

Análisis, diseño e implementación de válvulas reguladoras de flujo -VRF para yacimientos multicapas sometidos a procesos de recuperación química de petróleo

J. J. Herrera, Ecopetrol; E. E. Pérez, T.I.P.; L. C. Prada, T.I.P.; H. I. Quintero, Ecopetrol; M. Gutiérrez, Ecopetrol; G. A. Maya, Ecopetrol; L.Y Maldonado, P.S.L.; R. Castro, Meridian Consulting.

Categoría: Marque con una "X"

- 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 recuperación de petróleo mediante inyección de soluciones poliméricas en yacimientos heterogéneos multicapas, es una tecnología atractiva para mejorar la eficiencia de barrido volumétrico y el factor de recobro. No obstante, la inyección de soluciones poliméricas en cada capa requiere de sistemas de regulación que generan la ruptura de las cadenas del polímero debido a los altos esfuerzos de corte, ocasionando pérdida de la viscosidad. Desde el 2018, ECOPEPETROL ha trabajado en el análisis, diseño, construcción y evaluación a escala de laboratorio y campo de válvulas reguladoras de flujo (VRF) que mitigan las pérdidas de viscosidad por restricciones del flujo. Inicialmente, se construyeron bancos de pruebas de laboratorio y campo, así como metodologías para evaluar la degradación mecánica de soluciones poliméricas a través de VRF comerciales y/o prototipos para inyección de polímeros. De igual forma se diseñó un banco móvil de pruebas de VRF que actualmente se encuentra en construcción. Adicionalmente, se implementó y validó una metodología de simulación fluidodinámica (CFD) para desarrollar geometrías y predecir la degradación mecánica, bajo condiciones reales de yacimiento usando análisis nodal. Estos desarrollos han permitido construir tres diferentes prototipos de regulación de caudal y flujo; probados exitosamente en ambientes relevantes de presión y caudal como mecanismos reguladores de flujo en pozo. Los resultados muestran la disminución en un 30% de la degradación en comparación con válvulas comerciales de inyección de agua. Así mismo, al comparar con nuevas válvulas para inyección de polímero, se encuentran reducciones de hasta el 10%, y en condiciones de caídas de presión de 500 psi (80 BPD) se obtiene una degradación menor 25%, demostrando su capacidad de regulación sin afectar la viscosidad del polímero. Las nuevas VRF son una herramienta valiosa para las tecnologías CEOR (recobro mejorado químico), ya que reducen el consumo de polímero y aumentan el factor de recobro con un mejor control del perfil de inyección.

Introducción

Los polímeros basados en poliacrilamidas, tales como las poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas (HPAM) son ampliamente utilizados debido a su solubilidad en el agua y su menor costo (Bruno, et al., 2016). Sin embargo, son muy propensos a la degradación mecánica que ocurre durante el proceso de inyección desde la superficie hasta la formación. Por tanto, es posible encontrar en las facilidades de superficie o en fondo de pozo válvulas de choque, bombas de inyección, cambios de diámetros en líneas de distribución, entre otros equipos y accesorios, siendo los lugares con alto grado de cizallamiento donde se causa la degradación en el polímero con pérdidas de viscosidad inclusive superior al 50% (Morel, Jouenne, Vert, & Nahas, 2008) (Theriot, et al., 2018) (Maerker, 1976) (Seright, 1983), (Seright et al., 2009).

Para mitigar la degradación mecánica de las soluciones poliméricas, inicialmente se plantean mejoras y adaptaciones en las facilidades de superficie y fondo de pozo donde se busca principalmente disminuir restricciones o cambios abruptos de diámetro de entrada y salida, ya que como se ha reportado por (Culter et. al. 1975) (Ghoniem et. al., 1981) (Stavland et. al., 2016) (al Hashmi et al., 2013; Noik et al., 1995) (Herrera et al., 2020) la degradación mecánica del polímero ocurre en los cambios drásticos de flujo como contracciones que generan altas caídas de presión. Como solución para evitar estos cambios abruptos de diámetro se opta por usar geometrías tipo helicoidal, ya que según la literatura tienen un aumento del flujo secundario que genera a nivel total altas caídas de

presión debido a pérdidas por fricción y al aumento en el radio de curvatura. (Jain et. al., 2004) (Gohari et al., 2019) (Husveg et al., 2020); pero, no generan alta degradación debido a que no se tienen cambios abruptos de área de flujo.

El Centro de Innovación y Tecnología ICP de Ecopetrol, dentro del alcance de la línea de investigación de optimización de procesos de recuperación química de petróleo (cEOR) ha trabajado en la implementación de válvulas reguladoras de flujo y presión en yacimientos multicapas. Los objetivos principales son el ahorro de química mediante la reducción de la degradación mecánica y aumentos en los factores de recobro por barridos eficientes de crudo. Este artículo técnico presenta la metodología construida para el análisis, diseño, validación y construcción de válvulas reguladoras de flujo para procesos tipo cEOR. Adicionalmente, se presenta el prototipo de válvula reguladora de flujo tipo helicoidal diseñado a partir de la metodología construida y usando datos experimentales y simulaciones CFD. Dicha válvula fue probada en los dos bancos de pruebas (laboratorio y campo) construidos por Ecopetrol. Finalmente, se presentan los resultados de la evaluación de la VRF helicoidal en ambiente relevante de presión y caudal.

Metodología y Datos

ECOPETROL ha trabajado en el análisis, diseño, construcción y evaluación a escala de laboratorio y campo de válvulas reguladoras de flujo (VRF) que mitigan las pérdidas de viscosidad por restricciones del flujo. En una fase inicial, se construyeron bancos de pruebas de laboratorio y campo, así como metodologías para analizar la degradación mecánica de soluciones poliméricas a través de VRF comerciales y/o prototipos para inyección de polímeros. De igual forma se diseñó un banco móvil de pruebas de VRF que actualmente se encuentra en construcción. Adicionalmente, se implementó y validó una metodología de simulación fluidodinámica (CFD) para desarrollar geometrías y predecir la degradación mecánica, bajo condiciones reales de yacimiento usando análisis nodal. En la Figura 1, se muestra la metodología final construida para diseñar y evaluar válvulas reguladoras de flujo en pozos multicapas con inyección de polímero.

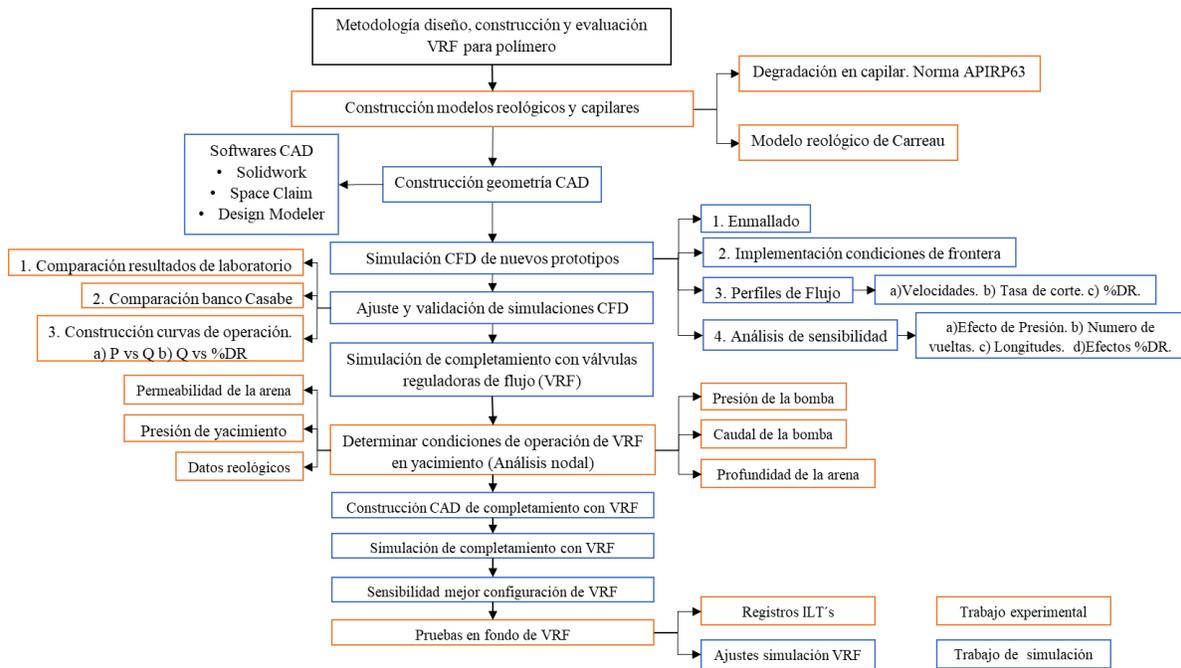


Figura 1. Metodología para la evaluación de la degradación mecánica de soluciones poliméricas a través de VRF empleando simulaciones CFD

La primera etapa de gran importancia es la construcción a nivel experimental de los modelos reológicos y de degradación de los polímeros usados en tecnologías de recobro, los cuales son generalmente tipo poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas (HPAM). Este tipo de polímeros presentan un comportamiento pseudoplástico (disminución de su viscosidad cuando incrementa la tasa de deformación (*shear rate*)) (Castro-García, et al., 2016); este efecto del cizallamiento es conocido como “*shear thinning*”. Un modelo de viscosidad que representa de manera adecuada este comportamiento en aplicaciones de la ingeniería es el modelo de Carreau, mostrado en la Ecuación (1)

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad \text{Ecuación (1).}$$

Los parámetros λ, n son constantes empíricas del polímero específico, mientras que η_0 y η_{∞} son los límites de viscosidad de baja y alta tasa de deformación (cizallamiento) y son obtenidos a partir de datos experimentales. Para la adquisición de datos se utilizó un reómetro Anton Paar MCR 702 usando una geometría de cilindros concéntricos a temperatura constante de 30°C.

Dado que las soluciones poliméricas cuando son sometidas a altos cizallamientos presentan degradación mecánica debido a los esfuerzos de corte que rigen el movimiento del fluido, estas pérdidas de viscosidad deben ser cuantificadas. De esta forma fue implementado el procedimiento estandarizado API RP63 para obtener diferentes valores de tasas de degradación. Este procedimiento utiliza un equipo de corte capilar donde se desplaza la solución polimérica a través de un capilar de diámetro previamente establecido. Una vez obtenidos los datos del equipo de corte capilar expresando en valores de tasa de degradación mecánica (%DR) para diferentes cizallamientos es propuesto un modelo logístico de crecimiento poblacional para correlacionar estas dos variables usando la siguiente expresión dada en la Ecuación (2):

$$\%DR = \frac{k}{1 + be^{-r\dot{\gamma}}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde, k, b, r son parámetros del modelo y $\dot{\gamma}$ es la velocidad de corte o cizallamiento. Estos parámetros son determinados experimentalmente. Para la determinación de los parámetros empíricos de los modelos de viscosidad y de degradación mecánica un ajuste de parámetros a partir de la adquisición de datos experimentales utilizando el algoritmo numérico de mínimos cuadrados para problemas no lineales fue implementado en el software MATLAB R2017.

Construcción geometrías CAD. Empleando el software Solidwork o en ocasiones Space Claim o Design Modeler del software Ansys se construyen las geometrías CAD del dominio de fluido que se desea analizar.

Enmallado con refinamiento en las paredes. Para el enmallado empleado en las geometrías construidas se utilizó el método de inflación, el cual se caracteriza porque las zonas cercanas a la pared se encuentran más refinadas que las zonas del centro de la geometría como se ilustra en la Figura 2. Para el fenómeno de estudio es de gran utilidad ya que permite sensibilizar los cambios de velocidad cercanos a la pared.

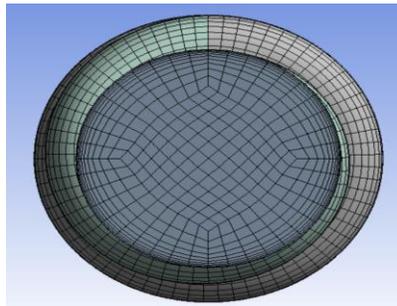


Figura 2. Refinamiento en las paredes.

Implementación de condiciones de frontera. Las características generales seleccionadas para las simulaciones de las válvulas reguladoras de flujo para inyección de polímero se presentan a continuación:

- Simulación: Estado Estacionario.
- Modelo de turbulencia: $k-\epsilon$, Realizable, Non-Equilibrium Wall Functions
- Densidad solución polimérica HPAM a 1000 y 300 ppm: 0.9979 g/cm³
- Comportamiento reológico pseudoplástico: Modelo de viscosidad empírico de Carreau.
- Condición de frontera de entrada: Flujo másico
- Condición de frontera de salida: Presión de salida
- Condición de pared: Condición de no deslizamiento

El criterio de convergencia para la resolución numérica se estableció en un error residual inferior a 1×10^{-4} , siendo necesario rodar cada simulación a través de 1500 iteraciones.

Evaluación de perfiles de flujo. A través de los perfiles de velocidad de flujo, tasa de corte y porcentaje de degradación se evalúan las zonas donde mayores valores se puedan presentar de estas variables, para que una vez calculada la tasa de deformación en el fluido, el modelo CFD correlacione estos valores con el modelo logístico de crecimiento, permitiendo estimar la tasa de degradación en cada región de la geometría en estudio. Para estimar la tasa de degradación de la solución polimérica se crea una región de control donde se calcula la tasa de corte promedio y este valor se correlaciona con el modelo de degradación capilar.

Análisis de sensibilidad. El objetivo es sensibilizar cada parte de la geometría en estudio con el fin de conocer el diseño óptimo que presente la menor degradación mecánica. El diseño seleccionado se fabrica para ser evaluado a nivel de laboratorio y campo.

Ajuste y validación de simulaciones CFD con pruebas experimentales. Una vez construido el prototipo de válvula reguladora de flujo se realiza la evaluación experimental en banco de pruebas de laboratorio y de campo. Estos bancos fueron previamente diseñados y construidos por Ecopetrol. Los resultados obtenidos a nivel experimental permiten ajustar y validar las simulaciones CFD para obtener resultados de degradación mecánica (%DR) en función de la presión y caudal (curvas de operación) representativos del proceso.

Simulación CFD de completamiento de pozo con VRF. Inicialmente, se construye el análisis nodal del pozo con los datos de yacimiento y superficie del pozo en estudio como son: presión en cabeza de pozo, presión de cada yacimiento en estudio, profundidad de las arenas a regular con VRF, permeabilidad de cada arena y espesor, entre otros. Una vez definido el análisis nodal se construye una geometría CAD del completamiento y se realizan las simulaciones basadas en las condiciones calculadas. Es importante realizar una sensibilidad de la mejor configuración de válvulas con el fin de alcanzar el caudal y presión deseado de regulación.

Pruebas de fondo de VRF. Finalmente, y como resultado de todo el proceso, se realiza la evaluación en ambiente relevante en fondo de pozo, para obtener mediante pruebas de trazadores radioactivos antes y después de instaladas las válvulas reguladoras de flujo datos de los caudales regulados en cada arena. Los resultados permiten un nuevo ajuste de simulación de estas válvulas en condiciones de fondo de pozo.

Resultados en diseño y construcción de la VRF

Los resultados de la fase inicial permitieron identificar los factores de mayor impacto en la degradación mecánica de soluciones poliméricas a través de VRF comerciales y/o prototipos para inyección de polímeros. De acuerdo con los resultados de degradación mecánica obtenidos en laboratorio y validados en campo, se evidenció que la degradación de soluciones poliméricas está directamente relacionada con la geometría de las VRF evaluadas, principalmente cuando éstas generan un cambio drástico de velocidad de flujo que sufre la solución polimérica (debido a cambios de área, cambios de presión del sistema), así mismo, variables como fuente de agua (salinidad, dureza, calidad de agua), tipo de polímero (tipo de síntesis, anionicidad, peso molecular, grado de sulfonación) y concentración de polímero influyen la viscosidad y también la degradación mecánica de la solución polimérica.

En términos generales se evidenció que a las mismas condiciones de evaluación la degradación de la solución polimérica aumenta cuando aumenta el flujo y/o el diferencial de presión, el peso molecular y/o la concentración de polímero, sin embargo, la degradación de la solución polimérica disminuye cuando aumenta el grado de sulfonación del polímero. De acuerdo a estas evaluaciones se construyó la metodología para diseñar, construir y evaluar VRF especiales para mitigar la degradación mecánica en soluciones poliméricas.

Una vez construida la metodología, se diseñó, construyó y evaluó un dispositivo tipo helicoidal. A continuación, se describe el paso a paso de la construcción y evaluación de la VRF helicoidal.

Construcción geometría CAD. Teniendo en cuenta la revisión de trabajos realizados por Gupta et. al. 2015, Sobti et.al. 2015, Chauveteau et. al. 2017, Jouenne et. al. 2017 y Jouenne et. al. 2018; se propuso el diseño de una geometría helicoidal en CAD (Figura 3) para control de presión y flujo que tiene como principio de funcionamiento la disipación de la energía a través de un espiral helicoidal.

Cada una de las partes de la geometría CAD fueron sensibilizadas en las simulaciones CFD, en función del número de vueltas, la longitud de las partes y su efecto sobre la caída de presión que se generaba y el porcentaje de degradación, con el fin de encontrar la geometría óptima que permita una regulación del polímero sin afectar la degradación del polímero.

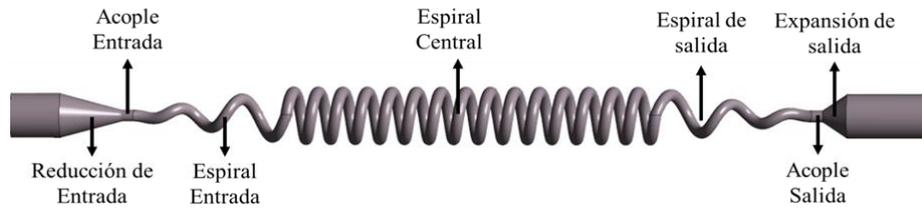


Figura 3. Modelo CAD del dominio de fluido para el prototipo de válvula a sensibilizar.

Enmallado con refinamiento en las paredes. Para el enmallado empleado en las geometrías construidas se utilizó el método de inflación para caracterizar las zonas cercanas a la pared como se ilustra en la Figura 4.

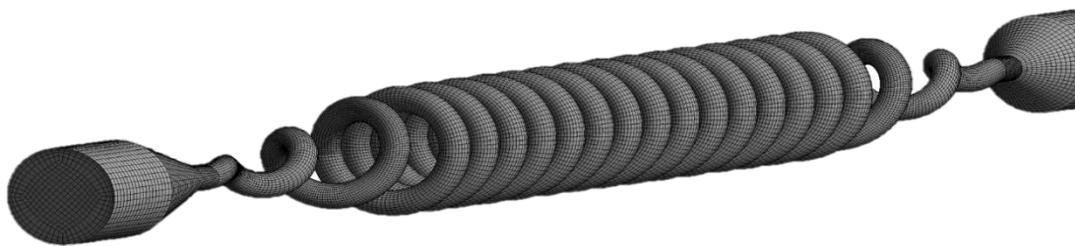


Figura 4. Inflación en las paredes de la geometría helicoidal.

Una buena discretización espacial o enmallado de la geometría permitirá una mejor representación del fenómeno en estudio, logrando que se pueda estimar mejor comportamiento del fluido en su paso por esta geometría en especial los cambios de velocidad cercanos a la pared.

Evaluación de perfiles de flujo. Para describir el flujo del polímero en la geometría helicoidal es importante la implementación de los modelos de fluidos ajustados construidos experimentalmente que permiten una adecuada representación de los cambios de velocidad, tasa de corte y de degradación

Ajustes modelos reológicos y de degradación. El polímero en estudio corresponde a una poliácridamida parcialmente hidrolizada de peso molecular medio de 8.6 MDa y un grado de hidrólisis del 11.52%. En la Figura 5 se observa el ajuste obtenido a partir de datos experimentales usando técnicas de regresión no lineal para el modelo de viscosidad de Carreau y el modelo logístico de crecimiento de la degradación por corte capilar, respectivamente. Un error medio en torno al 3% fue establecido entre los valores predichos por el modelo y los datos experimentales. Este buen ajuste permitirá una correcta representación en las simulaciones CFD, del flujo de las soluciones poliméricas (modelo de fluidos) a través de la VRF diseñadas (modelo geométrico).

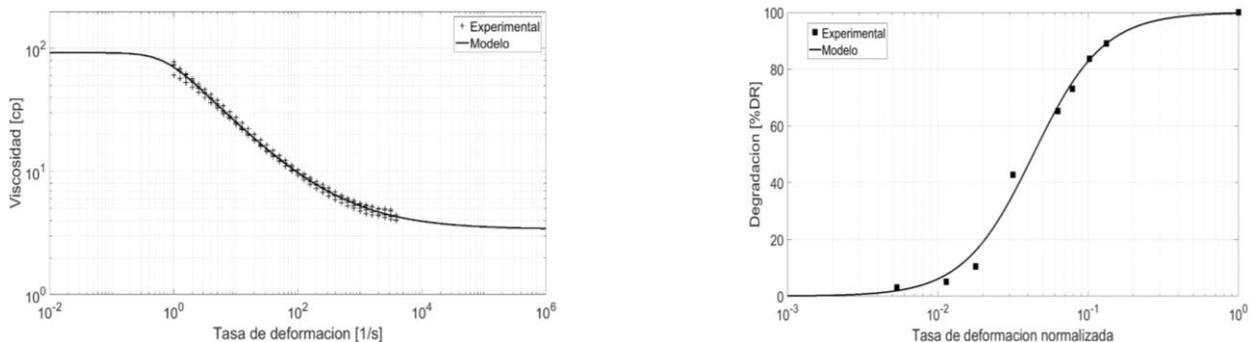


Figura 5. a) Ajuste modelo de Carreau y b) Ajuste modelo de degradación

Siguiendo con la metodología se evaluaron los perfiles de flujo con el fin de reconocer las zonas críticas de cambios de velocidad y por consiguiente tasas de corte y degradación como se muestran a continuación. En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos para la válvula tipo helicoidal.

Perfil de velocidad. En general, todas las simulaciones arrojan el perfil de velocidad mostrado en la Figura 6(a); donde, los colores rojos muestran las zonas de mayor velocidad, los cuales están en los primeros cambios de dirección de la espiral de entrada justo después de la reducción de entrada. Otra región que también presenta unos ligeros colores rojizos, pero no en la misma magnitud que en el espiral de entrada es al final de la espiral de salida. Como se verá más adelante en la sensibilización la mayor degradación se presentará en el espiral de entrada.

Perfil de tasa de corte. Las zonas de color rojo al igual que en los perfiles de velocidad muestran que en la entrada de la espiral se concentra la mayor degradación de polímero. En la Figura 6(b) se observa que la salida de la espiral también se observan cambios de los colores de la tasa de corte, pero, estos valores no son tan altos como los que se presenta en la entrada de la espiral.

Perfil porcentaje de degradación. Al tener tasas de corte altas en la zona de espiral de entrada es de esperarse que se presenten altas degradaciones. Como se observa en la Figura 6 (c) en la primera curva de la espiral de entrada se presenta valores de %DR cercanos al 30%. Posterior a esta zona de cambio abrupto de la dirección de flujo se tiene el mismo color uniforme para el espiral central con %DR menores al 10%, a continuación, en el espiral de salida regresan los colores amarillos y verdes con %DR cercanos al 15%. Finalmente, en la zona del acople y la expansión final, aunque se presenten colores rojos, los valores de DR% están por debajo del 30% estimado en la entrada de la espiral.

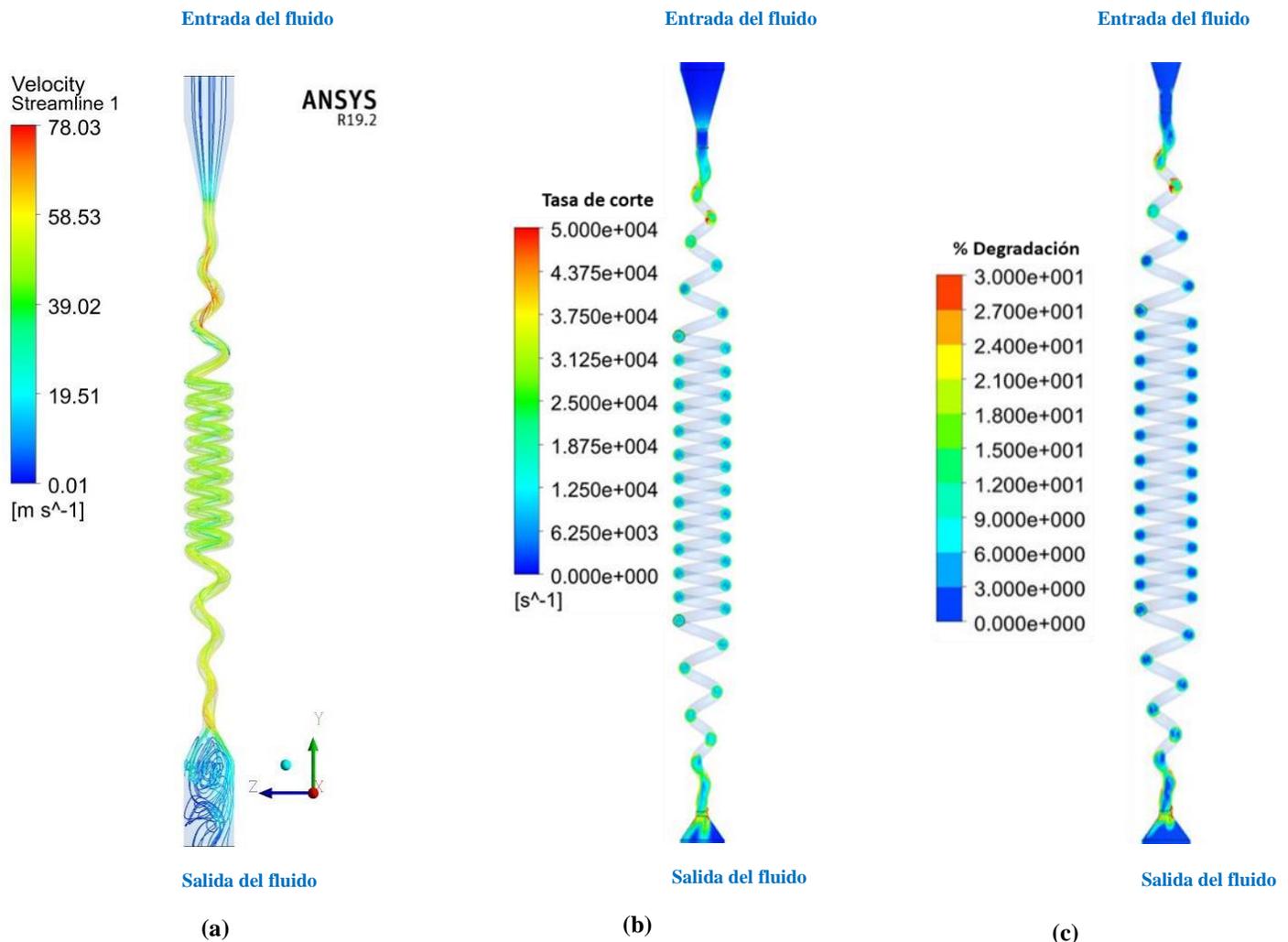


Figura 6. Resultados simulación CFD válvula helicoidal a) perfiles de velocidad, b) tasa de corte y c) % de degradación.

Sensibilización válvula helicoidal. Luego de analizar los perfiles mostrados en la evaluación de los perfiles de flujo se procedió a evaluar las zonas que mayor afectación en la viscosidad del polímero pueden presentar. En el caso de la válvula helicoidal se sensibilizó la reducción de entrada, acople de entrada y espiral de entrada. En la Tabla 1. Sensibilización zonas de entrada se presentan los porcentajes de degradación para las zonas de entrada sensibilizadas. Los resultados muestran que el espiral de entrada es la zona con mayor degradación en comparación con el acople y la reducción de entrada, alcanzando su mayor valor de 27.2% con una longitud de 45 mm. Adicionalmente, se observa que el %DR en la reducción de entrada se reduce en 65% con un aumento del doble de la longitud de la reducción de entrada; sin embargo, por encima de estas longitudes no se observan cambios representativos en el %DR. En el acople de entrada el aumento en la longitud genera un leve incremento en el %DR; siendo el mejor escenario una longitud de 2.5 mm. Finalmente, las sensibilizaciones realizadas permiten seleccionar el diseño óptimo de espiral donde el menor %DR se obtiene con una longitud de espiral de entrada de 75 mm, longitud de reducción de entrada 35 mm y reducción de acople de entrada de 2.5 mm.

Tabla 1. Sensibilización zonas de entrada

Reducción entrada		Acople de entrada		Espiral Entrada	
Longitud	DR	Longitud	DR	Longitud	DR
[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
10	27.0	2.5	15.5	45	27.2
20	9.4	5.0	15.7	60	24.6
25	9.5	7.5	15.8	75	23.3
30	8.5			90	24.8
35	8.5			100	24.8

Los resultados de la sensibilización en la zona de la espiral central se presentan en la Tabla 2; es evidente que no existe una diferencia considerable en la degradación al aumentar el número de espirales, ya que si se tiene un diámetro interno de espiral de 13 mm el cambiar el número de vueltas en la espiral de 10 a 13 el porcentaje de degradación sólo varía 0.5 unidades. Para el caso de la espiral central con diámetro interno de 10 mm, el cambiar de numero de vueltas de 10 a 13 sólo genera una variación en la degradación de 0.7 unidades.

En el caso de la caída de presión si existe una diferencia en cambiar el número de vueltas de la espiral central. Si se tiene un diámetro interno de espiral central de 13 mm y se pasa de 10 vueltas a 13 vueltas la caída de presión aumenta en más de 130 psi. De igual forma si se evalúa un diámetro interno de 10 mm y se aumenta de 10 vueltas a 13 vueltas en la espiral central también se tiene un aumento en la caída de presión de más de 140 psi.

Se puede observar entonces que tras hacer un screening de las diferentes partes que se sensibilizaron puede observarse las siguientes características. La reducción de la entrada al diámetro de la espiral debe poseer una longitud mayor a los 20 mm. La longitud del acople de la entrada no representa un cambio significativo en el porcentaje de degradación. A partir de los 60 mm de longitud de la espiral de entrada no es posible reducir más el porcentaje de degradación. En el espiral central es donde al aumentar el número de vueltas se concentra el mayor efecto de la caída de presión. Aumentar la longitud de la espiral de salida no significa la disminución del porcentaje de degradación.

Tabla 2. Sensibilización zona central.

Diámetro interno de la espiral	Número de vueltas en la espiral	Caída de Presión	DR
[mm]		[psi]	[%]
13	13	915.3	23.1
	10	767.2	22.6
10	13	921.9	23.2
	10	765.2	22.5

Construcción nueva válvula Con los ajustes que se realizaron en cada una de las partes se construyó el siguiente diseño de válvula reguladora de flujo (Figura 7). Este dispositivo presenta dos orificios (pieza 2) por donde ingresa el fluido, luego, una reducción cónica del diámetro de entrada del fluido hacia la espiral (pieza 3) y una ampliación cónica en la salida del dispositivo (pieza 5) que conecta con la punta de la válvula por donde sale el fluido (pieza 6). Estas reducciones y ampliaciones, al igual que la sección helicoidal (pieza 4), tienen por función controlar el caudal y reducir la degradación mecánica minimizando las caídas de presión

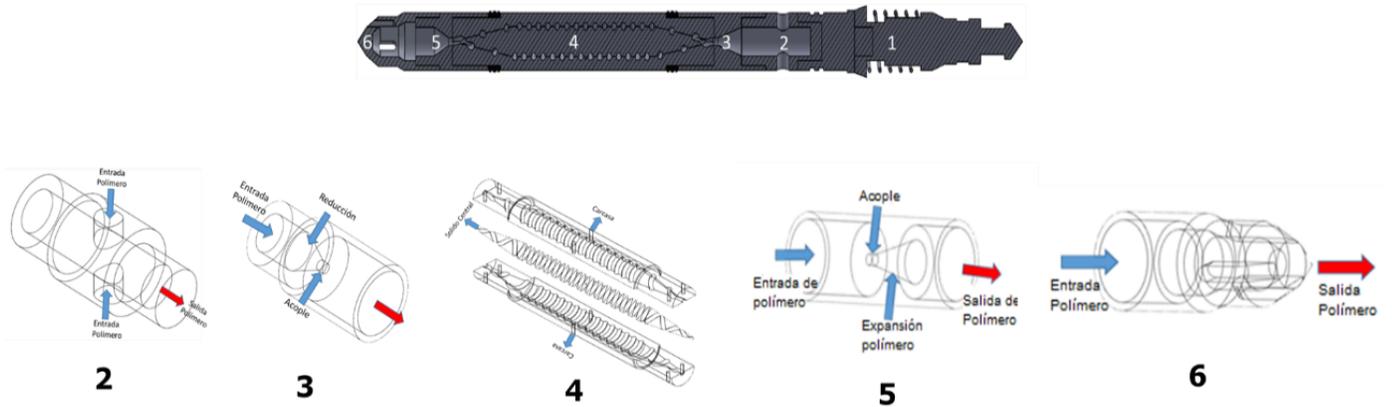


Figura 7. Válvula reguladora de flujo y presión tipo helicoidal para cEOR

Estimación de la degradación. Desde el año 2018 el Centro de Innovación y Tecnología ICP (Ecopetrol) empezó a trabajar en el diseño y construcción de metodologías y equipos para determinar la degradación mecánica de las soluciones poliméricas a través de su paso por válvulas reguladoras de flujo (VRF) tanto a escala de laboratorio como en campo. Para esto se propusieron los siguientes tres equipos a escala de laboratorio y campo:

Banco de pruebas de laboratorio: Para la evaluación de degradación de soluciones poliméricas a través de VRF se ensambló en el Laboratorio de Recobro Mejorado ICP el esquema presentado en la Figura 8 con el fin de obtener resultados de %DR en función de la presión y el caudal a menor escala.

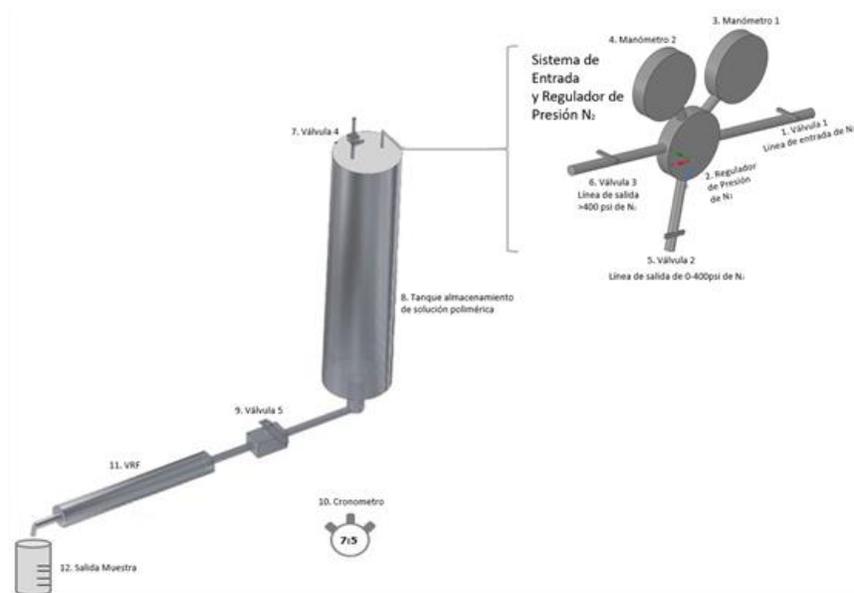


Figura 8. Banco de pruebas de laboratorio ICP

El banco de pruebas de campo y banco móvil se encuentran en proceso de patente ante la SIC con número de patente NC2020/0006806 Patente de Invención Nacional- Equipo fijo y móvil para la medición de degradación mecánica de soluciones poliméricas a través de válvulas reguladoras y controladoras de flujo en pozos inyectoros.

Comparación CFD y Laboratorio VRF tipo helicoidal. En la Tabla 3 se evidencia un buen ajuste entre los resultados experimentales en el banco de pruebas de laboratorio construido y simulaciones en CFD de las variables %DR y tasas de corte. En 5 de los 6 casos se alcanzan porcentajes de error menores al 20% para el %DR. En el primer caso, el porcentaje de error es de 19.6, aunque la diferencia entre los valores de degradación fue solo de 0.5 unidades, lo que arroja un alto valor del porcentaje de error es evidentemente el valor de solo 2% del porcentaje de degradación. En general las diferencias en 5 de los 6 casos son menores a dos unidades de degradación y solo en un caso la diferencia es de 4 unidades. Con respecto a la tasa de corte en los 6 casos de estudio, los porcentajes de error para la tasa de corte son menores al 10%. Es evidente que los resultados de simulación permiten un buen ajuste para predecir los porcentajes de degradación y tasa de corte a escala de laboratorio.

Tabla 3. Comparación CFD y resultados de laboratorio.

#	DP	Polímero	Orificio	Tasa	DR VRF Lab	DR VRF CFD	Error	Tasa de corte Lab	Tasa de corte CFD	Error
	psi	ppm	mm	(mL/s)	[%]	[%]	%	[s ⁻¹]	[s ⁻¹]	%
1	100	1000	5	70.8	2.7	2.2	19.6	5772.4	5787.3	0.3
2	100	1000	6	103.4	1.2	1.0	13.3	4878.3	4897.1	0.4
3	100	300	5	81.4	10.2	9.4	7.9	6634.0	6443.7	2.9
4	100	300	6	120.0	8.0	8.3	3.8	5658.8	5265.5	7.0
5	300	300	5	127.9	18.5	14.5	21.6	10424.8	9812.5	5.9
6	300	300	6	206.9	14.1	13.2	6.6	9756.6	9748.8	0.1

Comparación válvula helicoidal y comercial (waterflooding) en laboratorio. Los resultados evidencian que el incremento en el diferencial de presión (estimado con la presión de entrada a la válvula y la presión de yacimiento) causa mayor degradación mecánica de la solución polimérica. Sin embargo, la válvula helicoidal a diferencia de una válvula comercial de inyección de agua logra reducir el %DR en más de 20 unidades las pérdidas como se muestra la Figura 11. Adicionalmente, si la caída de presión en la válvula es menor al 300 psi el %DR estaría por debajo del 20%; lo cual representaría un ahorro en química por degradación mecánica.

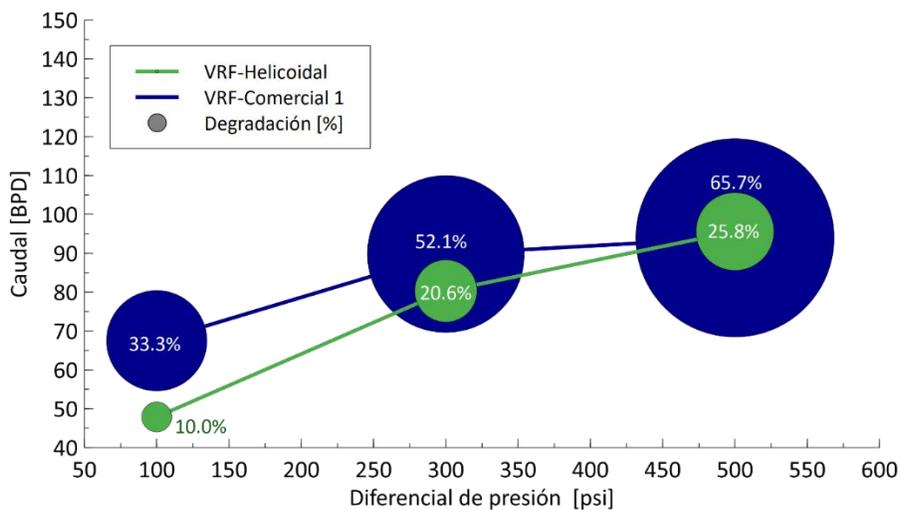


Figura 11. Comparación resultados de %DR válvula helicoidal y comercial.

Comparación CFD y banco de campo VRF tipo helicoidal. La Tabla 4 presenta los %DR, los caudales y presiones obtenidos en el banco de pruebas de campo construido en el campo Casabe.

Tabla 4. Comparación CFD y resultados de banco de pruebas de campo válvula helicoidal

5 mm				6 mm			
Q	DR Campo	DR CFD	Error	Q	DR campo	DR CFD	Error
BPD	%	%	%	BPD	%	%	%
66	12	18	50	100	2	8	300
150	42	51	21.2	300	40	41	2.5
190	53	64	20.7	500	68	72	7.4

Al comparar los %DR del prototipo helicoidal de 5 mm, se tienen diferencias menores de 11 unidades en los valores de degradación, y aunque se observe porcentajes de error por encima del 40% se atribuye a que en campo se obtuvo un valor bajo de %DR, en el caso de menor caudal. Para la válvula de 6 mm, el primer caso de degradación muestra un desfase considerable, pero los dos siguientes experimentos las diferencias el porcentaje de error es de solo una cifra. En esta configuración las diferencias no superan las 6 unidades de porcentaje de degradación. De nuevo, aunque se observe un porcentaje de error del 300% se atribuye a que el %DR del caso de menor caudal es de apenas 2%. Se puede decir entonces que las simulaciones CFD, aunque no son exactos en su predicción del %DR en los resultados del banco de pruebas de campo, si mantiene una tendencia lógica y permite estimar en la mayoría de los casos el porcentaje de degradación.

Curvas de operación de válvula helicoidal. Finalmente, los resultados de laboratorio y campo permitieron ajustar las simulaciones CFD para 4 geometrías helicoidales de 5, 6, 7 y 8 mm de orificio de flujo; con el fin de abarcar un rango más amplio de caudales. En la Figura 12 se presentan las curvas de operación obtenidas. Los orificios de mayor diámetro de helicoidal (7 y 8 mm) permiten mayor caudal de flujo y generan menor %DR; sin embargo, se observa que el caudal mínimo de regulación estaría por encima de 200 BPD (7 mm).

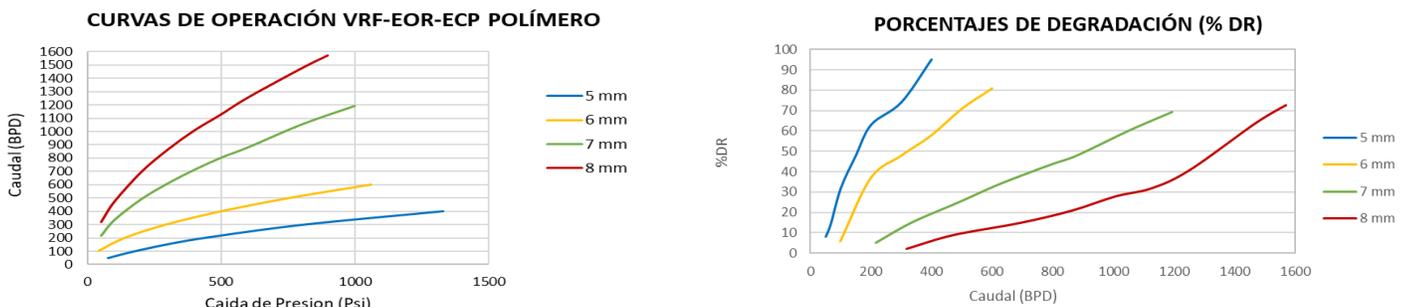


Figura 12. Curvas de operación válvula helicoidal

Implementación de la VRF en ambiente relevante campo Casabe y Discusión

Debido al creciente interés en Colombia de evaluar VRF en procesos de inyección de geles y/o polímero para aumentar la eficiencia vertical de las tecnologías de recuperación química de petróleo, se decidió inicialmente implementar la VRF diseñada y construida en un pozo inyector de agua para analizar su comportamiento operativo para mejorar el diseño y poder validar próximamente en un proceso de recobro químico.

Simulación de completamiento con VRF. Con el objetivo de realizar una simulación para predecir el mejor completamiento usando VRF helicoidal, se realizó un análisis nodal se realizó para un pozo en casabe bajo las condiciones de operación presentadas en la Tabla 5. Este pozo cuenta con 9 arenas; en 6 de ellas se desea regular en flujo en un promedio de 50 BPD. En la Figura 13 se presentan las caídas de presión que se tendrían en cada válvula de acuerdo con las condiciones de operación del pozo.

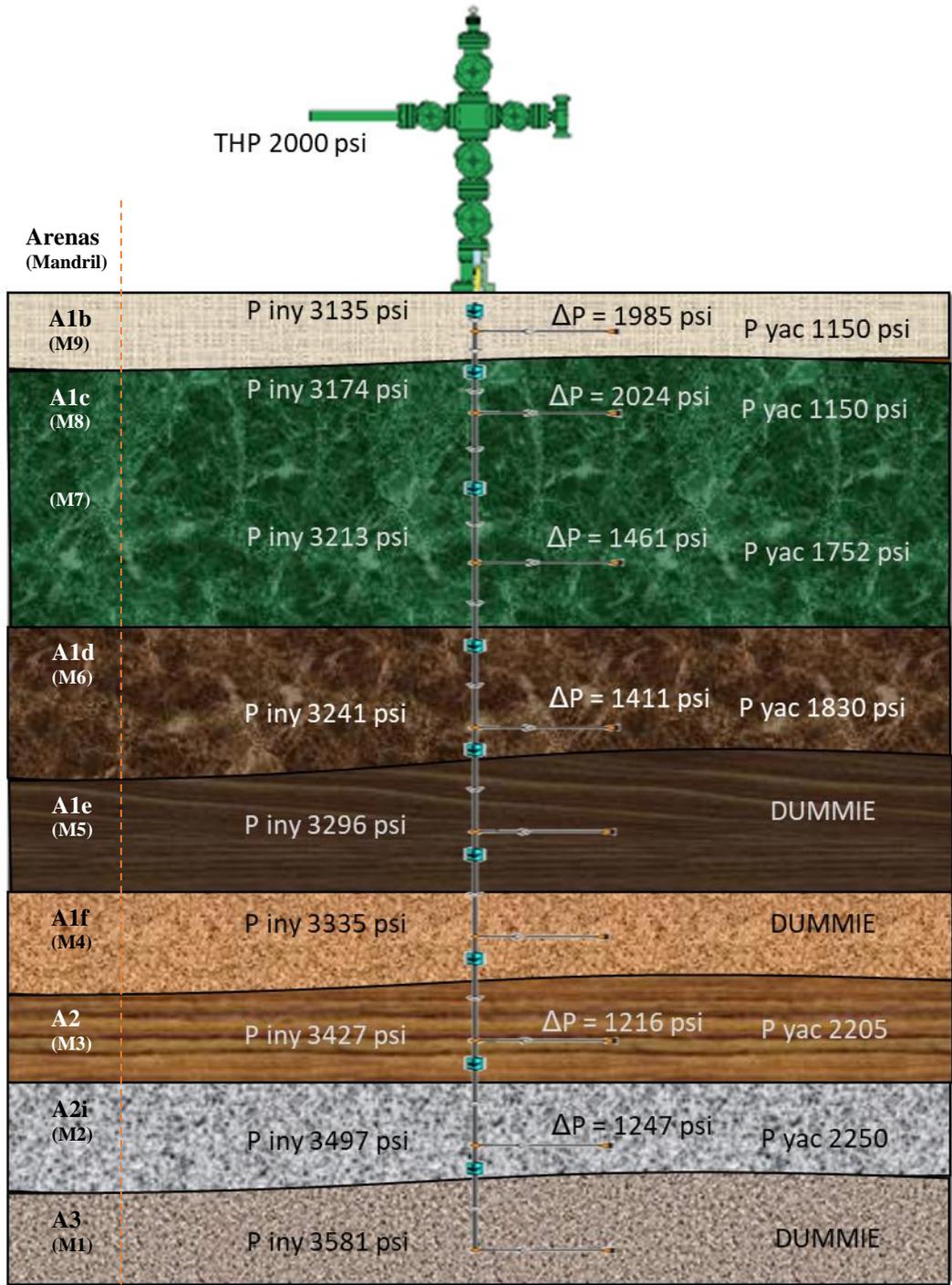


Figura 13. Configuración de pozo en casabe

Geometrías CAD. Teniendo en cuenta la distribución en el yacimiento de las arenas determinado por el análisis nodal, se procede a construir en CAD el diseño del pozo; guardando las dimensiones y ajustando las válvulas sin orificios de salida (dummies) o configuraciones helicoidales de diferente diámetro. En la Figura 14 se ilustra la geometría CAD para representar el dominio de fluido que se desplaza en los mandriles del pozo, donde se tienen configuraciones helicoidales de 5 mm y dummies.

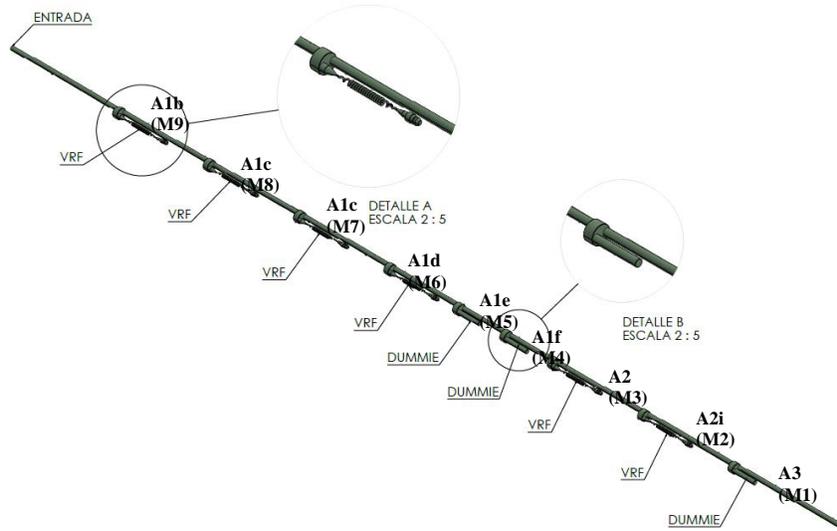


Figura 14. Geometría CAD configuración helicoidales y en completamiento de pozo.

Instalación y pruebas hidráulicas en fondo de pozo con la VRF Helicoidal. La Tabla 7 muestra los caudales del pozo en casabe con regulación en fondo de válvula comercial de agua medidos con trazador radiactivo desde el 20 de abril de 2022 (antes de instalar la VRF helicoidal). Lo que se evidenció en los trazadores anteriores es que se presentan problemas de arenamiento en la Arena A3 (mandril M1) de allí que su diámetro de VRF comercial fuese de 2.25mm. De igual forma, las arenas A2i (M2) y A1b (M9) venían presentando los mayores caudales de flujo, y para evitar que todo el flujo se fuese por el mandril 9 está presentaba un orificio de 3 mm. La arena A1c superior (M8) es otra de las arenas que se evidenciaba que tomaba un flujo significativo, mientras que las arenas de los mandriles 7, 6 y 3 (A1c inferior, A1d, y A2) no registraban un continuo flujo de fluidos. Los mandriles 5 y 4 (A1e y A1f) siempre han venido presentando válvula de 2 mm pues no es de interés del campo inyectar mucha agua en esas arenas. Finalmente, el 22 de abril del 2022 se realizó la instalación de las válvulas helicoidales como muestra la Figura 15.



Figura 15. Asentamiento VRF helicoidales en fondo de pozo

Inicialmente, se instaló válvula de 5 mm en los mandriles 9, 8, 7, 6, 3 y 2 del pozo. Teniendo en cuenta que el caudal objetivo por válvula es de 50 BPD y 5 mm es el menor diámetro de esta configuración VRF helicoidal; en los mandriles 5 y 4 se instalaron Dummies y el mandril 1 continuó con la válvula comercial de 2.25mm. Se evidenció en el primer perfil de inyección que el mandril 9 tomaba el 50% del agua inyectada mientras que los mandriles 8 y 2 tomaban alrededor del 20%, a una presión de inyección de 1920 psi y un caudal inyectado cercano a 1000 BPD.

Al día siguiente (22 de abril del 2022) se redujo el caudal de inyección del pozo y la presión de inyección se estabilizó a 1500 psi y se realizó otra prueba para evidenciar los caudales que tomaba cada arena, de nuevo, el mandril 9 tomó más del 50% alcanzando un 70% del caudal total, y los mandriles 8 y 2 seguían tomando alrededor del 20%.

Finalmente, se decidió bajar dummie en el mandril 9 y se realizaron otros registros dos registros de inyección, donde el último perfil de inyección del 2 de mayo del 2022 evidenció una regulación del caudal positiva, debido a que, 2 de las 4 arenas influenciadas en esa última configuración toman caudales entre 50 y 70 BPD, además que el mandril 3 que usualmente no tomaba se observó que recibe flujo, mejorando así el perfil vertical.

Tabla 5. Registro de trazadoras pruebas de VRF helicoidal

Pozo	Arena	VRF comercial	Perfil de inyección 20/04/2022	VRF EOR ECP	Perfil de inyección 22/04/2022	Perfil de inyección 23/04/2022	VRF EOR ECP	Perfil de inyección 29/04/2022	Perfil de inyección 02/05/2022
CSBE		Diametro orificio	Qiny	Diametro espiral	Qiny	Qiny	Diametro espiral	Qiny	Qiny
Mandril		(mm)	BPD	(mm)	BPD	BPD	(mm)	BPD	BPD
9	A1b	3	82	5.0	498	286	Dummie		
8	A1c	2.25	91	5.0	230	41	5.0	182	66
7	A1e	2	0	5.0	59	0	5.0	33	15
6	A1d	2	0	5.0	0	0	5.0	19	0
5	A1e	2	0	Dummie			Dummie		
4	A1f	2	58	Dummie			Dummie		
3	A2	4.75	0	5.0	0	0	5.0	0	54
2	A2i	6.25	221	5.0	198	63	5.0	186	98
1	A3	2.25	0	Arenamiento	0	0	Arenamiento	0	0
Q total			452		985	390		420	233
Presión cabeza			2000		1920	1500		1970	1970

Comparación de simulaciones CFD de completamiento y perfiles de inyección de pozo. Finalmente, se realizaron las corridas de simulación para las diferentes condiciones de presión y caudal de inyección de acuerdo con los trazadores realizados en un pozo en casabe. Aunque como muestra Figura 16 no se alcanzaron los mismos caudales de inyección simulados de los perfiles de inyección reales, en la mayoría de los casos, las simulaciones arrojaban las mismas tendencias, donde las arenas que más tomaban en el yacimiento eran las mismas que más tomaban en las simulaciones. De igual forma se observa que luego de colocar el dummie en el mandril 9 la simulación CFD muestra al igual que en los trazadores una mejor distribución del flujo. Los desfases entre simulaciones y perfiles de inyección se pueden deber a posibles mejoras en el modelo de fluidos y modelo geométrico CFD, a que se hace necesario adquirir e incorporar otros factores como el daño a la formación que puedan alterar la inyectividad en la cara de pozo, o también puede deberse a la incertidumbre implícita en los valores de presiones y permeabilidades de yacimiento.

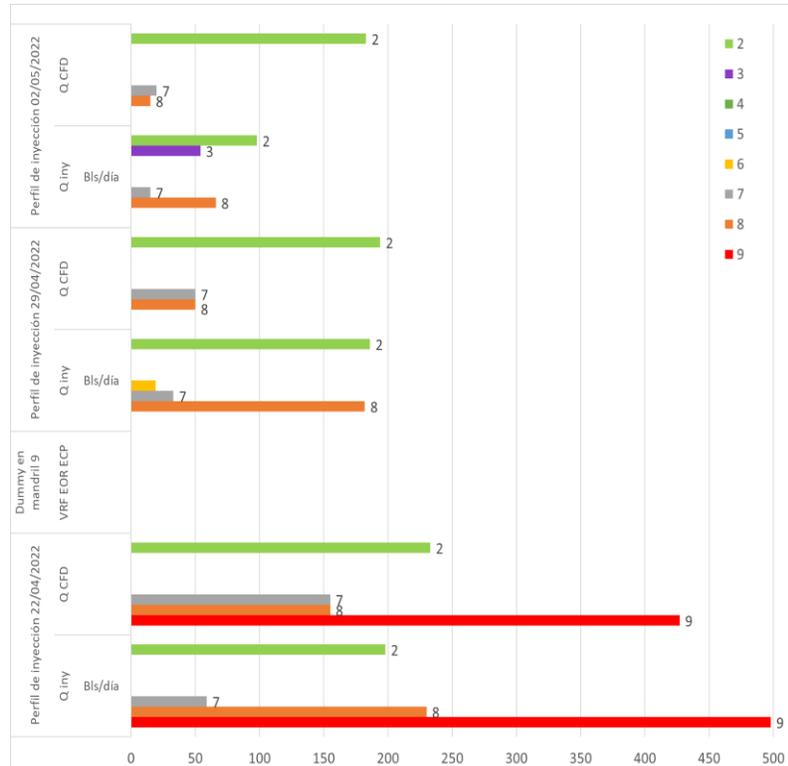


Figura 16. Comparación de simulaciones CFD de completamiento y perfiles de inyección de pozo

Conclusiones

1. Ecopetrol S.A. cuenta con una metodología de simulación fluidodinámica (CFD) robusta para diseñar prototipos de válvulas reguladoras de flujo de soluciones poliméricas y predecir la degradación mecánica, bajo condiciones reales de yacimiento usando análisis nodal en procesos selectivos de inyección de geles y/o polímero en pozos multicapas. La metodología se desarrolló mediante la incorporación de un modelo de fluido No-Newtoniano en régimen turbulento en CFD, el cual correlacionaba la tasa de cizallamiento ejercida por el movimiento del fluido con la tasa de degradación mecánica por capilar. Estos modelos empíricos y numéricos tanto de degradación como reológico permitieron estimar adecuadamente la degradación de soluciones poliméricas a través de VRF usando técnicas computacionales de CFD.
2. La metodología implementada permitió diseñar prototipos de baja y alta regulación de flujo para inyección de soluciones poliméricas. Una de ellas “válvula helicoidal” fue construida y evaluada a nivel de laboratorio y banco de pruebas de campo y finalmente probada en ambiente relevante bajo condiciones de fondo de pozo en casabe.
3. Los resultados muestran la disminución en un 30% de la degradación en comparación con válvulas comerciales de inyección de agua. Así mismo, al comparar con nuevas válvulas para inyección de polímero, se encuentran reducciones de hasta el 10%, y en condiciones de caídas de presión de 500 psi (80 BPD) se obtiene una degradación menor 25%, demostrando su capacidad de regulación sin afectar la viscosidad del polímero. Las nuevas VRF son una herramienta valiosa para las tecnologías CEOR, ya que reducen el consumo de polímero y aumentan el factor de recobro con un mejor control del perfil de inyección.
4. Se diseñaron y construyeron equipos de laboratorio, banco de pruebas de campo y equipo móvil para la determinación del porcentaje de degradación mecánica a través de válvulas reguladoras de flujo. Estos equipos permitieron evaluar los prototipos de válvulas diseñados para evidenciar su funcionamiento, ajustar las simulaciones en CFD y tener comparación con prototipos comerciales de inyección de agua o polímero.
5. Los resultados de simulación CFD mostraron un buen ajuste con los resultados experimentales en la mayoría de los casos. Las pruebas realizadas en las simulaciones en fondo de pozo muestran similitud en los patrones de inyección que se observaron en los registros ILT’s tomados en campo recientemente.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer al Centro de Innovación y Tecnología ICP de Ecopetrol por la autorización para publicar estos resultados. Este trabajo de investigación no está sujeta específicamente a agencias de financiación en los sectores público, comercial o sin fines de lucro.

Referencias

- Al Hashmi, A. R., Al Maamari, R. S., Al Shabibi, I. S., Mansoor, A. M., Zaitoun, A., and Al Sharji, H. H. (2013). Rheology and mechanical degradation of high-molecular-weight partially hydrolyzed polyacrylamide during flow through capillaries. *Journal of Petroleum Science and Engineering*
- Bruno, M. O. S., Lopes, L. F. & Moreno, R. B. Z. L., 2016. Rheological Approach of HPAM Solutions under Harsh Conditions for EOR Applications. *International Journal of Engineering & Technology*, 16(3), pp. 161403-2828-IJET-IJENS.
- Castro-Garcia, R. H., Maya-Toro, G. A., Jimenez-Diaz, R., Quintero-Perez, H. I., Díaz-Guardia, V. M., Colmenares-Vargas, K. M. & Pérez-Romero, R. A. (2016). Polymer flooding to improve volumetric sweep efficiency in waterflooding processes. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 6(3), 71-90
- Culter, J. D., y otros. (1975). Mechanical degradation of dilute solutions of high polymers in capillary tube flow. *Journal of Applied Polymer Science*, 19(12), 3235-3240.
- Gohari, K., Jutila, H. A., Mascagnini, C., Harper, C., & Kidd, P. J. (2019). Alternative helical flow control device for polymer injection in horizontal wells. Google Patents.
- Herrera J, Maya G., Prada L., Maldonado L., Castro R., Quintero H., Barbosa D., Pérez E. (2020). Experimental evaluation of the mechanical degradation of HPAM polymeric solutions used in Enhanced Oil Recovery. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 10(2), 131-141
- Husveg, T., Stokka, M., Husveg, R., & Jouenne, S. (2020). The Development of a Low-Shear Valve Suitable for Polymer Flooding. *SPE Journal*, 25(05), 2632–2647.
- Ghoniem, S., Chauveteau, G., y otros, (1981). Mechanical degradation of semi-dilute polymer solutions in laminar flows. *The Canadian Journal of Chemical*
- Jain, S., Singhal, N., & Shah, S. N. (2004). Effect of Coiled Tubing Curvature on Friction Pressure Loss of Newtonian and Non-Newtonian Fluids - Experimental and Simulation Study. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. doi:10.2118/90558-ms
- Maerker, J., 1976. Mechanical Degradation of Partially Hydrolyzed Polyacrylamide Solutions in Unconsolidated Porous Media. *Society of Petroleum Engineers Journal*, , 16(04), pp. 172-174
- Morel, D., Jouenne, S., Vert, M. & Nahas, E., 2008. Polymer Injection in Deep Offshore Field: The Dalia Angola Case.
- Noik, C. H., Delaplace, P. H. & Muller, G., 1995. Physico-chemical characteristics of Polyarylamidae solutions after mechanical degradation through a porous medium. s.l.:SPE 2895.
- Seright, R. S. (1983). The effects of mechanical degradation and viscoelastic behavior on injectivity of polyacrylamide solutions. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23(03), 475–485.
- Seright, R. S., Seheult, M., & Talashek, T. (2009). Injectivity Characteristics of EOR Polymers, SPE Res Eng: 783-792. SPE-115142-PA.
- 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. IEA-EOR.
- Theriot, T. P. y otros, 2018. Evaluation of Viscosity Loss of Viscosified Brine Solutions Due to Shear Degradation in Distribution System Components. *Society of Petroleum Engineers*, pp. SPE-190178-MS.