....	107
6. RECOMENDACIONES .....	108
BIBLIOGRAFÍA.....	109
ANEXOS .....	112

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Descripción proceso de inyección de polímeros.....	29
Figura 2. Estructura simplificada de poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM). .....	30
Figura 3. Unidad móvil de inyección de polímeros.....	43
Figura 4. Facilidades de inyección del campo Corcobo, Argentina.....	44
Figura 5. Unidad permanente de inyección de polímero.....	45
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de inyección de polímero campo Corcobo. ....	48
Figura 7. Esquema del sistema de mezcla e inyección de polímeros del campo Mangala. ....	50
Figura 8. Esquema típico de inyección de polímero .....	51
Figura 9. Proceso de inyección de polímero en el campo A. ....	55
Figura 10. Proceso de inyección de polímero del campo B. ....	56
Figura 11. Tanque de almacenamiento. ....	67
Figura 12. Bomba centrífuga. ....	68
Figura 13. Vasijas para filtros tipo cartucho, unidad de filtración primaria. ....	69
Figura 14. Vasijas para filtros tipo bola, unidad de filtración secundaria.....	70
Figura 15. Unidad tipo eductor.....	71
Figura 16. Tanque de maduración. ....	72
Figura 17. Bomba de cavidades progresivas.....	73
Figura 18. Mezclador estático.....	74
Figura 19. Bomba tríplex.....	75
Figura 20. Contenedor de 40 ft insonorizado.....	76
Figura 21. Plano de distribución de los equipos de una unidad de inyección. ....	82

Figura 22. Plano de distribución de los equipos de unidad de inyección dentro del contenedor.....	82
Figura 23. Simulación proceso de inyección campo A.....	85
Figura 24. Parámetros de simulación de la bomba centrífuga campo A.....	86
Figura 25. Parámetros de simulación de bombas de cavidades progresivas campo A.....	86
Figura 26. Simulación bomba tríplex para cada pozo inyector. ....	87
Figura 27. Simulación proceso de inyección campo B.....	88

## LISTA DE GRAFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1. Curva de la bomba centrífuga modelo 622 de la empresa Liquiflo.....	78
Gráfica 2. Flujo de caja neto alquilando una unidad de inyección de la empresa operadora y de la propuesta de diseño.....	104

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del polímero implementado en el campo A.....	33
Tabla 2. Propiedades físicas y químicas del polímero implementado en el campo B.....	34
Tabla 3. Composición del agua de captación del campo A. ....	40
Tabla 4. Parámetros y variables seleccionados.....	46
Tabla 5. Dimensiones y pesos de la tubería de acero forjado soldado y sin costura.....	59
Tabla 6. Rangos máximos permitidos de presión según la temperatura. ....	63
Tabla 7. Clasificación de las bombas centrifugas. ....	64
Tabla 8. Especificaciones bomba de la empresa PCM.....	79
Tabla 9. Especificaciones bomba tríplex.....	80
Tabla 10. Especificaciones de las unidades de filtración implementadas en el diseño. ....	81
Tabla 11. Rangos operacionales de los equipos. ....	81
Tabla 12. Requerimientos de potencia de las bombas simuladas. ....	88
Tabla 13. Costos de tuberías, válvulas y accesorios. ....	90
Tabla 14. Precios de las bombas seleccionadas para la alternativa de diseño. ....	93
Tabla 15. Costos de tanques y demás equipo que hacen parte de la alternativa de diseño. ....	93
Tabla 16. Costos de montaje. ....	95
Tabla 17. Costos de diseño. ....	96
Tabla 18. Costo total de la unidad de inyección propuesta.....	97
Tabla 19. Costos de alquiler de la unidad de inyección de la empresa prestadora de servicios y costos de químicos utilizados en el proceso de inyección. ....	97

Tabla 20. Escenarios para realizar la evaluación financiera. ....	101
Tabla 21. Ingresos totales para el escenario pronosticado por Ecopetrol S.A. ....	102
Tabla 22. Egresos totales anuales alquilando una unidad de inyección de la empresa prestadora de servicios. ....	103
Tabla 23. Egresos totales anuales implementando la alternativa de diseño. ....	103
Tabla 24. Comparación del VPN para un precio de crudo de 58,67 USD. ....	105
Tabla 25. Comparación del VPN para un precio de crudo de 78,67 USD. ....	105
Tabla 26. Comparación del VPN para un precio de crudo de 38,67 USD. ....	105
Tabla 27. Egresos totales anuales alquilando una unidad de inyección de la empresa prestadora de servicios. ....	127

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LOS TANQUES DE MADURACIÓN	112
ANEXO B DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE TUBERIA POR MEDIO DE LAS NORMAS ASME B31.3 Y ANSI B36 10/19	114
ANEXO C ESPÁRRAGOS SELECCIONADOS PARA LAS BRIDAS IMPLEMENTADAS UTILIZANDO EL SOFTWARE COMERCIAL PIPE DATA	118
ANEXO D COSTO DEL MONTAJE DE LA TUBERÍA SELECCIONADA PARA LA ALTERNATIVA DE DISEÑO	121
ANEXO E PRONÓSTICO DE LA PRODUCCIÓN DE PETROLEO INCREMENTAL DEL CAMPO A BAJO LA INYECCIÓN DE POLIMERO	122
ANEXO F CÁLCULOS REALIZADOS PARA HALLAR LOS INGRESOS Y EGRESOS PARA REALIZAR LA EVALUCIÓN FINANCIERA	123
ANEXO G FLUJO DE CAJA PARA LOS ESCENARIOS PESISMISTAS CON PRECIO DE CRUDO DE 38,67 USD/Bbl	126
ANEXO H FLUJO DE CAJA PARA LOS ESCENARIOS OPTIMISTAS CON PRECIO DE CRUDO DE 78,67 USD/Bbl	129

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ANSI</b>	American National Standards Institute
<b>API</b>	American Petroleum Institute
<b>ASME</b>	American Society of Mechanical Engineers
<b>ASTM</b>	American Section of the International for Testing Materials
<b>Bbl</b>	Barril
<b>BPD</b>	Barriles por Día
<b>CAPEX</b>	Capital Expenses
<b>cP</b>	Centipoise
<b>EOR</b>	Enhanced Oil Recovery
<b>ft</b>	Pies
<b>Hp</b>	Horse Power
<b>OPEX</b>	Operating Expenditure
<b>P</b>	Presión
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>RPM</b>	Revoluciones por Minuto
<b>SM</b>	Solución madre
<b>USD</b>	Dólar
<b>UND</b>	Unidad
<b>TIO</b>	Tasa interna de interés de oportunidad

## GLOSARIO

**Aspen HYSYS:** Es un simulador de procesos orientado a la industria petrolera utilizado para modelar matemáticamente procesos químicos, desde operaciones unitarias hasta plantas químicas completas y refinerías

**Barril:** Unidad de volumen. Un barril equivale a 42 galones.

**Bomba:** Equipo cuya función es impulsar o mover fluidos.

**Brida:** Elementos metálicos que permiten la unión de líneas de flujo, equipos, válvulas y accesorios.

**Campo petrolero:** Zona con abundancia de pozos de los que se extrae hidrocarburos del subsuelo.

**ECOPETROL:** Compañía colombiana de petróleo.

**Esparrago:** Elemento metálico que posee rosca en sus dos extremos, con el objetivo de asegurar piezas acopladas.

**Factor de recobro:** Cantidad de hidrocarburos recuperables de un yacimiento, normalmente expresada como un porcentaje.

**Filtros:** Equipo el cual es atravesado por un fluido con el fin de remover impurezas.

**Inyección de polímero:** Método de recobro químico que se fundamenta en el incremento de viscosidad del fluido de inyección (agua) mediante la adición de polímero.

**Permeabilidad:** Capacidad de una roca para permitir el paso de fluidos a través de ella.

**Polímero:** Macromoléculas constituidas por unidades más simples llamadas monómeros

**Porosidad:** El porcentaje de volumen de poros o espacio poroso, o el volumen de roca que puede contener fluidos.

**Pozo inyector:** Un pozo en el que los fluidos se inyectan en vez de producirse, siendo el objetivo principal mantener la presión de yacimiento.

**Recobro mejorado:** Técnicas de extracción de petróleo que busca aumentar el factor de recobro de un yacimiento mediante la implementación de diferentes tecnologías.

**Relación de movilidades:** cociente de la movilidad de la fase desplazante y la movilidad de la fase desplazada. Esta propiedad puede tener un efecto significativo en la eficiencia de desplazamiento microscópica, en caso de que  $M > 1$  se tendrá que el fluido desplazante se moverá más rápido que el fluido desplazado haciendo que la eficiencia de barrido se vea disminuida. Este fenómeno es conocido como digitación viscosa.

**Schedule:** Se refiere al espesor de pared para cada diámetro de tubería.

**Simulador de procesos:** Softwares dedicados fundamentalmente a mejorar y optimizar los procesos industriales.

**Tubería:** Conducto tubular que puede transportar fluidos.

**Viscosidad:** Propiedad que tienen los fluidos que indica su resistencia al flujo.

**Yacimiento:** Cuerpo rocoso del subsuelo que tiene un grado suficiente de porosidad y permeabilidad para almacenar y transmitir fluidos.

## RESUMEN

**TÍTULO: DISEÑO OPTIMIZADO A ESCALA PILOTO DE FACILIDADES PARA LA INYECCIÓN DE POLÍMERO COMO MÉTODO DE RECOBRO MEJORADO EN ECOPETROL S. A\***

**AUTORES: GAUDY VANESSA CÁCERES BLANCO  
MICHEEL FABIÁN GARCÍA NIÑO\*\***

**PALABRAS CLAVES:** Recobro mejorado, viscosidad, control de movilidad, facilidades de superficie, inyección de polímero.

### **DESCRIPCIÓN:**

La inyección de polímeros es un proceso de recobro mejorado que fue desarrollado para realizar mejoras en la inyección de agua convencional. Esta técnica se enfoca en el aprovechamiento de la viscosidad, propiedad que las soluciones poliméricas tienen la capacidad de incrementar, para controlar la movilidad de los fluidos en la formación. Una reducción en la relación de movilidades conlleva a un mejor barrido en el yacimiento, lo que a su vez resulta en un mayor desplazamiento de petróleo. Aunque es un proceso cuya mayor complejidad se observa en el subsuelo, el diseño de las facilidades juega un papel fundamental a la hora de la ejecución de la inyección en campo, ya que de acuerdo con los parámetros y variables que se establezcan, se deberán seleccionar los equipos óptimos para sostener una alta eficiencia y cumplir con los objetivos establecidos.

En este trabajo se propone una alternativa de diseño de facilidades de inyección de polímero para dos campos operados por Ecopetrol donde se lleva a cabo este proceso, basado en las normas API, ASTM y ANSI, utilizando como herramienta el simulador comercial ASPEN HYSYS, con el cual es posible analizar y corroborar las condiciones de operación de los equipos que se implementan en esta. Se desarrolla un estudio financiero al diseño propuesto para determinar su viabilidad económica, buscando de esta forma cumplir con el objetivo de reducir costos, lo cual posibilitaría la promesa de valor de una expansión del proceso en campo, operado por Ecopetrol.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Eider Niz Velásquez Ph. D., Codirector: Róbinson Jiménez

## ABSTRACT

**TITLE:** OPTIMIZED DESIGN OF A PILOT SCALE OF FACILITIES FOR THE POLYMER FLOODING AS AN IMPROVED RECOVER METHOD IN ECOPETROL S. A\*

**AUTHORS:** GAUDY VANESSA CÁCERES BLANCO  
MICHEEL FABÍAN GARCÍA NIÑO\*\*

**KEYWORDS:** Enhanced oil recovery, viscosity, mobility control, surface facilities, polymer flooding.

### DESCRIPTION:

Polymer flooding is an improved recovery process that was developed to make improvements in conventional water injection. This technique focuses on the use of viscosity, property that polymer solutions have the ability to increase, to control the mobility of fluids in the formation. A reduction in the ratio of mobilities leads to a better sweep in the reservoir, which in turn results in a greater displacement of oil. Although it is a process whose greater complexity is observed in the subsoil, the design of the facilities plays a fundamental role at the time of the execution of the injection in the field, since according to the parameters and variables that are established, it should be selected the optimal equipment to maintain a high efficiency and meet the established objectives.

In this degree work an alternative design of polymer injection facilities is offered for two fields operated by Ecopetrol where this method of recovery is carried out based on the API, ASTM and ANSI standards, using the ASPEN HYSYS commercial simulator as a tool, with which it is possible to analyze and corroborate the conditions of operation of the equipment that is implemented in this. A financial study is carried out on the proposed design to determine its economic viability, thus seeking to meet the objective of reducing costs, which would enable the promise of value of an expansion of the process in the field, operated by Ecopetrol.

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of Physical Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Eider Niz Velásquez Ph. D., Codirector: Róbinson Jiménez

## INTRODUCCIÓN

El recobro mejorado de petróleo (EOR) consiste en una serie de técnicas de inyección de agentes especializados al nivel del volumen de yacimiento para extraer cantidades mayores de hidrocarburo. Este concepto resulta atractivo para las empresas operadoras por cuanto se trata de un recurso asequible. Sin embargo, ha encontrado varios retos relacionados con los costos operativos y de capital. Dentro de estos métodos EOR se encuentran los procesos químicos, grupo al cual pertenece la inyección de polímero. De forma general, en este proceso los polímeros son agregados al fluido de inyección (agua) para incrementar su viscosidad y de esta manera, mejorar la relación de movilidades entre el fluido desplazado (crudo) y el desplazante, así como también la eficiencia de desplazamiento volumétrico.

El éxito de una inyección de polímero depende de la selección adecuada del polímero, la calidad del agua y la estrategia que se use para garantizar la estabilidad del polímero en el yacimiento; adicionalmente las facilidades de superficie son un parámetro importante para llevar a cabo un proceso de inyección óptimo y eficiente.<sup>1</sup> En este trabajo se hace énfasis en las facilidades de inyección, que generalmente se diseñan como una unidad funcional en un ciclo cerrado de mezcla, dilución, bombeo e inyección final en el pozo. Las facilidades incluyen almacenamiento de agua, sistema de potencia y unidad de inyección equipada con un sistema de dosificación de polímero, mezclado y tanques para maduración, hidratación y

---

<sup>1</sup> THOMAS, A.; GAILLARD, N.; FAVERO, C. Some key features to consider when studying acrylamides- based polymers for chemical enhanced oil recovery. Oil & Gas Science and Technology- Revue d'Lfp Energies nouvelles, 2012.

activación del polímero, bombas de desplazamiento positivo y un sistema de flujo de nitrógeno.<sup>2</sup>

Partiendo de las facilidades implementadas en dos campos (campo A y campo B) para la inyección de polímero, y teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, se presenta un diseño de inyección, al cual se le realizó una evaluación financiera para determinar su viabilidad económica. Posteriormente, se comparó frente al propuesto por una empresa prestadora de servicios y se estableció la mejor opción desde el punto de vista financiero para Ecopetrol y se analizó la rentabilidad que tendría implementar el diseño propuesto.

---

<sup>2</sup> GARCIA CASTRO, Ruben, et al. Inyección de Polímero para el Mejoramiento de la Eficiencia de Barrido Volumétrico en Procesos de Inyección de agua. Ciencia, Tecnología y Futuro, 2016, Vol. 6, no 3.

# 1. GENERALIDADES DE UN PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS

## 1.1 PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS

La inyección de polímero es un proceso de recobro mejorado perteneciente a la familia del recobro químico. Es una tecnología eficiente para yacimientos de aceites viscosos, ya que actúa para mejorar la relación de movilidades entre el aceite y el agua.

Los objetivos principales de una inyección de polímero son: incrementar la eficiencia de barrido volumétrica de los procesos de inyección de agua tanto maduros como nuevos, lograr un aumento en el factor de recobro y obtener un frente de desplazamiento de inyección más uniforme comparado con una inyección de agua convencional. Esto se obtiene cuando se realiza una mejora a la relación de movilidades (**M**) expresada matemáticamente mediante la **Ecuación 1**.

**Ecuación 1.** Relación de movilidades.

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = \frac{k_w \mu_o}{k_o \mu_w} = \frac{k_{rw} \mu_o}{k_{ro} \mu_w}$$

Donde, en la expresión final:

$\lambda_w$  = Movilidad de la fase desplazante (agua)

$\lambda_o$  = Movilidad de la fase desplazada (aceite)

$k_w$  = Permeabilidad efectiva al agua

$k_o$  = Permeabilidad efectiva al aceite

$k_{ro}$  = Permeabilidad relativa al aceite

$k_{rw}$  = Permeabilidad relativa al agua

$\mu_w$  = Viscosidad del agua

$\mu_o$ = Viscosidad del aceite

De la definición de relación de movilidades, se puede apreciar que en el caso típico de viscosidad del agua menor a la del aceite,  $M$  será mayor que 1, lo cual hará que ésta tienda a generar digitación viscosa dada la mayor velocidad de la fase desplazante, dejando atrás áreas del yacimiento sin contactar. Este fenómeno redundará en una baja eficiencia volumétrica, y, en consecuencia, en un menor factor de recobro. Para contrarrestar este efecto, surge como alternativa el proceso de inyección de polímero, que consiste en añadir al agua de inyección un polímero con características viscosificantes, con lo cual se aumenta la viscosidad de la fase desplazante, disminuyendo así la relación de movilidades.<sup>3</sup> Es así como se puede incrementar el factor de recobro respecto a un desplazamiento secundario por inyección de agua. Por tal razón, es común hablar del proceso de inyección de polímero como inyección de “agua mejorada”.

Los puntos claves en el diseño de un proceso de inyección de polímero, son la selección del polímero y su concentración. En la selección del polímero se debe considerar que este sea inyectable, sobrevivan sus características reológicas en el tiempo, se mueva a las condiciones del yacimiento y promueva la viscosidad requerida.<sup>4</sup>

En la mayoría de los casos, el agua de formación afecta críticamente la solución polimérica. Por esta razón antes de inyectar la solución polimérica se inyecta una solución de agua de baja salinidad denominada pre-flujo, con el fin de preparar la zona de yacimiento a ser contactada, previniendo así alteraciones en la composición química del polímero. Existen dos escenarios de inyección que se han implementado en el campo. El primero consiste en inyectar una concentración

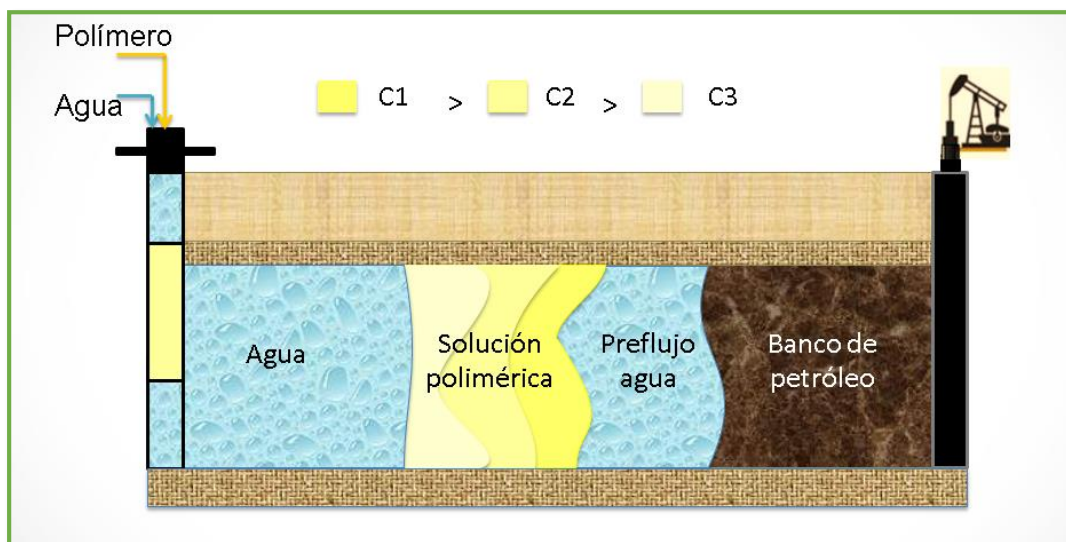
---

<sup>3</sup> JIMENEZ DIAZ, Robinson, et al. Análisis comparativo de procesos de inyección de polímeros ejecutados en Colombia. Bogotá, Acipet, 2017.

<sup>4</sup> CHANG, Harry L., et al. Polymer flooding technology yesterday, today, and tomorrow. Journal of Petroleum Technology, 1978, vol. 30, no 08, p. 1,113-1,128.

constante de polímero y el segundo consiste en inyectar la solución polimérica continuamente a una concentración inicial durante un periodo límite, posteriormente dicha concentración se reduce de manera gradual para disminuir el contraste de viscosidades entre la solución polimérica inyectada y el agua detrás de esta como se observa en la **Figura 1**, también, este gradiente de concentración está orientado a reducir los costos, pues se disminuye la cantidad de químico que se requiere.

**Figura 1. Descripción proceso de inyección de polímeros.**



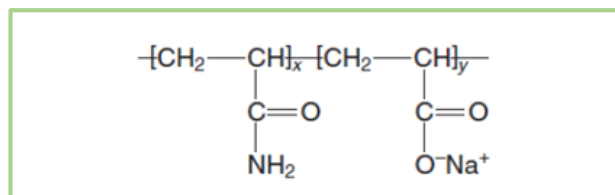
## 1.2 POLÍMEROS UTILIZADOS EN LA INYECCIÓN

Dos tipos de polímeros han sido usados para aplicaciones en campo: polisacáridos como la goma xanthan y poliacrilamidas, comúnmente en su forma parcialmente hidrolizada, (HPAM).<sup>5</sup> Este último es el tipo de polímero más usado en aplicaciones EOR debido a su menor costo, mayor tolerancia a la temperatura, mejor inyectividad y disponibilidad. La poliacrilamida se adsorbe sobre la superficie de los minerales;

<sup>5</sup> MANRIQUE, Eduardo Jose, et al. EOR field experiences in carbonate reservoirs in the United States. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007, vol. 10, no 06, p. 667-686.

es por esto que el polímero es parcialmente hidrolizado para reducir la adsorción mediante la reacción de la poliacrilamida con una base como el hidróxido de sodio, hidróxido de potasio o carbonato de sodio. La hidrólisis entonces convierte algunos de los grupos amida ( $\text{CONH}_2$ ) a grupos carboxilo ( $-\text{COO}-$ ), como se muestra en la **Figura 2**

**Figura 2. Estructura simplificada de poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM).**



**Fuente:** SHENG, J., 2011. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery. Theory and practice. Elsevier Inc.

En agua fresca, debido a la repulsión de las cargas del grupo carboxílico, las cadenas flexibles de la estructura de HPAM se estiran, elevando la viscosidad de la solución. En contraste, en agua salada las cargas son neutralizadas o cubiertas y las cadenas flexibles de la estructura de HPAM son comprimidas, resultando en soluciones de baja viscosidad.<sup>6</sup> Levitt & Pope reportaron que polímeros de acrilamida hidrolizada no deberían precipitar en reservorios con temperatura hasta de 100 °C y agua con contenidos de calcio por debajo de 200 ppm. Para altas concentraciones de calcio y elevadas temperaturas han evaluado a escala de laboratorio copolímeros de acrilamida mejorados con metaborato de sodio y carbonato de sodio (AMPS) que desarrollaron mayor estabilidad en su viscosidad.<sup>7</sup>

Para altos esfuerzos de corte, las estructuras organizadas en redes de polímeros son alteradas, y de esta forma la viscosidad es significativamente reducida. Sin

<sup>6</sup> SHENG, J. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery, Teory and Practice. Oxford, 2011. p. 102.  
<sup>7</sup> LEVITT, David, et al. Selection and screening of polymers for enhanced-oil recovery. En SPE Symposium on Improved Oil Recovery. Society of Petroleum Engineers, 2008

embargo, cuando se reduce el esfuerzo de corte aplicado, la red estructural del polímero se restaura y la viscosidad se incrementa nuevamente.<sup>8</sup> La reversibilidad de cizalla es altamente beneficiosa en aplicaciones en campo para recuperación mejorada de petróleo ya que mejora la inyectividad en el pozo debido al efecto de adelgazamiento por cizalla en los perforados y en las áreas cercanas a la cara del pozo. Lejos de la cara del pozo, la velocidad de flujo es reducida y la viscosidad es restaurada.<sup>9</sup>

Broseta y otros autores concluyeron que la presencia de aceite residual disminuye la adsorción de polímero en medios porosos con mojabilidad al aceite; se observó una tendencia inversa en medios porosos con mojabilidad preferente al agua.<sup>10</sup> En consecuencia, recomiendan evaluar previamente la mojabilidad del yacimiento en proyectos de inyección de polímeros. Otros investigadores concluyen que la inyección de polímeros puede reducir la permeabilidad relativa de la fase acuosa.<sup>11</sup> Por su parte, Huh & Pope, observaron que la saturación de aceite residual es menor, después de un proceso de inyección de polímero que después de un proceso análogo de inyección de agua.<sup>12</sup>

### **1.3 ESTABILIDAD DEL POLÍMERO**

Para ser eficaces, las soluciones poliméricas deben permanecer estables durante un tiempo considerable a condiciones de yacimiento. Los polímeros son sensibles

---

<sup>8</sup> LUO, P. Y., et al. Evaluation of a hydrophobically associative polymer in Daqing ASP flooding. PGODD, 2001, vol. 20, no 6, p. 2.

<sup>9</sup> SHENG. Op. cit., p. 103.

<sup>10</sup> BROSETA, Daniel, et al. Polymer Adsorption/Retention in porous media: Effects of core wettability on residual oil. SPE Advanced Technology Series, 1995, vol. 3, no 01, p. 103-112.

<sup>11</sup> BARREAU, P., et al. An experimental and numerical study of polymer action on relative permeability and capillary pressure. Petroleum Geoscience, 1999, vol. 5, no 2, p. 201-206.

<sup>12</sup> HUH, Chun, et al. Residual oil saturation from polymer floods: laboratory measurements and theoretical interpretation. En SPE Symposium on Improved Oil Recovery. Society of Petroleum Engineers, 2008.

a las degradaciones mecánicas, químicas y biológicas, entre otras. Estos tipos de degradación pueden prevenirse o minimizarse utilizando equipos y técnicas especiales.

**1.3.1 Degradación biológica** La degradación biológica se refiere a la descomposición microbiana de las macromoléculas de los polímeros por bacterias durante el almacenamiento o en el yacimiento. Aunque la degradación biológica es más frecuente para los biopolímeros, también puede ocurrir para los polímeros sintéticos. La HPAM (Poli-acrilamida parcialmente hidrolizada) es un tipo de polímero que puede proporcionar nutrición a las bacterias reductoras de sulfato.<sup>13</sup> Un método universal para abordar la degradación biológica es usar biocidas (por ejemplo, formaldehído).

**1.3.2 Degradación mecánica** La degradación mecánica describe la ruptura de una molécula como resultado de tensiones de cizallamiento en la macromolécula en la región de alto flujo cerca del pozo. Este es un efecto a corto plazo en y alrededor de la perforación, en el yacimiento cerca del pozo, y en algunos de los equipos de manejo de polímeros, estranguladores y otras estructuras. Esta degradación puede tener un efecto dramático en la reducción de la viscosidad de la solución de polímero. Para reducir el corte mecánico, las bombas de tornillo se utilizan para transportar la solución de polímero y las bombas de émbolo se utilizan para inyectar solución de polímero a altas presiones.

**1.3.3 Degradación química** Muchos factores causan la degradación química pero los dos más importantes son la oxidación y los efectos de iones férricos. Debido a esto se requieren sustancias que minimicen la cantidad de oxígeno en la solución como el hidrosulfito de sodio, el cual a bajas concentraciones tiene la capacidad de eliminar gran parte del oxígeno presente, en tanto se aplique al agua de inyección

---

<sup>13</sup> LUO, et al. Op. cit., p. 3.

antes que el polímero. La temperatura juega un rol importante en este tipo de degradación pues cumple el papel de catalizador, por lo que cuanto mayor sea, mayor será el efecto de la destrucción molecular por causas químicas.

Cuando hay presencia de oxígeno,  $Fe^{+2}$  se oxida a  $Fe^{+3}$ , liberando  $O^{-2}$  que se encarga de romper las cadenas de HPAM reduciendo la viscosidad significativamente, por lo que se recomienda controlar la concentración de  $Fe^{+2}$  por debajo de 0.5 mg/L. <sup>14</sup>

### 1.3.4 Degradación térmica

## 1.4 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL POLÍMERO IMPLEMENTADO EN LA ALTERNATIVA DE DISEÑO DE INYECCIÓN

En las siguientes **Tabla 1** y **2**, están descritas las propiedades físicas y químicas de las poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas, desarrolladas por la empresa prestadora de servicios, siendo los polímeros usados en el proceso de inyección en los campos de estudio y los utilizados para la propuesta de diseño.

**Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del polímero implementado en el campo A.**

VARIABLE	VALOR
Forma	Sólido granular
Color	Blanco
Olor	Ninguno
Carácter iónico	Aniónico
pH	5 - 9 @ 5 g/L
Peso molecular	6 millones de Dalton

<sup>14</sup> SHENG, James J., et al. Status of polymer-flooding technology. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2015, vol. 54, no 02, p. 116.

Punto / rango de fusión (° C)	> 150
Punto de inflamación (° C)	No aplica
Punto de ebullición (° C)	No aplica
Temperatura de autoignición (° C)	No aplica
Presión de vapor (mm Hg)	No aplica
Densidad aparente aproximada	0,6-0,9
Concentración de trabajo recomendada (g/l)	5
Concentración máxima de uso (g/l)	15
Tiempo de disolución en agua @ 5 g/l, 25°C	90
Estabilidad de la solución DI (días)	1
Temperatura de almacenamiento (° C)	0-35
Vida útil (meses) *	12
Solubilidad en agua	Completamente soluble
Coefficiente de partición	-2

**Fuente:** Carta de seguridad del polímero, proporcionada por la empresa prestadora de servicios.

**Tabla 2. Propiedades físicas y químicas del polímero implementado en el campo B.**

<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>
Forma	Sólido granular
Color	Blanco
Olor	Ninguno
Carácter iónico	Aniónico
pH	5 - 9 @ 5 g/L
Peso molecular	5 millones de Dalton
Punto / rango de fusión (° C)	> 150
Punto de inflamación (° C)	No aplica
Punto de ebullición (° C)	No aplica
Temperatura de autoignición (° C)	No aplica
Presión de vapor (mm Hg)	No aplica
Densidad aparente aproximada	0,6-0,9
Concentración de trabajo recomendada (g/l)	5
Concentración máxima de uso (g/l)	15
Tiempo de disolución en agua @ 5 g/l, 25°C	60
Estabilidad de la solución DI (días)	1

Temperatura de almacenamiento (° C)	0-35
Vida útil (meses) *	12
Solubilidad en agua	Completamente soluble
Coefficiente de partición	-2

**Fuente:** Carta de seguridad del polímero, proporcionada por la empresa prestadora de servicios.

## **2. SELECCIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES PARA EL DISEÑO DE LAS FACILIDADES DE UN PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS A ESCALA PILOTO**

En este capítulo se describen los parámetros y variables claves para tener en cuenta en el diseño de facilidades de inyección. Además, con base en las condiciones operacionales de los campos de estudio se definen cada uno de estos.

### **2.1 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES**

**2.1.1 Concentración del polímero** Es la cantidad en fracción de masa del polímero que es disuelta en la solución polimérica. La viscosidad es la propiedad más relevante de la solución polimérica a utilizar y es directamente proporcional a la concentración. La relación de movilidad a su vez disminuye con mayor concentración, logrando de esta forma aumentar la recuperación de petróleo.

Es importante sensibilizar esta variable para encontrar la concentración que brinde resultados óptimos del proceso de desplazamiento. La concentración a inyectar máxima razonable puede ser determinada teniendo en cuenta el incremento de presión permitido para la inyección de polímero de cada inyector, ya que la presión incremental es función de la viscosidad del fluido inyectado.

Conociendo la concentración de polímero a utilizar en el proceso se puede determinar la dimensión de la tolva, de los tanques de almacenamiento y mezcla del polímero, así como las revoluciones por minuto requeridas de los agitadores de los tanques. Así mismo, entre mayor sea la concentración mayor es la presión de inyección afectando la potencia de las bombas.

Para preparar la solución concentrada, se debe homogenizar agua con el polímero en un tanque de mezcla. La concentración del químico en este proceso es un factor fundamental que se debe tener en cuenta con el fin de cumplir las condiciones finales de inyección, es decir una concentración específica dado un volumen diario de inyección. En la **Ecuación 2**, se presenta el cálculo necesario para determinar la concentración que debe ir en el tanque de mezcla para cumplir dichos requerimientos.

$$\text{ppm de los tanques de mezcla} = \frac{\frac{\text{Libras polimero/día}}{\text{Ciclos/día}} * 2853}{\text{Volumen util del tanque}}$$

De la **Ecuación 2**, los ciclos por día o ciclos de inyección hacen referencia al número de veces por día que los tanques de mezcla suministran solución madre a las bombas de polímero.

**2.1.2 Calidad del agua** Generalmente se requiere de una gran cantidad de agua para todos los procesos de inyección química y la calidad del agua es uno de los factores más importante para el éxito del proceso EOR. La mala calidad del agua puede conducir a una utilización menos eficiente de los productos químicos y a una pobre capacidad de desplazamiento o barrido. En algunos casos, pueden ser necesarios productos químicos tales como biocidas, eliminadores de oxígeno y productos químicos estabilizadores de polímeros para minimizar la degradación del polímero.

El agua fuente viene generalmente de la corriente de producción después de la separación y del tratamiento o de una fuente natural tal como río, lago o acuíferos. Minerales, microorganismos, sólidos en suspensión (SS), compuestos orgánicos y productos químicos de tratamiento pueden estar presentes en el agua de origen y

necesitan ser eliminados. Las prácticas comunes en los procesos de tratamiento de agua se resumen a continuación.

**2.1.2.1 Salinidad del agua** El agua empleada para la preparación de soluciones poliméricas debe ser estudiada previamente para determinar su compatibilidad con el yacimiento. Debe utilizarse agua con la menor salinidad para la mezcla de la solución de polímero. Si se usa agua de producción con mayor salinidad para preparar la solución polimérica, el costo del polímero se incrementará porque se necesita más polímero para lograr la misma viscosidad.<sup>15</sup> Ayirala y otros investigadores presentaron resultados utilizando agua de baja salinidad para mezclar la solución de polímero de modo que se necesita una baja concentración de polímero para lograr la viscosidad objetivo en comparación con el uso de agua con alta salinidad. Sus datos indican un consumo de polímero aproximadamente 5 a 10 veces menor usando agua de baja salinidad.<sup>16</sup>

**2.1.2.2 Concentración de hierro** La mayoría de las salmueras de campo contendrán hierro ferroso (Fe ++) o hierro férrico (Fe +++) de la contaminación de la tubería de acero o de la ocurrencia natural. Se sabe que el hierro en el agua puede causar degradación del polímero especialmente con la presencia de oxígeno a temperaturas altas. En el diseño de las instalaciones para inyecciones químicas, se recomienda que el contenido de hierro sea inferior a 0,5 ppm.<sup>17</sup> Puede usarse una simple unidad de intercambio de iones para eliminar el hierro en el agua de preparación antes de la dispersión y mezcla de polímeros.

---

<sup>15</sup> NIU, J. G., et al. Research and development of polymer enhanced oil recovery. Research and development of enhanced oil recovery in Daqing. Petroleum Industry Press, Beijing, 2006, p. 227-325.

<sup>16</sup> AYIRALA, Subhash C., et al. A designer water process for offshore low salinity and polymer flooding applications. En SPE Improved Oil Recovery Symposium. Society of Petroleum Engineers, 2010

<sup>17</sup> CHANG, Harry Lo, et al. Chemical EOR Injection Facilities-From Pilot Test to Field-Wide Expansion. En SPE Enhanced Oil Recovery Conference. Society of Petroleum Engineers, 2013. p.

**2.1.2.3 Concentración de oxígeno en el agua** El oxígeno disuelto en aguas de preparación de soluciones poliméricas es crítico para la degradación del polímero en el yacimiento. Por lo tanto, para minimizar el impacto de la degradación en la viscosidad del polímero y consecuentemente el rendimiento, el contenido de oxígeno disuelto debe mantenerse lo más bajo posible, menor a 10 partes por billón (ppb)<sup>18</sup>. Debido a esto, el sistema de inyección debe ser cerrado para evitar corrientes de oxígeno que puedan acelerar las pérdidas de viscosidad de la solución; adicionalmente, sobre los tanques de almacenamiento de agua y equipos de preparación de la solución polimérica se deben instalar sistemas de *blanketing* con nitrógeno, para mantener el sistema inerte a la presencia de oxígeno. Sin embargo, a baja temperatura, el efecto del oxígeno disuelto sobre la viscosidad de la solución de polímero no es significativo, y la solución de polímero puede ser estable durante mucho tiempo.

**2.1.2.4 Iones Divalentes** En presencia de iones divalentes, el comportamiento de la viscosidad se determinará en gran medida por su concentración. A medida que aumenta la hidrólisis, existe más ácido acrílico en la solución. Las poliacrilamidas hidrolizadas (grupos carboxilo negativos) interactúan fuertemente con cationes metálicos divalentes tales como  $\text{Ca}^{+2}$   $\text{Mg}^{+2}$ . Este fenómeno se asocia comúnmente con la reducción de la viscosidad, formación de geles o precipitados en tuberías

**2.1.2.5 Bacterias** Generalmente el agua de producción contiene bacterias las cuales deben ser removidas. Las bacterias en general tienen dificultad en utilizar los polímeros en su estado inicial como fuente de carbono. A medida que los polímeros se degradan por causas químicas y mecánicas, generan cadenas cortas de fácil utilización por las bacterias, por lo que es posible observar desarrollos bacteriológicos. Esto también depende de otros factores, tales como temperatura, tipo y cantidad de población bacteriana contaminante, presencia de otros nutrientes

---

<sup>18</sup> Ibid., p. 3

(N<sub>2</sub>, etc.). Normalmente se requieren bactericidas para prevenir estos ataques microbianos.

**2.1.2.6 Sólidos en suspensión** Los sólidos en suspensión afectan principalmente la inyectividad del agua al reservorio. Estos no afectan a la viscosidad de la solución de forma significativa; salvo el caso de sólidos compuestos por hierro o sulfuros, que pueden degradar químicamente el polímero. Pueden aplicarse métodos de control como filtración, inhibidores entre otros. Se debe manejar un total de sólidos suspendidos (TSS) por debajo de 10 ppm.<sup>19</sup>

En la **Tabla 2**, se puede observar la composición del agua utilizada para la inyección de polímero en el campo A.

**Tabla 3. Composición del agua de captación del campo A.**

COMPONENTE	CONCENTRACIÓN (ppm)
<b>Total, sólidos suspendidos</b>	275
Cl <sup>-</sup>	5.73
Br <sup>-</sup>	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.55
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3.47
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	119
Na <sup>+</sup>	105.2
K <sup>+</sup>	7.13
Mg <sup>+</sup>	2.61
Ca <sup>+</sup>	7.38

**Fuente:** GHENEIM, Thaer, et al. Enhanced Oil Recovery in a High Stratigraphic Complex Reservoir: Casabe Project Case Study. En SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Society of Petroleum Engineers, 2017.

**2.1.3 Tasa de inyección** La velocidad de inyección debe depender principalmente de la inyectividad del yacimiento y de la presión de inyección permitida, para reducir

<sup>19</sup> Ibid., p. 5

la degradación mecánica, la velocidad de inyección debe ser lenta, pero, una mayor tasa de inyección puede reducir la degradación química como también acelerar el proyecto, mejorando así la economía de este.<sup>20</sup>

**2.1.4 Tamaño del bache** Se refiere al volumen poroso a inyectar en el yacimiento, que normalmente está entre el 5 y el 40 % de solución polimérica. Este parámetro tiene influencia directa en el tiempo de duración de la inyección de polímero.

En el proceso de inyección se utilizan tamaños de baches finitos y varios métodos para elegir el tamaño de bache apropiado han sido utilizados.

Este parámetro de diseño afecta profundamente el costo, la economía, y el rendimiento de un proyecto de esta índole, debido a que, a mayor tamaño del bache, mayores son los costos asociados al proceso. En el caso de un gran tamaño de bache de solución polimérica, al agua de desplazamiento se le hará más difícil disolverlo y se logrará un mayor control en la producción de agua, aumentando de esta forma la producción de aceite. Pero si se tiene un bache extremadamente pequeño no será efectivo, resultando casi igual a una inyección de agua convencional.<sup>21</sup> Además, conocer el bache a inyectar es de gran importancia para poder dimensionar y seleccionar los equipos adecuadamente con el fin de que estos puedan manejar e inyectar con la mayor eficiencia los químicos al yacimiento.

En el diseño de un proceso óptimo de inyección de polímeros se deben tener en cuenta la tasa de inyección, la naturaleza del polímero y las características de la formación donde se va a inyectar.

---

<sup>20</sup> SHENG, et al. Op. cit., p. 118.

<sup>21</sup> Ibid., p. 120

Los resultados de la aplicación del proceso en diversos proyectos a nivel mundial muestran que el tamaño del bache debe ser por lo menos del 10% del volumen poroso del yacimiento.

**2.1.5 Espacio físico disponible** A partir del espacio físico disponible se puede seleccionar el tipo de unidad de inyección que se utilizará para el desarrollo del proceso de recobro químico. Para dicha selección se debe tener en cuenta el número de pozos inyectoros en el proyecto y el número de químicos involucrados en el sistema.

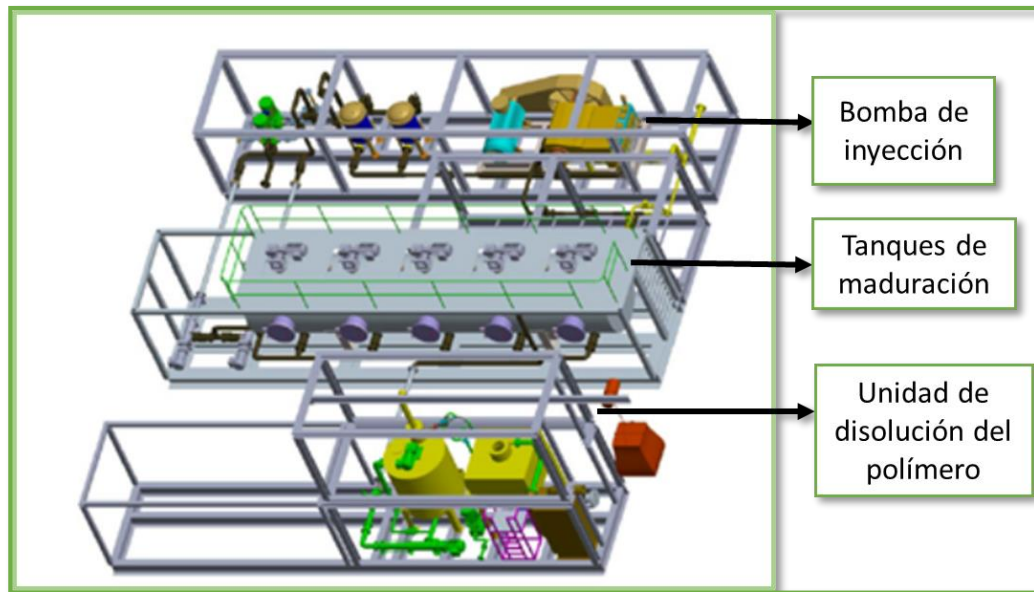
Este tipo de unidad está diseñada para suplir las necesidades de inyección a pequeña escala de una prueba piloto. Los criterios claves requeridos para el diseño de tal unidad son el número de pozos inyectoros (1 a 4 pozos de inyección)<sup>22</sup>, la presión de inyección, la tasa de inyección, y el número y tipo de químicos a ser inyectados. Es relativamente simple y se puede ensamblar y desmontar fácilmente cuando sea necesario y se puede operar en áreas remotas. El sistema puede estar diseñado para funcionar de manera totalmente automática o funcionar manualmente.

La **Figura 3**, es un ejemplo de este tipo de unidad con una tasa de inyección máxima de 5.000 barriles por día (BPD) a una presión máxima de 2.000 psi con una bomba de inyección triplex de alta presión y cuatro válvulas de bajo corte (LSV) para la distribución del fluido de inyección en cada pozo.

---

<sup>22</sup> CHANG, et al. Op. cit. p. 7.

**Figura 3. Unidad móvil de inyección de polímeros.**



**Fuente:** CHANG, Harry Lo, et al. Chemical EOR Injection Facilities-From Pilot Test to Field-Wide Expansion. En SPE Enhanced Oil Recovery Conference. Society of Petroleum Engineers, 2013. P. 10.

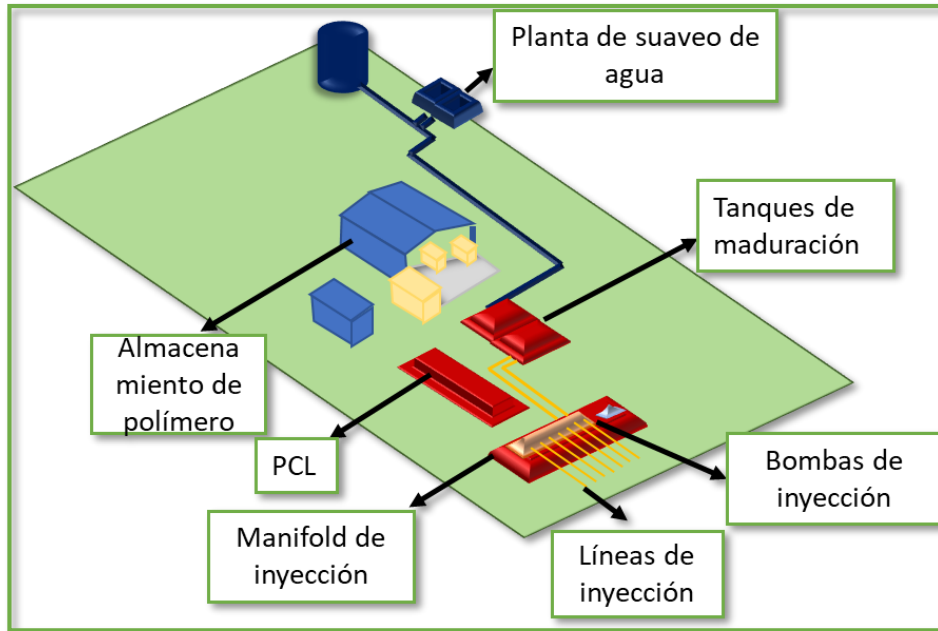
**2.1.5.2 Unidad multifuncional** Este tipo de instalación de inyección se utiliza para operaciones a mediano plazo. Es la más adecuada para pruebas piloto de inyecciones múltiples, en tierra o costa afuera y operaciones más complejas en proyectos multi-pozo, calentamiento de los fluidos de inyección, y manejo de media docena de químicos incluyendo polímeros. Este tipo de instalación de inyección es en su mayoría completamente automática.<sup>23</sup>

En la **Figura 4**, se observa las facilidades de inyección implementadas en el piloto del campo El Corcobo Norte en Argentina, las cuales corresponden a un ejemplo de este tipo de unidad.

---

<sup>23</sup> Ibid., p. 7

**Figura 4. Facilidades de inyección del campo Corcobo, Argentina.**



**Fuente:** HRYC, A., et al. Evaluation of a Polymer Injection Pilot in Argentina. En SPE Latin America and Caribbean Heavy and Extra Heavy Oil Conference. Society of Petroleum Engineers, 2016. p. 4.

**2.1.5.3 Unidad permanente o semipermanente** Las unidades permanentes son normalmente usadas para procesos CEOR de gran escala, con al menos una docena de pozos inyectoros. Este tipo de unidad es normalmente construida por lapsos mayores, de manera permanente o semi-permanente. Es muy similar a las anteriores, excepto que es en una escala mucho más grande. Las unidades de inyección son usualmente probadas y preconstruidas antes del envío. Posteriormente son ensambladas e instaladas en sitio como un sistema de inyección multi-pozos.<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup> Ibid., p. 8

**Figura 5. Unidad permanente de inyección de polímero**



**Fuente.** SNF FLOERGER. Enhancing Polymer Flooding Performance 30 Years of Experience in EOR [En línea] [Citado en 07 de diciembre de 2014]. Disponible de World Wide Web: <http://snf.us/wp-content/uploads/2014/08/EOR-Oil-30-Years-of-EOR1.pdf>

**2.1.6 Disolución del polímero** La comprensión del proceso de disolución permite la optimización de las condiciones de diseño y procesamiento, así como la selección de un disolvente adecuado. El proceso de disolución de un polímero ocurre durante un intervalo de tiempo de hidratación específico donde hay un hinchamiento del polímero por penetración de las moléculas del disolvente y des enredamiento de las cadenas de polímero. Se debe tener en cuenta que el tiempo óptimo de hidratación de un polímero específico depende de la calidad del agua, la temperatura y el peso molecular del producto.<sup>25</sup>

Este tiempo también se conoce como tiempo de residencia o tiempo de disolución.

---

<sup>25</sup> PUTNAM, John M. Facility Requirements for Implementing a Chemical EOR Project. En Enhanced Oil Recovery Field Case Studies. 2013. p. 337-360

**2.1.7 Velocidad de la mezcla** La velocidad del rotor afecta directamente a la tensión y deformación total por cortes y por lo tanto la velocidad de la mezcla. Una mayor velocidad de mezclado se traduciría en un mayor esfuerzo cortante y, por lo tanto, se puede esperar que sea más beneficioso para romper aglomerados durante la composición de los sistemas de polímeros cargados.<sup>26</sup>

## 2.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES DE INYECCIÓN

Para realizar una alternativa de diseño de las facilidades de inyección de polímero se tomaron como base las condiciones de operación del campo A y B, las cuales se describen en la **Tabla 3**.

**Tabla 4. Parámetros y variables seleccionados.**

PARAMETRO Y/O VARIABLE	CAMPO A	CAMPO B
<b>Concentración del polímero</b>	Solución madre: 5.000 ppm Solución final: 312 ppm	Solución madre: 10.000 ppm Solución final: 1.100 ppm
<b>Presión de inyección</b>	Presión de fractura: 2.400 psi Presión de inyección promedio: 2.000 psi	Presión de fractura: 2.800 psi Presión de inyección promedio: 2.400 psi
<b>Tasa de inyección</b>	Tasa de inyección: 3.000 BPD Número de pozos: 4 Tasa de inyección por pozo: 750 BPD	Tasa de inyección: 5.000 BPD Número de pozos: 2 Tasa de inyección por pozo: 2.500 BPD
<b>Tipo de unidad</b>	Unidad móvil	Unidad móvil
<b>Consumo de polímero diario</b>	80 kg diarios	150 kg diarios

<sup>26</sup> SHENOY, A.V. Rheology of Filled Polymer Systems. Dordrecht, The Netherlands. 1999. 449. p. 229.

PARAMETRO Y/O VARIABLE	CAMPO A	CAMPO B
Tiempo de disolución	45 minutos	45 minutos
Velocidad de la mezcla	20 rpm	10 rpm

### 2.3 CASOS DE CAMPOS DONDE SE HA IMPLEMENTADO LA INYECCIÓN DE POLÍMERO A ESCALA PILOTO

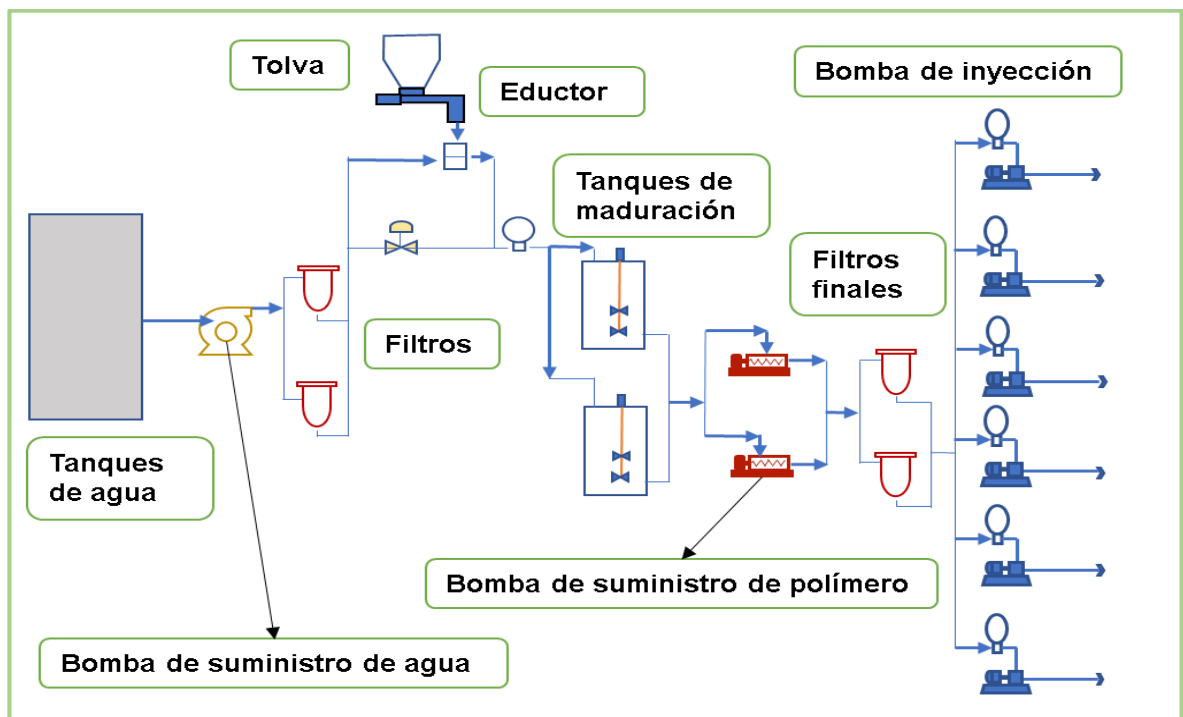
A continuación, se presentan dos casos de campos donde se ha implementado la inyección de polímero. El primero es el campo Yarigui Cantagallo, donde este método de recobro se implementó por primera vez en Colombia. El segundo es el campo Mangala ubicado en la India el cual es pionero en la implementación de este método.

**2.3.1 Campo Corcobo Norte** Desde enero de 2012 se está llevando a cabo un piloto de inyección de polímeros en el campo El Corcobo Norte de Argentina. El piloto consiste en seis patrones de 7 puntos invertidos de aproximadamente 20 acres cada uno y se diseñó para inyectar 500 ppm de solución de HPAM de alto peso molecular con una viscosidad de 20-25 mPa.s (@ 38 ° C, 6 l / s) considerando la salinidad del agua de inyección.

Las instalaciones de inyección y producción están ubicadas en la misma área que la zona piloto. Se reactivó una instalación de producción aislada para separar la producción piloto del resto de la producción de petróleo del campo. Esto permitiría atender localmente cualquier problema de separación agua-aceite causado por la presencia de sustancias químicas inyectadas y producidas en el piloto. El agua de inyección se proporciona a la planta de polímero desde una planta de tratamiento de agua que desoxigena y filtra el agua dulce de una fuente superficial. El

ablandamiento, y eventualmente el calentamiento del agua, ocurre en las mismas instalaciones de inyección donde el polímero se hidrata. La inyección se establece de modo que cada pozo inyector tenga una bomba de polímero separada. La solución madre hidratada en los tanques se diluye en una solución de pozo a pozo con una corriente de agua que permite controlar la concentración de polímero de cada pozo. La **Figura 6** muestran el diagrama de flujo del proceso de la planta de polímero.

**Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de inyección de polímero campo Corcobo.**



**Fuente:** HRYC, A., et al. Evaluation of a Polymer Injection Pilot in Argentina. En SPE Latin America and Caribbean Heavy and Extra Heavy Oil Conference. Society of Petroleum Engineers, 2016. p. 4. modificado por autores.

**2.3.2 Campo Mangala** El campo Mangala fue descubierto en enero de 2004 y fue evaluado entre 2004 y 2007. La producción comenzó en agosto de 2009 y los pozos del piloto EOR se perforaron en 2010. El piloto de inyección de agua se llevó a cabo

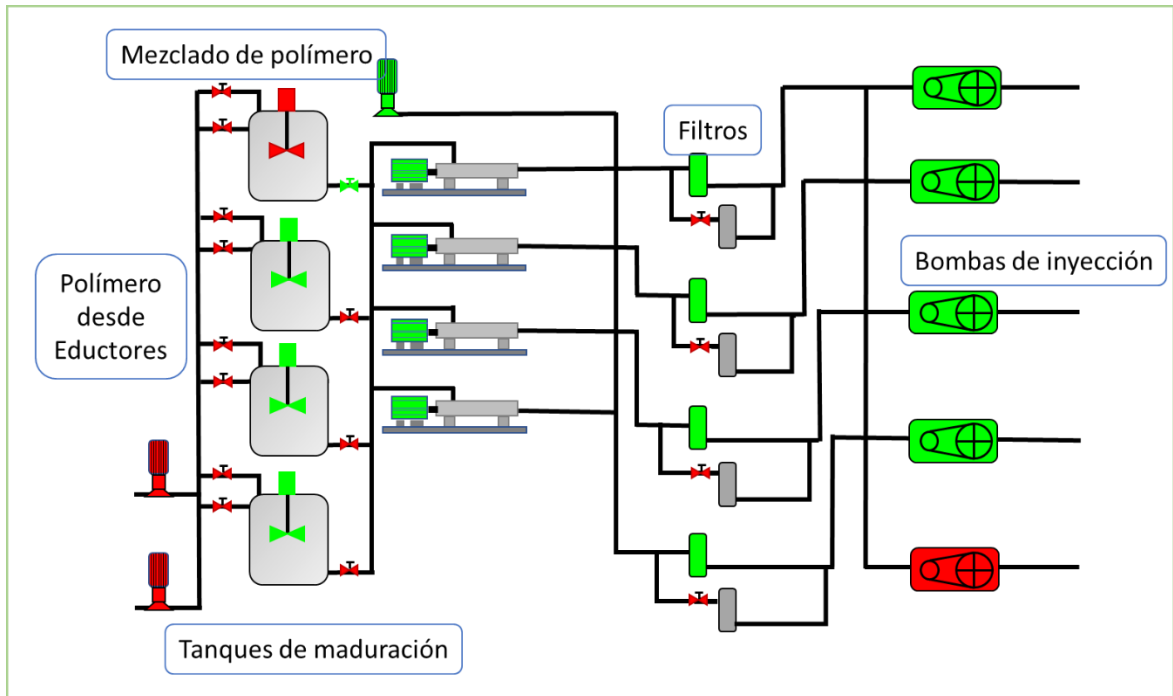
desde diciembre de 2010 hasta julio de 2011. El piloto de inyección de polímero inició en 2011, con resultados iniciales alentadores. La inyección de polímero será seguida por una inyección de solución álcali-surfactante-polímero (ASP).

El piloto EOR del campo Mangala consiste en cuatro inyectores, un productor central y tres pozos de observación en un área de 100 m x 100 m. El diseño de las facilidades para el piloto de inyección se basó en un sistema convencional de tolva-educador para la preparación de la solución madre a una concentración de polímero de 5.000 ppm, seguido de dilución con agua hasta la concentración deseada de boca en pozo de 2.000-2.500 ppm. Todos los sistemas de mezcla de polímeros tienen un manto de nitrógeno para evitar la entrada de oxígeno. También se añadió un eliminador de oxígeno al agua de inyección para retirar cualquier oxígeno disuelto antes de mezclar el polímero. Para evitar la degradación mecánica, se usaron bombas reciprocantes implementadas para la inyección en cada pozo.

**La Figura 7**, muestra un esquema del sistema de mezcla e inyección de polímero. La solución madre de polímero se prepara en agua ambiente a 5.000 ppm a través de dos sistemas de tolva de educador de polímero. La solución se deja madurar en un tanque de maduración de polímero para la hidratación completa de las moléculas del polímero. La solución madre se bombea luego a través de bombas dosificadoras de cavidades progresivas, después de lo cual se mezcla con agua para la dilución de la solución madre y la mezcla se pasa a través de un filtro de 50 micras para eliminar los ojos de pescado. Luego, la solución pasa a través de mezcladores estáticos en línea a la succión de las bombas de alta presión, después de lo cual se calienta a través de los intercambiadores de calor a temperaturas de 85 °C antes de ser inyectada en los pozos. Se proporcionaron bombas de inyección para cada pozo para controlar las tasas de inyección. Este sistema proporciona una flexibilidad fácil

para ajustar las concentraciones de polímero de cabeza de pozo variando la tasa de agua de dilución.<sup>27</sup>

**Figura 7. Esquema del sistema de mezcla e inyección de polímeros del campo Mangala.**



**Fuente:** PANDEY, Amitabh, et al. Chemical EOR pilot in mangala field: results of initial polymer flood phase. En SPE Improved Oil Recovery Symposium. Society of Petroleum Engineers, 2012.

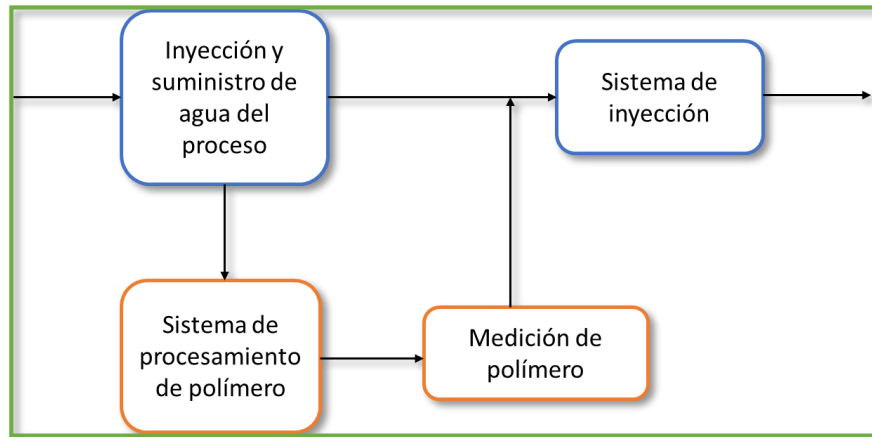
<sup>27</sup> PANDEY, Amitabh, et al. Chemical EOR pilot in mangala field: results of initial polymer flood phase. En SPE Improved Oil Recovery Symposium. Society of Petroleum Engineers, 2012.

### 3. DEFINICIÓN DE LOS EQUIPOS Y ACCESORIOS REQUERIDOS PARA EL PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMERO SEGÚN LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMERO

La inyección de polímero es una mejora al proceso de inyección de agua. De esta forma las instalaciones para suministro, preparación, dilución e inyección de polímero son integradas al diseño de las facilidades utilizadas para el desarrollo de la inyección de agua como se observa en la **Figura 8**.

**Figura 8. Esquema típico de inyección de polímero**



**Fuente:** SHENG, James Enhanced oil Recovery Field Case Studie. Waltham, MA. Elsevier. 2013. p. 344

Uno de los objetivos más importantes durante todo el proceso de inyección es mantener la estabilidad del polímero. Sin embargo, la estabilidad de este, en una solución acuosa está sujeta a varios tipos de degradación incluyendo mecánica,

química, térmica y microbiana.<sup>28</sup> Por lo tanto, el diseño de una instalación de inyección de polímero debe tener en cuenta estas posibles degradaciones y tratar de minimizarlas. También existen otros factores como la hidratación y uniformidad en el proceso de dispersión y mezclado que requieren especial atención, ya que los ojos de pescado o grumos de polímero sin disolverse pueden formarse cuando se usa un equipo de mezcla diseñado incorrectamente. Los diseños de instalaciones tienen que considerar el uso de eliminadores de oxígeno, mantas de nitrógeno, biocidas y productos químicos estabilizadores para preservar la calidad de la solución de polímero.

El proveedor de la instalación determina el límite de concentración que puede manejar adecuadamente el equipo. Las viscosidades más elevadas serán más difíciles de agitar en los tanques de mezcla y maduración luego también serán difíciles de transferir a través de bombas y líneas. Gran parte de los diseños de los equipos implementados para la inyección de polímeros están definidos para concentraciones de solución madre de aproximadamente 10.000 ppm. Es posible diseñar una solución madre de mayor concentración, pero estaría limitada por la viscosidad de la solución madre (SM), que requeriría potencia adicional para la agitación y transporte en tuberías. La mezcla y filtración de fluidos extremadamente viscosos requiere consideraciones especiales en el diseño del equipo.

Dos aspectos importantes que considerar en el diseño del equipo para manejar la solución de polímero son: el esfuerzo cortante o de cizalla y el tipo de agua utilizada en la preparación de la solución madre. El cizallamiento es un problema serio en el equipo de mezcla y transferencia de polímero. Normalmente, la solución madre de alta concentración es menos susceptible al esfuerzo mecánico que las soluciones poliméricas diluidas. Por lo tanto, se debe prestar especial atención a los sistemas de suministro de polímero, tales como el tamaño y longitud de la tubería, la

---

<sup>28</sup> CHANG, et al. Op. cit., p. 1.113.

velocidad de la mezcla, el tamaño de la bomba de inyección de desplazamiento positivo, los tipos de válvulas, filtros y accesorios adicionales como codos, reducciones, curvas entre otros. En la mayoría de los sistemas de inyección de polímero, se utiliza una filtración final antes de la bomba de inyección de alta presión para evitar el daño potencial de la bomba y para minimizar la pérdida potencial de inyectividad.

El proceso de inyección involucra mezcla, dispersión, disolución, maduración, transferencia, filtración, almacenamiento temporal, dosificación, dilución e inyección. Algunos de estos pasos pueden ser eliminados, y la secuencia puede ser alternada o invertida dependiendo de diseños específicos. Entre todos estos pasos, la mezcla, dispersión, disolución y maduración en la preparación de la solución madre son los más importantes, Sin embargo, se ha demostrado que este último paso puede ser eliminado en algunas operaciones de campo.

Para disolver el polímero en agua, la industria sólo tiene dos tecnologías estándar: las unidades de tipo eductor y las unidades rebanadoras de polímero (PSU, por sus siglas en inglés). Los eductores convencionales trabajan sobre el principio de Venturi y permiten la mezcla del polímero y del agua hasta ciertas concentraciones. Las unidades PSU, por otra parte, reducen el tamaño de partícula del polímero con una cabeza de corte a un tamaño uniforme y permitiendo concentraciones de polímero significativamente mayores sin afectar el peso molecular del polímero.<sup>29</sup>

Los factores que podrían afectar el suministro y la dilución de las soluciones de polímero son: el tipo de polímero utilizado, la concentración, la viscosidad de la solución madre y la calidad del agua de dilución.

---

<sup>29</sup> WILSON, Adam, et al. Challenges During Surface-Facility-Project Implementation for a Full-Field Polymer Flood. *Journal of Petroleum Technology*, 2017, vol. 69, no 06, p. 81-82.

### **3.2 FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE INYECCIÓN IMPLEMENTADA EN EL CAMPO A**

Se realizó una visita al campo con la finalidad de conocer el funcionamiento de la planta de polímero del campo A, el cual inicia con una válvula reguladora de presión encargada de disminuir la presión con la que entra el agua proveniente de la planta de inyección de agua ubicada en el municipio de Yondó, que será utilizada en el proceso. Esta ingresa a dos tanques de almacenamiento con capacidad de 400 barriles cada uno. Según la cantidad de agua requerida, los tanques están equipados con controladores de nivel para mantenerlos siempre al 80% de llenado. A través de una bomba se suministra el agua requerida para la disolución del polímero y para disminuir la concentración de la solución madre. Además, se cuenta con un sistema de filtrado el cual tiene dos recipientes de filtros, que se utilizan para filtrar el agua que se dirige a la unidad de dilución de polímero, donde uno de los filtros está en funcionamiento mientras que el otro se encuentra en stock, entrando en operación cuando el filtro que está en actividad se satura.

Las líneas de alimentación de agua, las cuales se utilizan para regular el caudal de agua que alimenta la PSU están provistas con una válvula que se activa al iniciar cada ciclo de la planta. Cuando se empieza un ciclo esta válvula se abre para dar paso a las corrientes de agua, una inferior y una superior, encargadas de humectar el polímero que se disuelve.

También se encuentra un silo de polímero seco donde se introduce el polímero que va a ser utilizado en el proceso y que es transferido a una tolva mediante un motor y un controlador de nivel; el polímero se introduce en la Unidad Laminadora de Polímeros PSU 100 que es usada para la disolución de polímero y para la alimentación del tanque de maduración, los cuales cuentan con cuatro cámaras y flujo de rebalse para asegurar que la disolución del polímero sea completa, continua y homogénea. La solución obtenida conocida como “solución madre” es transferida

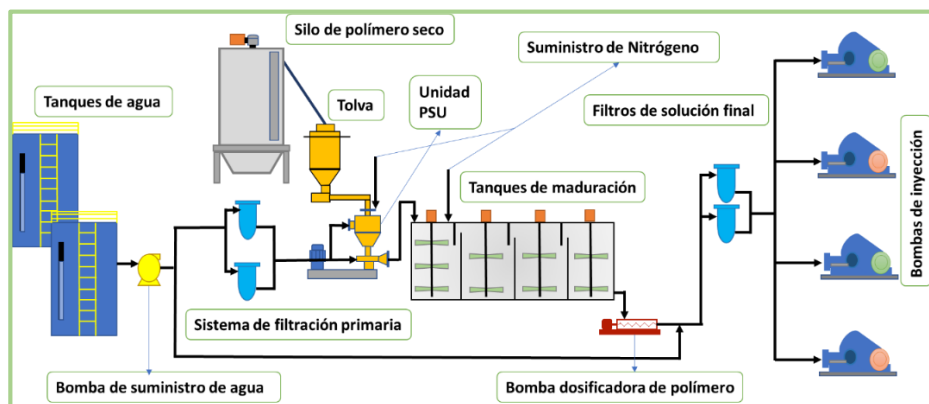
mediante una bomba de cavidades progresivas desde la última cámara del tanque de maduración hasta las bombas de inyección. En este punto la mezcla tiene una concentración de 5.000 ppm y por medio de una corriente de agua proveniente de la bomba de suministro de agua se reduce la concentración de la mezcla, obteniendo la solución final de 300 ppm. Luego de alcanzar esta concentración, la solución se filtra para asegurar que esta mezcla no contenga grumos.

Para finalizar se distribuye la mezcla hacia los 4 pozos inyectoros existentes a través de bombas de alta presión.

Cabe resaltar que la Unidad de dilución de poliácridamida en agua para inyección se encuentra instalada dentro de un contenedor aislado de 16 metros de longitud. Esta planta cuenta con un generador de nitrógeno con tres líneas de alimentación de nitrógeno, las cuales se usan para inertización del tanque de maduración, de PSU y para inertización externa.

En la **Figura 9**, se puede observar el proceso de inyección implementado en el campo A, anteriormente descrito.

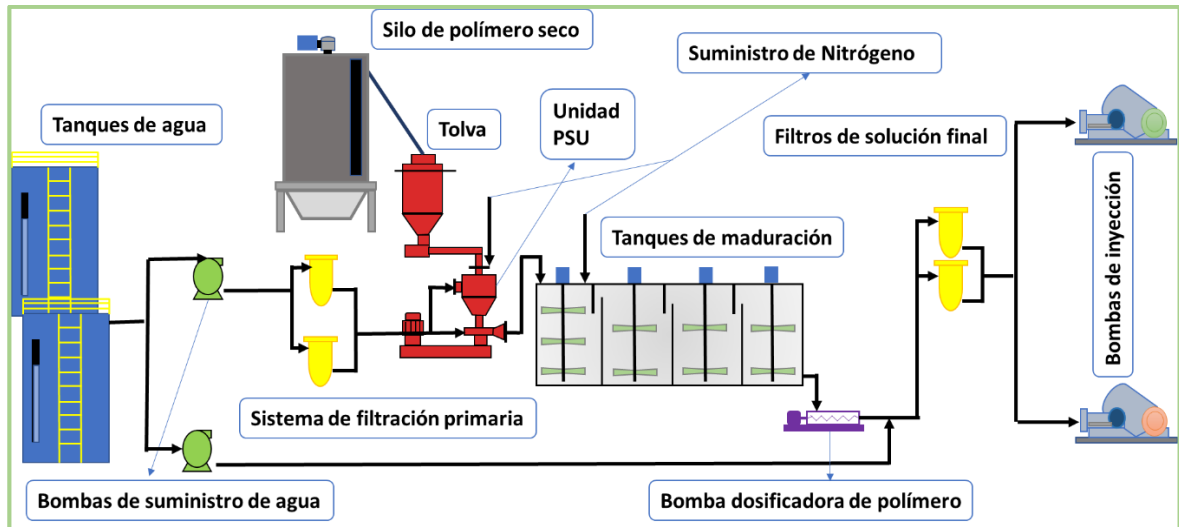
**Figura 9. Proceso de inyección de polímero en el campo A.**



**Fuente:** BRIDGEWATER, S., et al. Polymer EOR-A New HSE Hazard in an Old Industry. En International Petroleum Technology Conference. International Petroleum Technology Conference, 2016.

El campo B, presenta un funcionamiento similar al de campo A, su diferencia radica en el número de pozos inyectoros y la cantidad de bombas centrífugas implementadas. En la Figura 10, se puede observar el proceso de inyección del campo B.

**Figura 10. Proceso de inyección de polímero del campo B.**



**Fuente:** BRIDGEWATER, S., et al. Polymer EOR-A New HSE Hazard in an Old Industry. En International Petroleum Technology Conference. International Petroleum Technology Conference, 2016.

### 3.3 NORMATIVIDAD UTILIZADA PARA LA PROPUESTA DE DISEÑO

La implementación de un equipo en la industria petrolera está ligada necesariamente a una normatividad la cual funciona como guía para la selección adecuada y bajo las especificaciones pertinentes en cuanto a seguridad, dimensiones, materiales entre otros. A continuación, se enseñan las normas bajo las cuales fueron seleccionados los equipos y accesorios para la alternativa de inyección de polímero

### 3.3.1 Normatividad para líneas de flujo

- **ASTM A53**

La tubería ordenada bajo esta especificación se destina para aplicaciones mecánicas y de presión. Además, también son aceptables para usos comunes en líneas de vapor, agua, gas y aire.<sup>30</sup>

- **ANSI B36. 10/19**

Este estándar cubre las dimensiones de las tuberías de acero forjado soldado y sin costura, para altas y bajas temperaturas y presiones.

La palabra tubería se usa a diferencia del tubo para aplicar a productos tubulares de dimensiones comúnmente utilizadas para líneas de flujo y sistemas de tuberías

La denominación de espesor de pared estándar, extra fuerte y doble extra fuerte se han usado comercialmente durante muchos años. El estándar y Schedule 40 son idénticos para tamaños nominales de hasta 10 pulgadas. El espesor extra fuerte y Schedule 80 son idénticos para tuberías nominales de hasta 8 pulgadas. El espesor de pared de una tubería puede ser adoptado también por los estándares, API 5L, 5LX Y 5LS.<sup>31</sup>

Cuando la selección del espesor de pared depende principalmente de la capacidad de resistir la presión interna bajo condiciones dadas, se debe calcular el valor de espesor de pared adecuado para las condiciones para las cuales se requiere la tubería como se describe en la norma ANSI B31 para tubería de presión u otros códigos similares. Luego de esto se debe seleccionar un espesor de la **Tabla 4**,

---

<sup>30</sup> PIPE, A. Steel. ASTM A53/A53M Schedule 40 black. 1. Fittings: ASME B, vol. 16, p. 2-1.

<sup>31</sup> CARBON, Alloy; PIPES-ASME, Stainless Steel. ANSI B36. 10/19, nd.

para adecuarse al valor calculado y cumplir así con las condiciones para las cuales se desea la tubería.

**Tabla 5. Dimensiones y pesos de la tubería de acero forjado soldado y sin costura.**

Inchs Units				Identification			SI Units		
Inch Nominal Size	Outside Diameter In.	Wall Thickness In.	Plain End Weight lb/ft	API Specs	Standard(STD) X- strong(X) XX- strong(XXS)	Schedule No.	Outside Diameter mm	Wall Thickness mm	Plain End Mass kg/m
2	2.375	0.083	2.03	5L 5LX			60.3	2.11	3.03
2	2.375	0.109	2.64	5L 5LX			60.3	2.77	3.93
2	2.375	0.125	3.00	5L 5LX			60.3	3.18	4.48
2	2.375	0.141	3.36	5L 5LX			60.3	3.58	5.01
2	2.375	0.154	3.65	5L 5LX	STD	40	60.3	3.91	5.44
2	2.375	0.172	4.05	5L 5LX			60.3	4.37	6.03
2	2.375	0.188	4.39	5L 5LX			60.3	4.78	6.54
2	2.375	0.218	5.02	5L 5LX	XS	80	60.3	5.54	7.48
2	2.375	0.250	5.67	5L 5LX			60.3	6.35	8.45
2	2.375	0.281	6.28	5L 5LX			60.3	7.14	9.36
2	2.375	0.344	7.46	5L 5LX	XXS	160	60.3	8.74	11.11
2	2.375	0.438	9.03	5L 5LX			60.3	11.07	13.44
3	3.500	0.083	3.03	5L 5LX			88.9	2.11	4.52
3	3.500	0.109	3.95	5L 5LX			88.9	2.77	5.88
3	3.500	0.125	4.51	5L 5LX			88.9	3.18	6.72
3	3.500	0.141	5.06	5L 5LX			88.9	3.58	7.53
3	3.500	0.154	5.57	5L 5LX			88.9	3.96	8.29
3	3.500	0.172	6.11	5L 5LX			88.9	4.37	9.11
3	3.500	0.188	6.65	5L 5LX	STD	40	88.9	4.78	9.92

Inchs Units				Identification			SI Units		
Inch Nominal Size	Outside Diameter In.	Wall Thickness In.	Plain End Weight lb/ft	API Specs	Standard(STD) X- strong(X) XX- strong(XXS)	Schedule No.	Outside Diameter mm	Wall Thickness mm	Plain End Mass kg/m
3	3.500	0.218	7.58	5L 5LX			88.9	5.49	11.29
3	3.500	0.250	8.68	5L 5LX			88.9	6.35	12.93
3	3.500	0.281	9.66	5L 5LX			88.9	7.14	14.40
3	3.500	0.344	10.25	5L 5LX	XS	80	88.9	7.62	15.27
3	3.500	0.438	14.32	5L 5LX			88.9	11.13	21.35
3	3.500	0.600	18.58	5L 5LX	XXS	160	88.9	15.24	27.68

Fuente: CARBON, Alloy; PIPES-ASME, Stainless Steel. ANSI B36. 10/19, nd. Modificado por los autores.

- **ANSI B.31.3. (TUBERÍAS DE PROCESOS)**

Esta norma establece los requisitos de ingeniería considerados necesarios para el diseño y la construcción segura de tubería a presión. Esto incluye requisitos para materiales aceptables, dimensiones, componentes, ensamblaje, evaluación y limitación de esfuerzos, exámenes, inspecciones y pruebas de tubería. La tubería de procesos se encuentra típicamente en las refinerías de petróleo, en plantas químicas, farmacéuticas, papeleras entre otras. Además, define los criterios de temperatura, presión y diversas fuerzas aplicables al diseño de tuberías, los cuales se mencionan a continuación.

✓ **Presión de diseño**

La presión de diseño de cada componente en un sistema de tubería no deberá ser menor a la presión obtenida para la condición más severa de presiones y temperaturas coincidentes, internas o externas que se esperan alcanzar durante el servicio.<sup>32</sup>

El espesor de pared para un tubo recto a presión interna se determina a partir de la **Ecuación 3.**

$$t = \frac{pD}{2(SE + p\gamma)}$$

**Donde:**

**t:** Espesor de la tubería por presión

**p:** Presión de diseño interna manométrica

**S:** Valor de esfuerzo del material

---

<sup>32</sup> Sociedad Americana de ingenieros Mecánicos (ASME). Tuberías de proceso. B31.3. Estados Unidos. 2010.

**D:** Diámetro externo del tubo

**E:** Factor de calidad

**$\gamma$ :** Coeficiente

✓ **Temperatura de diseño**

La temperatura de diseño de cada componente en un sistema de tuberías es la temperatura a la cual, bajo una presión coincidente, se requiere el mayor espesor o la clasificación más alta del componente. Los diferentes componentes en un mismo sistema de tuberías pueden tener distintas temperaturas de diseño.<sup>33</sup>

Otros efectos que se deben tener en cuenta para el diseño de tubería son los efectos dinámicos, de peso, ductilidad, expansión y contracción térmica. Los cuales no se tendrán en cuenta en el diseño.

• **ANSI B16.5.**

Es el estándar para para la ingeniería y las aplicaciones de bridas. Esta norma cubre rangos de presión y temperatura, materiales, dimensiones, tolerancias y controles de los espacios en blanco de línea que operan en tamaños nominales de tubería.

---

<sup>33</sup> Sociedad Americana de ingenieros Mecánicos (ASME). Tuberías de proceso. B31.3. Estados Unidos. 2010.

**Tabla 6. Rangos máximos permitidos de presión según la temperatura.**

Temperature (°F)	Maximum Allowable non- Shick Pressure (psig)						
	Pressure Class (lb)						
	150	300	400	600	900	1500	2500
	Hydrostatic Test pressure (psig)						
	450	1125	1500	2225	3350	5575	9275
-20 to 100	290	750	1000	1500	2250	3750	6250
200	260	750	1000	1500	2250	3750	6250
300	230	730	970	1455	2185	3640	6070
400	200	705	940	1405	2110	3520	5865
500	170	665	885	1330	1995	3325	5540
600	140	605	805	1210	1815	3025	5040
650	125	590	785	1175	1765	2940	4905
700	110	555	740	1110	1665	2775	4630
750	95	505	675	1015	1520	2535	4230
800	80	410	550	825	1235	2055	3430
850	65	320	425	640	955	1595	2655
900	50	225	295	445	670	1115	1855
950	35	135	185	275	410	685	1145
1000	20	85	115	170	255	430	715

**Fuente:** ENGINEERING TOOLBOX. ANSI B16.5 - Maximum Pressure and Temperature Ratings  
 Disponible en: [http://www.engineeringtoolbox.com/ansi-flanges-pressure-temperature-d\\_342.html](http://www.engineeringtoolbox.com/ansi-flanges-pressure-temperature-d_342.html).  
 Consultado en: 14 de diciembre de 2014. Modificado por los autores.

### 3.3.2 Normatividad para bombas

- **API 610 (BOMBAS CENTRÍFUGAS)**

Esta norma describe los requerimientos mínimos para bombas centrífugas utilizadas en la industria petrolera. Esta norma es también aplicable para turbinas recuperadoras de potencia hidráulica.

A continuación, en la **Tabla 6**, se muestra la clasificación de las bombas centrífugas según la norma API 610.

**Tabla 7. Clasificación de las bombas centrífugas.**

PUMP TYPE		ORIENTATION		TYPE CODE	
CENTRIFUGAL PUMPS	Overhung	Flexibly coupled	Horizontal	Foot-mounted	OH1
				Centreline-supported	OH2
			Vertical in-line with bearing bracket	----	OH3
		Rigidly coupled	Vertical in-line	----	OH4
		Close-coupled	Vertical in-line	----	OH5
			High-speed integrally geared	----	OH6
	Between-bearing	1- And 2- stage	Axially Split	----	BB1
			Radially Split	----	BB2
		Multistage	Axially Split	----	BB3
			Radially Split	Single casing	BB4
				Double casing	BB5
	Vertically suspended	Single casing	Discharge through column	Diffuser	VS1
				Volute	VS2
				Axial Flow	VS3
		Separate discharge	Line shaft	VS4	
			Cantilever	VS5	
		Double casing	Diffuser	----	VS6
			Volute	----	VS7

**Fuente:** STANDARD, A.P.I. 610. Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries. 2010. Modificado por los autores.

- **API 674. BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS.**

Esta norma cubre los requisitos mínimos para bombas de reciprocantes de desplazamiento positivo para el uso en servicio de las industrias petrolera, química y de gas. Se incluyen tanto los de acción directa como los de potencia. Además, la **norma API 675** cubre las bombas de volumen controlado y la **norma 676** las bombas rotativas.

el equipo cubierto por esta norma debe diseñarse y construirse para una vida útil mínima de 20 años y al menos tres años de funcionamiento ininterrumpido. Este requisito se reconoce como un criterio de diseño.

**3.3.3 Normatividad para tanques** Para tanques de almacenamiento a presiones atmosféricas o bajas presiones y de tamaños relativamente grandes se utilizan las reglas de construcción y diseño de uno de los siguientes códigos

- **API 12B**
- **API 12D**
- **API 12F**
- **API 650**
- **API 620**

Para este caso se tendrá en cuenta la norma **API 650**. La cual se basa en el conocimiento y la experiencia acumulada de fabricantes y usuarios de tanques de almacenamiento de petróleo soldados, de varios tamaños y capacidades, con una presión manométrica interna que no excede de 2.5 psi.<sup>34</sup> Esta norma cubre requerimientos para materiales, diseño, fabricación, montaje y pruebas de tanques. Además, está diseñada para construir tanques con seguridad adecuada y costos razonables para líquidos almacenados normalmente en la industria petrolera.

---

<sup>34</sup> STANDARD, A. P. I. 650. Welded Steel Tanks for Oil Storage”, 2007.

- **ASTM A283/283.**

Esta norma especifica los materiales con los cuales pueden ser fabricados los tanques de almacenamiento. La norma cubre cuatro grados (A, B, C y D) de placas de acero al carbono de calidad estructural para aplicación general. Cuando se va a soldar el acero, una soldadura apropiada para el grado de acero y el uso o servicio previsto para ser utilizado

### **3.4 EQUIPOS Y ACCESORIOS IMPLEMENTADOS EN LA ALTERNATIVA DE DISEÑO**

Como se mencionó anteriormente las instalaciones de inyección de polímero se fundamentan en el suministro, preparación dilución e inyección de este. De acuerdo con esto surge la necesidad de implementar equipos adecuados que permitan llevar a cabo de manera óptima y eficiente cada etapa del proceso cumpliendo con condiciones operacionales preestablecidas.

A continuación, se presentan los equipos y accesorios implementados en la propuesta de diseño para la inyección de polímero describiendo su funcionamiento en el proceso.

**3.4.1 Tanques de almacenamiento** La función principal de estos tanques es el almacenamiento de fluidos y su implementación en una planta de inyección se debe a la necesidad de tener reservas de agua para que el proceso de inyección no se vea afectado en caso de que se presente alguna falla con el suministro de esta.

Se utilizaron dos tanques, cada uno con capacidad de 500 barriles (**Figura 11**) y con un porcentaje de llenado del 80 %. A estos tanques llegará el agua fresca

proveniente de la fuente de captación la cual se utilizará para la preparación de la solución concentrada.

**Figura 11. Tanque de almacenamiento.**



**Fuente:** DEL CORPORATION, Products. Disponible en: <http://www.deltank.com/vertical-storage-tanks.html> . Consultado en: 18 de enero del 2018.

**3.4.2 Bombas centrífugas** Se debe implementar un sistema de bombeo que distribuya el agua proveniente de los *Tanques de almacenamiento* para la preparación y dilución de la solución polimérica, las bombas centrífugas son idóneas para este proceso puesto que son muy versátiles y más económicas que las bombas de desplazamiento; entre sus ventajas se encuentran el manejo de caudal constante, presión uniforme, sencillez de construcción, tamaño reducido, bajo mantenimiento entre otros. Estas bombas también podrían ser implementadas para el bombeo de la solución polimérica, sin embargo, debido a la cantidad de cizallamiento que genera no es recomendable ya que se aumentaría la degradación mecánica y disminuiría la viscosidad de la solución.

Para el diseño se emplearon dos bombas de este tipo **Figura 12**, las cuales bombean el agua proveniente de los *Tanques de almacenamiento* con una potencia de 7 hp. Una de ellas llevará el agua necesaria para generar la concentración de la solución madre en los tanques de mezcla y la otra llevará el agua requerida para diluir la solución concentrada y obtener la solución final con concentración de 312 ppm. Estas bombas deben ser capaces de manejar un caudal de 3.000 BPD.

**Figura 12. Bomba centrífuga.**



**Fuente:** LIQUIFLO CHEMICAL PROCESSING PUMPS. Products list. Disponible en: <http://www.liquiflo.com/v2/centro/centry/622.htm>. Consultado en: 27 de enero de 2018.

**3.4.3 Filtros** Las unidades de filtración son indispensables en un proceso de inyección de polímero por dos motivos. El primero es que es necesario remover las impurezas del agua ya que estas pueden afectar negativamente la viscosidad de la solución madre. El segundo es evitar la formación de ojos de pescado o grumos en la solución final.

Para el diseño se tendrán en cuenta dos unidades de filtración. Una primaria con 6 filtros tipo cartucho de 10 micras que se localizará después de la *bomba centrífuga* que lleva el agua a los tanques de mezcla, estos filtros serán los encargados de retirar cualquier impureza del agua proveniente de los *Tanques de almacenamiento* (**Figura 13**), y, una secundaria constituida por dos filtros tipo bolsa de 25 micrones

que estarán antes de las bombas de inyección con el fin de evitar que la solución final llegue con grumos a estas bombas **Figura 14**.

Se utilizaron filtros tipo cartucho y tipo bolsa basados en los implementados en los campos de estudio.

**Figura 13. Vasijas para filtros tipo cartucho, unidad de filtración primaria.**



**Fuente:** PALL CORPORATION, Products List. Disponible en: <https://shop.pall.com/us/en/>. Consultado en: 24 enero de 2018.

**Figura 14. Vasijas para filtros tipo bola, unidad de filtración secundaria.**

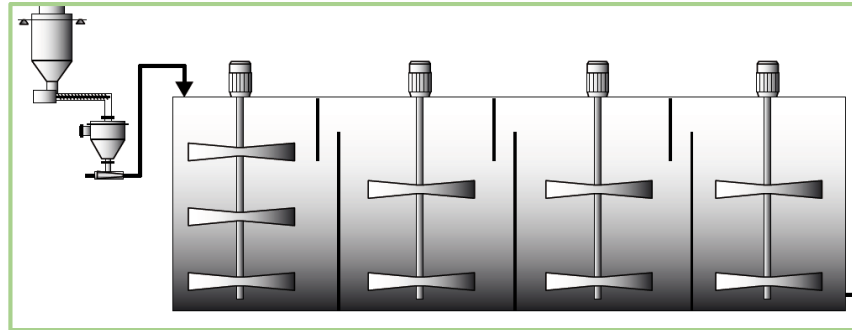


**Fuente:** PALL CORPORATION, Products List. Disponible en: <https://shop.pall.com/us/en/>. Consultado en: 24 enero de 2018.

**3.4.4 Sistema de disolución de polímero** Como se mencionó anteriormente la industria cuenta con dos tecnologías para disolver el polímero en agua, las unidades de tipo eductor y las unidades PSU.

Las unidades tipo eductor, implementadas en la alternativa de diseño, están constituidas por una tolva volumétrica, que se encarga de alimentar por gravedad a un tornillo sin fin el cual brinda una dosificación precisa del polímero al eductor de sólidos, donde la proporción adecuada de agua y polímero se mezcla a una concentración preestablecida. Posteriormente la solución se descarga en los tanques de maduración como se observa en la **Figura 15**.

**Figura 15. Unidad tipo eductor.**



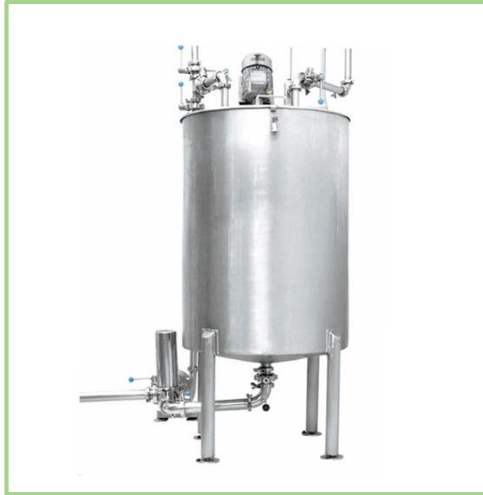
**Fuente:** SNF FLOERGER. FLOQUIP PSU High speed polymer dissolution equipment. [en línea] [citado en 20 de enero de 2018] Disponible de World Wide Web: <http://www.snf-oil.com/images/phocagallery/brochures/Equipment-FLOQUIP-Polymer-Slicing-Unit.pdf>

**3.4.5 Tanques de maduración** Los tanques de maduración tienen como objetivo dentro del proceso de inyección dar a la solución madre concentrada el tiempo de hidratación suficiente para alcanzar la disolución completa y la viscosidad requerida. Para determinar el volumen adecuado de los tanques se debe tener en cuenta la concentración a dosificar, caudal a tratar y tiempo de residencia.

Teniendo en cuenta lo anterior se seleccionaron dos tanques a los cuales se les determinó el volumen adecuado de 6,7 metros cúbicos (**Figura 16**), cada uno para llevar a cabo la inyección con las condiciones de operación establecidas. Trabajarán alternadamente para no detener el proceso de inyección y tendrán un porcentaje de llenado mínimo y máximo lo que definirá el volumen útil de este. Los tanques están equipados con agitadores cada uno con un moto reductor de 3 hp y 330 rpm.

Los cálculos para determinar el volumen de los tanques de maduración son descritos en el **Anexo A**.

**Figura 16. Tanque de maduración.**

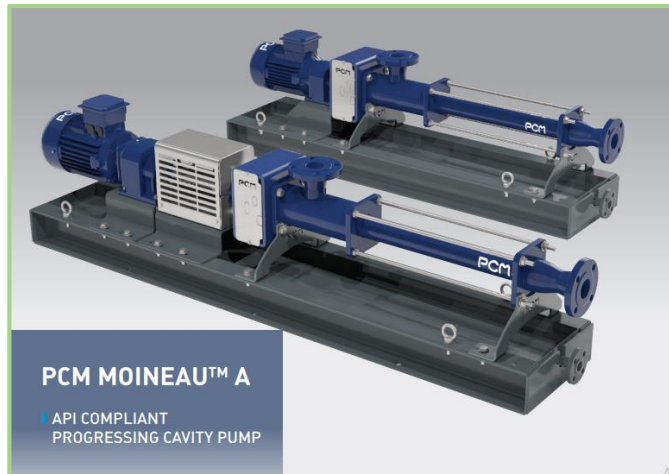


**Fuente:** SERVILAB, Lista de productos. Disponible en: <http://servilab.com.co/mezclador-estatico-de-42-cm/>. Consultado en: 16 de enero de 2018.

**3.4.6 Bombas de cavidades progresivas** Las bombas de cavidades progresivas funcionan como medio para transportar la solución polimérica con la presión de succión requerida desde los tanques de maduración hasta las bombas de inyección, este tipo de bombas se emplean principalmente porque generan poco cizallamiento evitando la degradación mecánica, además pueden manejar fluidos con altas viscosidades y caudales continuos.

En el caso de la alternativa de diseño se utilizaron dos bombas de este tipo cada una con 5 hp de potencia las cuales se muestran en la **Figura 17**.

**Figura 17. Bomba de cavidades progresivas.**



**Fuente:** PCM Keep it Moving, Products list. Disponible en: <http://www.pcm.eu/es/industria/soluciones-pcm/bombas-de-cavidad-progresiva>. Consultado en: 16 de enero del 2018.

**3.4.7 Mezclador estático** Un mezclador estático está formado por una serie de elementos fijos, por lo general helicoidales (**Figura 18**), incluidos dentro de una carcasa tubulares el cual se utiliza para mezclar dos fluidos normalmente líquido-líquido, sin embargo, también pueden mezclar corrientes de gas, dispersar un gas en un líquido, o dispersar líquidos inmiscibles entre sí.

Para la propuesta se instaló un mezclador estático corriente abajo de las *bombas de cavidades progresivas* con el fin de mezclar el agua de disolución con la solución madre y así obtener la solución final con la concentración deseada (312 ppm)

**Figura 18. Mezclador estático.**



**Fuente:** FLOW CONTROL AND HANDLING S.A., Lista de productos. Disponible en: <http://novatecfs.com/descargas/novatecfs/novatec-mixers/33-novatec-inyector/file>. Consultado en: 16 de enero de 2018.

**3.4.8 Bombas tríplex** Son bombas de desplazamiento positivo que están configuradas con tres émbolos. Estas bombas demuestran sus puntos fuertes, en comparación con las *bombas centrífugas*, esencialmente en el movimiento de medios de bombeo viscoso. Son usadas principalmente en aplicaciones de mediano caudal y altas presiones, esto las hace candidatas para llevar a cabo el proceso de inyección, pues son las encargadas de inyectar la solución polimérica final al pozo.

En el diseño, luego que la solución madre se diluya en el *mezclador estático* y pase por los *filtros* finales llegará a estas bombas las cuáles serán las encargadas de inyectar la solución final a los cuatro pozos inyectoros.

Teniendo en cuenta la presión promedio de inyección y la viscosidad de la solución a inyectar se seleccionó una bomba triplex de 100 Hp (**Figura 19**).

**Figura 19. Bomba tríplex.**



**Fuente:** NATIONAL OILWELL VARCO, Disponible en: [https://www.nov.com/Segments/Completion\\_and\\_Production\\_Solutions/Process\\_and\\_Flow\\_Technologies/Production\\_Technologies/Pumps/Positive\\_Displacement/Reciprocating\\_Single\\_Acting/Triplex/101T4L\\_101T4M\\_101T4H/101T-4L,\\_101T-4M,\\_101T-4H.aspx](https://www.nov.com/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Process_and_Flow_Technologies/Production_Technologies/Pumps/Positive_Displacement/Reciprocating_Single_Acting/Triplex/101T4L_101T4M_101T4H/101T-4L,_101T-4M,_101T-4H.aspx) Consulta en: 17 enero de 2018.

**3.4.9 Contenedor** Dentro del contenedor se ubicarán equipos y accesorios necesarios para la preparación y dilución de la solución polimérica concentrada. Para esta labor se selección un contenedor de 40 ft insonorizado como se muestra en la Figura 20.

**Figura 20. Contenedor de 40 ft insonorizado.**



**Fuente:** Boët StopSon, Lista de productos. Disponible en: <http://www.boet-stopson.com/es/energia/contenedor-insonorizado/>. Consultado en: 12 de enero del 2018.

**3.4.10 Líneas de flujo y accesorios** Basados en la planta de inyección implementada en el campo A y en la norma ASME B31. se seleccionaron:

- Líneas para la conexión entre equipos teniendo en cuenta la presión máxima que se puede generar y la temperatura que deben soportar, 85 psi y 82,4 F respectivamente. Se escogen líneas con NPS:2" y 3"; Schedule:40. Acero al carbón.
- Línea que conecta la bomba triplex con el pozo: debido a la presión máxima de inyección la cual tiene un valor promedio de 2.000 psi. Se escoge la línea con un NPS: 3"; Schedule:80. Acero al carbón.

En el **Anexo B**, se presentan los cálculos y procedimientos para determinar los diámetros y espesor de tubería.

Las **bridas** son elementos de una línea de tubería destinados a permitir la unión o ensamblado de las partes, sean estas tuberías, válvulas, bombas u otro equipo que forme parte de la línea. De acuerdo con lo anterior y bajo la norma ANSI B.16.5. se implementaron las siguientes bridas:

Para tubería que conecta los equipos: clase 150#, que soporta una presión de 284,7 psi:

- 2" NPS weldneck flange 150# RF Sch-40
- 3" NPS weldneck flange 150# RF Sch-40

Para tubería de inyección: clase 1500# que soporta 3702,81 psi:

- 3" NPS weldneck flange 1500#RF sch 80

Sabiendo que tipo de bridas se implementan, se utilizó el programa pipe data el cual es un software comercial para determinar las dimensiones de los **espárragos** necesarios. En el **Anexo C**, se muestra el procedimiento de selección utilizando este software.

- Espárragos: 5/8" UNC (or M16) \*85 Long
- Espárragos: 5/8" UNC (or M16) \*90 Long
- Espárragos: 1+1/8" UNC (or M30) \*180 Long

Las **válvulas** que se incorporaron en el diseño son las siguientes:

- **Válvulas de alivio de presión.**

También llamadas válvulas de seguridad o válvulas de alivio, Su misión es evitar la explosión del sistema protegido o el fallo de un equipo o tubería por un exceso de presión.

- **Válvulas de cheque.**

Estas válvulas están destinadas a impedir una inversión de la circulación. La circulación del líquido en el sentido deseado abre la válvula; al invertirse la circulación, se cierra.

- **Válvulas de corte.**

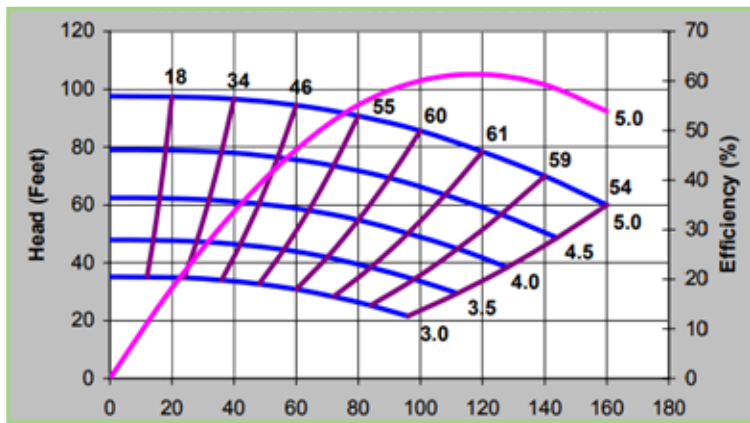
Estas son las encargadas de controlar el flujo de fluido a través de las líneas.

### 3.5 RANGOS OPERACIONALES DE LOS EQUIPOS IMPLEMENTADOS

Los equipos de la alternativa de diseño fueron seleccionados a partir de una tasa inyección máxima, sin embargo, como se observan en los reportes de los campos de estudio este parámetro puede modificarse a través del tiempo según el comportamiento de los pozos productores entonces, es necesarios establecer los rangos operacionales de los equipos para tener presente hasta que tasas puede operar la unidad de inyección de la propuesta.

**3.5.1 Bombas centrífugas** En el diseño se implementan dos bombas centrífugas cada una de estas funciona a 3.500 RPM y con un caudal maximo de 160 gpm equivalentes 5.485 barriles por dia como se observa en la **Grafica 1**. Además, trabajan con una potencia de 7hp.

**Gráfica 1. Curva de la bomba centrífuga modelo 622 de la empresa Liquiflo.**



**Fuente:** LIQUIFLO CHEMICAL PROCESSING PUMPS. Products list. Disponible en: <http://www.liquiflo.com/v2/centro/centry/622.htm>. Consultado en: 27 de enero de 2018.

**3.5.2 Bombas de cavidades progresivas** En la **Tabla 7**, se observan las especificaciones técnicas de la bomba de cavidades progresivas de la empresa PCM.

**Tabla 8. Especificaciones bomba de la empresa PCM.**

Flujo máximo	310 gpm
Máximo diferencial de presión	350 psi
Máxima temperatura del fluido	265 °F
Mínima temperatura del fluido	10 °F
Máxima viscosidad del polímero	10.000 Cps

**Fuente:** PCM Keep it Moving, Catalogue. Disponible en: <http://www.pcm.eu/es/industria/soluciones-pcm/bombas-de-cavidad-progresiva>. Consultado en: 16 de enero del 2018.

**3.5.3 Bombas tríplex** Se implementaron 4 bombas tríplex para el diseño de la empresa National Oilwell Varco las cuales son capaces de inyectar a la presión y tasa que se establecieron para la alternativa de diseño. Las especificaciones se muestran en la **Tabla 8**, donde se observa que con 100 hp y a 400 rpm se alcanza una tasa máxima de 1.928 barriles por día.

**Tabla 9. Especificaciones bomba tríplex.**

<b>101T-4 Triplex Plunger Pump</b>																			
<b>Performance Data</b>																			
PUMP	English Units					50 RPM		150 RPM		250 RPM		300 RPM		350 RPM		400 RPM			
	Plunger Dia. In.	Plunger Area Sq. In.	BPD per RPM	GPM per RPM	Max. Press. PSI	BPD	GPM	BPD	GPM	BPD	GPM	BPD	GPM	BPD	GPM	BPD	GPM		
101T-4L (T100-4)	3.375	8.9462	17.9255	0.5228	738	897	26.1	2689	78.4	4482	130.7	5378	156.8	6274	183.0	7171	209.1		
	3.250	8.2958	16.6223	0.4848	796	832	24.2	2494	72.7	4156	121.2	4987	145.4	5818	169.7	6649	193.9		
	3.125	7.6699	15.3682	0.4482	861	769	22.4	2306	67.2	3843	112.1	4611	134.5	5379	156.9	6148	179.3		
	3.000	7.0686	14.1634	0.4131	934	709	20.7	2125	62.0	3541	103.3	4250	123.9	4958	144.6	5666	165.2		
	2.875	6.4918	13.0077	0.3794	1017	651	19.0	1952	56.9	3252	94.8	3903	113.8	4553	132.8	5204	151.8		
	2.750	5.9396	11.9012	0.3471	1111	596	17.4	1786	52.1	2976	86.8	3571	104.1	4166	121.5	4761	138.8		
2.625	5.4119	10.8438	0.3163	1220	543	15.8	1627	47.4	2711	79.1	3254	94.9	3796	110.7	4338	126.5			
101T-4M (T100-3)	2.500	4.9087	9.8357	0.2869	1345	492	14.3	1476	43.0	2459	71.7	2951	86.1	3443	100.4	3935	114.7		
	2.375	4.4301	8.8767	0.2589	1490	444	12.9	1332	38.8	2220	64.7	2664	77.7	3107	90.6	3551	103.6		
	2.250	3.9761	7.9669	0.2324	1660	399	11.6	1196	34.9	1992	58.1	2391	69.7	2789	81.3	3187	92.9		
	2.125	3.5466	7.1063	0.2073	1861	356	10.4	1066	31.1	1777	51.8	2132	62.2	2488	72.5	2843	82.9		
	2.000	3.1416	6.2948	0.1836	2101	315	9.2	945	27.5	1574	45.9	1889	55.1	2204	64.3	2518	73.4		
	1.875	2.7612	5.5326	0.1614	2390	277	8.1	830	24.2	1384	40.3	1660	48.4	1937	56.5	2214	64.5		
1.750	2.4053	4.8195	0.1406	2744	241	7.0	723	21.1	1205	35.1	1446	42.2	1687	49.2	1928	56.2			
101T-4H (T100-2)	1.625	2.0739	4.1556	0.1212	3182	208	6.1	624	18.2	1039	30.3	1247	36.4	1455	42.4	1663	48.5		
	1.500	1.7671	3.5408	0.1033	3735	178	5.2	532	15.5	886	25.8	1063	31.0	1240	36.1	1417	41.3		
	1.375	1.4849	2.9753	0.0868	4445	149	4.3	447	13.0	744	21.7	893	26.0	1042	30.4	1191	34.7		
	1.250	1.2272	2.4589	0.0717	5378	123	3.6	369	10.8	615	17.9	738	21.5	861	25.1	984	28.7		
Brake Horsepower Required						13		38		63		75		88		100			

**Fuente:** NATIONAL OILWELL VARCO, Disponible en: [https://www.nov.com/Segments/Completion\\_and\\_Production\\_Solutions/Process\\_and\\_Flow\\_Technologies/Production\\_Technologies/Pumps/Positive\\_Displacement/Reciprocating\\_Single\\_Acting/Triplex/101T4L\\_101T4M\\_101T4H/101T-4L,\\_101T-4M,\\_101T-4H.aspx](https://www.nov.com/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Process_and_Flow_Technologies/Production_Technologies/Pumps/Positive_Displacement/Reciprocating_Single_Acting/Triplex/101T4L_101T4M_101T4H/101T-4L,_101T-4M,_101T-4H.aspx) Consulta en: 17 enero de 2018.

**3.5.4 Tanques de mezcla de polímero** Los tanques seleccionados tienen un volumen efectivo del 60 % debido a que estos cuentan con controladores de nivel máximo del 80% y mínimo del 20 %, de acuerdo con lo anterior el volumen efectivo de cada tanque es de 25 barriles con lo que se logra un suministro máximo de 600 BPD de solución polimérica concentrada (solución madre).

**3.5.5 Sistema de filtración** La unidad de filtración primaria está conformada por dos vasijas porta filtros equipadas con 6 filtros tipo cartucho cada una. De estas vasijas siempre hay una en funcionamiento y la otra en *stand by*, con el fin de no parar el proceso de inyección cuando se cambian los cartuchos. Igualmente sucede con la unidad secundaria de filtración la cual está constituida por dos vasijas con un filtro tipo bolsa cada una. Las especificaciones de estas unidades se muestran a continuación en la **Tabla 9**.

**Tabla 10. Especificaciones de las unidades de filtración implementadas en el diseño.**

VARIABLE	FILTRACIÓN PRIMARIA	FILTRACIÓN SECUNDARIA
Máxima tasa (gpm)	60	240
Máxima presión de operación (psi)	150	150
Micrones	10	25

La tabla 11, resume los rangos operacionales de cada equipo mencionado anteriormente.

**Tabla 11. Rangos operacionales de los equipos.**

EQUIPO	RANGO OPERACIONAL
Bombas centrífugas	0 – 5.485 BPD
Bombas de cavidades progresivas	171 BPD – 10.628 BPD
Bombas tríplex	240 BPD –1.928 BPD
Tanques de mezcla y maduración	200 BPD –600 BPD
Sistemas de filtración	Primaria: 2.057 BPD
	Secundaria: 8.228 BPD

### **3.6 DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS PARA UN PLANTA DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS**

En la **Figura 21** y **22**, se observa las bombas centrífugas de color verde, seguidas por el sistema de filtración primario color verde oscuro, la tolva junto al eductor de sólidos de color amarillo, luego de estos equipos, están los tanques de maduración color azul con sus respectivos agitadores de color naranja y finalmente se tiene la bomba de cavidades progresivas de color rojo. Este sistema integrado es el responsable de llevar a cabo el proceso de preparación y dilución de la solución polimérica a inyectar.

Figura 21. Plano de distribución de los equipos de una unidad de inyección.

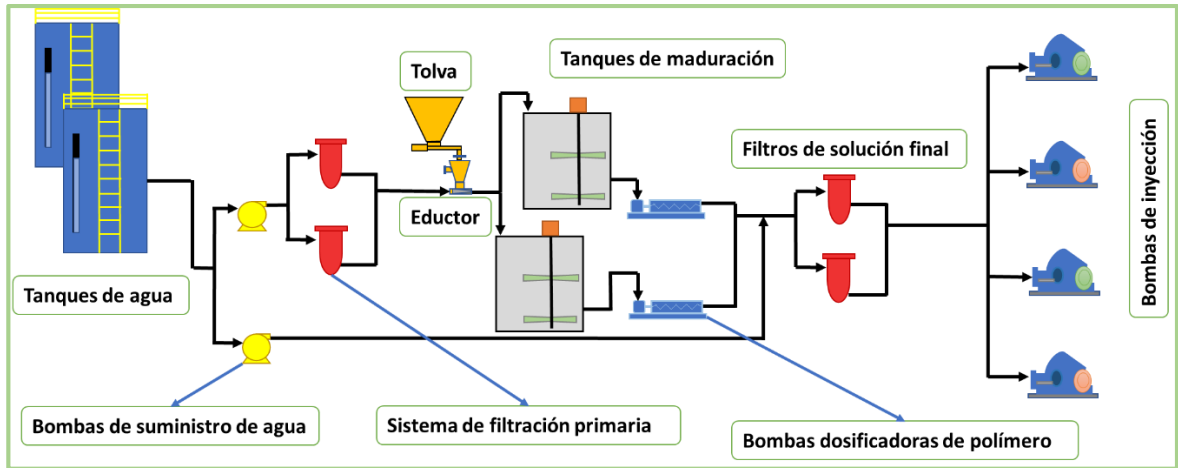
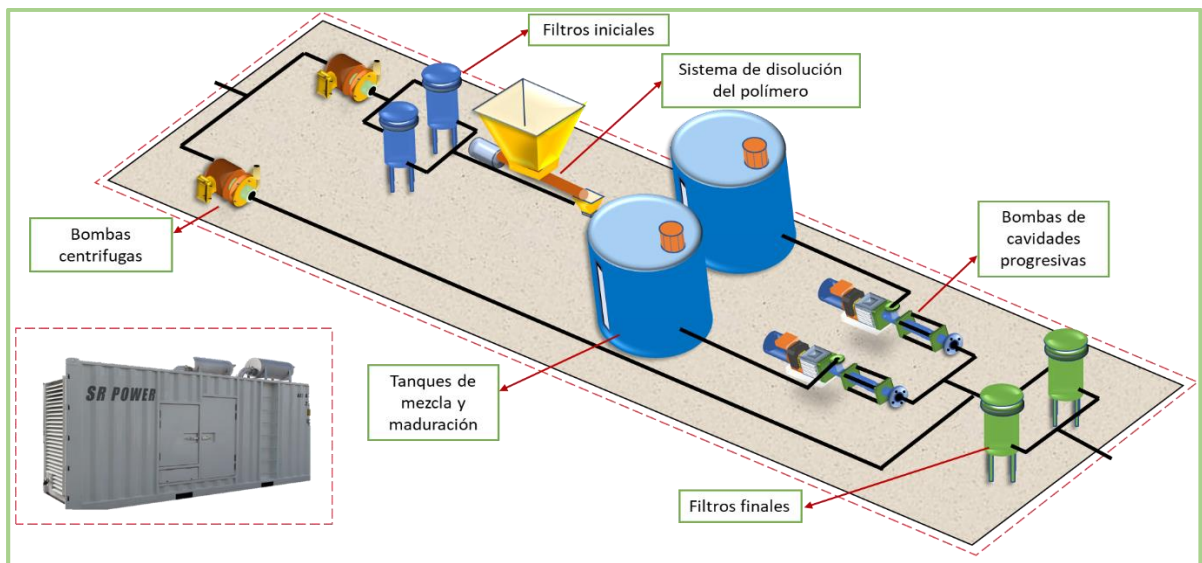


Figura 22. Plano de distribución de los equipos de unidad de inyección dentro del contenedor.



### 3.7 SIMULACIÓN

Una vez seleccionados los equipos y accesorios que hacen parte de la alternativa de facilidades de inyección se procedió a realizar una simulación en el simulador comercial de procesos (Aspen HYSYS) con el fin de determinar la potencia

requerida por cada bomba para manejar los fluidos a las condiciones establecidas y de esta forma corroborar que la selección de estos equipos fue la adecuada.

**3.7.1 Simuladores de procesos** Simuladores dedicados fundamentalmente a mejorar, predecir y optimizar procesos industriales. Existe una gran variedad de simuladores de procesos comerciales, algunos de las cuales son poderosas herramientas de cálculo, con inmensos bancos de datos que contienen las propiedades físicas de miles de compuestos y sustancias químicas, selección de modelos termodinámicos, cálculos de equipos (teórico y real), análisis de costo, estado de agregación y condiciones de operación, que le dan al simulador la ventaja de una gran versatilidad.

**3.7.2 Aspen Hysys** Hysys es un simulador de procesos perteneciente al grupo Aspentech, orientado hacia la industria del petróleo. Muchas de sus herramientas y utilidades cubren unidades de procesos de refinación del petróleo; aun así, el programa incluye muchas opciones de cálculo, tanto de operaciones físicas unitarias, como de operaciones químicas ajenas a la industria petrolera. Está conformado por modelos de unidades de proceso tales como separadores, intercambiadores de calor, reactores, operaciones lógicas, controladores, tubería, columnas de destilación y extracción, entre otros. Tiene como objetivo facilitar el cálculo en el diseño y optimización de procesos de manera resumida y organizada.

Los resultados de la simulación dependerán de la calidad de datos de entrada, de la confiabilidad de los mismos, y de la precisión y lo apropiado de los modelos matemáticos que se seleccionen o que estén disponibles para simular los procesos.

### **Campos de aplicación**

- Modelos termodinámicos, componentes y propiedades de mezclas

- Simular unidades de proceso corrientes: división, mezcla y fraccionamiento, ciclo de refrigeración, separación de fases, separador de tres fases.
- Simular procesos con corrientes de recirculación: procesos con reciclo, compresión en tres etapas, ajuste de variables.
- Simular reactores: utilizar reactores de conversión, relación no lineal entre variables, reactor de mezcla completa, reactor flujo pistón y reactor catalítico heterogéneo.
- Establecer balances de materia y calor.
- Simular columnas de destilación y absorción.

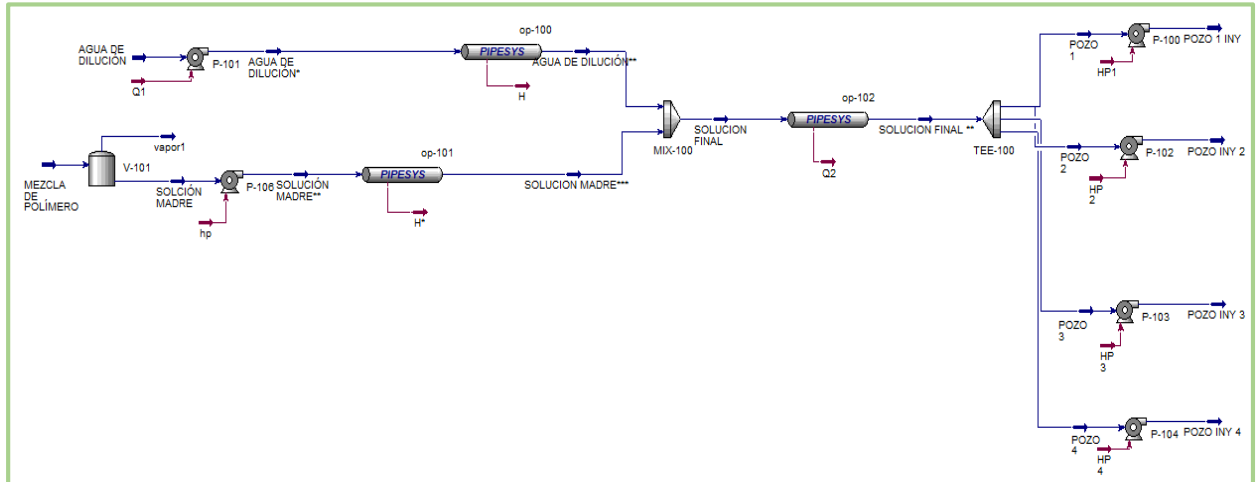
HYSYS usa el concepto de Paquete de Fluido (Fluid Package) para contener toda la información necesaria para los cálculos físicos de las propiedades de los componentes. Este acercamiento le permite definir toda información (propiedades, parámetros de interacción, reacciones, datos tabulares, componentes hipotéticos, etc.) dentro de una sola entidad.

Esta herramienta de HYSYS permite predecir las propiedades de las mezclas que van desde sistemas bien definidos de hidrocarburos ligeros hasta mezclas de aceites complejos y altamente no ideales (no electrolíticos) de los sistemas químicos.

Para realizar la simulación fue necesario crear un polímero hipotético en estado líquido asumiendo que este ya se encontraba en los tanques de mezcla, para esto se utilizó el peso molecular del polímero y se trabajó con la densidad del agua (62.3lb/ft<sup>3</sup>) puesto que la solución polimérica maneja una densidad relativamente igual a dicho fluido, con estos datos se determinó el peso molecular de la mezcla creando así el componente hipotético. A continuación, se simula el proceso de inyección del campo A partiendo de los tanques y de las bombas centrifugas (**Figura 23**) implementadas en el diseño. La ecuación de estado que se escogió fue la ecuación UNIQUAC, porque según los modelos descritos anteriormente esta

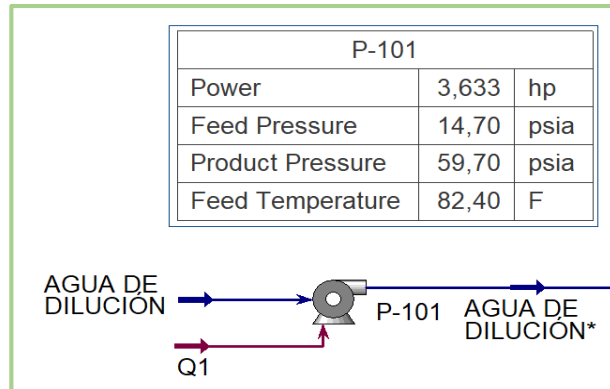
predice con éxito el equilibrio de sistemas altamente no ideales, por ejemplo, las soluciones poliméricas.

**Figura 23. Simulación proceso de inyección campo A.**



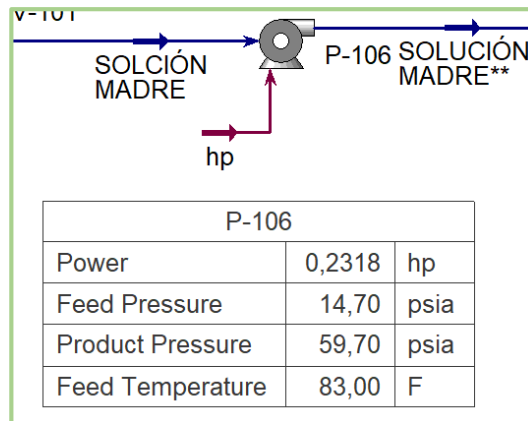
**3.7.3 Simulación bombas centrífugas** Se simuló el comportamiento de la bomba encargada de llevar el agua para diluir la solución madre. El agua proveniente de los *tanques de almacenamiento* ingresa a la bomba con una presión de 0 psig y una temperatura de 82,4 °F. El caudal que bombea corresponde a 2.820 BPD, el necesario para obtener la concentración de la solución final de 312 ppm. En la **Figura 24**, se pueden observar estos parámetros, que corresponden a los actualmente empleados en el campo A. También se observa la potencia requerida por la bomba para estas condiciones.

**Figura 24. Parámetros de simulación de la bomba centrífuga campo A.**



**3.7.4 Simulación bombas de cavidades progresivas** La simulación de esta bomba determina una potencia de 0,2318 hp necesaria para desplazar 180 BPD de solución madre hacia las bombas de inyección. Esta solución ingresa a una presión de 14,7 psia y una temperatura de 83 °F, y tiene una presión de descarga de 45 psig, como se observa en la **Figura 25**.

**Figura 25. Parámetros de simulación de bombas de cavidades progresivas campo A.**

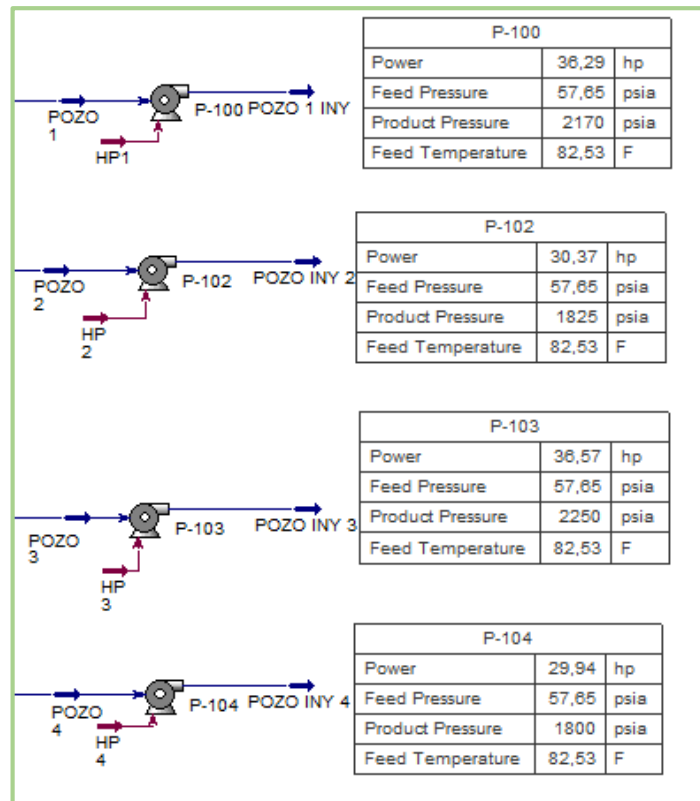


**3.7.5 Simulación bombas tríplex** Estas bombas se simularon a partir de las condiciones de operación (presión y caudal) que se manejan actualmente en cada uno de los pozos inyectoros de la planta de polímero en el campo A. El caudal total

de inyección es de 3.000 barriles diarios distribuido en cuatro pozos inyectora cada uno con 750 BPD.

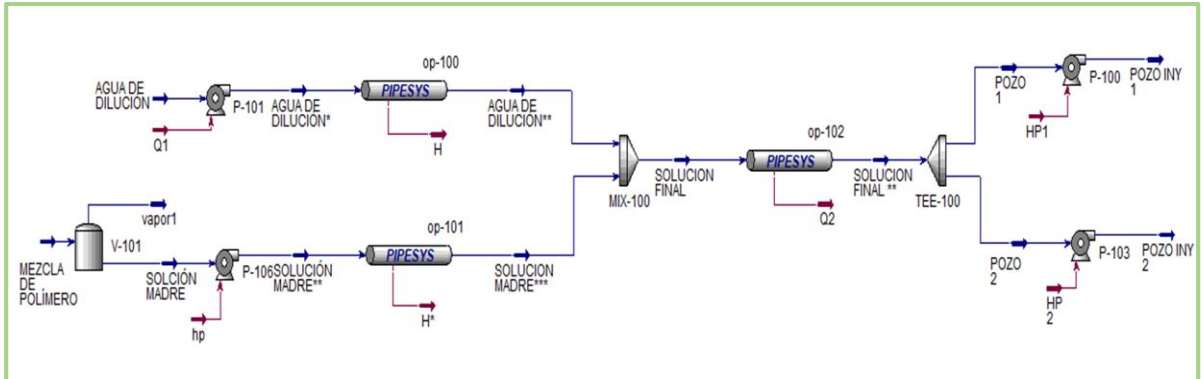
En la **Figura 26**, se muestra la presión de inyección de cada pozo y los requerimientos de potencia de cada bomba.

**Figura 26. Simulación bomba tríplex para cada pozo inyector.**



Para la simulación del campo B, se realizó el mismo procedimiento que el campo A, pero, con sus respectivos parámetros de operación. La **Figura 27**, muestra la simulación del campo B.

**Figura 27. Simulación proceso de inyección campo B.**



Una vez realizada la simulación para cada uno de los campos de estudio se obtiene la **Tabla 12**, la cual muestra los requerimientos de potencia de las bombas que intervienen en el proceso de inyección en los dos campos y se compara con la potencia con la que cuentan las bombas seleccionadas para la alternativa de diseño.

**Tabla 12. Requerimientos de potencia de las bombas simuladas.**

EQUIPO	REQUERIMIENTO DE POTENCIA CAMPO A	REQUERIMIENTO DE POTENCIA CAMPO B	POTENCIA EQUIPO IMPLEMENTADO
<b>Bombas centrífugas</b>	3,6	5,8	7
<b>Bombas de cavidades progresivas</b>	0,23	0,64	5
<b>Bombas triplex</b>	36,6	136,4	100

De la **Tabla 12**, se puede concluir que las bombas seleccionadas para la alternativa de diseño pueden funcionar de forma eficiente para los requerimientos de potencia de los dos campos. Para cada pozo inyector del campo B se utilizarán dos bombas triplex de 100 hp, para cumplir con el requerimiento de potencia 136,4 hp.

## 4. ESTUDIO FINANCIERO DE LA ALTERNATIVA DE DISEÑO PROPUESTA

Para determinar la viabilidad de la alternativa de diseño desde el punto de vista económico se realizó una evaluación financiera donde se utilizó el valor presente neto (VPN) para hacer una comparación entre la empresa prestadora de servicios, con la cual Ecopetrol tiene un contrato desde el año 2014 para la inyección de polímero en el campo A, y la alternativa de diseño desarrollada en este proyecto. El análisis se ejecutó a 5 años con periodos anuales, (365 días) teniendo como punto de partida el año 2018. Además, la divisa con la que se trabajaron todos los cálculos de costos de operación, costos de inversión e ingresos fue el dólar estadounidense (USD).

### 4.1 COSTOS DE ADQUISICIÓN DE LA ALTERNATIVA DE DISEÑO

En las **Tablas 10, 11 y 12**, se muestran los costos de cada uno de los equipos y accesorios que hacen parte de la alternativa de diseño propuesta en este proyecto. Debido a que algunos de estos costos fueron proporcionados en pesos colombianos (COP), se hizo la conversión a dólares con la tasa representativa del jueves 25 de enero del 2018 con un valor de COP 2.820,53. Además, se tienen en cuenta los costos de montaje y diseño que son expuestos en las **Tablas 13 y 14**.

El costo del montaje de la tubería se determina a partir del peso por metro de esta como se muestra en el **Anexo D**.

**Tabla 13. Costos de tuberías, válvulas y accesorios.**

<b>TUBERÍA, VÁVULAS Y ACCESORIOS</b>						
	ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<b>TUBERÍA</b>	1	TUBERÍA A/C 2" SCH40 S/COSTURA A-106	m	10,28	45,30	465,684
	2	TUBERÍA A/C 3" SCH40 S/COSTURA A-106	m	18,44	32,75	603,91
	3	TUBERÍA A/C 3" SCH80 S/COSTURA A-106	m	42,55	11,08	471,454
<b>BRIDAS</b>	4	FLANCHE W.N A/CARBON 2" X 150 LBS SCH40 RF	UND	11,10	30	333
	5	FLANCHE W.N A/CARBON 3" X 150 LBS SCH40 RF	UND	34,75	6	208,5
	6	FLANCHE W.N A/CARBON 3" X 1500 LBS SCH80 RF	UND	106,36	6	638,16
<b>ESPARRAGOS</b>	7	ESPARRAGO DE 5/8"X 3-1/4" A 193 GR B7 C/T	UND	0,88	120	105,6
	8	ESPARRAGO DE 5/8"X 3-3/4" A 193 GR B7 C/T	UND	0,96	24	23,04
	9	ESPARRAGO DE 1-1/8"X 7" A 193 GR B7 C/T	UND	12,41	48	595,68

<b>TUBERÍA, VÁVULAS Y ACCESORIOS</b>						
	ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<b>ACCESORIOS</b>	10	EMPAQUE FLEXITALICO DE 2" X 150 LBS	UND	1,42	4	5,68
	11	EMPAQUE FLEXITALICO DE 3" X 150 LBS	UND	2,82	4	11,28
	12	EMPAQUE ESPIROMETALICO DE 3" X 1500 LBS	UND	2,64	4	10,56
	13	CODO 90 A/CARBON 2" SCH40 A-234 WPB	UND	1,24	38	47,12
	14	CODO 90 A/CARBON 3" SCH40 A-234 WPB	UND	2,84	2	5,68
	15	CODO 90 A/CARBON 3" SCH80 A-234 WPB	UND	17,73	5	88,65
	16	TEE RED. A/C 3"X 2" SCH40 WPB	UND	5,52	1	5,52
	17	TEE A/CARBON 2" SCH40 WPB	UND	2,34	12	28,08
	18	THREDOLET A-105 DE 1/2" X 3/4" A 36 X 3000 NPT	UND	4,96	6	29,76
	19	NIPLE A/CARBON SCH80 1/2" X 3"	UND	2,48	12	29,76
<b>VÁVULAS</b>	20	VÁLVULA DE ALIVIO DE PRESIÓN 2" 150#, RF, A-216 GR WCB, 316 SSTL TRIM.	UND	4.808,8	3	14.426,4

TUBERÍA, VÁLVULAS Y ACCESORIOS						
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	CANTIDAD	VALOR TOTAL	
21	VÁLVULA CHEQUE 3", FLG, 150#, RF, A216 GR WCB, BC, TRIM8.	UND	123,86	1	123,86	
22	VÁLVULA CHEQUE 3" 1500#, RF, A216 GR, WCB, BC, TRIM 8.	UND	1.404,3	1	1.404,3	
23	VÁLVULA CHEQUE 2", FLG, 150#, RF, A216 GR WCB, BC, TRIM8.	UND	140,9	8	1.127,2	
24	VÁLVULA DE BOLA 3", 150#, RF, A216, GR, WCB, 316 SSTL TRIM W/REINFORCED TEFLON INSERT, REDUCED BORE.	UND	230	2	460	
25	VÁLVULA DE BOLA 3", 1500#, RF, A216, GR, WCB, 316 SSTL TRIM W/REINFORCED TEFLON INSERT.	UND	1908,5	1	1.908,5	

**Tabla 14. Precios de las bombas seleccionadas para la alternativa de diseño.**

<b>BOMBAS</b>						
	<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (USD)</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
<b>BOMBAS</b>	26	BOMBA CENTRIFUGA, MODELO 6-22, MOTOR 7HP, 3500 RPM, 60 HZ	UND	600	2	1.200
	27	BOMBA DE CAVIDADES PROGRESIVAS PCM, MODELO 25ª12 DE LA SERIE A, ACERO AL CARBON, MOTOR 5 HP, 3 FASES.	UND	30.000	2	60.000
	28	BOMBA TRIPLEX de PISTON DE NATIONAL OILWELL VARCO, MODELO 101T-4M, MOTOR DE 100 HP, 400 RPM	UND	122.500	4	490.000

**Tabla 15. Costos de tanques y demás equipo que hacen parte de la alternativa de diseño.**

<b>TANQUES Y OTROS EQUIPOS</b>						
	<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (USD)</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR TOTAL (USD)</b>
<b>TANQUES</b>	29	TANQUE DE MEZCLA DE POLÍMERO, 6,7 m3 DE CAPACIDAD, ACERO INOXIDABLE	UND	2.500	2	5.000

TANQUES Y OTROS EQUIPOS						
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	CANTIDAD	VALOR TOTAL (USD)	
30	TANQUE DE AGUA 500 Bls, LARGO DE 13.72 m. ANCHO 2.59 m., ALTO TOTAL 3.15 mts.	UND	37.180,87	2	74.361,74	
OTROS EQUIPOS	31	FILTROS DE PALL CORPORATION, TIPO CARTUCHO DE 10 MICRONES	UND	29	6	174
	32	VASIJA DE PALL CORPORATION, PARA FILTROS TIPO CARTUCHO	UND	4.990	2	9.980
	33	FILTROS DE PALL CORPORATION, TIPO BOLSA DE 25 MICRONES	UND	12	2	24
	34	VASIJA DE PALL CORPORATION, PARA FILTROS TIPO BOLSA, ACERO INOXIDABLE	UND	2050	2	4.100
	35	CONTENEDOR DE 40 FT INSONORISADO	UND	54.623,32	1	54.623,32

TANQUES Y OTROS EQUIPOS						
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	CANTIDAD	VALOR TOTAL (USD)	
36	TOLVA DE 4FT LARGO, 4 FT ANCHO, 4,4 FT FT + TORNILLO SIN FIN	UND	255,2	1	255,2	

Tabla 16. Costos de montaje.

MONTAJE					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	TARIFA UNITARIO (USD)	CANTIDAD	VALOR TOTAL (USD)
1	INSTALACIÓN DE EQUIPOS DE BOMBEO	UND	51,13	2	102,26
2	INSTALACIÓN, TRANSPORTE, EMBALAJE, DOSSIER Y PLANOS AS BUILT DE TANQUES DE MEZCLA	UND	182	2	364
3	INSTALACIÓN, TRANSPORTE, EMBALAJE, DOSSIER Y PLANOS AS BUILT DEL TANQUE DE ALM.	UND	275	2	550
4	MONTAJE DE TUBERÍA AEREA DE 2", SCH 40	Kg	1,31	246,21	322,53
5	MONTAJE DE TUBERÍA AEREA DE 3", SCH 80	Kg	1,31	168,86	221,20
6	MONTAJE DE TUBERÍA AEREA DE 3", SCH 40	Kg	1,31	369,42	483,94
7	CUADRILLA MECÁNICA	DÍA	12	830	9.960

MONTAJE					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	TARIFA UNITARIO (USD)	CANTIDAD	VALOR TOTAL (USD)
8	CUADRILLA DE TUBERÍA	DÍA	12	922	10.944
9	CAPATAZ MECÁNICO	MES	0,33	4.110,50	1.356,47
10	SUPERVISOR MECÁNICO	MES	0,33	5.115,50	1.688,12
11	ASESOR O VIGÍA	MES	0,33	3.105,20	1.024,72
12	OBRERO	DÍA	12	59	708
13	OFICIAL DE OBRAS CIVILES	DÍA	12	102,35	1.228,2
14	INSTRUMENTISTA (CON HERRAMIENTA Y EQUIPO ESTÁNDAR DE CALIBRACIÓN)	DÍA	10	278,23	2.782,30

**Tabla 17. Costos de diseño.**

DISEÑO					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	TARIFA UNITARIA (USD)	CANTIDAD	VALOR TOTAL (USD)
1	INVESTIGADOR 1	SMMV	276,98	7	1.938,89
2	INVESTIGADOR 2	SMMV	276,98	7	1.938,89
3	DIRECTOR	Hora	33	150	4.950

A continuación, en la **Tabla 15**, se presenta el costo total de la implementación de la alternativa de diseño propuesta en este proyecto.

**Tabla 18. Costo total de la unidad de inyección propuesta.**

<b>COSTO UNIDAD DE INYECCIÓN</b>	
<b>Costo de equipos (USD)</b>	727.276,00
<b>Costo diseño (USD)</b>	8.827,78
<b>Costo Montaje (USD)</b>	31.735,74
<b>Costo Químicos (USD)</b>	75.737,5
<b>TOTAL</b>	<b>843.577,02</b>

#### **4.2 UNIDAD DE INYECCIÓN DE LA EMPRESA PRESTADORA DE SERVICIOS**

Ecopetrol S.A. actualmente está llevando a cabo un proceso de inyección de polímero en el campo A, en convenio con una empresa operadora de servicios. La **Tabla 16** muestra los costos por el alquiler de la unidad de inyección y los costos del polímero utilizado.

**Tabla 19. Costos de alquiler de la unidad de inyección de la empresa prestadora de servicios y costos de químicos utilizados en el proceso de inyección.**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (USD)</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR TOTAL (USD)</b>
COSTO ALQUILER UNIDAD DE INYECCIÓN DE POLÍMERO	MES	60.272,36	12	723.268,32
COSTOS QUÍMICOS	Kg	2,5	30.295	75.737,5

**Fuente:** Ecopetrol S.A.

## 4.3 EVALUACIÓN FINANCIERA

**4.3.1 Valor presente neto (VPN)** El valor presente neto (VPN) es una herramienta que sirve como indicador para medir y determinar la viabilidad de una inversión o un proyecto en términos de rentabilidad y ganancia, el cual proporciona a partir de su análisis un marco de referencia para la toma de decisiones. Por ejemplo, si se quiere invertir en un nuevo activo o proyecto, gracias a este indicador se puede analizar si es viable o no, o si realmente conviene llevar a cabo dicha inversión.<sup>35</sup> El valor estimado puede ser positivo, negativo o continuar igual. Si es positivo significará que el valor de la empresa tendrá un incremento equivalente al monto del Valor Presente Neto. Si es negativo quiere decir que la empresa reducirá su riqueza en el valor que arroje el VPN. Si el resultado del VPN es cero, la empresa no modificará el monto de su valor.

Para hallar el VPN de un proyecto o inversión se utiliza la **Ecuación 4**.

$$VPN = \sum Fn(1 + i)^{-n} = 0$$

**Donde:**

**VPN=** Valor presente neto

**Fn=** Flujo de caja para cada periodo

**i=** Tasa interna de interés de oportunidad

**4.3.2 Tasa interna de interés de oportunidad (TIO)** Es la rentabilidad mínima que exige una empresa al momento de evaluar económicamente un proyecto; debe satisfacer las expectativas de los inversionistas y es establecido directamente por la empresa.

---

<sup>35</sup> DUQUE NAVARRO, Jannier. Valor presente neto [en línea]. ABC FINANZAS. 2016 (Recuperado en 27 de enero 2018) Disponible en: <https://www.abcfinanzas.com/administracion-financiera/valor-presente-neto>.

**4.3.3 Flujo de caja** El flujo de caja de un proyecto es el resultado de la diferencia entre la cantidad de dinero que ingresa y egresa de las arcas del negocio para cada periodo específico de tiempo que puede ser semana, mes, año, etc. Normalmente los flujos de caja se consideran anuales a efectos de evaluación de proyectos, sin embargo, existen casos particulares donde es conveniente reducir el tiempo de los periodos de los flujos de caja a semestres, meses o semanas.<sup>36</sup>

**4.3.3.1 Ingresos** Están compuestos por todas las entradas líquidas que generaría el negocio o proyecto, como son los ingresos por venta, los ingresos por servicios, y otros ingresos generados por el cobro de intereses, ventas de activos, etc. En la industria petrolera los ingresos están dados por las ganancias generadas por la venta de hidrocarburos.<sup>37</sup> El cálculo de los ingresos del presente proyecto se hace de acuerdo con la producción de crudo, las regalías y los precios de referencia del crudo, proyectados hasta el año 2022.

**4.3.3.2 Egresos** Esta conformados por todas aquellas salidas líquidas de dinero o volumen, necesarias para la ejecución y operación del proyecto, tales como: inversiones en activos, costos asociados al proyecto, costos de operación y mantenimiento, consumos propios, participación de terceros en la producción o ganancia, impuestos, etc. Estos egresos son la suma entre el capex y opex, a continuación, se define cada uno.

- **Opex**

Del inglés (Operating Expenditure), se refiere a los costos asociados con el mantenimiento de equipos y gastos de consumibles y otros gastos de funcionamiento y operación, necesarios para la producción y el funcionamiento del

---

<sup>36</sup> MAIX MUNTÓ, Rigoberto. Flujo de caja [en línea]. Evaluación económica de proyectos petroleros. Bogotá D.C Edición 2014- 1. p. 27. (Recuperado en: 27 enero de 2018). Disponible en: [https://issuu.com/cronprios/docs/af\\_completo\\_libro\\_de\\_proyectos\\_petr](https://issuu.com/cronprios/docs/af_completo_libro_de_proyectos_petr)

<sup>37</sup> Ibid., p. 27

sistema. Los costos de operación del presente proyecto corresponden a los costos para extraer los hidrocarburos desde el fondo de pozo hasta superficie (Lifting Cost) y los impuestos anuales a pagar que en este caso son el impuesto sobre la renta a personas jurídicas y el impuesto sobre la renta para la equidad (CREE).

- **Capex**

Cuando un ingreso se destina a la compra de equipos u otros bienes que pasan a formar parte de los activos de la empresa, se considera que contribuye al capital de la empresa. En el medio de la industria petrolera se refiere a ese tipo de egreso como CAPEX, por su abreviatura e inglés de Capital Expenses. Para el caso de la alternativa de diseño, el capex viene dado por el valor de la unidad de inyección y el costo del polímero a ser inyectado. Por otra parte, para la empresa prestadora de servicios solo se tendrá en cuenta como capex el costo del polímero inyectado, debido a que la unidad de inyección es alquilada y este tipo de gastos entra en la definición de opex.

#### **4.4 DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA**

Para el desarrollo de la evaluación financiera se propusieron 3 precios de crudo diferentes, debido a que el precio del crudo está en constante variación. Esto permitió realizar un análisis más completo de la viabilidad económica de la alternativa de diseño respecto a una empresa prestadora de servicios.

Se establecen entonces 3 escenarios: el primero es el precio que Ecopetrol ha pronosticado para el campo A, (58,67 USD/Bbl), el segundo es un escenario pesimista cuyo precio será 20 dólares menos que el estimado por Ecopetrol, y, por último, un escenario optimista de 20 dólares por encima del estimado por Ecopetrol.

Este valor se corrobora con los pronósticos que se esperar para el precio del crudo a futuro.

**Tabla 20. Escenarios para realizar la evaluación financiera.**

PRECIOS DE CRUDO UTILIZADOS EN LA EVALUACIÓN FINANCIERA		
Escenario pesimista (USD/Bbl)	Escenario establecido por Ecopetrol (USD/Bbl)	Escenario optimista (USD/Bbl)
38,67	58,67	78,67

Fuente: Ecopetrol S.A.

**4.4.1 Análisis de ingresos** Los ingresos en la industria petrolera están dados por las ganancias generadas por la venta de hidrocarburos. No obstante, para calcular los ingresos totales es necesario conocer el porcentaje de regalías que son una contraprestación económica de propiedad del estado otorgado por la explotación de un recurso natural no renovable. El valor de las regalías es propuesto por la agencia nacional de hidrocarburos (ANH), y para el campo en estudio es 20% sobre la producción.<sup>38</sup>

El pronóstico de producción incremental asociado al piloto de inyección de polímero en el campo A, bajo el cual se hizo el análisis de ingresos se muestra en el **Anexo E**.

A continuación, en la **Tabla 18**, se muestra el análisis de ingresos para un precio de crudo de 58,67 USD/Bbl.

<sup>38</sup> COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 756. (23, julio, 2002). Por la cual se modifica la Ley 141 de 1994, se establecen criterios de distribución y se dictan otras disposiciones. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2002. no. 44878. p. 1-38.

**Tabla 21. Ingresos totales para el escenario pronosticado por Ecopetrol S.A.**

<b>Año</b>	<b>Producción (Bbls)</b>	<b>Precio del crudo (USD/Bbl)</b>	<b>Venta del crudo (USD)</b>	<b>Regalías (USD)</b>	<b>Ingresos totales (USD)</b>
2018	126.071,00	58,67	7.396.585,57	1.479.317,11	5.917.268,46
2019	102.839,00	58,67	6.033.564,13	1.206.712,83	4.826.851,30
2020	91.250,00	58,67	5.353.637,50	1.070.727,50	4.282.910,00
2021	70.518,00	58,67	4.137.291,06	827.458,21	3.309.832,85
2022	59.313,00	58,67	3.479.893,71	695.978,74	2.783.914,97

**4.4.2 Análisis de egresos** Para determinar los egresos fue necesario establecer el costo de la unidad de inyección de la propuesta y también conocer el costo del alquiler de la planta de inyección de polímero implementada en el campo de A. Adicionalmente, se tuvo en cuenta el valor del Lifting Cost, que para el campo A, es de 8 USD/bbl<sup>39</sup> y los impuestos anuales que debe pagar Ecopetrol S.A, que en este caso son el impuesto sobre la renta a personas jurídicas del 33% para el año 2018 y 32% para los años posteriores y el impuesto sobre la renta para la equidad (CREE) 8%.<sup>40</sup>

En las **Tablas 19 y 20**, se muestran los egresos implementando la alternativa de diseño y alquilando la unidad de inyección a la empresa prestadora de servicios, suponiendo un precio del crudo de 58,67 USD/bbl.

<sup>39</sup> ACOSTA, T, et al. Recuperación mejorada en un yacimiento de alta complejidad estratigráfica: Campo Casabe (Caso de estudio). Bogotá, Aceip, 2017.

<sup>40</sup> DIAN. ABC del CREE. [En línea] [Citado en 28 de enero de 2018]. Disponible de World Wide Web: [http://www.dian.gov.co/contenidos/otros/Preguntas\\_Cree\\_2014.html#a1](http://www.dian.gov.co/contenidos/otros/Preguntas_Cree_2014.html#a1).

**Tabla 22. Egresos totales anuales alquilando una unidad de inyección de la empresa prestadora de servicios.**

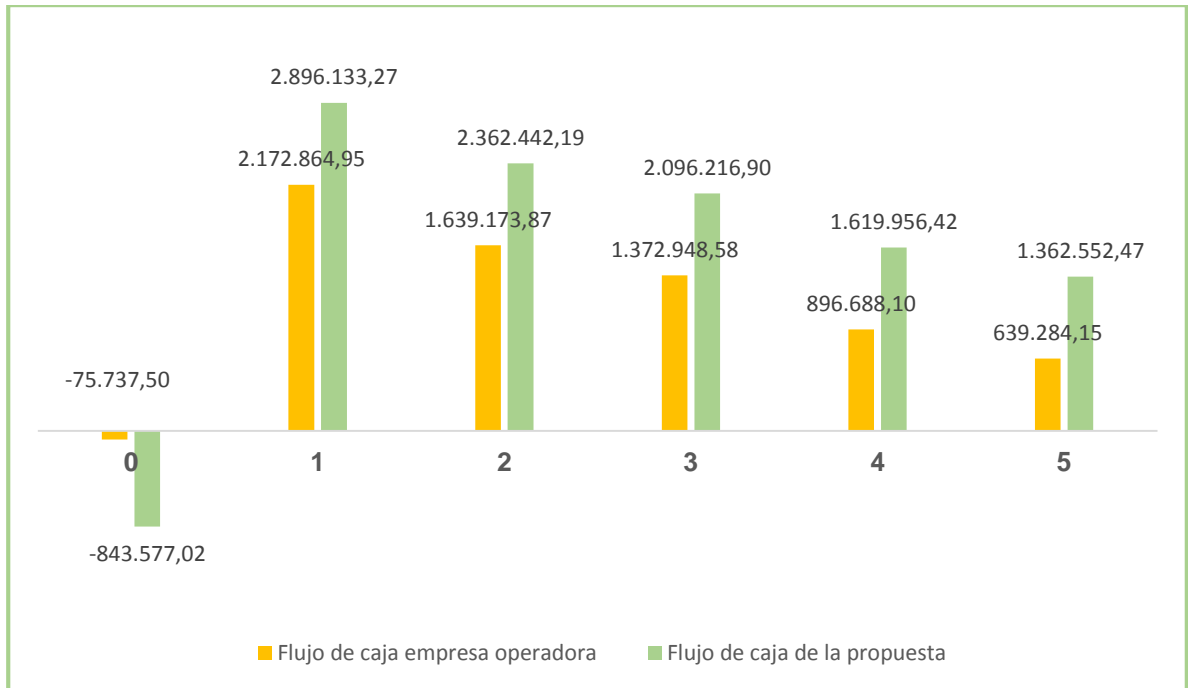
	OPEX				CAPEX	Total Egresos (USD)
Año	Lifting Cost (USD/Bbl)	Depreciación	Impuestos (USD)	Alquiler (USD)	Costo polímero (USD)	
2018	1.008.568,00	-	2.012.567,19	723.268,32	75.737,5	3.820.141,01
2019	822.712,00	-	1.641.697,11	723.268,32		3.187.677,43
2020	730.000,00	-	1.456.693,10	723.268,32		2.909.961,42
2021	564.144,00	-	1.125.732,43	723.268,32		2.413.144,75
2022	474.504,00	-	946.858,50	723.268,32		2.143.630,82

**Tabla 23. Egresos totales anuales implementando la alternativa de diseño.**

	OPEX			CAPEX		Total, Egresos (USD)
Año	Lifting Cost (USD/Bbl)	Depreciación	Impuestos	Costo de unidad de inyección	Costo polímero (USD)	
2018	1.008.568,00	-	2.012.567,19	767.839,52	75.737,5	3.864.712,21
2019	822.712,00	-	1.641.697,11			2.464.409,11
2020	730.000,00	-	1.456.693,10			2.186.693,10
2021	564.144,00	-	1.125.732,43			1.689.876,43
2022	474.504,00	-	946.858,50			1.421.362,50

**4.4.3 Flujo de caja** Las **Gráficas 1.** representa el flujo de caja neto de cada una de las formas de adquisición de una planta de inyección de polímero teniendo en cuenta los ingresos y egresos planteados anteriormente.

**Gráfica 2. Flujo de caja neto alquilando una unidad de inyección de la empresa operadora y de la propuesta de diseño.**



Para los escenarios pesimista y optimista con un precio de crudo de 38,67 y 78,67 USD/Bbl respectivamente, los análisis de ingresos, egresos y flujo de caja se desarrollan detalladamente en el **Anexo F, G y H**. También allí se relacionan los cálculos utilizados para determinar los ingresos y egresos.

**4.4.4 Análisis y comparación del valor presente neto (VPN)** A continuación, se presenta en las **Tablas 21, 22 y 23**, la comparación del valor presente neto, entre la opción de adquirir una unidad de inyección a partir de la propuesta de ingeniería conceptual y la opción de alquilarla a una empresa prestadora de servicios, para cada escenario del precio del crudo.

- Escenario Pronosticado por Ecopetrol 58,67 USD

Tabla 24. Comparación del VPN para un precio de crudo de 58,67 USD.

UNIDAD DE INYECCIÓN		
	Empresa prestadora de servicios	Alternativa de diseño
<b>PRODUCCIÓN TOTAL (Bbls)</b>	449.991,00	449.991,00
<b>VPN (USD)</b>	5.764.943,41	7.964.272,90

- Escenario optimista 78,67.

Tabla 25. Comparación del VPN para un precio de crudo de 78,67 USD.

UNIDAD DE INYECCIÓN		
	Empresa prestadora de servicios	Alternativa de diseño
<b>PRODUCCIÓN TOTAL (Bbls)</b>	449.991,00	449.991,00
<b>VPN (USD)</b>	9.384.359,85	11.583.689,34

- Escenario pesimista 38,67.

Tabla 26. Comparación del VPN para un precio de crudo de 38,67 USD.

UNIDAD DE INYECCIÓN		
	Empresa prestadora de servicios	Alternativa de diseño
<b>PRODUCCIÓN TOTAL (Bbls)</b>	449.991,00	449.991,00
<b>VPN (USD)</b>	2.145.526,96	4.344.856,45

De esta comparación se obtiene la **Tabla 24**, que se muestra a continuación.

Precio del crudo	Diferencia de VPN para cada escenario	Porcentaje de ganancia de VPN
38,67	2.199.329,49	102,5%
58,67	2.199.329,49	38,15%
78,67	2.199.329,49	23,43%

Desde el punto de vista financiero, en los 3 escenarios se observa como la planta de inyección propuesta tiene un VPN mayor que el generado por el alquiler de una unidad de inyección de la empresa prestadora de servicios. En la **Tabla 23**, se muestra como la diferencia de VPN es la misma para todos los escenarios, debido a que la producción y la cantidad de egresos no varía para ninguno de estos. En esta tabla también se contempla el porcentaje de ganancia de VPN de la implementación de la alternativa de diseño con respecto a alquiler de la unidad de inyección, el cual se determina a partir de la **Ecuación 5**.

$$\%VPN = \frac{VPN_{PROPUESTA} - VPN_{ALQUILER DE LA UNIDAD}}{VPN_{ALQUILER DE LA UNIDAD}} * 100$$

De acuerdo con esta información se puede afirmar que para Ecopetrol S.A. es más rentable diseñar e implementar su propia planta de inyección de polímero que recurrir a una empresa prestadora de servicios.

## 5. CONCLUSIONES

- La planta de inyección propuesta es adecuada para manejar las condiciones de operación presentadas en los campos de estudio. Además, debido a que la unidad es de tipo móvil, podría implementarse en nuevos proyectos de inyección de polímero y así proveer herramientas en mejores términos negociables para Ecopetrol.
- Las unidades de inyección que están siendo alquiladas por Ecopetrol S.A. para los campos A y B están diseñadas para manejar soluciones poliméricas concentradas de hasta 15 g/l, y al observar los reportes de los campos de estudio, se ha trabajado con concentraciones de hasta 10 g/l. Esta concentración se puede manejar bajo un sistema de eductor convencional como el propuesto en la alternativa de diseño.
- Con base en el análisis financiero realizado, la implementación de la alternativa de diseño resulta ser más rentable para Ecopetrol S.A., debido a que se incrementa el VPN con respecto a la opción base en cada uno de los tres escenarios propuestos.

## 6. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis del comportamiento de la viscosidad de los polímeros utilizados bajo las dos tecnologías de la industria para disolver el polímero en agua (Eductor y unidades PSU) y con esto tener otro parámetro de comparación además del financiero para una elección acertada de estas unidades en un proyecto de inyección de polímero.
- Verificar en cuáles campos operados por Ecopetrol S.A. se está realizando un estudio de la viabilidad de implementar un proceso de inyección de polímero, y determinar si la unidad de inyección propuesta en el proyecto podría a llegar a implementarse en dichos campos.
- Se requiere incluir en la propuesta los costos de implementar un sistema para la automatización de procesos.

## BIBLIOGRAFÍA

AUDIBERT, A., et al. Thermal stability of sulfonated polymers. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. SPE-28953-MS.1995.

BRIDGEWATER, S., et al. Polymer EOR-A New HSE Hazard in an Old Industry. En International Petroleum Technology Conference. International Petroleum Technology Conference, 2016.

CHANG, Harry L., et al. Polymer flooding technology yesterday, today, and tomorrow. Journal of Petroleum Technology. SPE-7043-PA. 1978.

CHANG, Harry Lo, et al. Chemical EOR Injection Facilities-From Pilot Test to Field-Wide Expansion. SPE Enhanced Oil Recovery Conference. SPE 165308. 2013.

ESCANDAR RAMIREZ, Zwanny; TALEB RESTREPO, Shadya. propuesta de ingeniería conceptual a escala piloto para las facilidades de un proceso de inyección de polímeros, inyección de surfactante-polímero e inyección de álcalisurfactante-polímero en ecopetrol s.a. Trabajo de grado. Bogotá D.C. Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías. 2015. 209 p.

HRYC, A., et al. Evaluation of a Polymer Injection Pilot in Argentina. SPE Latin America and Caribbean Heavy and Extra Heavy Oil Conference. SPE-181210. 2016.

JIMENEZ DIAZ, Robinson, et al. Análisis comparativo de procesos de inyección de polímeros ejecutados en Colombia. Bogotá, Acipet, 2017. p. 6.

JIMÉNEZ, Ana. Metodología para el diseño de baches en un proceso de inyección de polímeros a partir de fenómenos de interacción roca / fluidos presentes. Tesis de grado. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad fisicoquímicas. 2015.

KUMAR, Pankaj, et al. Field Implementation of Mangala Polymer Flood: Initial Challenges, Mitigation and Management. SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia. SPE-179820, 2016.

LUO, P. Y., et al. Evaluation of a hydrophobically associative polymer in Daqing ASP flooding. PGODD, 2001, vol. 20, no 6, p. 1-4.

MEHTA, Nirav, et al. Challenges in Full Field Polymer Injection Mangala in Field. SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia. SPE-179807. 2016.

MELO, M. A., et al. Lessons Learned From Polymer Flooding Pilots in Brazil. SPE Latin America and Caribbean Mature Fields Symposium. SPE-184941. 2017.

MOHANRAM, Santosh, et al. Challenges During Execution, Construction and Operational Readiness Phase of Surface Facilities in a Full Field Polymer Flood Project. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE-181615. 2016.

PANDEY, Amitabh, et al. Chemical EOR pilot in mangala field: results of initial polymer flood phase. SPE Improved Oil Recovery Symposium. SPE-154159, 2012.

PUTNAM, John M. Facility Requirements for Implementing a Chemical EOR Project. En Enhanced Oil Recovery Field Case Studies. 2013. p. 337-360.

SHENG, J. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery, Teory and Practice. Oxford. 2011.

SHENG, James J., et al. Status of polymer-flooding technology. Journal of Canadian Petroleum Technology. SPE 174541. 2015.

SNF FLOERGER. Enhancing Polymer Flooding Performance 30 Years of Experience in EOR [En línea] [Citado en 07 de diciembre de 2014]. Disponible de World Wide Web: <http://snf.us/wp-content/uploads/2014/08/EOR-Oil-30-Years-of-EOR1.pdf>

SNF FLOERGER. FLOQUIP PSU High speed polymer dissolution equipment. [en línea] [citado en 20 de enero de 2018] Disponible de World Wide Web: <http://www.snf-oil.com/images/phocagallery/brochures/Equipment-FLOQUIP-Polymer-Slicing-Unit.pdf>

THOMAS, A.; GAILLARD, N.; FAVERO, C. Some key features to consider when studying acrylamide-based polymers for chemical enhanced oil recovery. Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles, 2012, vol. 67, no 6, p. 887-902.

## ANEXOS

### ANEXO A CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LOS TANQUES DE MADURACIÓN

Se realizó un balance de masa sencillo para determinar el volumen de los tanques. Se partió del tiempo de disolución utilizado en el campo B, el cual corresponde a 60 minutos, y los barriles por día de solución madre que estos tienen que suministrar. Primero se hallaron los ciclos de inyección por día de los tanques con la **Ecuación 1**.

**Ecuación 1.** Ciclos por día.

$$\text{Ciclos por día} = \frac{1440 \text{ minutos}}{\text{tiempo de disolución}}$$

$$\frac{\text{Ciclos}}{\text{día}} = \frac{1440 \text{ minutos}}{60 \text{ minutos}} = 24 \text{ ciclos/día}$$

Debido a que hay dos tanques y están funcionando alternadamente, cada uno cumple con 16 ciclos/día.

Posteriormente con los barriles de solución madre que necesitan suministrar los tanques se calcula la capacidad que deben tener estos para cumplir esta necesidad. De acuerdo con la **Ecuación 2**.

**Ecuación 2.** Volumen efectivo del tanque.

$$\text{Volumen del tanque efectivo} = \frac{\frac{\text{Barriles}}{\text{día}} \text{ de solución madre}}{\text{Ciclos/día}}$$

Como se quiere trabajar en los tanques al doble de la capacidad requerida se estipula que cada tanque debe ser capaz de suministrar toda la cantidad de solución madre que el proceso de inyección necesita en 1 día.

$$\text{Volumen del tanque efectivo} = \frac{600 \text{ Barriles/día}}{24 \frac{\text{ciclos}}{\text{día}}} = 25 \text{ Barriles/ciclo}$$

El volumen efectivo del tanque equivale al 60% puesto que cada tanque trabaja con controladores de nivel de llenado mínimo 20% y máximo 80%. De acuerdo de esto el volumen total de cada tanque es 9,47 Barriles como se muestra a continuación en la **Ecuación 3**.

**Ecuación 3.** Volumen total de cada tanque de maduración.

$$\text{volumen total de cada tanque} = \frac{\text{volumen efectivo}}{0,6}$$

$$\text{volumen total de cada tanque} = \frac{25 \text{ Barriles}}{0,6} = 42 \text{ Barriles}$$

## ANEXO B DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE TUBERIA POR MEDIO DE LAS NORMAS ASME B31.3 Y ANSI B36 10/19

Para determinar el grosor de la tubería implementada en la alternativa de diseño se utiliza la **Ecuación 1**, y las tablas que están incorporadas en la norma ASME B31.3. y la norma ANSI B36.10/19.

### Ecuación 1.

$$t = \frac{pD}{2(SE + P\gamma)}$$

#### Donde:

- t:** Espesor de la tubería por presión
- p:** Presión de diseño interna manométrica
- S:** Valor de esfuerzo del material
- D:** Diámetro externo del tubo
- E:** Factor de calidad
- γ:** Coeficiente

**Tabla 1.** Esfuerzos permitidos básicos en tensión para metales.

Material	No. de espec.	N.º P o N.º S (5)	Grado	No. UNS	Notas	Temp. min. °F (6)	Min. esfuerzo especificado, ksi		Temp. min. a 100	200	300
							Tensión	Elasticidad			
<b>Acero carbón tuberías y tubos (2)</b>											
A 285 Gr. A	A 134	1	...	...	(8b)(57)	B	45	24	15,0	14,7	14,2
A 285 Gr. A	A 672	1	A45	K01700	(57)(59)(67)	B	45	24	15,0	14,7	14,2
Soldadura a tope Smls y ERW	API 5L	S-1	A25	...	(8a)	-20	45	25	15,0	15,0	14,7
	API 5L	S-1	A25	...	(57)(59)	B	45	25	15,0	15,0	14,7
...	A 179	1	...	K01200	(57)(59)	-20	47	26	15,7	15,7	15,3
Tipo F	A53	1	A	K02504	(8a)(77)	20	48	30	16,0	16,0	16,0
...	A 139	S-1	A	...	(8b)(77)	A	48	30	16,0	16,0	16,0
...	A 587	1	...	K11500	(57)(59)	-20	48	30	16,0	16,0	16,0
...	A53	1	A	K02504	(57)(59)	B	48	30	16,0	16,0	16,0
...	<b>A 106</b>	<b>1</b>	<b>A</b>	<b>K02501</b>	<b>(57)</b>	<b>B</b>	<b>48</b>	<b>30</b>	<b>16,0</b>	<b>16,0</b>	<b>16,0</b>
...	A 135	1	A	...	(57)(59)	B	48	30	16,0	16,0	16,0
...	A 369	1	FPA	K02501	(57)	B	48	30	16,0	16,0	16,0

**Fuente:** Sociedad Americana de ingenieros Mecánicos (ASME). Tuberías de proceso. B31.3. Estados Unidos. 2010. p. 158.

**Tabla 2.** Factores de calidad básicos para juntas longitudinales soldadas en tubería, tuberías y accesorios, E.

No. espec.	Clase (o tipo)	Descripción	E <sub>j</sub> (2)	Notas. Apéndice A
<b>Acero carbono</b>				
API 5L	...	Tubería sin costura	1.00	...
		Tubería soldada por resistencia eléctrica	0.85	...
		Tubería soldada por fusión eléctrica, doble tope, cordón recto o en espiral	0.95	...
		Soldada a tope en horno	0.60	...
A 53	Tipo S	Tubería sin costura	1.00	...
	Tipo E	Tubería soldada por resistencia eléctrica	0.85	...
	Tipo F	Soldada a tope en horno	0.60	...
A 105	...	Forjas y accesorios	1.00	(9)
<b>A 106</b>	<b>...</b>	<b>Tubería sin costura</b>	<b>1.00</b>	<b>...</b>
A 134	...	Tubería soldada por fusión eléctrica, doble tope, cordón recto o en espiral	0.80	...
A 135	...	Tubería soldada por resistencia eléctrica	0.85	...
A 139	...	Tubería soldada por fusión eléctrica, doble tope, cordón recto o en espiral	0.80	...
A 179	...	Tubería sin costura	1.00	...

**Fuente:** Sociedad Americana de ingenieros Mecánicos (ASME). Tuberías de proceso. B31.3. Estados Unidos. 2010. p. 209.

**Tabla 3.** Valores de coeficiente Y para  $t \leq D/6$ .

Materiales	Temperatura, °C (°F)					
	≤ 482 (900 y menores)	510 (950)	538 (1.000)	566 (1.050)	593 (1.100)	≤ 621 (1.150 y mayores)
<b>Aceros Ferríticos</b>	<b>0,4</b>	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7
Aceros Austeníticos	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7
Otros metales ductiles	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Hierro Fundido	0,0	...	...	...	...	...

**Fuente:** Sociedad Americana de ingenieros Mecánicos (ASME). Tuberías de proceso. B31.3. Estados Unidos. 2010. p. 22.

**Tabla 4.** Dimensiones y pesos de la tubería de acero forja y sin costuras.

Inchs Units				Identification			SI Units		
Inch Nominal Size	Outside Diameter In.	Wall Thickness In.	Plain End Weight lb/ft	API Specs	Standard(STD) X- strong(X) XX- strong(XXS)	Schedule No.	Outside Diameter mm	Wall Thickness mm	Plain End Mass kg/m
2	2.375	0.083	2.03	5L 5LX			60.3	2.11	3.03
2	2.375	0.109	2.64	5L 5LX			60.3	2.77	3.93
2	2.375	0.125	3.00	5L 5LX			60.3	3.18	4.48
2	2.375	0.141	3.36	5L 5LX			60.3	3.58	5.01
2	2.375	0.154	3.65	5L 5LX	STD	40	60.3	3.91	5.44
2	2.375	0.172	4.05	5L 5LX			60.3	4.37	6.03
2	2.375	0.188	4.39	5L 5LX			60.3	4.78	6.54
2	2.375	0.218	5.02	5L 5LX	XS	80	60.3	5.54	7.48
2	2.375	0.250	5.67	5L 5LX			60.3	6.35	8.45
2	2.375	0.281	6.28	5L 5LX			60.3	7.14	9.36
2	2.375	0.344	7.46	5L 5LX	XXS	160	60.3	8.74	11.11
2	2.375	0.438	9.03	5L 5LX			60.3	11.07	13.44
3	3.500	0.083	3.03	5L 5LX			88.9	2.11	4.52
3	3.500	0.109	3.95	5L 5LX			88.9	2.77	5.88
3	3.500	0.125	4.51	5L 5LX			88.9	3.18	6.72
3	3.500	0.141	5.06	5L 5LX			88.9	3.58	7.53
3	3.500	0.154	5.57	5L 5LX			88.9	3.96	8.29
3	3.500	0.172	6.11	5L 5LX			88.9	4.37	9.11
3	3.500	0.188	6.65	5L 5LX	STD	40	88.9	4.78	9.92

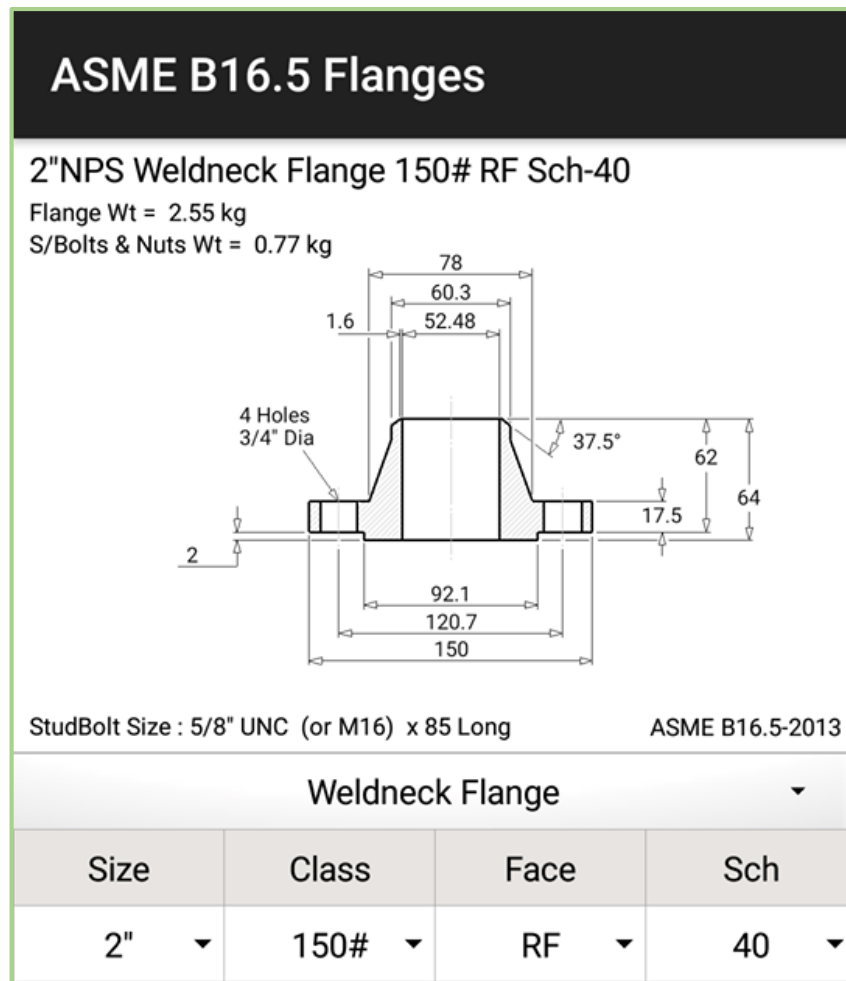
Inchs Units				Identification			SI Units		
Inch Nominal Size	Outside Diameter In.	Wall Thickness In.	Plain End Weight lb/ft	API Specs	Standard(STD) X- strong(X) XX- strong(XXS)	Schedule No.	Outside Diameter mm	Wall Thickness mm	Plain End Mass kg/m
3	3.500	0.218	7.58	5L 5LX			88.9	5.49	11.29
3	3.500	0.250	8.68	5L 5LX			88.9	6.35	12.93
3	3.500	0.281	9.66	5L 5LX			88.9	7.14	14.40
3	3.500	0.344	10.25	5L 5LX	XS	80	88.9	7.62	15.27
3	3.500	0.438	14.32	5L 5LX			88.9	11.13	21.35
3	3.500	0.600	18.58	5L 5LX	XXS	160	88.9	15.24	27.68

Fuente: CARBON, Alloy; PIPES-ASME, Stainless Steel. ANSI B36. 10/19, nd. Modificado por los autores.

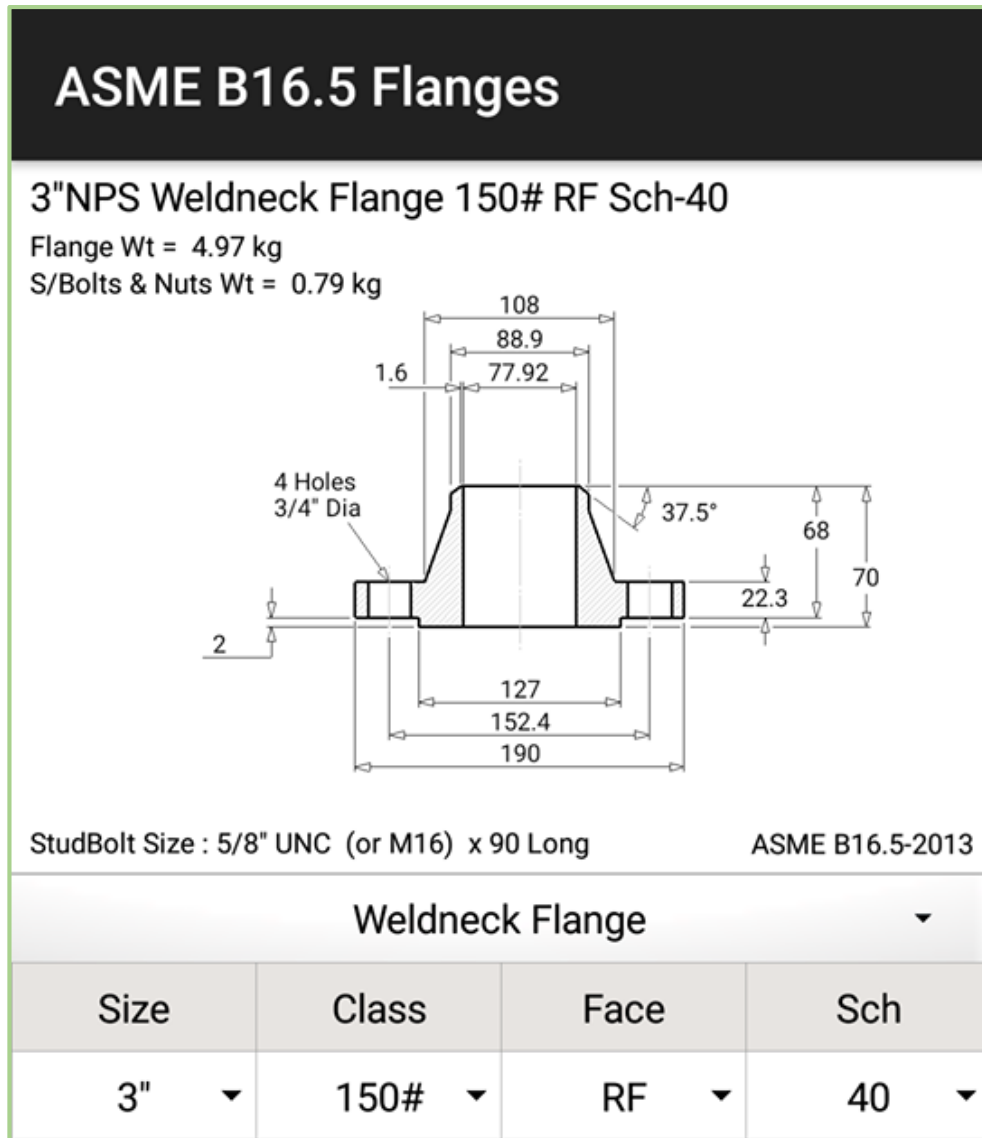
## ANEXO C ESPÁRRAGOS SELECCIONADOS PARA LAS BRIDAS IMPLEMENTADAS UTILIZANDO EL SOFTWARE COMERCIAL PIPE DATA

Conociendo cuales son las bridas necesarias para la conexión de tubería en la alternativa de diseño, se recurre al software comercial Pipe Data para determinar las características que debe tener los espárragos encargados de unir brida con brida como se muestra en las **Figuras 1, 2 y 3**.

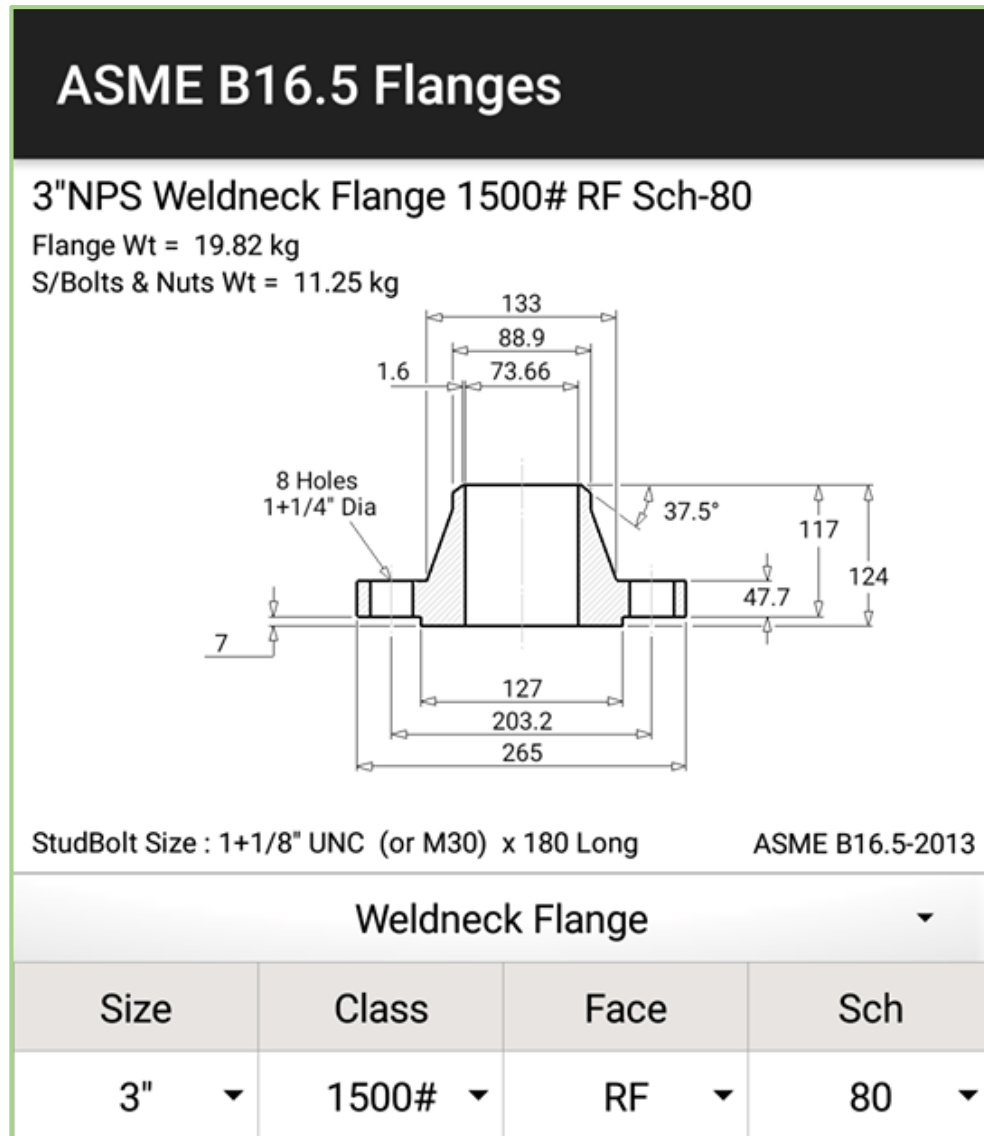
**Figura 1.** Características de los espárragos para una brida de diámetro nominal de 2" tipo Weldneck 150#.



**Figura 2.** Características de los espárragos para una brida de diámetro nominal de 3" tipo Weldneck 150#.



**Figura 3.** Características de los espárragos para una brida de diámetro nominal de 3" tipo Weldneck 1500#.



## ANEXO D COSTO DEL MONTAJE DE LA TUBERÍA SELECCIONADA PARA LA ALTERNATIVA DE DISEÑO

Por medio de la **Tabla 1**. se determinó el costo del montaje de la tubería cotizada. Dependiendo del diámetro y el Schedule seleccionados se determina el peso por metro de cada tubo (Kg/m) este se multiplica por la longitud requerida en la unidad de inyección propuesta así se obtiene el peso total de cada línea de flujo implementadas en el diseño y se multiplica por el costo de montaje por cada kilogramo obteniendo así el costo total del montaje de las líneas de flujo.

**Tabla 1.** Tubería de acero al carbono api 5l / astm a53 / a106

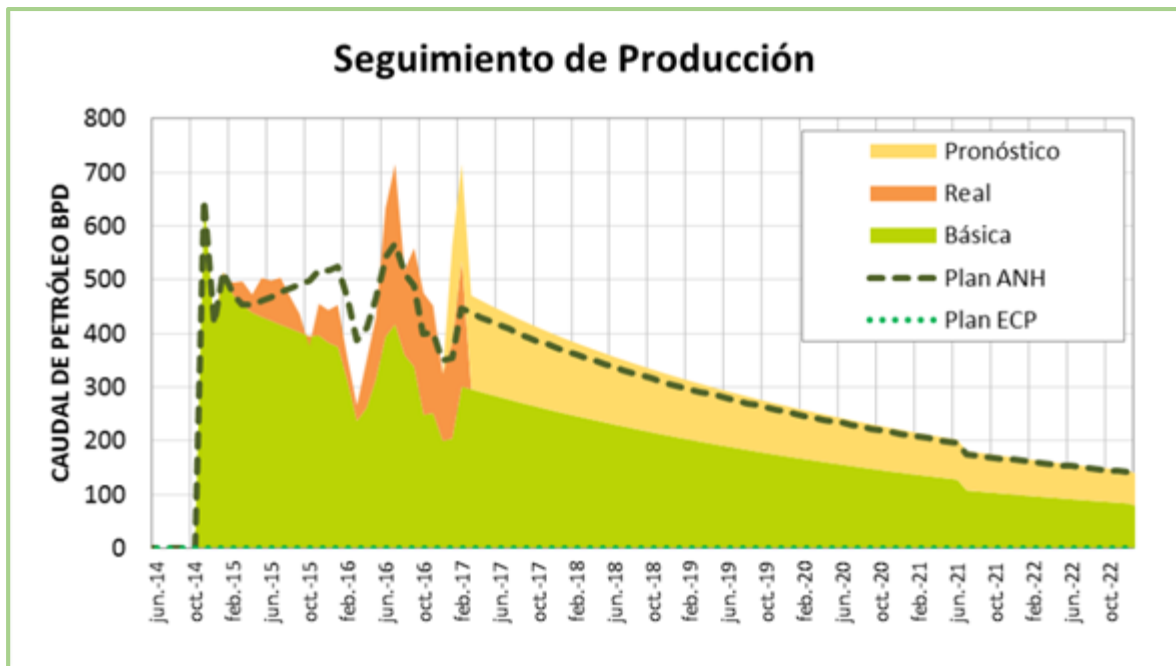
Diámetro Nominal NPS		Diámetro Exterior Real		Espesor de Pared		Identificación		Peso del Tubo		ASTM A53 PRESION DE PRUEBA			
Pulgadas in.	Milímetros mm.	(in.)	mm.	Pulgadas (in.)	Milímetros (mm.)	Weight Class	Schedule	lb/pie	kg/m	Grado A		Grado B	
										psi	Kg/cm2	psi	Kg/cm2
1/2	15	0.840	21.3	0.109	2.77	STD	40	0.85	1.27	700	49	700	49
				0.147	3.73	XS	80	1.09	1.62	850	60	850	60
3/4	20	1.050	26.7	0.113	2.87	STD	40	1.13	1.69	700	49	700	49
				0.154	3.91	XS	80	1.47	2.20	850	60	850	60
1	25	1.315	33.4	0.133	3.38	STD	40	1.68	2.50	700	49	700	49
				0.179	4.55	XS	80	2.17	3.24	850	60	850	60
1-1/4	32	1.660	42.2	0.140	3.56	STD	40	2.27	3.39	1200	84	1300	91
				0.191	4.85	XS	80	3.00	4.47	1800	127	1900	134
1-1/2	40	1.900	48.3	0.145	3.68	STD	40	2.72	4.05	1200	84	1300	91
				0.200	5.08	XS	80	3.63	5.41	1800	127	1900	134
2	50	2.375	60.3	0.154	3.91	STD	40	3.65	5.44	2300	162	2500	176
				0.218	5.54	XS	80	5.02	7.48	2500	176	2500	176
2-1/2	65	2.875	73	0.203	5.16	STD	40	5.79	8.63	2500	176	2500	176
				0.276	7.01	XS	80	7.66	11.41	2500	176	2500	176
				0.375	9.52	---	160			2500	176	2500	176
				0.552	14.02	XXS	-			2500	176	2500	176
3	80	3.500	88.9	0.125	3.18	---	-	4.51	6.72	1290	91	1500	105
				0.156	3.96	---	-	5.57	8.29	1600	112	1870	131
				0.188	4.78	---	-	6.65	9.92	1930	136	2260	159
				0.216	5.49	STD	40	7.58	11.29	2220	156	2500	176
				0.250	6.35	---	-	8.68	12.93	2500	176	2500	176
				0.281	7.14	---	-	9.66	14.40	2500	176	2500	176
				0.300	7.62	XS	80	10.25	15.27	2500	176	2500	176

**Fuente:** VEMACERO. Tablas, Disponible en: <http://www.vemacero.com/Tablas/A53MP.pdf>. Consultado en: 24 enero de 2018.

## ANEXO E PRONÓSTICO DE LA PRODUCCIÓN DE PETROLEO INCREMENTAL DEL CAMPO A BAJO LA INYECCIÓN DE POLIMERO

Los pronósticos incrementales para el piloto de inyección de agua mejorada son evaluados mensualmente y ajustados con base en los resultados obtenidos a la fecha. A continuación, en la **Gráfica 3**, se presentan los perfiles Planeado inicialmente (Plan ANH), Real y Pronóstico (Plan ajustado).

**Gráfica 3.** Pronóstico de producción incremental.



**Fuente:** ACOSTA, T, et al. Recuperación mejorada en un yacimiento de alta complejidad estratigráfica: Campo Casabe (Caso de estudio). Bogotá, Aceip, 2017.

## ANEXO F CÁLCULOS REALIZADOS PARA HALLAR LOS INGRESOS Y EGRESOS PARA REALIZAR LA EVALUACIÓN FINANCIERA

En este anexo se presentan todos los cálculos procesados en Excel para determinar ingresos y egresos.

- **Ingresos**

Los ingresos corresponden a las ventas de hidrocarburos (hcs) que se calculan a partir de la **Ecuación 1**.

**Ecuación 1.**

$$\text{Venta de hidrocarburos} = \text{Producción} * \text{Precio del crudo}$$

También hay que tener en cuenta las regalías que para este caso y según la ley 756 de 2002 son del 20% para el campo A, de esta forma se obtiene el total de ingresos a partir de las **Ecuaciones 2 y 3**.

**Ecuación 2.**

$$\text{Regalías} = V_{hcs} * 0,2$$

**Ecuación 3.**

$$\text{Total de ingresos} = \text{Ventahcs} - \text{Regalías}$$

- **Egresos**

Los **Costos operacionales opex** en el caso de alquilar una unidad de inyección de la empresa prestadora de servicios (lifting cost, depreciaciones, impuestos, alquiler).

En primera instancia se tiene en cuenta el lifting cost que es de 8 USD/bbl<sup>41</sup> para el campo A y es el mismo con el que se trabaja la propuesta. De acuerdo con esto se tiene la **Ecuación 4**, para determinar el lifting cost total.

**Ecuación 4.**

$$\text{Lifting cost total} = 8 \frac{\text{USD}}{\text{Bbl}} * \text{producción}$$

Una vez obtenido los costos asociados al lifting cost se determina el valor de los beneficios antes de los intereses, impuestos, las predicciones y amortizaciones (EBITDA) a partir de la **Ecuación 5**.

**Ecuación 5.**

$$\text{EBITDA} = \text{Total de ingresos} - \text{Lifting cost total}$$

Las depreciaciones pueden calcularse con la **Ecuación 6**.

**Ecuación 6.**

$$\text{Porcentaje de depreciación anual} = \frac{100\%}{\text{Vida util (anual)}}$$

El beneficio operativo de una empresa (EBIT) se determina con la **Ecuación 7**.

**Ecuación 7.**

$$\text{EBIT} = \text{EBITDA} - \text{Depreciaciones}$$

Hay que decir que para los flujos de caja las depreciaciones no se tienen en cuenta.

---

<sup>41</sup> ACOSTA, T, et al. Recuperación mejorada en un yacimiento de alta complejidad estratigráfica: Campo Casabe (Caso de estudio). Bogotá, Aceip, 2017.

Es necesario conocer también los impuestos a pagar, que en este caso son el impuesto para la renta de personas jurídicas del 33% y el CREE del 8%.<sup>42</sup> Los costos por impuestos se calculan con la **Ecuación 8**.

**Ecuación 8.**

$$\text{Impuestos} = (0,33 * EBIT) + (0,008 * EBIT)$$

Finalmente se tiene en cuenta el costo del alquiler de la unidad de inyección de la empresa prestadora de servicios. Entonces la utilidad neta se puede determinar mediante la **Ecuación 9**.

**Ecuación 9.**

$$\text{Utilidad neta} = EBIT - \text{Impuestos} - \text{alquiler de la unidad}$$

Para el caso de la propuesta de diseño el procedimiento para calcular los egresos operacionales es el mismo, sin embargo, no se tienen en cuenta los costos asociados al alquiler de la unidad puesto que para la alternativa de diseño se pretende adquirir los equipos.

Los **costos de inversión capex** en el caso de alquilar la unidad por parte de una empresa prestadora de servicios están asociados a la cantidad de polímero requerido para el proceso de inyección, mientras que para el caso de la propuesta de este proyecto es la suma de adquirir los equipos y las cantidades de polímero requerido.

---

<sup>42</sup> DIAN. ABC del CREE. [En línea] [Citado en 28 de enero de 2018]. Disponible de World Wide Web: [http://www.dian.gov.co/contenidos/otros/Preguntas\\_Cree\\_2014.html#a1](http://www.dian.gov.co/contenidos/otros/Preguntas_Cree_2014.html#a1).

**ANEXO G FLUJO DE CAJA PARA LOS ESCENARIOS PESIMISTAS CON  
PRECIO DE CRUDO DE 38,67 USD/Bbl**

En **la Tabla 1.** se muestran los ingresos generados a partir de un precio de crudo de 38, 67 USD/Bbl.

**Tabla 1.** Ingresos totales

<b>Año</b>	<b>Producción (Bbls)</b>	<b>Precio del crudo (USD/Bbl)</b>	<b>Venta del crudo (USD)</b>	<b>Regalías (USD)</b>	<b>Ingresos totales (USD)</b>
2018	126.071,00	38,67	4.875.165,57	975.033,11	3.900.132,46
2019	102.839,00	38,67	3.976.784,13	795.356,83	3.181.427,30
2020	91.250,00	38,67	3.528.637,50	705.727,50	2.822.910,00
2021	70.518,00	38,67	2.726.931,06	545.386,21	2.181.544,85
2022	59.313,00	38,67	2.293.633,71	458.726,74	1.834.906,97

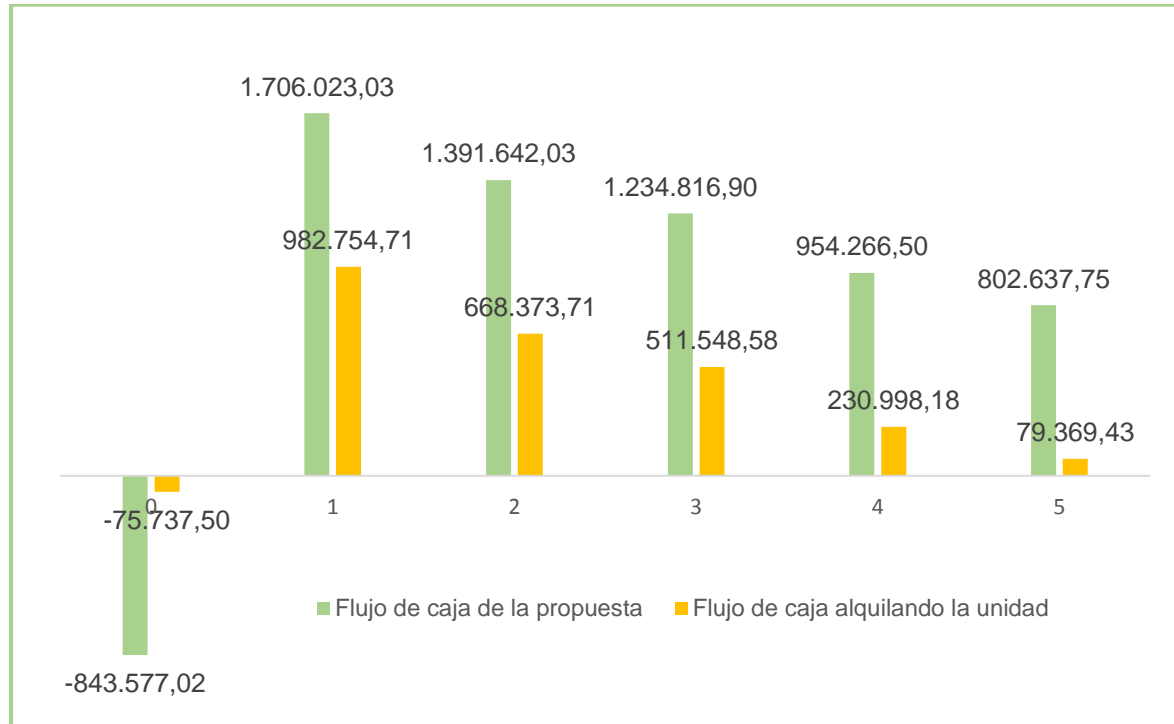
**Tabla 27. Egresos totales anuales alquilando una unidad de inyección de la empresa prestadora de servicios.**

	OPEX				CAPEX	Total Egresos (USD)
Año	Lifting Cost (USD/Bbl)	Depreciación	Impuestos (USD)	Alquiler (USD)	Costo polímero (USD)	
<b>2018</b>	1.008.568,00	-	1.185.541,43	723.268,32	75.737,5	2.993.115,25
<b>2019</b>	822.712,00	-	967.073,27	723.268,32		2.513.053,59
<b>2020</b>	730.000,00	-	858.093,10	723.268,32		2.311.361,42
<b>2021</b>	564.144,00	-	663.134,35	723.268,32		1.950.546,67
<b>2022</b>	474.504,00	-	557.765,22	723.268,32		1.755.537,54

**Tabla 3. Egresos totales anuales implementando la alternativa de diseño.**

	OPEX			CAPEX		Total Egresos (USD)
Año	Lifting Cost (USD/Bbl)	Depreciación	Impuestos	Costo de unidad de inyección	Costo polímero (USD)	
<b>2018</b>	1.008.568,00	-	1.185.541,43	767.839,52	75.737,5	3.037.686,45
<b>2019</b>	822.712,00	-	967.073,27			1.789.785,27
<b>2020</b>	730.000,00	-	858.093,10			1.588.093,10
<b>2021</b>	564.144,00	-	663.134,35			1.227.278,35
<b>2022</b>	474.504,00	-	557.765,22			1.032.269,22

**Tabla 4.** Flujo de caja para alternativa de diseño y para el alquiler de la unidad de inyección.



**ANEXO H FLUJO DE CAJA PARA LOS ESCENARIOS OPTIMISTAS CON  
PRECIO DE CRUDO DE 78,67 USD/Bbl**

En la **Tabla 1.** se muestran los ingresos generados a partir de un precio de crudo de 78, 67 USD/Bbl.

**Tabla 1.** Ingresos totales

<b>Año</b>	<b>Producción (Bbls)</b>	<b>Precio del crudo (USD/Bbl)</b>	<b>Venta del crudo (USD)</b>	<b>Regalías (USD)</b>	<b>Ingresos totales (USD)</b>
2018	126.071,00	78,67	9.918.005,57	1.983.601,11	7.934.404,46
2019	102.839,00	78,67	8.090.344,13	1.618.068,83	6.472.275,30
2020	91.250,00	78,67	7.178.637,50	1.435.727,50	5.742.910,00
2021	70.518,00	78,67	5.547.651,06	1.109.530,21	4.438.120,85
2022	59.313,00	78,67	4.666.153,71	933.230,74	3.732.922,97

**Tabla 2.** Egresos totales anuales alquilando una unidad de inyección de la empresa prestadora de servicios.

Año	OPEX				CAPEX	Total Egresos (USD)
	Lifting Cost (USD/Bbl)	Depreciación	Impuestos (USD)	Alquiler (USD)	Costo polímero (USD)	
<b>2018</b>	1.008.568,00	-	2.839.592,95	723.268,32	75.737,5	4.647.166,77
<b>2019</b>	822.712,00	-	2.316.320,95	723.268,32		3.862.301,27
<b>2020</b>	730.000,00	-	2.055.293,10	723.268,32		3.508.561,42
<b>2021</b>	564.144,00	-	1.588.330,51	723.268,32		2.875.742,83
<b>2022</b>	474.504,00	-	1.335.951,78	723.268,32		2.533.724,10

**Tabla 3.** Egresos totales anuales implementando la alternativa de diseño.

Año	OPEX			CAPEX		Total Egresos (USD)
	Lifting Cost (USD/Bbl)	Depreciación	Impuestos	Costo de unidad de inyección	Costo polímero (USD)	
<b>2018</b>	1.008.568,00	-	2.839.592,95	767.839,52	75.737,5	4.691.737,97
<b>2019</b>	822.712,00	-	2.316.320,95			3.139.032,95
<b>2020</b>	730.000,00	-	2.055.293,10			2.785.293,10
<b>2021</b>	564.144,00	-	1.588.330,51			2.152.474,51
<b>2022</b>	474.504,00	-	1.335.951,78			1.810.455,78

**Tabla 4.** Flujo de caja para alternativa de diseño y para el alquiler de la unidad de inyección.

