

## Análisis fluido dinámico y evaluación del desempeño de reguladoras de flujo para inyección de polímeros por múltiples capas

Paiva Rojas, Miguel<sup>a</sup>; Zanetti, Joanna; Zanetti, Stefano; Stieben, Alejandro; Tidball, Eduardo<sup>b</sup>  
 Correspondencia: <sup>a</sup>ingenieria2@binning-oil-tools.com.ar/<sup>b</sup>etidball@binning-oil-tools.com.ar

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.  
 Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

### Resumen

La inundación con polímeros es un método de recuperación mejorada que se lleva a cabo mediante el bombeo de una solución de alta viscosidad, producto de la mezcla de agua con polímeros, a través de un pozo inyector, lo cual desplaza los hidrocarburos líquidos remanentes en el yacimiento hacia los pozos productores. Recientemente, el método de inyección de polímeros por múltiples capas para diferentes admisiones de flujo ha permitido una mejora en la distribución heterogénea del flujo y con ello el incremento del factor de recobro. Sin embargo, para el control de flujo de admisión por capas es necesario el uso de choques o reguladores; no obstante, cualquier obstrucción afecta la viscosidad del polímero por efecto de la degradación mecánica o cizallamiento. Estas tasas de cizallamiento a través de un orificio de una reguladora convencional, romperían los enlaces de las moléculas de polímeros causando pérdida de viscosidad, y por consiguiente, la reducción de las propiedades de arrastre del fluido y el factor de recobro. En orden de evitar la degradación por cizallamiento, fueron seleccionados varios reguladores no-convencionales para el control de presión y flujo. En este trabajo, se realizaron varios estudios experimentales y computacionales para evaluar el desempeño de los diferentes diseños de reguladoras para la inyección del fluido polimérico. El concepto de patrón de flujo de velocidad variable obtuvo el mejor desempeño, superando los objetivos planteados. Los datos experimentales mostraron que, el choque de velocidad variable obtuvo una pérdida de viscosidad inferior al 10% a una presión diferencial de 34,5 bar con una baja concentración de polímeros promedio de 700 mg/L, alto caudal 89 m<sup>3</sup>/d, y concentración de cloruros entre 5000 y 6000 mg/L. Finalmente, los datos computacionales alcanzaron una buena aproximación con los datos experimentales, lo cual disminuyó el número de prototipos y ensayos.

### Introducción

Los métodos de recuperación mejorada se utilizan para incrementar el factor de recobro de hidrocarburos líquidos en los yacimientos cuando no hay más líquido que pueda fluir con métodos de recuperación convencionales. Es de extensivo conocimiento que, mediante los métodos de recuperación convencionales solo una fracción de todo el reservorio puede ser extraído. La inyección de agua es uno de los métodos más comunes para la recuperación de hidrocarburos líquidos. Sin embargo, varios estudios han afirmado que en numerosos yacimientos, el flujo durante la inundación con agua forma corrientes en forma de flecha entre el pozo inyector y el pozo productor (canalización). Como resultado del ascenso del agua en ese patrón de flujo, un gran volumen de hidrocarburos permanece en el lugar, ya que el agua inyectada se desvía de la roca saturada (Hinkley y Glenn, 2017). La inundación con polímeros es uno de los métodos de recuperación mejorada más utilizados en muchos campos petrolíferos debido a su eficiencia en el factor de recobro (Wang y col., 2009; Divers y col., 2017; Manrique y col., 2017; Abidin y col., 2012; Gao y col., 2014). Incluso, ha sido demostrado que es un buen método de recuperación en yacimientos de crudos pesados (Saboorian-Jooybari y col., 2016; Wassmuth y col., 2007). Debido a la naturaleza elástica del polímero, la velocidad de distribución en el yacimiento es muy diferente que un fluido Newtoniano, así como también, el polímero ejerce un efecto de fuerza de empuje (Wang y col., 2000). Además, la viscosidad del polímero es ampliamente mayor que la viscosidad del agua, lo cual debe disminuir la tendencia del agua a desviarse (Mahani y col., 2011). En consecuencia, se alcanza mayor eficiencia de barrido del hidrocarburo hacia los pozos productores mejorando el factor de recobro.

A pesar de las ventajas que ha mostrado el método de inundación por polímeros, una de las limitaciones del método son los mecanismos de degradación tales como químicos, biológicos, térmicos, y mecánicos. La oxidación y la presencia de iones de hierro son los más importantes en la degradación química. Por otro lado, la degradación biológica puede suceder porque el polímero proporciona una fuente de nutrición a las bacterias (Sheng y col., 2015). Además, algunas investigaciones han indicado temperaturas que pueden comprometer la integridad del polímero sobre la evidencia de un amplio rango de condiciones de yacimiento desde 7,2 a

112,7 °C (Taber y col., 1997). No obstante, Divers y col., (2017) han afirmado que en algunos campos los yacimientos pueden alcanzar temperaturas superiores a los 140 °C, ya que la temperatura del yacimiento normalmente se incrementa con la profundidad. Finalmente, la degradación mecánica puede producirse en dos etapas durante el proceso de inyección del polímero; cuando el polímero es forzado entrar al medio poroso bajo alta tasa de flujo o a través de restricciones aguas arriba del pozo inyector como en bombas, equipos de mezcla, reducción en accesorios de tuberías u otras estructuras (Seright, 1983; Sheng y col., 2015).

La degradación química ha sido disminuida por el uso de captadores de oxígeno, así como también la degradación biológica por medio del uso de bactericidas. La degradación por temperatura ha sido mitigada con el uso de aditivos que proporcionan resistencia a la degradación en elevadas temperaturas. Por otra parte, la degradación mecánica en el medio poroso puede controlarse siguiendo buenos protocolos de inyección y mediante un buen modelo de inyectabilidad; mientras que, la degradación por cizallamiento ha sido reducida con el uso de bombas de tornillo para el transporte del polímero, bombas de diafragma para la inyección en alta presión, y caudalímetros electromagnéticos para reducir los esfuerzos en cizalla (Seright, 1983; Sheng y col., 2015; y Divers y col., 2017). Sin embargo, mediante el control de inyección por múltiples capas es difícil evitar los efectos del cizallamiento en choques, y válvulas reguladoras.

Recientemente, más estudios y tecnologías han sido desarrollados para mejorar el método de inundación por polímeros. Varios campos petrolíferos están siendo caracterizados como yacimientos con porosidad heterogénea que varía de acuerdo a la capa de roca. Es decir que, algunas de estas capas tienen baja o alta permeabilidad, lo cual puede afectar el desplazamiento del hidrocarburo, causar bloqueo y daños en la formación rocosa (Morel y col., 2012; Liang y col., 2011). Por tal razón, el método de control de flujo por capas ha obtenido buenos resultados en evitar tales problemas y mejorar el factor de recobro. El campo petrolífero de Daqin en China es uno de los ejemplos más relevantes y con mayor evidencia del control de flujo por capas (Zhong y col., 2017; Liang y col., 2011; Alvarado y Manrique, 2010; Yaning y col., 2010; Liu y col., 2009). Otro ejemplo de aplicación del método ha sido en el campo Diadema en el golfo de San Jorge, Argentina, con alta heterogeneidad, con muchas capas muy diferentes entre sí, y en donde el control por capas es necesario (Del Pozo y col., 2018). Así mismo, el proyecto piloto de inyección de polímeros en el campo La Cira en Colombia llevado a cabo en conjunto por OXY y Ecopetrol.

El principal problema sobre el método de inyección por capas es la ruptura de cadenas del polímero por el choque durante la regulación del flujo. Minock y col., (2018) ha definido que el polímero se degrada si es expuesto a una corriente en alta velocidad en cizalla o alta aceleración durante el proceso de inyección, reduciendo su eficacia, lo cual requeriría más cantidad de materia prima para obtener los resultados deseados. Lo anterior, es exactamente lo que sucede en una reguladora convencional con orificio, en donde la energía de presión se transforma en energía cinética para cumplir con el balance de conservación de masa y energía. Por tal motivo, debe evitarse el uso de reguladoras convencionales tipo orificio. En tal sentido, algunas alternativas comerciales se encuentran disponibles en el mercado para regulación en superficie pero estas son de dimensiones superiores a los bolsillos, lo cual hace impracticable su conexión en mandriles normalizados, y otras si bien disminuyen los efectos de cizallamiento y cumplen con las dimensiones de los bolsillos, los valores de degradación siguen siendo altos. De acuerdo a lo anterior, no se dispone de una opción comercial o desarrollo culminado para la resolución del problema.

Siendo la reguladora extraíble la clave en el método de inyección por capas separadas, algunos diseños posibles han sido probados con buenos y moderados resultados, así como también, conceptos sin evidencias de resultados. Hasta el momento, los tipos de reductores de bajo cizallamiento podrían separarse como:

- Helicoidales
- Ciclónicos
- Capilares
- Flujo anular a través de surcos
- Choques en serie

Del Pozo y col., (2018) han desarrollado un dispositivo regulador de bajo cizallamiento mediante el embobinado con un capilar alrededor de un mandril convencional, el cual fue probado en un pozo de inyección de polímeros en el Golfo de San Jorge, Argentina. El estudio reportó una presión diferencial alcanzada alrededor de 19,3 bar, 9% de degradación, y una tasa de velocidad de deformación en cizalla por debajo de  $3000 \text{ s}^{-1}$  con un flujo de  $59.9 \text{ m}^3/\text{d}$ . Sin embargo, es un dispositivo alargado solo disponible para instalarse fuera del mandril. Esto limita cambios en el control de flujo una vez han sido instalados.

Husveg y col., (2020) han presentado un dispositivo para control de presión y flujo con forma de espiral que han denominado hélice cónica. La magnitud en la presión diferencial es controlada por varios de estos platos con espirales posicionados paralelamente uno encima del otro con un eje en el centro que permite el paso de flujo por más o menos platos. Si el flujo es bajo, el sistema usa más canales, y si es alto direcciona el flujo a menos canales para mantener el rango de presión diferencial deseado. Los espirales como conductores en la presente invención, permiten una combinación de beneficios en cuanto a presión diferencial, control de flujo, y bajo cizallamiento. Esta tecnología también puede implementarse en la ruptura y coalescencias de gotas, segregación de sólidos, y reducción en la degradación de fluidos poliméricos. El rango de control de flujo probado en laboratorio para fluidos poliméricos fue de  $78 \text{ m}^3/\text{d}$ , caída de presión de 40 bar, y degradación inferior al 10% con concentraciones de polímeros de  $2000 \text{ mg/L}$ , y concentración de cloruros de 3,5% con la intención de crear una mezcla más sensible al cizallamiento.

Naug (2013) trabajó con tres tipos de reguladores de bajo cizallamiento escala laboratorio para aplicaciones en manejo e inyección de polímeros, que se dividen en capilares embobinados, flujo ciclónico, y una válvula de aguja convencional. Los resultados reportados no mostraron degradación en los capilares embobinados desde diámetros entre 8 a 15 mm y máximo flujo de  $2,4 \text{ m}^3/\text{d}$  para obtener una presión diferencial de 13 bar, mientras que, el modelo de flujo ciclónico obtuvo 8 bar a  $24 \text{ m}^3/\text{d}$  y 10% de degradación. El regulador ciclónico es más compacto que el capilar embobinado, pero aun tales dimensiones siguen siendo superiores al diámetro interno de los bolsillos de mandriles de inyección. Así que una adaptación dimensional debe ser realizada en caso de la aplicación de ese concepto. Por otro lado, Husveg y col., (2009) presentaron un concepto similar mediante un ciclón de 16 mm de diámetro interno para obtener 6 bar de presión diferencial. Los resultados indicaron bajo cizallamiento y menos turbulencia que evita la ruptura de burbujas, lo cual formarían emulsiones no deseables para el proceso.

El flujo a través de capilares rectos es el concepto propuesto por Kwakernaak y col., (2007), el cual ha presentado un dispositivo de grupos de capilares con diámetros diferentes arreglados en paralelo dentro de un cilindro, muy similar a un intercambiador de calor tipo carcasa. La propuesta ha sido presentada como solución en choques de flujo que eviten la formación de emulsiones no deseadas en procesos de separación física. Este tipo de concepto tendría la potencialidad en la inyección de polímeros a través de mandriles por su versatilidad en la configuración del sistema de capilares.

Por su parte, Liang y col., (2010); y Liu y col., (2009); han probado un sistema poco convencional para el control de flujo y presión basado en el principio de sellos laberínticos (dispositivos muy usados en sistema de sellos en turbinas de alta eficiencia por su poca fricción entre las partes giratorias). Su trabajo ha mostrado un novedoso regulador con un inyector concéntrico especialmente diseñado para la inyección de polímeros por múltiples capas. A máxima tasa de flujo de  $70 \text{ m}^3/\text{d}$ , el regulador alcanzó una presión diferencial de 35 bar, y una degradación reportada por debajo de 8%. Se usó una solución polimérica de 12 millones de peso molecular y concentraciones sobre los 1000 mg/L.

Adicionalmente, Díaz, y col., (2020), han presentado dos tipos de reguladora para inyección de polímeros a través de mandriles de bolsillo. Una válvula conformada por choques en serie que forman cámaras de expansión y reducción, y una mediante flujo helicoidal a través de un doble tornillo. El concepto de choques en serie ha sido también implementado a gran escala en manejo y control del flujo en superficie por SNF. Díaz, y col., (2020), obtuvieron resultados satisfactorios en el concepto helicoidal, alcanzando una presión diferencial de 62,4 bar a un flujo máximo de  $90 \text{ m}^3/\text{d}$ , y una degradación de 14,05%. Mientras que la reguladora de choques en serie obtuvo 26,6 bar a una tasa de flujo máximo de  $89 \text{ m}^3/\text{d}$ , con una degradación sobre el 12% pero moderado desempeño en cuando presión diferencial.

En este trabajo, fueron comparados tres conceptos en cuanto a presión diferencial, facilidad de instalarse en un mandril de bolsillo, flujo máximo y degradación. Las pruebas fueron desarrolladas en una unidad experimental de escala comercial con dos tipos de fluidos poliméricos. Adicionalmente, con la finalidad de mejorar el número de prototipos y experimentos, los diseños fueron desarrollados usando dinámica de fluidos computacional (Computed fluid dynamic, CFD) que al mismo tiempo alcanzaron buenas aproximaciones con los datos experimentales, y aportaron datos en la comprensión del comportamiento fluido-dinámico de cada uno de los conceptos.

## Metodología y datos

**Diseños propuestos.** Tres tipos de conceptos fueron evaluados. Primero, un regulador de flujo helicoidal de triple canal de dos etapas, el cual fue calculado en base a un diámetro hidráulico equivalente en la primera etapa de 12,6 mm y la segunda de 10,8 mm. El segundo, es en flujo rotatorio a través de cintas retorcidas dentro de cilindros dispuestos en dos etapas con diámetros de 12,6 mm 9,5 mm, respectivamente. La primera etapa contiene tres cilindros en paralelo que combina el flujo giratorio y zigzaguo hasta la segunda etapa donde solo se encuentra un solo cilindro con una cinta retorcida en el centro hasta la salida del regulador. Finalmente, el regulador basado en flujo laberíntico, el cual contiene un vástago regulador concéntrico con salientes con características geométricas que son similares a una curva senoide. Todos los diseños aquí propuestos son posibles de instalarse en mandriles normalizados con bolsillos nominales de 38,1 mm. Una de las ventajas y premisas de este trabajo era que todos los modelos pudieran ser retirables de mandriles de bolsillo (ver Figura 1) y compatibles con las trabas y herramientas de pesca estándar. Por otro lado, todos los diseños cumplen con la función de choque en la parte interna de la válvula evitando así el uso del bolsillo como elemento reductor de flujo, lo cual acortaría su vida útil.

Un total de cinco válvulas fueron probadas experimentalmente: dos de canales helicoidales de triple hélice, una de flujo rotacional a través de cintas retorcidas, y dos dispositivos a través de un vástago inyector con surcos sinusoidales. Los detalles de cada uno de los modelos se han enumerado en la Tabla 1.

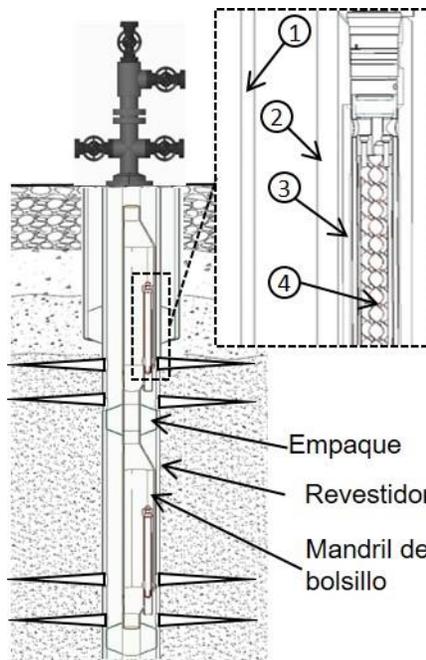


Figura 1. Esquemático de un completamiento típico de un pozo inyector. 1- Tubería de revestimiento; 2-Bolsillo; 3-Alojamiento principal de la válvula; 4-Regulador de flujo rotatorio

Tabla 1. Característica de diseño de los conceptos probados

Modelos	Características
1-Canales de triple hélice completo	Dos etapas de canales helicoidales triples con diámetros hidráulicos de 4,2 y 3,6 mm cada canal, respectivamente. Total recorrido del fluido alrededor de 3,2 m.
2-Canales de triple hélice primera etapa	Sólo la primera etapa de los canales de triple hélice de 4,2 mm de diámetro hidráulico cada canal. El recorrido del fluido es 1,6 m.
3-Cinta retorcida	Primera etapa con tres cavidades cilíndricas de 12,5 mm de diámetro cada una, y una segunda etapa de salida con alojamiento cilíndrico de 9,5 mm. El recorrido del fluido es de 0,75 m.
4-Vástago con surcos A	Dos etapas con vástagos con salientes sinusoidales. El vástago de la segunda etapa tiene una frecuencia diferente entre surcos con respecto a la primera etapa. El recorrido del fluido es de 0,39 m.
5-Vástago con surcos B	Dos etapas con vástagos con salientes sinusoidales. Ambos vástagos con frecuencia similares entre surcos. El recorrido del fluido es de 0,39 m.

**Instalación experimental.** Las pruebas fueron llevadas a cabo en un sistema piloto modular (ver Figura 2). El sistema de tuberías está principalmente fabricado de acero inoxidable, con un alojamiento que simula un mandril y su bolsillo estándar de 38,1 mm, una bomba de diafragma con una capacidad máxima de 245,3 m<sup>3</sup>/d y presión máxima de 241 bar; cuatro tanques de alimentación de polímeros que suman una capacidad total de 4901 L; tres transmisores de presión, dos para mediciones aguas arriba y aguas debajo de la válvula de prueba, y un transmisor para enviar una señal a un interruptor de seguridad ajustado en 213,7 bar, dos manómetros tipo Bourdon, dos válvulas de alivio, y dos válvulas de choque aguas abajo del alojamiento de la válvula de prueba para incremento de la presión del sistema, y separación de la zona de alta presión y baja presión. En la sección de baja presión, se encuentra conectado un caudalímetro electromagnético. Adicionalmente, el sistema cuenta con dos puntos de toma de muestras aguas arriba y aguas debajo del alojamiento de prueba. El caudal de la bomba es controlado mediante un variador de frecuencia. Finalmente, las señales de presión, frecuencia del motor de la bomba, y el caudal se envían a un registrador videográfico.

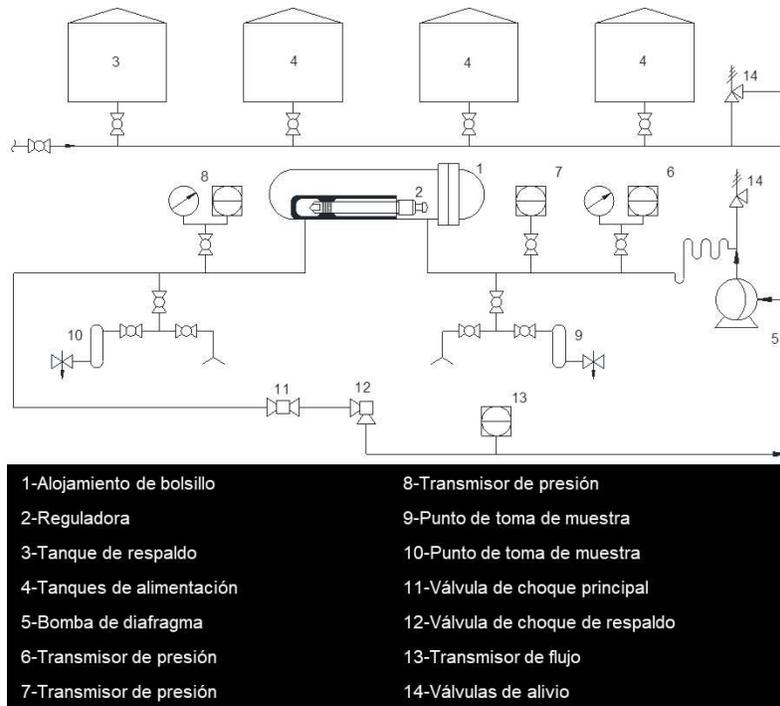


Figura 2. Diagrama de tuberías, equipos e instrumentación del banco de pruebas de reguladoras para inyección de polímeros

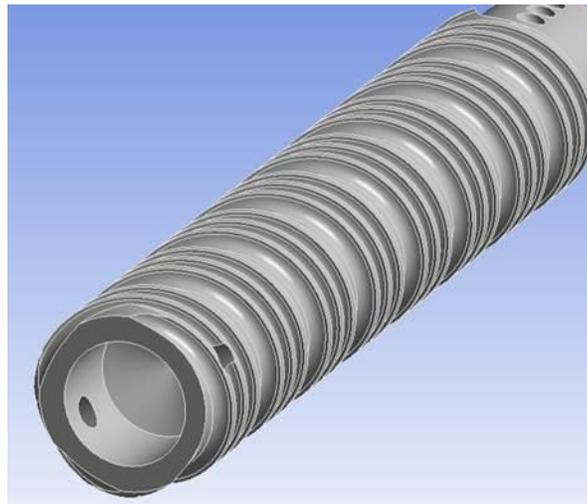


Figura 3. Regulador de flujo helicoidal de alto cizallamiento para evaluar los efectos de la concentración del polímero. Un canal de  $D_h=5,4$  mm, y dos canales de  $D_h=2,7$  mm cada uno

Se utilizaron dos tipos de sustancias poliméricas preparadas de acuerdo a la compatibilidad, y con agua de inyección disponible en el campo. Un fluido polimérico de peso molecular moderado denominado EOR303-600/700 con un protocolo de concentración de polímeros de 600 y 700 mg/L con la finalidad se simular las condiciones de yacimiento, y un fluido polimérico denominado EOR880-700 para ser probado post selección del mejor sistema de regulación con una concentración de polímero aproximada de 700 mg/L. La presión de operación del sistema se estableció en 206,8 bar, lo cual es dado en base a la máxima presión hidrostática de acuerdo a la profundidad del pozo inyector, y un máximo caudal de operación de  $89 \text{ m}^3/\text{d}$  en todas las reguladoras probadas. Adicionalmente, se utilizó una reguladora de flujo helicoidal de alta tasa de velocidad y cizallamiento para la evaluación del efecto de la concentración del polímero sobre la degradación (Figura 3). Este choque helicoidal, fue parte de las etapas iniciales del desarrollo, la cual mostró alta degradación y no continuó hacia las siguientes etapas de ajuste y pruebas.

La degradación en cada prueba fue calculada siguiendo la ecuación 1, la cual también ha sido usada por Divers, T y col., (2017) y Naug, S. M. J. (2013).

$$\%Degrada\text{cion} = \frac{\eta_0 - \eta_{deg}}{\eta_0 - \eta_{H_2O}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

Donde  $\eta_{H_2O}$  es la viscosidad del agua a 45,5°C que son aproximadamente 0,59 cP;  $\eta_0$  es la viscosidad de la muestra antes de entrar a la válvula, y  $\eta_{deg}$  es la viscosidad de la solución a la salida de la válvula.  $\eta_0$  y  $\eta_{deg}$  fueron medidas a una tasa de cizallamiento de 0,21 s<sup>-1</sup> y temperatura de yacimiento de 45,5 °C en todos los casos estudiados.

**Modelo computacional.** Para la resolución de las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos, se utilizó el código computacional ANSYS Fluent 2019 R2. El método que se implementa en estos códigos combina fundamentos físicos y desarrollos matemáticos para obtener el comportamiento de un flujo de fluidos a través del medio circundante o como los objetos afectan el flujo de fluidos alrededor de estos. Estas ecuaciones describen como la velocidad, la presión, y la densidad están conectadas con un fluido en movimiento.

**Ecuaciones gobernantes.** La conservación de la masa es aplicada a una partícula infinitesimal de fluido, la cual va a dejar la ecuación de continuidad, que relaciona el campo de la velocidad y la densidad. Por consiguiente, la segunda ley de Newton va a permitir el desarrollo de las ecuaciones diferenciales parciales conocidas como ecuaciones de Navier Stokes, las cuales son las ecuaciones de cantidad de movimiento (momentum) de un fluido Newtoniano.

La ecuación de continuidad o conservación de la masa se describe de la siguiente manera:

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \dots \dots \dots (2)$$

La ecuación de cantidad de movimiento puede ser escrita como:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = -\Delta P + \rho g + \mu \nabla^2 V \dots \dots \dots (3)$$

A pesar que las ecuaciones de Navier Stokes son antiguas, estas solo han podido ser resueltas para geometrías muy simples, las cuales permiten soluciones analíticas. En época más reciente, sólo unas dos o tres décadas atrás con la ayuda de aproximaciones por métodos numéricos, modelos de turbulencia semi-empíricos, y la capacidad de procesamiento de las computadoras, han permitido la resolución de estas ecuaciones para geometrías más complejas, condiciones físicas reales, incluso con reacciones químicas, transferencia de masa y calor.

**Modelo de viscosidad.** Los fluidos usados en las simulaciones computacionales son No-Newtonianos, específicamente de comportamiento pseudoplástico. Contrariamente, un fluido Newtoniano es un fluido con características donde los esfuerzos cortantes son constantes y linealmente proporcionales a la velocidad de deformación en cizalla, y poseen una viscosidad conocida ( $\mu$ ). Mientras que, un fluido No-Newtoniano es un fluido en el cual los esfuerzos cortantes no son linealmente proporcionales a la velocidad de deformación en cizalla. Para cada fluido en particular, la viscosidad aparente ( $\eta$ ) es el radio del esfuerzo cortante dado de acuerdo a una velocidad de deformación en cizalla (ANSYS CFX Tutorials, 2017).

El modelo de Herschel Bulkley (Ecuación 4) propone una relación general, en la cual se representa el comportamiento de un fluido No-Newtoniano. El exponente ( $n$ ) representa el comportamiento del fluido si es adelgazamiento por cizallamiento (pseudoplástico) o engrosamiento por cizallamiento (dilatante) (Tovar y col., 2014). El modelo de Herschel Bulkley es el más usado para definir viscosidades dependientes del esfuerzo por cizallamiento.

$$\sigma = (\gamma^n) + \sigma_0 \dots \dots \dots (4)$$

El valor de ( $n$ ) determina el tipo de fluido según las siguientes definiciones:

$n = 1 \rightarrow$  Fluido Newtoniano

$n > 1 \rightarrow$  Fluido dilatante, y

$n < 1 \rightarrow$  Fluido pseudoplástico

Si el comportamiento del fluido es pseudoplástico, el esfuerzo de fluencia va a ser despreciable, quedando la expresión conocida como relación de ley de potencias:

$$\sigma = (\gamma^n) \dots \dots \dots (5)$$

Sustituyendo la definición de viscosidad aparente ( $\eta$ ) en la ecuación 4, la expresión de ley de potencias queda:

$$\eta = (\dot{\gamma}^{n-1}) \dots\dots\dots(6)$$

El comportamiento de la curva del fluido puede obtenerse directamente desde la función de ley de potencias en Microsoft Excel  $y = ab^x$  (Figura 4) para un rango de velocidad de cizallamiento en condiciones de laboratorio entre 0,37 hasta 73,3  $s^{-1}$  para obtener la curva de viscosidad aparente del polímero EOR303 con una concentración de 700 mg/L  $y = 20,874b^{-0,261}$ . En ANSYS Fluent necesita como dato de entrada la resultante de la relación del valor de ( $n$ ), es cual puede obtenerse directamente de  $-0,261 = n - 1$  resultando  $n < 1$ .

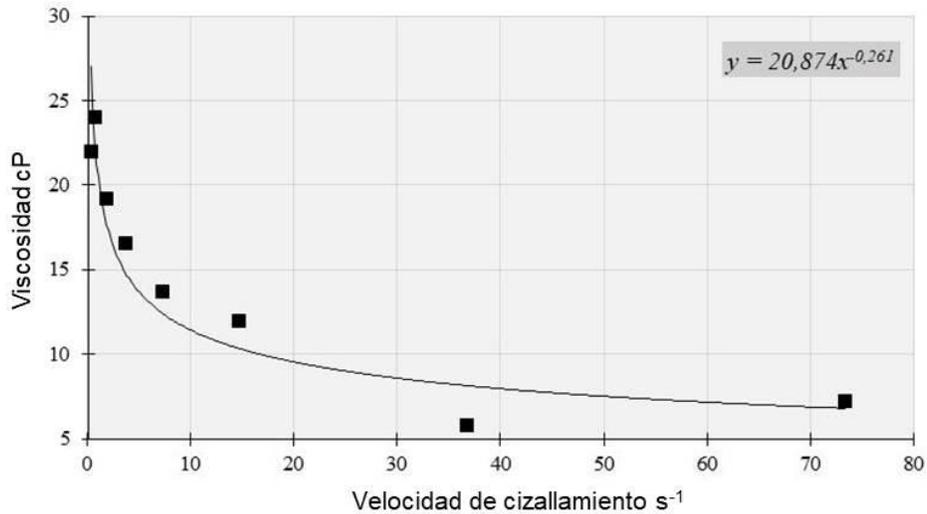


Figura 4. Curva de viscosidad para el polímero EOR 303 con concentración de 700 mg/L estimada a temperatura de 45,5 °C

ANSYS Fluent dispone de diferentes opciones para solución en régimen laminar de flujo de fluidos No Newtonianos; incluso para flujo turbulento es posible. En el caso del modelo de ley de potencias sólo es posible activar en régimen de flujo laminar.

**Mallas computacionales.** Como fue mencionado anteriormente, las ecuaciones gobernantes solo han sido aplicadas para la solución de problemas con modestas geometrías o condiciones ideales. Con la finalidad de resolver problemas reales y complejos, se desarrollaron métodos como el de volumen finito (FV) y ha sido el más usado por códigos computacionales comerciales y códigos abiertos de acceso libre. El método combina diferentes métodos matemáticos para alcanzar una aproximación a la solución. Primero, el código obtiene una discretización de las ecuaciones gobernantes por una aproximación algebraica o linealización, y luego, el problema de índole geométrico es resuelto a través de la discretización del dominio de cálculo, lo cual no es más que la división del espacio bajo análisis en pequeños volúmenes unidos por nodos que formarían lo que se conoce como malla computacional. Para este trabajo fueron generadas cinco mallas usando ANSYS Mesh.

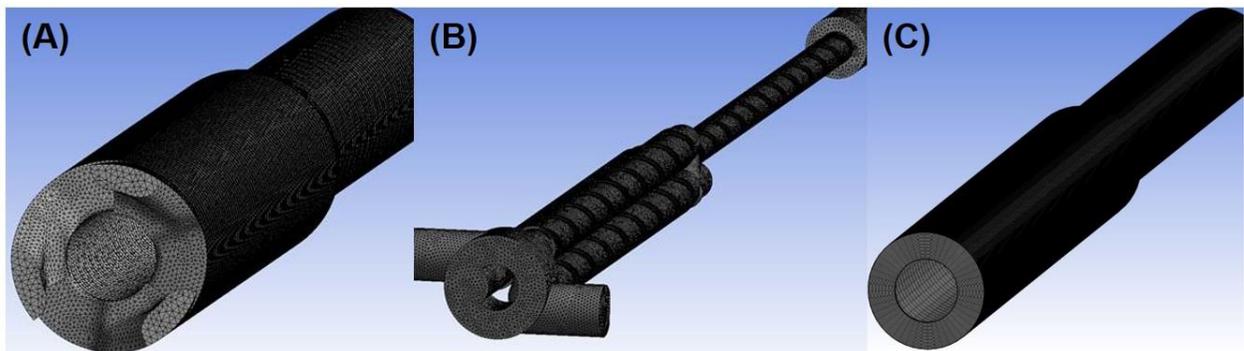


Figura 5. Mallas computacionales de los tres conceptos generales. (A) Canales helicoidales de hélice tripe (modelos 1 y 2); (B) Cintra retorcida (Modelo 3); y (C) Vástago con surcos (Modelos 4 y 5)

Se construyeron dos mallas tridimensionales para las hélices triples y una para el modelo de flujo rotatorio a través de la cinta retorcida, ambas con elementos tetraédricos de 2.829.797 volúmenes (Figura 5A) y 2.482.255 volúmenes (Figura 5B), respectivamente. Con la finalidad de ahorrar costo computacional, y tomando en cuenta que la geometría de los reguladores de vástago con surcos son axisimétricos, se construyó una malla computacional tridimensional  $\frac{1}{4}$  de la sección anular de 4.393.894 volúmenes con elementos tetraédricos (Figura 6A). Finalmente, para incrementar el número de nodos en las zonas de interés en los modelos de vástagos con surcos, se construyeron mallas bidimensionales axisimétricas de 35.852 celdas cuadriculadas (Figura 5C y Figura 6B).

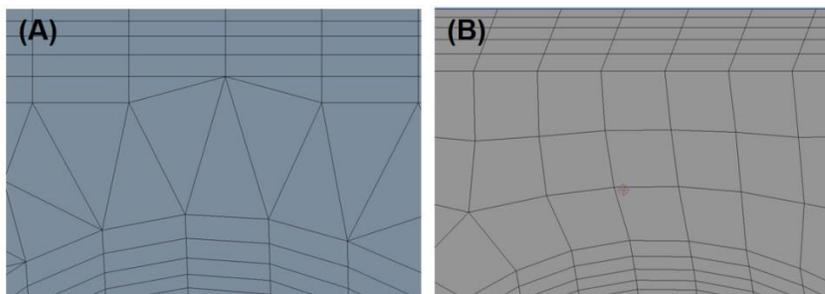


Figura 6. Detalles de nodos y celdas de mallado del modelo de vástago con surcos. (A) Corte longitudinal de 1/4- 3D del modelo 4, y (B) Mallado axisimétrico para los modelos 4 y 5

**Modelo físico y condiciones de borde.** En la Tabla 2 se detallan la configuración del modelo y las condiciones de borde. El régimen de flujo en las condiciones de cada reguladora se encuentra entre laminar y transición. Para este trabajo, se ha seleccionado el régimen laminar. Se probaron algunas simulaciones en régimen turbulento pero los resultados sobreestimaron el valor de presión diferencial en comparación con los datos experimentales.

Tabla 2. Configuración general del modelo computacional

Parámetros	Características
Entrada	Presión estática Pa
Salida	Flujo másico kg/s
Paredes	Sin deslizamiento y sin fenómenos de transferencia.
Modelo físico	Laminar
Fluido	Modelo de ley de potencia fluidos No Newtonianos
$\eta_0$ EOR303	12.6-17.8 cP at 0.21 1/s

## Resultados

**Resultados experimentales.** Un total de cinco modelos de reguladores de presión fueron probados en banco de prueba para obtener presión diferencial con su respectivo porcentaje de degradación. Los resultados experimentales mostraron que los dos objetivos principales de la propuesta fueron alcanzados: una presión diferencial entre 34,5 y 41,4 bar y degradación por debajo del 10%. Además, estos datos se obtuvieron en condiciones de altas tasas de flujo (88-89,4 m<sup>3</sup>/d), el cual es un parámetro operacional crítico sobre este tipo de solución polimérica. La Figura 7, muestra los principales resultados de los modelos probados en alto flujo. La presión diferencial más alta fue alcanzada por el modelo 1, sin embargo, con alto porcentaje de degradación. Mientras que, el modelo 2, con sólo la primera etapa de la hélice triple y de menor recorrido, obtuvo una presión diferencial moderada y menos degradación. Por otro lado, el modelo 3 obtuvo un porcentaje de degradación aceptable, muy cercana al objetivo, pero pobre desempeño en cuanto a presión diferencial. De los conceptos seleccionados, el mejor desempeño fue registrado de los modelos 4 y 5 basados en el principio de sello laberíntico.

Finalmente, la Figura 8 muestra que el incremento en la concentración de polímeros en la preparación de la solución incrementa la resistencia del fluido al cizallamiento. La solución polimérica de mayor concentración de polímeros se degradó menos en las dos condiciones de flujo probadas en un regulador helicoidal de alto cizallamiento (Figura 3). Este comportamiento, también ha

sido afirmado por Slavland y col., 2016; Husveg y col., (2020); y Herrera y col., (2020). La caída de presión se incrementa con el incremento del flujo y en proporción con la concentración del polímero, ya que la concentración del polímero incrementa la viscosidad, con lo cual aumenta las pérdidas por fricción. Sin embargo, se observó en la Figura 8 que, la caída de presión a concentración de 700 mg/L es inferior que la prueba con 500 mg/L en alto flujo, lo cual contradice el resultado esperado. Este comportamiento podría estar relacionado al hecho que cada ensayo puede tener una reología distinta a pesar de la concentración de polímeros, causado por la variación de minerales en el agua, ya que la fuente hídrica para la preparación de los fluidos se tomó directamente de los recursos disponibles para la inyección a gran escala sin tratamiento de filtrado especiales. Esto se desarrolló de esta manera con la finalidad de evaluar las condiciones operacionales reales al momento de entrar en la etapa de inyección por capas el programa piloto.

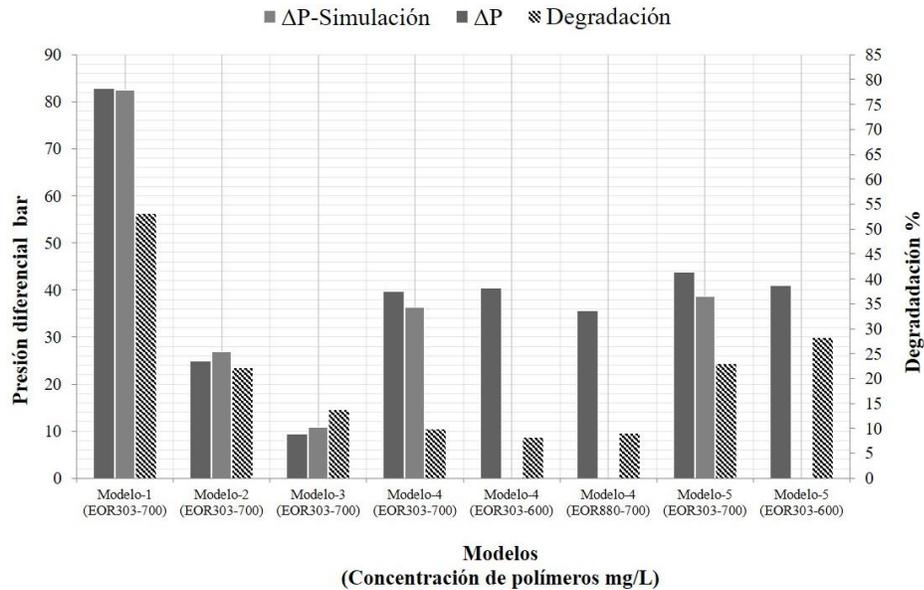


Figura 7. Caída de presión experimental, computacional y degradación resultante bajo alto flujo entre 88,0-89,4 m<sup>3</sup>/d con dos tipos de solución de polímeros y dos concentraciones

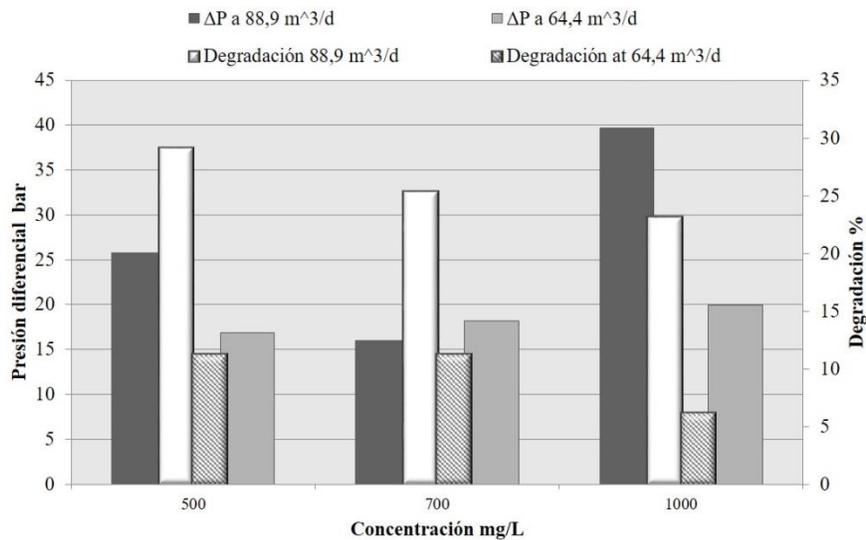


Figura 8. Efecto de la concentración de polímeros sobre la degradación y caída de presión a dos condiciones de flujo con polímero EOR 880

**Resultados computacionales.** Con la finalidad se mostrar la relación entre la degradación y algunos parámetros fluido-dinámicos en las reguladoras de flujo, se han graficado las corrientes de velocidad, los esfuerzos cortantes en las paredes, y la tasa de cizallamiento. En la Figura 9, se muestra la velocidad del fluido a través de líneas de trayectoria con la misma magnitud de escala de colores en la leyenda fijada entre 0 y 40 m/s en los modelos desarrollados. El modelo 1 y 3 muestran alta tasa de velocidad en la segunda etapa, más alta en el modelo 1 que en el modelo 3, en donde se registraron velocidades de 35,8 y 12,8 m/s, respectivamente. De manera similar, el modelo 4 ha mostrado alta velocidad en la primera etapa de 12,0 m/s, ligeramente superior sobre la segunda etapa de alrededor de 11,5 m/s. Mientras que, el modelo regulador 5, el cual no fue graficado en las Figuras 9 y 10 registró una velocidad promedio de 11,0 m/s en la primera etapa, y un incremento leve en la segunda etapa de alrededor de 12,3 m/s.

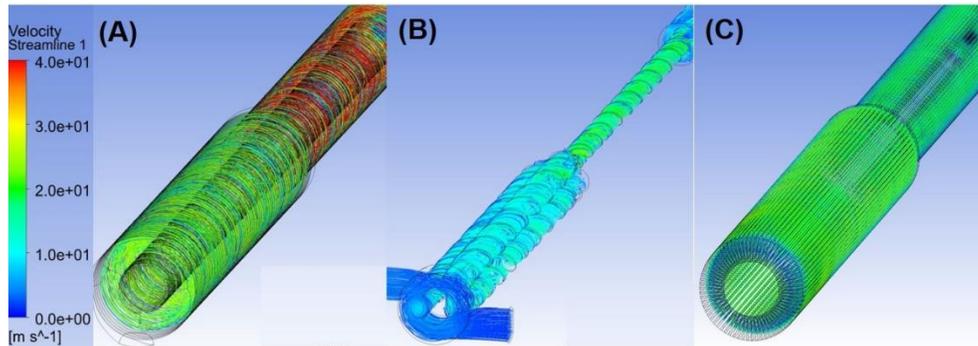


Figura 9. Velocidad en líneas de trayectoria m/s en ANSYS Fluent R2 (A) Modelo 1; (B) Modelo 3; y (C) Modelo 4 malla axisimétrica

En ANSYS Fluent, los esfuerzos cortantes en la pared provienen de la ecuación 7, lo cual es proporcional a la tasa de deformación del tensor ( $\bar{D}$ ), ecuación 8, para la viscosidad. En fluidos No-Newtonianos, la viscosidad aparente ( $\eta$ ) se considera una función de la velocidad de deformación en cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) dado por la ecuación 9, siendo uno de los parámetros más influyentes para relacionar la fluido-dinámica con la degradación. El esfuerzo cortante en la pared han sido utilizado por Díaz y col., (2020) para desarrollar un modelo semi-empírico predictivo de degradación. Sin embargo, a diferencia del cizallamiento, el esfuerzo cortante en la pared es dependiente de la viscosidad aparente del fluido, por lo cual el incremento o disminución de su magnitud también está sujeta a las características físicas y químicas de fluido y no solo a parámetros de operación como flujo y presión.

$$\tau = \eta(\bar{D})\bar{D} \dots\dots\dots(7)$$

$$\bar{D} = \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \dots\dots\dots(8)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{0.5\bar{D}:\bar{D}} \dots\dots\dots(9)$$

En la Figura 10, a una escala de magnitud fijada entre 0 – 4000 Pa se muestran los gráficos de esfuerzos cortantes en las paredes entre los tres diferentes conceptos. Se observa en la Figura 10 que, el máximo esfuerzo es encontrado en la entrada del modelo 1, de igual modo el gráfico 10 (A) también muestra que el esfuerzo promedio en las paredes se incrementa en la segunda etapa como consecuencia de la reducción del tamaño de los canales en esa zona. El comportamiento es similar en la segunda etapa del modelo 3 por la misma razón que el modelo 1, por la reducción del diámetro de la cavidad, pero en menor orden de magnitud que el modelo 1. Del mismo modo, el máximo esfuerzo en las paredes se encuentra en la zona de estrangulamiento anular a la entrada del modelo 4. Sin embargo, en la imagen resaltada en la Figura 10 (C), se observa un comportamiento intermitente y continuo de alto y bajo esfuerzo cortante en la pared producto del efecto laberíntico. Por otro lado, a diferencia de los modelos 1 y 3; la segunda etapa del modelo 4 los esfuerzos en las paredes decrecen drásticamente con similar comportamiento que la primera etapa con efecto intermitente de los esfuerzos cortantes en las paredes.

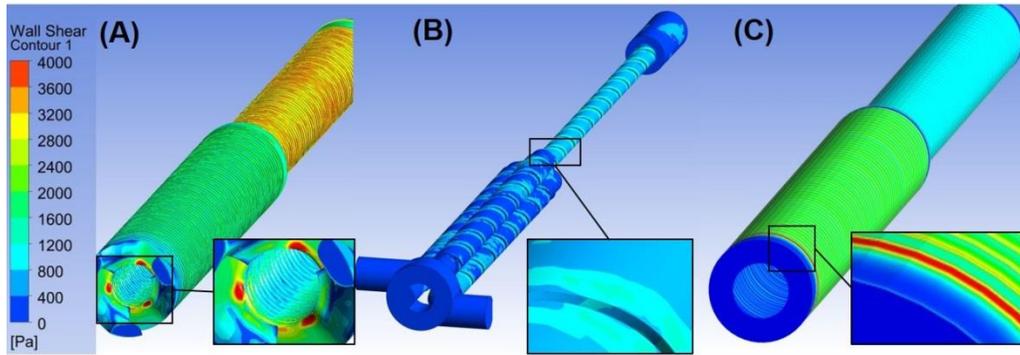


Figura 10. Esfuerzos cortantes en las paredes en Pa dado por ANSYS Fluent R2 bajo condiciones de máximo flujo de 88-89 m<sup>3</sup>/d EOR 303 y 700 mg/L (A) Modelo ; (B) Modelo 3; y (C) Modelo 4 malla axisimétrica

En la Figura 11, se muestra una serie de curvas promediando las tasas de cizallamiento obtenido en el centro del grupo de celdas de cada canal de la hélice triple del modelo 1. Mientras que, los datos promedio de la tasa de cizallamiento de los modelos 4 y 5 fueron tomados desde una línea en el centro entre la pared del cuerpo interno del regulador y la cresta de los surcos. La razón por la cual se toman los datos del centro de las celdas se debe a que, en el método de volúmenes finitos, los parámetros fluido dinámicos resultantes de la aproximación de las ecuaciones gobernantes son dependientes del tamaño de las celdas en las zonas cercanas a las paredes, y los parámetros como la tasa de cizallamiento es derivado directamente de la velocidad, que también es dependiente del tamaño de las celdas, lo cual sería un error tomar un promedio de toda la sección ya que los valores de cizallamiento en la zona cercana a la pared suelen ser sobrestimados. La tasa de cizallamiento promedio para la curva del modelo 1 muestra un estado cuasi-estable en la primera etapa y algo menos estable en la segunda etapa, no obstante, al comparar con los modelos 4 y 5 la curva del modelo 1 puede considerarse que no posee sobresaltos importantes en la tasa de cizallamiento. Ya que los modelos 4 y 5 son similares en la primera etapa, tienen el mismo desempeño en la frecuencia en las curvas de tasa de cizallamiento, mientras que, la amplitud es diferente en la segunda etapa entre ambas curvas; producto del cambio de velocidad y frecuencia del estrangulamiento en la zona de los surcos entre ambos modelos (4 y 5) solo en la segunda etapa. Puede con este resultado afirmarse que, la tasa de cizallamiento en ambos modelos 4 y 5, no es constante. Estos resultados son producto del patrón de flujo intermitente causado por los surcos que actúan como variadores de velocidad y en consecuencia, la tasa de cizallamiento.

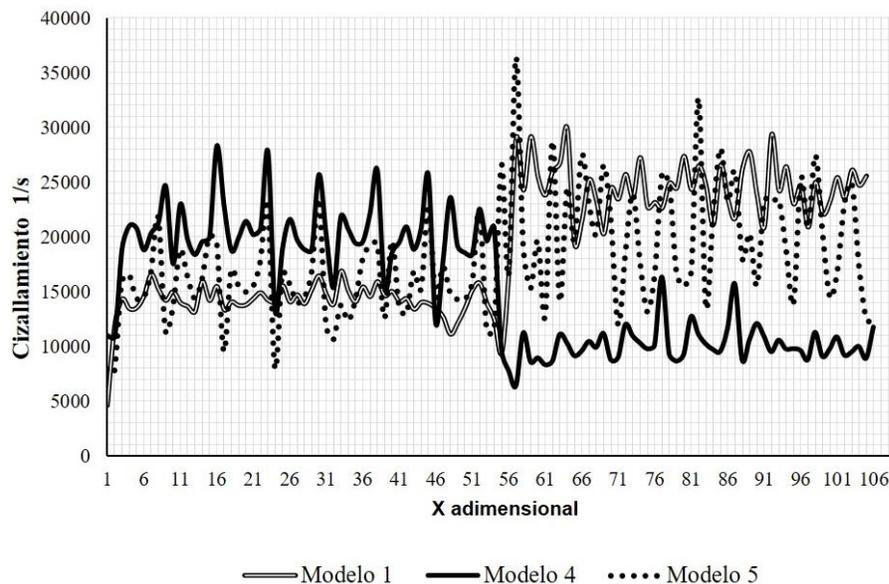


Figura 11. Tasa de cizallamiento a lo largo de la trayectoria obtenido en ANSYS Fluent R2 para reguladoras del modelo 1, 4 y 5 en alto caudal 88-89 m<sup>3</sup>/d con solución polimérica EOR 303-700

En la Figura 12, se muestra el desempeño fluido-dinámico de la válvula según el caudal y la caída de presión que genera cada modelo estimado computacionalmente. En la Figura 12, sólo han sido considerados los modelos 1, 2, 4 y 5; ya que el modelo 3 genera muy poca presión diferencial y ha sido descartado para este análisis.

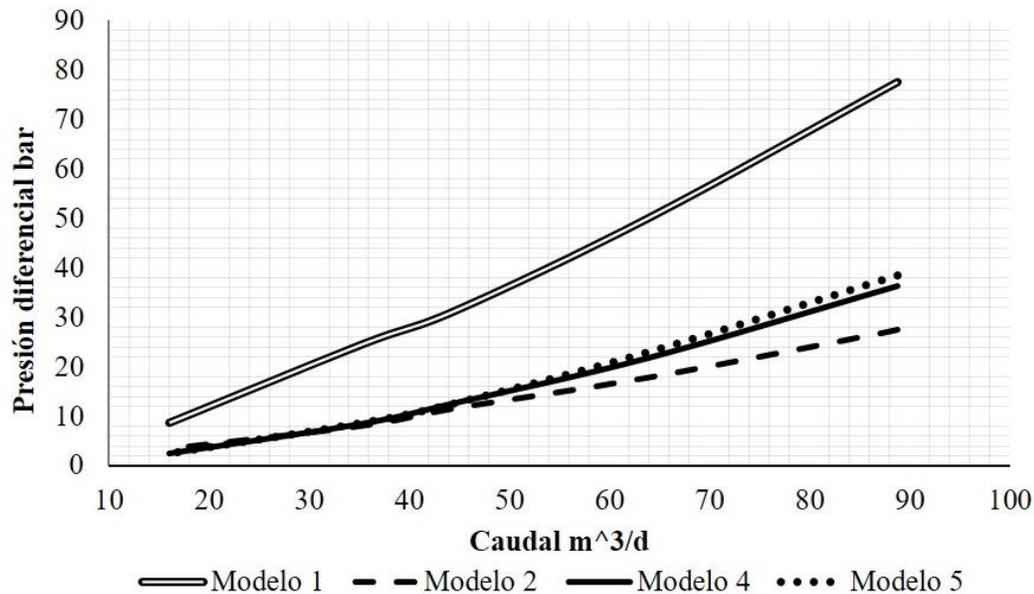


Figura 12. Presión diferencial y caudal resultantes de simulaciones computacionales para la solución polimérica EOR 303-700

Las simulaciones graficadas en la Figura 12, muestran que el modelo 1 alcanza mayor presión diferencial que los demás modelos, pero como se indicó anteriormente, también generó alta degradación del polímero. El modelo 2 ha obtenido una presión diferencial promedio aceptable así como una degradación moderada, con la potencialidad de ser mejorado. Mientras que, el desempeño de presión diferencial entre los modelos 4 y 5 fue casi el mismo. Sin embargo, en cuanto a degradación el modelo 4 ha reportado mejores resultados que el modelo 5.

Las presiones diferenciales mostradas en la Figura 12, son el resultado de la resolución de la ecuación de conservación de la masa (2); y la conservación de movimiento (3). Las ecuaciones solucionan el campo de velocidades en cualquier punto y tiempo de la geometría con una condición inicial del flujo de fluidos. Una vez el campo de velocidades es solucionado, otros parámetros como la presión, densidad, y temperatura pueden ser obtenidos. La presión diferencial en los reguladores de hélices helicoidales (1 y 2) se atribuye más a pérdidas por fricción y la magnitud de la trayectoria, ya que son notablemente más largas que los modelos 4 y 5. En consecuencia, mayor fricción en mayor tiempo, y más presión diferencial resultante. Sin embargo, los efectos viscosos en los modelos 4 y 5 puede que sean de inferior influencia porque la trayectoria del fluido es menor que en los modelos 1 y 2. Para todas las reguladoras, se cumple con el balance de conservación de movimiento en donde el incremento de la velocidad incrementa la presión diferencial.

**Discusión.** En la Tabla 3, se presenta un resumen de los principales resultados experimentales y computacionales con la finalidad de comparar los parámetros entre presión diferencial y degradación, como la validación de los modelos computacionales. Adicionalmente, allí se indican los resultados de datos de caudal medio para los modelos 4 y 5 siendo los reguladores de mejor desempeño probados en este trabajo.

Los resultados de la Tabla 3, muestran una aceptable aproximación entre los datos experimentales y los datos computacionales. A excepción del modelo 3, que tuvo una desviación estándar mayor al 10%; posiblemente causada por la concentración de minerales en el agua de preparación de ese experimento, lo cual pudo haber afectado la curva de viscosidad de forma importante como para generar un incremento del error entre los datos experimentales y computacionales. Es importante mencionar que, el protocolo experimental no contemplaba obtener una curva del polímero por corrida en cada válvula, asumiendo que la curva mostrada en la Figura 4 sería la base disponible para los datos de entrada al simulador para todas las corridas. Un cambio en la curva de viscosidad debido a la concentración de minerales puede tener un efecto en la solución de la ecuación de conservación de movimiento y con ello la desviación reportada. Otro valor que se muestra distinto al resto, es el esfuerzo cortante promediado en las paredes entre la malla 1/4 3D del modelo 4 y los modelo 4 y 5 2D-Axisimétrico. Esto debido a que, como se mencionó en la metodología, las limitaciones del número de nodos en la zona cercana a la pared en la malla 1/4 3D sobreestima los valores de esfuerzos cortantes, lo cual fue solucionado con más números de nodos en la zona cercana a la pared con soluciones axisimétricas para los modelos 4 y 5.

Tabla 3. Grupo de resultados experimentales y computacionales para solución polimérica EOR 303-700

Modelos	Flujo m <sup>3</sup> /d	Degradación %	$\Delta P$ (Exp) bar	$\Delta P$ (CFD) bar	Esfuerzo cortante máximo en las paredes mbar	Cizallamiento promedio 1/s	Error absoluto %
1	92,1	53,1	78,19	82,54	100,8	19355	5,49
2	87,0	22,1	23,51	26,88	67,0	14091	2,79
3	81,2	13,7	8,97	10,89	38,0	11024	21,49
4	88,0	9,8	37,60	34,27	83,5	43301	9,80
4*	88,0	9,8	37,60	36,24	75,6	15096	4,67
5*	89,4	22,9	42,02	38,55	78,2	17982	8,23
4*	45,6	2,3	11,86	12,84	28,6	8358	8,27
5*	44,5	5,3	11,86	12,84	35,2	13630	8,27

\*Simulaciones axisimétricas

Con respecto a la relación que tienen la tasa de cizallamiento y la degradación viscosa, los resultados de los reguladores de flujo rotatorio y helicoidal reportados en la Tabla 3 son consistentes con algunos trabajos del arte previo (Naug, 2013; Del Pozo y col., 2018; Díaz y col., 2020; y Husveg y col., 2020). Las tasas de cizallamiento entre 10.000 y 14.000 s<sup>-1</sup> registraron degradación inferiores que las que superan los 15.000 s<sup>-1</sup>. Hasta ahora, no se encuentra disponible un criterio unificado de la magnitud de la tasa de cizallamiento para predecir la degradación viscosa debido a que este parámetro va a depender de las condiciones de proceso, características físicas y químicas del polímero, y su protocolo de preparación que puede afectar su resistencia al cizallamiento. No obstante, algunos trabajos han contribuido a mostrar una mirada general a este problema. Del Pozo y col., 2018 han afirmado que para su sistema de capilar embobinado, la tasa de cizallamiento no debe ser superior a 3000 s<sup>-1</sup>. Sin embargo, Naug (2013) ha definido la tasa de cizallamiento por encima de 18.000 s<sup>-1</sup> como un valor crítico. Mientras que, Stavland y col., (2016) han reportado que la tasa de cizallamiento debe ser inferior a 10.000 s<sup>-1</sup> para evitar degradación severa de la solución polimérica en aplicaciones de recuperación mejorada. Adicionalmente, los resultados computacionales publicados por Díaz, y col., (2020) han mostrado que tasas de cizallamiento por encima de 15.000 s<sup>-1</sup> comienzan a tener resultados adversos sobre la degradación en su regulador de hélice helicoidal.

Las definiciones anteriores corresponden a conceptos de reguladoras de flujo helicoidal o rotatorio y para válvulas de estrangulamiento en serie. Sin embargo, los resultados reportados en este trabajo para los conceptos de vástago con surcos basado en el principio de sellos laberínticos no coinciden con la mayoría de las tasas de cizallamiento establecidas en esos trabajos como críticas.

Los resultados de la simulación del modelo 4, ha obtenido tasas promedio de cizallamiento incluso por encima de 15.000 s<sup>-1</sup>. A pesar de esto, el modelo 4 ha mostrado buen desempeño con bajo porcentaje de degradación. Este comportamiento, es una señal que el sistema ha logrado una condición equilibrio, lo cual evita el incremento de la degradación y la presión diferencial que es esperada. Encontrar un equilibrio como este no es una tarea fácil. Si hay un cambio, por más insignificante que fuera en el diseño, la respuesta sobre la degradación cambiaría drásticamente. Adicionalmente, la tasa de cizallamiento también depende de otros factores externos al regulador; por ejemplo el contenido de minerales como los cloruros en la solución de preparación para el método de inundación por polímeros (Muhammad y col., 2020). Divers y col., (2017), han reportado que los cloruros pueden tener un efecto negativo sobre los polímeros y han propuesto la implementación de desalinizadores o la mezcla con aditivos que mejoren la resistencia del polímero a la salmuera.

Liu y col., (2009) han descrito que la clave del desempeño del concepto de sello laberíntico son los surcos. En los surcos, las cadenas de moléculas del fluido No-Newtoniano son entongadas y encogidas, y así gradualmente se logra alcanzar altos diferenciales de presión y con poca o ninguna degradación. Esta sería una ventaja y descripción para un fluido dilatante que permitiría obtener elevada presión diferencial. Sin embargo, una explicación más extensa del fenómeno no ha sido aún publicada y como el sistema evita alta degradación con altas tasas de cizallamiento. Por esta razón, en este trabajo se propone una hipótesis sobre este problema. Con la finalidad de entender como el sistema funciona, es necesario definir la tasa de cizallamiento, en este caso en particular, como un rápido proceso químico, el cual puede ser análogo a algunos reactores químicos, donde los fundamentos relacionados a estos deben ser tomados en cuenta. La tasa de reacción química es una función de las variables y condiciones operativas del sistema: moles, tiempo de

residencia, energía aplicada (presión, temperatura, agitación), así como la composición de los elementos (James, 1996). Si se hace una analogía de algunas de las anteriores características a una reguladora para inyección de polímeros, la trayectoria del fluido dentro del regulador sería el tiempo de residencia y la energía aplicada sería la tasa de cizallamiento, mientras que la tasa de los productos de reacción va a ser dependientes de la magnitud de estos parámetros. Los productos de la reacción en esta extrapolación, serían las moléculas cizalladas del polímero cuantificables a través del porcentaje de degradación o pérdida de viscosidad. La clave de este sistema es disminuir esas condiciones de reacción sin reducir demasiado la presión diferencial. Hay un rango específico de la tasa de cizallamiento donde la trayectoria del fluido tiene alto efecto sobre la degradación, y el tiempo de residencia pasa a ser muy importante, mientras más larga es la trayectoria más tiempo de residencia del fluido en condición de alta energía y más degradación es obtenida. En el caso de los modelos 4 y 5, hay dos tipos de periodos de alta energía durante la trayectoria del fluido dentro de la válvula, cuando el fluido pasa a través de cada surco y el tiempo que tarda en atravesar toda la válvula, lo cual para estos modelos es escasamente 0,38 m. En otras palabras, el diseño debe obtener la deseada caída de presión (restricción del flujo) en una determinada tasa de cizallamiento máxima en un proceso rápido de un solo paso. Si el diseño cumple con tal equilibrio, se obtiene baja degradación.

La anterior suposición, puede explicar porque el modelo 2 de hélice triple, incluso con un área de estrangulamiento mayor que el modelo 4 y menos tasa de cizallamiento, ha obtenido mayor degradación que el modelo 4, inclusive con menor presión diferencial como resultante. Es decir, el modelo 2 tienen un tiempo de residencia 4 veces mayor que el modelo 4 y por tal razón hay más oportunidad de reacción en el sistema. Por otra parte, el modelo 4 y 5 tienen trayectorias similares, pero los resultados en cuanto a degradación son evidentemente distintos. Tal comportamiento, puede ser parte de la misma teoría de balance entre nivel de energía y tiempo de residencia. En el modelo 5, el diseño contempla mantener la misma velocidad y la tasa de cizallamiento en toda la trayectoria, mientras que en el modelo 4, la segunda etapa, la tasa de cizallamiento es disminuida según el diseño (puntos entre 50 y 110 en la Figura 11). En este caso, una disminución en el nivel de energía en la mitad de la trayectoria y desaceleración, jugó un importante rol en los resultados obtenidos. Adicionalmente, si la solución polimérica pierde viscosidad en la primera etapa producto de la degradación, los componentes de velocidad, turbulencia y esfuerzos cortantes van a incrementarse en la segunda etapa y más degradación va a producirse. Por esta razón, el modelo 4 con un vástago que desacelera el flujo en la segunda etapa satisface el equilibrio entre el balance de energía y tiempo de residencia con el estrangulamiento del flujo deseado.

Algunos trabajos han divulgado argumentos que soportan y ayudan a entender la hipótesis y ejemplos previamente presentados. Culter y col., (1975), han afirmado que la degradación del polímero por cizallamiento es una reacción de despolimerización en la cual la energía de activación es suplementada por acción mecánica sobre el polímero. Consecuentemente, Noik y col., (1995) han declarado que el tiempo de residencia en la elongación de las moléculas debe ser considerado. Para una distribución de peso molecular dado, y tamaño de la obstrucción, las moléculas no tienen el tiempo suficiente para degradarse para una determinada concentración de polímeros.

Sumado a los anteriores puntos de vista y ejemplos, el tiempo de residencia también puede estar justificado siguiendo los resultados presentados por Díaz y col., 2020. A pesar que su helicoide doble tiene un área más pequeña que la hélice triple del modelo 2 de este trabajo, lo cual incrementaría la tasa de cizallamiento al comparar ambos modelos y con ello la degradación, la trayectoria del flujo es casi la mitad del modelo 2 de este trabajo, con lo cual se obtuvo un efecto positivo sobre el nivel de degradación. No obstante, los diseños de flujo helicoidal pueden convertirse en una tarea infructuosa para alcanzar el equilibrio y obtener niveles de degradación aceptables en alto flujo y baja concentración de polímeros.

## Conclusiones

Se probaron un total de cinco diseños de reguladores de flujo para un proyecto de inundación con polímeros en un sistema experimental de mediana escala. Adicionalmente, se llevaron a cabo simulaciones computacionales para todos los reguladores con aceptables aproximaciones con los datos experimentales.

El prototipo helicoidal de triple hélice en dos etapas y con alta tasa de cizallamiento obtuvo alta presión diferencial y alta degradación, mientras que los prototipos de triple hélice de una sola etapa, y de flujo rotatorio, ambos diseños de mediana y baja tasa de cizallamiento obtuvieron una moderada degradación, pero baja presión diferencial. Sin embargo, los diseños de vástagos con surcos han alcanzado los objetivos experimentales sobre degradación, presión diferencial, y caudal; a pesar de las altas tasas de cizallamiento obtenidas en las simulaciones computacionales. Los modelos de vástago con surcos han superado algunas condiciones críticas para obtener alta presión diferencial con un aceptable porcentaje de degradación con las soluciones poliméricas probadas en este trabajo.

La tasa de cizallamiento, los esfuerzos cortantes en las paredes, y la velocidad no son los únicos parámetros que deben considerarse sobre la degradación mecánica. Incluso, en este trabajo fueron calculadas tasas de cizallamiento que exceden de manera significativa los valores reportados como críticos por el arte previo, y aun así, se logró bajos porcentajes de degradación porque el proceso también es afectado por la trayectoria del fluido en estos diseños. Específicamente, el tiempo de residencia es la clave en el diseño de los reguladores con ciertas áreas de estrangulamiento y patrón de flujo. No obstante, siempre va a haber un nivel de magnitud en la tasas de cizallamiento dado por condiciones de operación o área de estrangulamiento, donde el porcentaje de degradación va a ser independiente del tiempo de trayectoria y la despolimerización va ser inevitable. Por otra parte, los parámetros operacionales y geometrías relacionadas con la degradación mecánica van a ser siempre dependientes de las características químicas,

concentración del polímero, y hasta de la calidad de los químicos. Esto quiere decir que, la estimación del porcentaje de degradación sigue siendo una tarea sin una única solución predictiva.

## Nomenclatura

$\bar{D}$	Tasa del tensor deformación, $\Delta V/\Delta L$
$Dh$	Diámetro hidráulico, mm
$g$	Gravedad, $m/s^2$
$L$	Longitud, m
$n$	Índice del polímero, adimensional
$P$	Presión, bar
$\Delta P$	Presión diferencial, bar
$K$	Coficiente de consistencia, adimensional
$V$	Velocidad, m/s
$t$	Tiempo, s
$y$	Curva de ley de potencia, adimensional
$\rho$	Densidad, $kg/m^3$
$\sigma$	Esfuerzo cortante, bar
$\sigma_0$	Esfuerzo de fluencia, bar
$\dot{\gamma}$	Velocidad de deformación en cizalla o cizallamiento, $s^{-1}$
$\tau$	Esfuerzo cortante en las paredes, mbar
$\mu$	Viscosidad dinámica, cP
$\eta$	Viscosidad aparente, cP
$\eta_0$	Viscosidad aparente de la solución sin degradación, cP
$\eta_{deg}$	Viscosidad aparente de la solución degradada, cP

## Referencias

- Abidin, A. Z., Puspasari, T., and Nugroho, W. A., 2012. "Polymers for Enhanced Oil Recovery Technology". *Procedia Chemistry*. 4, 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2012.06.002>.
- Alvarado, V., and Manrique, E., 2010. "Enhanced oil recovery: An update review. Energies". *MDPI AG*. <https://doi.org/10.3390/en3091529>.
- ANSYS CFX, 2017. Tutorials ANSYS Inc.
- Arne Stavland and Siv Marie Åsen., 2016. "Impact of choke valves on the IOR polymer flooding Lessons learned from large scale tests". Retrieved from <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>.
- Culter, J. D., Zakin, J. L., Patterson, G. K., 1975. "Mechanical degradation of dilute solutions of high polymers in capillary tube flow". *Journal of Applied Polymer Science*. **19** (12), 3235–3240. <https://doi.org/10.1002/app.1975.070191210>.
- Del Pozo, L., Daparo, W. D., Fernandez, G., Carbonetti, J., 2018. "Implementing a field pilot project for selective polymer injection in different reservoirs". In *Proceedings - SPE Symposium on Improved Oil Recovery*. <https://doi.org/10.2118/190205-ms>.
- Demin Wang; Jiecheng Cheng; Qingyan Yang; Gong Wenchao; Li Qun; Fuming Chen., 2000. "Viscous-Elastic Polymer Can Increase Microscale Displacement Efficiency in Cores". *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas*. <https://doi.org/10.2118/63227-MS>.
- Díaz, F. A., Torné, J. P., Prada, A., Perez, G., 2020. "Shear degradation model of HPAM solutions for the design of regulator valves in polymer flooding EOR". *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. **10** (6), 2587–2599. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00905-5>.
- Divers, Thomas; Gaillard, Nicolas; Bataille, Stéphane; Thomas, Antoine; Cédric, Favéro., 2017. "Successful Polymer Selection for CEOR: Brine Hardness and Mechanical Degradation Considerations". *Paper presented at the SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.2118/185418-MS>.
- Gao, C., Shi, J., Zhao, F., 2014. "Successful polymer flooding and surfactant-polymer flooding projects at Shengli Oilfield from 1992 to 2012". *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13202-013-0069-7>.
- Herrera, J., Prada, C., Maya, G., Gomez, J., Castro, R., Quintero, H., Jimenez, R., Perez, E., 2020. "CFD simulation of HPAM EOR solutions mechanical degradation by restrictions in turbulent flow". *CT&F*, **10** (2), 115-129. <https://doi.org/10.29047/01225383.255>.
- Hinkley, H., and Glenn, B., 2017. "Polymer enhanced oil recovery-Industry lesson learned. Oil and Gas Authority": **9**
- Husveg, T., Bilstad, T., Guinee, P., Jernsletten, J., Knudsen, B., Nordbo, H. T. (2009). "A Cyclone-Based Low Shear Valve for Enhanced Oil-Water Separation". *Society of Petroleum Engineers (SPE)*. <https://doi.org/10.4043/otc-20029-ms>.
- Husveg, T., Stokka, M., Husveg, R., Jouenne, S., 2020. "The Development of a Low-Shear Valve Suitable for Polymer Flooding". *SPE Journal*. **25** (5), 2632–2647. <https://doi.org/10.2118/201223-PA>.

15. James, G., 1996. "Chemical petroleum process fundamentals for non-chemical engineers". *American Institute of Chemical Engineers, New York, USA*.
16. Kwakernaak, P. J., Van Den Broek, W. M. G. T., Currie, P. K., 2007. "Reduction of oil droplet breakup in a choke". In *SPE Production and Operations Symposium, Proceedings*. 302–309. <https://doi.org/10.2523/106693-ms>.
17. Liang, Y., Zhang, S., Pei, X., Hong, D., 2011. "Practice and understanding of separate-layer polymer injection in daqing oil field". *SPE Production and Operations. Society of Petroleum Engineers*. <https://doi.org/10.2118/128103-PA>.
18. Liang, Y., Shicheng, Z., He, L., Xiaohan, P., Hong, D., 2010. "Practice and understanding of separate layer polymer flooding in Daqing Oilfield". In *SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia 2010, OGWA - EOR Challenges, Experiences and Opportunities in the Middle East*. 86–90. <https://doi.org/10.2523/128103-ms>.
19. Liu, H., Li, J., Yan, J., Wang, W., Zhang, Y., Zhao, L., 2009. "Successful practices and development of polymer flooding in Daqing Oilfield". In *Society of Petroleum Engineers - SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition 2009, APOGCE 09*. **2**, 927–931. <https://doi.org/10.2118/123975-ms>.
20. Mahani, H., Sorop, T. G., Van Den Hoek, P. J., Brooks, A. D., Zwaan, M., 2011. "Injection fall-off analysis of polymer flooding EOR". In *Society of Petroleum Engineers - SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition 2011, RCSC 2011*. 51–63. <https://doi.org/10.2118/145125-ms>.
21. Manrique, E., Ahmadi, M., Samani, S., 2017. "Historical and recent observations in polymer floods: An update review". *CT&F - Ciencia, Tecnologia y Futuro. Ecopetrol S.A.* <https://doi.org/10.29047/01225383.72>.
22. Morel, D. C., Vert, M., Jouenne, S., Gauchet, R., Bouger, Y., 2012. "First Polymer Injection in Deep Offshore Field Angola: Recent Advances in the Dalia/Camelia Field Case". *Oil and Gas Facilities*. **1 (02)**, 43–52. <https://doi.org/10.2118/135735-pa>.
23. Naug, M. J., 2013. "Improved in polymer water flooding efficient using a low shear choke valve". Master Thesis, University of Stavanger, Faculty of Science and Technology. <http://hdl.handle.net/11250/182600>.
24. Noik, Ch., Delaplace, Ph., Muller, G., 1995. "Physico-Chemical Characteristics of Polyacrylamide Solutions after Mechanical Degradation through a Porous Medium". *Society of Petroleum Engineers (SPE)*. <https://doi.org/10.2118/28954-ms>.
25. Saboorian-Jooybari, H., Dejam, M., Chen, Z., 2016. "Heavy oil polymer flooding from laboratory core floods to pilot tests and field applications: Half-century studies". *Journal of Petroleum Science and Engineering*. **142**, 85–100. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.01.023>.
26. Seright, R. S., 1983. "The effect of mechanical and viscoelastic behavior on injectivity of polyacrylamide solutions". *Society of Petroleum Engineers Journal*. **23 (03)**, 475–485. <https://doi.org/10.2118/9297-PA>.
27. Sheng, J., Leonhart, B., Azri, N., 2015. "Status of polymer-flooding technology". *Journal of Canadian Petroleum Technology*. **54 (02)**: 116–126. <https://doi.org/10.2118/174541-PA>.
28. Stavland, A., Asen, S. M., Mebratu, A., Gathier, F., 2016. "Impact of Choke Valves on the IOR Polymer Flooding: Lessons Learned from Large Scale Tests". *Proc., IOR Norway*. 18–22.
29. Taber, J. J., Martin, F. D., Seright, R. S., 1997. "EOR Screening Criteria Revisited—Part 1: Introduction to Screening Criteria and Enhanced Recovery Field Projects". *SPE Res Eng*. **12 (03)**, 189–198. <http://dx.doi.org/10.2118/35385-PA>.
30. Tovar, F. D., Barrufet, M. A., Schechter, D. S., 2014. "Long Term Stability of Acrylamide Based Polymers during Chemically Assisted CO<sub>2</sub> WAG EOR". *SPE Improved Oil Recovery Symposium*. <https://doi.org/10.2118/169053-MS>.
31. Wassmuth, F. R., Arnold, W., Green, K., Cameron, N., 2007. "Polymer flood application to improve heavy oil recovery at east bodo". In *Canadian International Petroleum Conference, CIPC*. <https://doi.org/10.2118/2007-184>.
32. Wang, W; Liu, H; Liu, Z; Zhongyu, L; Yan, J; Zhang, L; Liu, Q; Yongdong, L; Zeng, L; Yannian, Hu., 2009. "Successful Refracturing Enhances Oil Production in Horizontal Wells: A Case Study from Daqing Oilfield, China". *The Asia Pacific Oil and Gas Conference & Exhibition, Jakarta, Indonesia*. <https://doi.org/10.2118/123210-MS>.
33. Yaning, L., Shicheng, Z., Liu, H., Xiaohan, P., Hong, D., 2010. "Practice and understanding of separate layer polymer flooding in Daqing oil field". *SPE EOR Conference at oil & gas west Asia held in Muscat, Oman*. <https://doi.org/10.2118/128103-MS>.
34. Zhong, H., Zhang, W., Fu, J., Lu, J., Yin, H., 2017. "The performance of polymer flooding in heterogeneous type II reservoirs-an experimental and field investigation". *Energies*. **10 (4)**, 1–19. <https://doi.org/10.3390/en10040454>.