

Prototipo de válvula de inyección para reducir la degradación mecánica del polímero en procesos
de recuperación mejorada

Johann Marcial Medina Arciniegas

Trabajo de Grado para Optar el Título de Magister en Ingeniería de Petróleos y gas

Director

Magister. Samuel Fernando Muñoz Navarro

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Maestría de Ingeniería de Petróleos y Gas
Bucaramanga
Año 2026

Dedicatoria

Le agradezco a Dios por bendecirme y permitirme la oportunidad de mantenerme con vida, poder aportar un granito de arena a la industria petrolera y de convertirme en un gran profesional.

A mi única bendición Paula Samantha a quien amo, adoro y es la razón por la que cada día me sigo superando para verla feliz y acompañarla en cada etapa de su vida.

A mis padres Marcial Medina e Irma Arciniegas con quienes pude convivir en armonía y me facilitaron el camino a ser un hombre de bien en la sociedad.

Y a mis Hermanos, Julie, Jiselle, Paola y Oswaldo por hacer parte de mi historia y acompañarme en muchos momentos de felicidad.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Justificación	16
2. Objetivos	19
2.1 Objetivo general	19
2.2 Objetivos específicos	19
2.3 Formulación del problema	19
3. Marco teórico y estado del arte	21
3.1 Antecedentes	21
3.2 Historia química de los polímeros	23
3.3 Principio de recuperación mejorada con polímeros	25
3.4 Mecanismos de degradación del polímero	27
3.4.1 Degradación mecánica	28
3.4.2 Degradación térmica	28
3.4.3 Degradación química	29
3.4.4 Degradación biológica	29
3.4.5 Evaluación en laboratorio y campo	29
3.5 Tecnologías actuales de válvulas de inyección	30
3.5.1 Limitación de las válvulas convencionales	31
3.5.2 Diseños alternativos orientados a polímeros	32
3.6 Experiencia en Colombia: Adaptación a sistemas existentes	35
3.7 Desafíos técnicos y proyecciones	36
3.8 Análisis comparativo de reguladores de bajo cizallamiento para inyección de polímeros	39

PROTOTIPO DE VÁLVULA DE INYECCIÓN	4
3.8.1 Desempeño hidráulico	39
3.9 Compatibilidad con mandriles	40
3.10 Riesgo de degradación polimérica	40
3.11 Inyección de polímeros y control de flujo por capas en campos maduros	41
3.11.1 Evolución histórica y estudios relevantes	42
3.11.2 Tecnologías actuales y desafíos	43
4. Metodología	44
4.1 Enfoque del estudio.....	44
4.2 Diseño del banco de pruebas.....	45
4.3 Simulación CFD con Ansys-Fluent	45
4.4 Parámetros de prueba.....	46
5. Desarrollo experimental	48
5.1 Uso de tabla comparativa.....	49
5.2 Descripción de prototipos de válvula.....	49
5.2.1 Criterios generales de diseño	50
5.3 Procedimientos de prueba y recolección de datos	53
5.3.1 Fundamentos metodológicos	54
5.3.2 Preparación de la solución polimérica	54
5.3.3 Estructura del banco de pruebas	55
5.3.4 Protocolo de ejecución de pruebas.....	55
5.3.5 Variables registradas	56
5.3.6 Control de calidad y fuentes de incertidumbre	56
5.4 Validación con simulación CFD.....	57

PROTOTIPO DE VÁLVULA DE INYECCIÓN	5
5.4.1 Desempeño comparativo entre prototipos	57
5.4.2 Interpretación técnica y patrones observados	58
5.4.3 Conclusiones preliminares del análisis	59
6. Resultados y discusión	61
6.1 Comparación entre diseños y desempeño	61
6.1.1 Discusión técnica: aportes y validación	62
6.1.2 Comparación con estudios previos	62
6.2 Análisis de la degradación mecánica	63
6.3 Comportamiento reológico del polímero y condiciones de prueba	66
6.4 Desempeño hidráulico comparativo entre válvulas	66
6.4.1 Análisis funcional del diseño y su efecto sobre el polímero.....	67
6.5 Relevancia técnica y económica de los hallazgos.....	67
6.5.1 Limitaciones para el estudio	67
6.6 Aportes tecnológicos y científicos	68
6.6.1 El problema referente a la geometría	68
6.6.2 Comparación funcional	69
6.6.3 Innovación del diseño y su compatibilidad.....	70
6.6.4 Valor estratégico en la industria nacional	70
6.6.5 Impacto económico y reducción de costos apetitivos.....	71
6.6.6 Tecnología diseñada para Colombia.....	71
6.7 Resumen y hallazgos principales	72
6.7.1 Análisis del comportamiento a la degradación mecánica del polímero y caídas de presión, según cambios de caudal, presión de entrada y concentración de la solución polimérica.....	72

6.8 Impacto en la eficiencia del barrido y recobro.....	86
7. Diseño final de válvula de prototipo	89
7.1 Selección del diseño más eficiente	89
8. Compatibilidad operativa.....	90
8.1 Planos y especificaciones.....	90
8.2 Adaptabilidad a condiciones de campo.....	91
8.2.1 Compatibilidad con mandriles existentes.	91
8.2.2 Resiliencia operativa.....	91
8.2.3 Mantenimiento y vida útil.....	92
8.2.4 Compatibilidad con diferentes polímeros	92
8.2.5 Proyección a nivel de campo	92
9. Discusión.....	94
10. Conclusiones.....	97
11. Recomendaciones	99
11.1 Recomendaciones para la implementación en campo	99
11.2 recomendaciones para estudios futuros	99
11.3 Líneas futuras de investigación.....	100
Referencias Bibliográficas	101
Apéndices.....	103

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Comparativa de cizallamiento de polímero	38
Tabla 2 Desempeño comparativo de válvulas ensayadas	49
Tabla 3 Desempeño comparativo entre prototipos.	58
Tabla 4 Análisis comparativo de válvulas de inyección	64
Tabla 5 Modelos de válvula.....	66
Tabla 6 Válvula comercial vs Prototipo Sinusoidal.....	69
Tabla 7 Adaptabilidad de la Válvula prototipo a condiciones de campo.	92

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Válvula convencional	31
Figura 2 Válvula de Baker Hughes Londres	33
Figura 3 Válvulas Typhonix (Shark).	33
Figura 4 Válvulas de Luetzelschab	34
Figura 5 Válvulas de reducción escalonada localmente	35
Figura 7 Comparación de degradación mecánica en laboratorio	69
Figura 8 Banco de pruebas La Cira- Infantas	73
Figura 9 Válvula 1 -1000 ppm	75
Figura 10 Válvula 1-1200 ppm	76
Figura 11 Válvula 2 Diferentes Concentraciones	78
Figura 12 Válvula 2 - 700 ppm	78
Figura 13 Válvula 2 - 1000 ppm	79
Figura 14 Válvula 2 - 1200 ppm	80
Figura 15 Válvula 3 concentraciones superpuestas	81
Figura 16 Válvula 3 - 700 ppm	81
Figura 17 Válvula 3 - 1000 ppm	82
Figura 18 Válvula 3 - 1200 ppm	82
Figura 19 Gráfico de diseño estandarizados	84

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Válvula polímeros modelo 4F4A.....	103
Apéndice B. Ficha Técnica Prototipo - Binning Oil Tools.....	104
Apéndice C. Modelo de válvula en 3D. A) Hélice B) Cinta Retorcida C) Surcos Sinusoidales	105
Apéndice D. Hélice 3 canales. Cartucho Superior.....	106
Apéndice E. Vástago con Surcos Sinusoidales.....	107
Apéndice F. Cartuchos de prueba en otros prototipos	108

Resumen

Título: Prototipo de válvula de inyección para reducir la degradación mecánica del polímero en procesos de recuperación mejorada*

Autor: Johann Marcial Medina Arciniegas**

Palabras Clave: Polímeros, Recuperación Mejorada, Degradación Mecánica, Inyección Selectiva, Válvulas Reguladoras, CFD

Descripción: La inyección de polímeros es una técnica avanzada de recuperación mejorada de petróleo (EOR) que permite aumentar la eficiencia del barrido del yacimiento mediante la inyección de soluciones viscosas que desplazan el crudo remanente hacia los pozos productores. Sin embargo, los sistemas convencionales de control de caudal generan altos niveles de cizallamiento, provocando la degradación mecánica del polímero, pérdida de viscosidad y disminución en la efectividad del proceso.

Este trabajo presenta el diseño, validación y evaluación experimental de un prototipo de válvula de inyección especialmente desarrollado para minimizar la degradación del polímero durante su paso por sistemas de completamiento selectivo. Se utilizaron simulaciones CFD (dinámica computacional de fluidos) junto con pruebas en un banco físico ubicado en campo para evaluar distintos diseños. El prototipo más eficiente, basado en un patrón de flujo de velocidad variable, logró una pérdida de viscosidad inferior al 10% a una presión diferencial de 560 psi, con una concentración de polímero de 700 ppm y caudales de hasta 600 bbl/día.

* Tesis

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director Samuel Fernando Muñoz Navarro

Los resultados demuestran una alta correlación entre las simulaciones y los ensayos físicos, lo cual permitió reducir el número de prototipos necesarios y optimizar el diseño final. Esta innovación es compatible con mandriles existentes, lo que representa una solución eficaz, económica y adaptable para campos maduros que aplican recuperación secundaria mediante inyección de polímeros.

Abstract

Title: Prototype injection valve to reduce mechanical degradation of polymers in enhanced recovery processes *

Author: Johann Marcial Medina Arciniegas**

Keywords: Polymers, Enhanced Oil Recovery, Mechanical Degradation, Selective Injection, Flow Regulators, CFD

Description: Polymer injection is an enhanced oil recovery (EOR) technique that increases reservoir sweep efficiency by injecting high-viscosity polymer solutions to displace remaining oil toward production wells. However, conventional flow control devices generate high shear rates, leading to polymer mechanical degradation, loss of viscosity, and reduced displacement efficiency.

This study presents the design, validation, and performance assessment of a novel injection valve prototype specifically developed to minimize polymer degradation during selective injection processes. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were combined with physical tests conducted in a field-based test bench to evaluate various design alternatives. The most efficient prototype, featuring a variable velocity flow pattern, achieved viscosity losses below 10% at a differential pressure of 560 psi, using a polymer concentration of 700 ppm and flow rates up to 600 bbl/day.

* Tesis

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director Samuel Fernando Muñoz Navarro

The strong correlation between simulation and experimental results reduced the need for multiple prototypes and accelerated the optimization process. The final design is compatible with standard injection mandrels, offering a practical and cost-effective solution for mature fields employing polymer injections for enhanced oil recovery.

Introducción

Desde el año 2006, la industria petrolera colombiana ha orientado sus esfuerzos hacia la incorporación de tecnologías avanzadas que contribuyan al incremento del factor de recobro en yacimientos maduros. Entre estas tecnologías se destacan la inyección selectiva de agua y, de manera creciente, la inyección de polímeros, las cuales han demostrado ser alternativas efectivas para mejorar la eficiencia del barrido en formaciones con altos niveles de heterogeneidad. En particular, la inyección de polímeros como método de recuperación mejorada (EOR) se ha consolidado como una estrategia capaz de incrementar la eficiencia de desplazamiento del crudo. No obstante, su implementación enfrenta desafíos técnicos relevantes, entre los cuales se destaca la degradación mecánica del polímero durante el proceso de inyección, fenómeno que reduce la viscosidad de la solución e impacta negativamente el desempeño del método (Ecopetrol, 2020).

El principio fundamental de la inyección de polímeros radica en incrementar la viscosidad del agua de inyección con el fin de optimizar su movilidad y promover un desplazamiento más uniforme del petróleo remanente en el yacimiento (GESKAL, 2024). Para ello, se utilizan soluciones acuosas de polímeros solubles, como la poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM), que exhiben un comportamiento viscoelástico capaz de mejorar la relación de movilidad entre el agua y el petróleo. Sin embargo, estas macromoléculas presentan una alta sensibilidad a los esfuerzos de cizallamiento que se generan al atravesar dispositivos con restricciones de flujo, tales como válvulas, bombas o estranguladores, lo que ocasiona una pérdida significativa de viscosidad y compromete la eficiencia del proceso (Ecopetrol, 2020).

En el contexto colombiano, operaciones realizadas en campos como La Cira–Infantas, Castilla y Chichimene han evidenciado que los dispositivos reguladores de caudal disponibles en la actualidad no han sido diseñados para preservar la integridad molecular de las soluciones

poliméricas. Esta situación ha puesto de manifiesto una brecha tecnológica que limita la efectividad de los proyectos de recuperación mejorada mediante inyección de polímeros. Como consecuencia, surge la necesidad de desarrollar equipos especializados que sean capaces de manejar fluidos viscoelásticos bajo condiciones operacionales reales, minimizando los efectos de degradación mecánica y manteniendo las propiedades reológicas necesarias para garantizar un barrido eficiente.

A partir de esta problemática, el presente trabajo plantea como objetivo general proponer una válvula de inyección que permita minimizar la degradación mecánica del polímero, considerando las variables y condiciones del sistema que pueden ser simuladas y validadas en un banco de pruebas. Para alcanzar este propósito, se propone un enfoque metodológico que integra tres componentes fundamentales: (1) el diseño conceptual y geométrico de una válvula optimizada orientada a reducir los niveles de cizallamiento interno; (2) la simulación numérica del comportamiento del fluido polimérico mediante dinámica computacional de fluidos (CFD), con el fin de evaluar el desempeño de diferentes configuraciones bajo condiciones operacionales representativas; y (3) la validación experimental del prototipo en un banco de pruebas a escala real, lo que permitirá correlacionar los resultados obtenidos en las simulaciones con los comportamientos observados en laboratorio, asegurando la confiabilidad del diseño propuesto.

La propuesta desarrollada en este estudio busca contribuir al fortalecimiento de las tecnologías de recuperación mejorada aplicadas en campos maduros, mediante el diseño de una solución operativa que sea técnica y económicamente viable, compatible con la infraestructura existente y capaz de mejorar la eficiencia del proceso de inyección de polímeros. De esta manera, se aspira a aportar una alternativa que permita optimizar el factor de recobro y apoyar la sostenibilidad de la producción en yacimientos con condiciones desafiantes.

1. Justificación

Colombia enfrenta actualmente el reto de sostener una producción eficiente y estable de hidrocarburos en un escenario donde la mayoría de sus yacimientos convencionales han alcanzado altos niveles de madurez. En este contexto, las tecnologías de recuperación mejorada (EOR, por sus siglas en inglés) se han convertido en herramientas estratégicas para extender la vida útil de los campos y optimizar el factor de recobro. Entre estas metodologías, la inyección de polímeros ha adquirido una relevancia creciente debido a su capacidad para incrementar la viscosidad del agua de inyección, mejorar la relación de movilidad y favorecer un barrido más eficiente del crudo residual.

Sin embargo, la implementación de esta técnica en el entorno nacional ha evidenciado limitaciones operativas significativas, particularmente asociadas a la degradación mecánica del polímero durante su circulación a través de los sistemas de completamiento existentes. El paso del fluido polimérico por válvulas y estranguladores convencionales genera altos niveles de esfuerzo cortante que rompen las cadenas macromoleculares, reduciendo su viscosidad y, en consecuencia, la eficiencia del proceso de recobro. Este problema no solo compromete el desempeño técnico del método, sino que también incrementa los costos operativos al requerir mayores concentraciones o volúmenes de polímero para alcanzar los objetivos de producción.

La gravedad de este desafío se intensifica en los campos maduros colombianos donde ya se encuentran instalados sistemas de inyección selectiva, cuyo reemplazo total no es viable técnica ni económicamente. Esto evidencia una clara brecha tecnológica: mientras la industria avanza hacia la adopción de procesos EOR más sofisticados, los elementos de completamiento disponibles no han sido diseñados para manejar fluidos viscoelásticos sensibles a la degradación mecánica. En

este sentido, es necesario un desarrollo que no solo preserve la integridad del polímero, sino que además se adapte a la infraestructura existente sin generar modificaciones mayores.

Ante esta situación, el diseño de una válvula de inyección especializada emerge como una solución estratégica y altamente pertinente. El presente proyecto se plantea como respuesta a dicha necesidad, proponiendo el desarrollo de un prototipo capaz de minimizar la degradación mecánica del polímero mediante un control de flujo eficiente y de bajo cizallamiento, asegurando al mismo tiempo su compatibilidad con los mandriles y sistemas de completamiento actualmente instalados en los campos colombianos. Esta compatibilidad constituye uno de los elementos más innovadores del proyecto, ya que permite implementar la solución sin inversiones adicionales significativas ni interrupciones operativas prolongadas.

La metodología propuesta integra simulaciones numéricas mediante dinámica computacional de fluidos (CFD) y pruebas experimentales en un banco de pruebas con condiciones representativas de campo, lo que permitirá validar el desempeño hidráulico y estructural del prototipo. Esta combinación de análisis computacional y experimentación controlada no solo facilitará la optimización de la geometría interna de la válvula, sino que asegurará que el diseño final ofrezca un desempeño confiable bajo las condiciones reales de operación en Colombia.

En conjunto, la tecnología desarrollada representa una contribución innovadora al proceso de inyección de polímeros en el país, al abordar directamente una limitación técnica que ha afectado la efectividad de los proyectos EOR nacionales. Además de mejorar la eficiencia del método, el diseño propuesto fortalece las capacidades locales en ingeniería aplicada a la recuperación mejorada y promueve soluciones adaptadas a las condiciones particulares de los campos colombianos. De esta manera, se presenta una alternativa técnica y económicamente viable

orientada a incrementar la productividad en yacimientos maduros, integrando eficiencia, adaptabilidad e innovación dentro del marco operativo de la industria petrolera nacional.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Proponer una válvula de inyección que permita la mínima degradación mecánica del polímero de acuerdo con las variables o condiciones del sistema que se puedan simular y validar en un banco de pruebas.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento a la degradación mecánica de la solución polimérica y caídas de presión, según cambios de caudal, presión de entrada y concentración de la solución polimérica.
- Analizar las tendencias de degradación del polímero y caídas de presión con resultados obtenidos en el simulador ANSYS-FLUENT de computed fluid dynamics (CFD), validados con pruebas piloto realizadas en campo.
- Simular diferentes escenarios con prototipos de válvulas de inyección para lograr reducir la degradación mecánica del polímero a máximos diferenciales.
- Proponer un diseño de válvula eficiente que permita adaptarse a las condiciones de campo en Colombia.

2.3 Formulación del problema

La inyección de polímeros se ha consolidado como una de las técnicas más efectivas dentro de los métodos de recuperación mejorada de crudo (EOR), especialmente en yacimientos maduros con alta heterogeneidad, donde las estrategias convencionales ya no logran una eficiencia adecuada (Saboorian-Jooybari, 2016) (Manrique, 2017). Sin embargo, su implementación enfrenta una limitación crítica: la degradación mecánica del polímero durante su paso por componentes del sistema de completamiento que no están diseñados para este tipo de fluidos.

Estudios han demostrado que el paso del polímero por válvulas de inyección convencionales genera altos niveles de cizallamiento, lo cual rompe las cadenas moleculares, reduce la viscosidad de la solución e impacta negativamente la eficiencia del barrido en el yacimiento (Seright R. S., *Polymer Degradation During Flow Through Porous Media*, 1983). Esta pérdida de viscosidad disminuye el factor de recobro y, por lo tanto, la rentabilidad del proceso de recuperación mejorada.

En campos colombianos como La Cira-Infantas y Castilla, se han implementado sistemas de inyección selectiva con válvulas reguladoras diseñadas para agua, pero que resultan inadecuadas para polímeros, ya que inducen una degradación superior al 10% incluso a presiones moderadas (Díaz, 2020). Además, muchas soluciones comerciales existentes no son compatibles dimensionalmente con los mandriles normalizados, lo que limita su aplicación en campo sin realizar modificaciones costosas (Del Pozo, 2018).

Esta situación plantea un desafío doble: por un lado, reducir la degradación mecánica del polímero, y por otro, garantizar la compatibilidad del nuevo diseño con los sistemas ya instalados. De ahí surge la necesidad de desarrollar un prototipo de válvula con geometría interna optimizada, que permita el paso del fluido polimérico sin comprometer su integridad reológica, y que pueda instalarse directamente en los mandriles existentes.

¿Cómo diseñar y validar un prototipo de válvula de inyección que reduzca significativamente la degradación mecánica del polímero, mantenga su viscosidad en condiciones reales de campo, y sea compatible con los mandriles existentes en pozos con sistemas de inyección selectiva?

3. Marco teórico y estado del arte

3.1 Antecedentes

En 1931, el químico Hermann Staudinger fue pionero en la teoría moderna de los polímeros al proponer que estos compuestos estaban formados por largas cadenas de átomos enlazados covalentemente, a las que denominó macromoléculas. Esta propuesta representó un cambio fundamental en la comprensión científica de los polímeros, desplazando la idea previa que los consideraba agrupaciones de moléculas pequeñas (coloides) mantenidas unidas por fuerzas indefinidas. El trabajo de Staudinger no solo sentó las bases teóricas de la química macromolecular, sino que también propició el desarrollo de nuevos materiales poliméricos como el neopreno, el nailon y el poliéster, marcando el inicio de una nueva era en la ciencia de los materiales.

Posteriormente, Caudle y Ericson (1954) demostraron que los polímeros solubles en agua, incluso en bajas concentraciones (medidas en partes por millón), pueden incrementar de forma considerable la viscosidad del agua hasta en un factor de 10 a 50 cuando poseen altos pesos moleculares. Además, observaron que estos polímeros reducen la permeabilidad relativa de la roca al agua, disminuyendo así la razón de movilidad del fluido inyectado hasta valores cercanos a uno o incluso inferiores. Esta modificación en la dinámica de flujo mejora significativamente la eficiencia del barrido volumétrico y, por tanto, incrementa la cantidad de petróleo recuperable a través del proceso de inyección de polímeros.

En Colombia, ingenieros del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) desarrollaron en 2013 investigaciones conceptuales y experimentales enfocadas en la aplicación de la inyección de polímeros (polymer flooding) para la recuperación de crudo pesado en condiciones de alta temperatura. Este método de recobro, implementado principalmente en yacimientos terrestres de

la región de Santander, emplea polímeros diseñados para mantener una viscosidad elevada y estable frente a temperaturas de hasta 100 °C. Sin embargo, la estabilidad térmica de estos polímeros representa un desafío técnico importante, ya que tienden a degradarse con facilidad bajo dichas condiciones, lo que convierte su implementación eficiente en un reto tecnológico a escala global. Debido a sus características de diseño y formulación, el piloto implementado en campos de los Llanos Orientales por el grupo técnico Recobro Rentable del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) demostró una alta eficiencia operativa. Este desempeño es especialmente relevante considerando que la mayoría de los pozos en Colombia presentan profundidades de hasta 6.000 pies y operan dentro de un rango térmico entre 80 °C y 110 °C, condiciones que representan un desafío importante para la estabilidad de soluciones poliméricas.

Según el ingeniero Gustavo Maya (2014), egresado de la Universidad Nacional de Colombia, se han llevado a cabo al menos cuatro pilotos en distintos campos del país, los cuales han generado más de 130.000 barriles de petróleo adicionales. Estos resultados posicionan la inyección de polímeros como una alternativa viable frente a la marcada declinación en la producción nacional, al tiempo que ofrecen una oportunidad para reactivar la economía en las zonas donde esta tecnología puede ser aplicada.

Iniciativas como esta, lideradas conjuntamente por ingenieros del ICP y de la Universidad Industrial de Santander (UIS), han marcado el inicio de un esfuerzo sostenido por parte de la ingeniería petrolera colombiana para incursionar en la investigación aplicada de polímeros solubles en agua con alta resistencia térmica, abriendo nuevas posibilidades para el desarrollo de tecnologías de recobro mejorado adaptadas al contexto local.

Entre 2014 y 2025 destacan la creación de polímeros de “grado EOR” con mayor estabilidad térmica y resistencia a la salinidad, como variantes mejoradas de HPAM y copolímeros

sulfonados (AMPS y ATBS), así como arquitecturas avanzadas diseñadas para reducir la degradación mecánica, incluyendo polímeros de ultra alto peso molecular, polímeros estrella y sistemas nanorreforzados. En paralelo, estudios liderados por el ICP y universidades colombianas han validado formulaciones capaces de mantener propiedades reológicas en rangos de 70–90 °C y en presencia de iones divalentes, junto con mejoras operacionales y diseños de completamiento que minimizan los esfuerzos de cizallamiento. A nivel global, proyectos en China, Omán, India y el Mar del Norte han fortalecido el entendimiento sobre la estabilidad del polímero en condiciones extremas, mientras que herramientas como CFD han permitido optimizar geometrías de inyección y dispositivos low-shear. Estos avances consolidan la necesidad y oportunidad de desarrollar componentes especializados —como válvulas de inyección de bajo cizallamiento— que preserven la integridad molecular del polímero y maximicen la eficiencia del proceso en campos maduros.

3.2 Historia química de los polímeros

La historia de los polímeros, aunque asociada en gran parte a la química del siglo XX, tiene raíces que se remontan al siglo XIX. Durante esa época, científicos como Braconnot, Schonbein y Parkes desarrollaron materiales como la nitrocelulosa, celuloide y goma vulcanizada, sin comprender plenamente su estructura molecular. Fue hasta la década de 1920 cuando Hermann Staudinger revolucionó el campo al introducir el concepto de macromoléculas, proponiendo que los polímeros no eran agregados coloidales, sino largas cadenas de unidades repetitivas enlazadas por enlaces covalentes (Staudinger, 1931). Esta teoría enfrentó una fuerte oposición inicial, pero se consolidó gracias a la evidencia experimental acumulada en las décadas posteriores y le valió el Premio Nobel en 1953.

A partir de este avance, la industria y la ciencia de los materiales poliméricos se expandieron rápidamente. La síntesis controlada de materiales como el neopreno (1931), el nailon

(1935) y el polietileno (1937) marcó el comienzo de una nueva era en la tecnología de polímeros, con aplicaciones que van desde textiles hasta la industria petrolera.

En el contexto del petróleo, los polímeros adquirieron un papel estratégico en la recuperación mejorada de petróleo (EOR). La necesidad de mejorar la eficiencia del barrido de crudo en formaciones heterogéneas llevó al estudio de polímeros solubles en agua, principalmente la poliacrilamida (PAM) y su variante parcialmente hidrolizada (HPAM). Estas moléculas tienen la capacidad de aumentar la viscosidad del agua inyectada sin requerir altas concentraciones, gracias a su alto peso molecular.

Desde el punto de vista estructural, un polímero puede clasificarse según su tipo de monómero, peso molecular, grado de ramificación y funcionalización química. Estos factores influyen directamente en sus propiedades reológicas, térmicas y de interacción con rocas y fluidos. En soluciones acuosas, los polímeros como HPAM muestran comportamiento no newtoniano pseudoplástico, lo que significa que su viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de cizallamiento, fenómeno conocido como tixotropía. (Sheng, 2011)

En ambientes de alta temperatura, como los yacimientos colombianos del Magdalena Medio y los Llanos Orientales (80–110 °C), el comportamiento del polímero se vuelve crítico. La estabilidad térmica depende del diseño químico: la presencia de grupos funcionales como carboxilos, sulfonatos o éteres puede mejorar la resistencia a la hidrólisis y a la oxidación térmica, prolongando su vida útil en el yacimiento.

En los últimos años, especialmente alrededor de 2020, se han desarrollado formulaciones poliméricas avanzadas para enfrentar retos de temperatura, salinidad y degradación mecánica. Fabricantes internacionales y centros de investigación como el ICP han introducido copolímeros sulfonados (AMPS y ATBS) con mayor estabilidad térmica y tolerancia a iones divalentes, así

como polímeros de ultra alto peso molecular capaces de mantener viscosidad a menores concentraciones. Paralelamente, surgieron arquitecturas innovadoras como polímeros estrella y nanorreforzados, diseñados para resistir esfuerzos de cizallamiento y reducir la pérdida de viscosidad en válvulas y equipos de superficie. Estos avances han permitido aplicar la inyección de polímeros en condiciones antes consideradas inviables, incluyendo temperaturas superiores a 90 °C y salinidades mayores a 100,000 ppm.

Además, se han desarrollado polímeros modificados o copolímeros (como el ATBS-Hydrolyzed PAM) con mayor resistencia al calor y a la salinidad, lo cual ha permitido su aplicación en condiciones cada vez más exigentes. Sin embargo, el diseño de los equipos que manejan estos fluidos sigue siendo un desafío, ya que el polímero es susceptible a daños mecánicos a lo largo de su recorrido desde superficie hasta la formación, especialmente al atravesar válvulas, bombas o secciones estrechas del sistema.

En resumen, los fundamentos de la química de polímeros no solo explican su estructura y propiedades, sino que también son esenciales para comprender su comportamiento bajo condiciones de inyección en yacimientos petroleros. Estos conocimientos permiten diseñar soluciones a medida para mitigar su degradación y mejorar la eficiencia de los métodos de recuperación secundaria y terciaria.

3.3 Principio de recuperación mejorada con polímeros

En los procesos de producción de hidrocarburos, la recuperación primaria logra extraer solo entre el 10% y el 30% del petróleo original en sitio (OOIP, por sus siglas en inglés), aprovechando la energía natural del yacimiento. La recuperación secundaria, principalmente mediante inyección de agua, permite aumentar ese porcentaje hasta aproximadamente un 40–50%. Sin embargo, este método enfrenta limitaciones importantes, como la canalización del agua en

zonas de alta permeabilidad, lo cual deja grandes volúmenes de petróleo sin ser barridos (Sheng, 2011).

Para superar esta limitación, se han desarrollado técnicas de recuperación mejorada de petróleo (EOR). Dentro de ellas, la inyección de polímeros ha ganado protagonismo por su capacidad para incrementar la viscosidad del agua de inyección, disminuyendo la razón de movilidad y mejorando el perfil de barrido en yacimientos heterogéneos (Wang, 2000).

La base físico-química de esta técnica se centra en modificar la razón de movilidad:

$$M = \frac{\mu_w}{kr_w} \div \frac{\mu_o}{kr_o} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde μ es la viscosidad del agua o del petróleo, y kr es la permeabilidad relativa. Al aumentar la viscosidad del fluido inyectado (por adición de polímeros), se reduce la movilidad del agua respecto al crudo, evitando canalizaciones prematuras y permitiendo una invasión más uniforme del crudo en la matriz porosa (Lake, 1989).

Los polímeros más comúnmente utilizados son la poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM) y el xanthan gum. La HPAM ha demostrado ser más versátil en términos de formulación, solubilidad y adaptabilidad a diferentes salinidades y temperaturas (Seright R. S., 2010). No obstante, su aplicación requiere especial cuidado en el diseño del sistema de inyección para evitar su degradación mecánica, térmica o química.

La inyección de polímeros también ha demostrado ventajas económicas. Si bien el costo del polímero puede representar un porcentaje considerable de la inversión inicial, su efecto en la mejora del factor de recobro puede justificar la inversión, especialmente en campos maduros con infraestructura existente. Estudios de campo han demostrado que incrementos del factor de recobro del orden de 5–15 puntos porcentuales pueden lograrse con esta técnica (Manrique, 2017).

Un ejemplo emblemático es el campo Daqing en China, donde más de 1000 pozos han sido sometidos a recuperación mejorada mediante polímeros, logrando un incremento adicional de hasta el 20% del OOIP (Wang et al., 2009). En Latinoamérica, campos como Diadema en Argentina y La Cira-Infantas en Colombia han mostrado resultados prometedores con pilotos ejecutados entre 2013 y 2020, en los que la viscosidad de la solución polimérica fue cuidadosamente adaptada a las condiciones térmicas y salinas del yacimiento (Maya, 2014).

A pesar de estos beneficios, uno de los desafíos persistentes es asegurar que la solución polimérica mantenga su integridad durante todo su trayecto, desde el sistema de superficie hasta el frente de inyección. La eficiencia del método depende de conservar las propiedades reológicas del polímero, lo que obliga a revisar no solo la química del fluido, sino también el diseño de válvulas, tuberías, bombas y conexiones que puedan generar esfuerzos de cizallamiento.

En conclusión, la inyección de polímeros es una técnica robusta y efectiva dentro del portafolio EOR, capaz de generar incrementos significativos en la producción de campos maduros. Sin embargo, su éxito depende de una implementación cuidadosa que minimice los riesgos de degradación, tanto en superficie como en subsuelo.

3.4 Mecanismos de degradación del polímero

Uno de los desafíos más significativos en la aplicación de la inyección de polímeros en procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR) es la preservación de las propiedades reológicas del fluido a lo largo del sistema de transporte e inyección. A pesar de su efectividad para mejorar la eficiencia del barrido, los polímeros como la poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM) son susceptibles a diferentes formas de degradación, las cuales pueden comprometer seriamente la eficiencia del proceso. (Sheng, 2011)

3.4.1 Degradación mecánica

La degradación mecánica es uno de los mecanismos más críticos y frecuentes en operaciones reales. Esta ocurre cuando las cadenas poliméricas se rompen debido a esfuerzos de cizallamiento excesivos, generados principalmente al atravesar válvulas, bombas, codos, orificios y otras zonas con restricciones geométricas. Al romperse las cadenas, se reduce el peso molecular del polímero y, por tanto, disminuye su viscosidad, afectando directamente la relación de movilidad entre el agua y el petróleo.

Estudios como los de Seright (1983) y Sheng et al. (2015) demuestran que existe una velocidad crítica de cizallamiento a partir de la cual la degradación del polímero se vuelve exponencial. Esta velocidad depende del tipo de polímero, su concentración, la temperatura del fluido y la geometría del sistema. Cuando el fluido pasa por orificios estrechos a alta presión, pueden generarse chorros finos y de alta velocidad (microjets) que elevan localmente el gradiente de velocidad, generando daños estructurales en la macromolécula.

Además, el diseño de válvulas tradicionales, comúnmente utilizadas en inyección de agua, presenta zonas de estrechamiento súbito donde el flujo se acelera, incrementando los esfuerzos de cizallamiento locales. Esto ha sido identificado como una de las principales causas de pérdida de viscosidad en aplicaciones de campo, tal como lo reportaron estudios realizados en La Cira-Infantas (Díaz et al., 2020).

3.4.2 Degradación térmica

La temperatura también influye notablemente en la estabilidad del polímero. A medida que aumenta la temperatura, se incrementa la energía cinética de las moléculas, lo cual puede romper enlaces secundarios e incluso enlaces covalentes en la cadena principal si se supera el umbral térmico del polímero.

El HPAM, por ejemplo, muestra estabilidad térmica hasta los 80–90 °C, pero comienza a degradarse a mayores temperaturas, especialmente en presencia de oxígeno o iones metálicos como hierro y manganeso (Taber, 1997). En yacimientos colombianos, donde se han registrado temperaturas entre 80 y 110 °C, la degradación térmica es una amenaza real que debe considerarse al seleccionar el polímero y al diseñar su sistema de transporte.

3.4.3 Degradación química

La exposición prolongada a ambientes con alto contenido de sales divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+}), iones de hierro (Fe^{2+}) y oxígeno disuelto puede provocar la ruptura química de la cadena del polímero. Esta degradación se puede acelerar por procesos de oxidación, particularmente si el fluido no ha sido adecuadamente tratado con captadores de oxígeno.

La reacción entre oxígeno y HPAM puede generar radicales libres, que actúan como agentes degradantes sobre las cadenas largas del polímero. Por esta razón, es común utilizar inhibidores como tiourea y captadores de oxígeno como sulfito de sodio durante la preparación e inyección del fluido polimérico (Abidin, 2012).

3.4.4 Degradación biológica

En condiciones donde existen bacterias sulfato-reductoras o aerobias heterótrofas, el polímero puede servir como fuente de carbono, desencadenando una degradación enzimática que también reduce su eficacia. Este fenómeno ha sido observado en campos donde no se ha aplicado un adecuado tratamiento bactericida o donde hay presencia de biofilm en la infraestructura de inyección (Sheng et al., 2011).

3.4.5 Evaluación en laboratorio y campo

El nivel de degradación se mide normalmente como la pérdida de viscosidad en porcentaje comparando muestras de entrada y salida en un tramo específico del sistema. Una degradación

superior al 10% suele considerarse significativa, ya que puede reducir la eficiencia del barrido hasta en un 30% dependiendo del diseño del patrón de inyección.

Se han utilizado herramientas como reómetros, caudalímetros de alta resolución y simuladores CFD con funciones personalizadas (User Defined Functions – UDF) que permiten modelar el comportamiento del polímero bajo condiciones de flujo real, incluyendo predicciones del punto de ruptura molecular (Ecopetrol, 2020).

3.5 Tecnologías actuales de válvulas de inyección

En los procesos de recuperación mejorada de petróleo que emplean la inyección de polímeros, el diseño adecuado de las válvulas de inyección adquiere una relevancia crítica, ya que influye directamente en la conservación de las propiedades fisicoquímicas del polímero, especialmente en lo que respecta a su estabilidad reológica. Esta estabilidad es esencial para garantizar la eficiencia del desplazamiento del crudo en el yacimiento y, en consecuencia, optimizar la productividad del proceso. Aunque en ciertas aplicaciones se han reutilizado válvulas originalmente concebidas para sistemas de inyección de agua, estas no siempre resultan adecuadas para el manejo de soluciones poliméricas debido a diferencias sustanciales en sus propiedades de flujo. La geometría interna de estas válvulas, así como su mecanismo de operación, pueden generar cizallamientos excesivos o condiciones de flujo turbulento que comprometen la integridad del polímero, reduciendo su viscosidad y afectando negativamente su desempeño en el reservorio. Por lo tanto, se vuelve imprescindible desarrollar o adaptar válvulas específicamente diseñadas para satisfacer los requerimientos técnicos del proceso de inyección de polímeros, asegurando así su efectividad y prolongando su vida útil dentro del sistema. (Ecopetrol, 2020)

3.5.1 Limitación de las válvulas convencionales.

Las válvulas de inyección más comúnmente instaladas en sistemas de completamiento inteligente o inyección selectiva están diseñadas para operar con agua o fluidos de baja viscosidad. Estas válvulas, generalmente tipo orificio o flapper, regulan el caudal mediante un resorte o una esfera que se desplaza por diferencial de presión.

No obstante, este mecanismo genera zonas de alta aceleración del flujo, especialmente en la entrada del orificio de paso. Estas zonas de cizallamiento inducen esfuerzos locales que provocan la ruptura de las cadenas del polímero, disminuyendo su viscosidad y reduciendo la efectividad del barrido (Seright, 2010; Ecopetrol, 2020). Además, el contacto con superficies metálicas rugosas o el atrapamiento del fluido en cámaras estrechas también contribuye al fenómeno de degradación.

Figura 1

Válvula convencional



Nota: Extraída de (Seright R. S., 2009)

Adicionalmente, otros factores de diseño como la presencia de superficies metálicas con rugosidad elevada o la existencia de cámaras internas estrechas donde el fluido puede quedar atrapado, incrementan aún más el riesgo de degradación del polímero. Estas condiciones físicas desfavorables intensifican los esfuerzos de cizallamiento y pueden inducir turbulencias locales, afectando la estabilidad del fluido e impactando negativamente su desempeño dentro del yacimiento. En consecuencia, la selección o rediseño de válvulas específicas para este tipo de

aplicaciones resulta clave para garantizar la eficiencia del proceso de inyección de polímeros y preservar las propiedades deseadas del fluido a lo largo del sistema.

3.5.2 Diseños alternativos orientados a polímeros

Dado que las válvulas convencionales no son aptas para soluciones viscoelásticas como HPAM, diferentes investigaciones han propuesto nuevos diseños hidráulicos de bajo cizallamiento. A continuación, se describen los más relevantes:

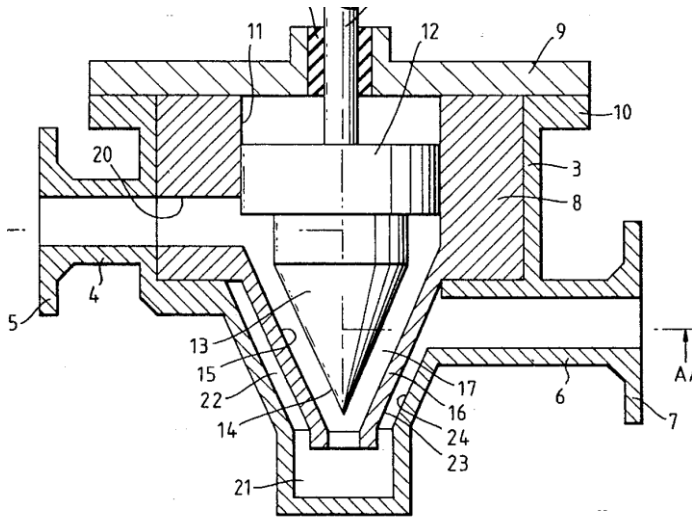
a. Capilares embobinados. Estos dispositivos, comúnmente conocidos como capilares helicoidales, están conformados por tubos de pequeño diámetro dispuestos en forma de espiral alrededor de una estructura base. Esta configuración geométrica permite extender significativamente la longitud efectiva del conducto, lo que a su vez facilita una distribución más uniforme de la pérdida de presión a lo largo del trayecto del fluido. Como resultado, se minimizan las zonas de alta aceleración y los gradientes de cizallamiento que suelen ser responsables de la degradación mecánica de los polímeros.

De acuerdo con Naug (2013), este tipo de sistemas ha demostrado ser altamente eficiente en la preservación de la viscosidad de soluciones poliméricas, con pérdidas inferiores al 5% durante su paso por el capilar. Esta característica los hace particularmente útiles en contextos donde la integridad reológica del fluido es crítica.

No obstante, su principal limitación radica en la capacidad de manejo de caudal, que típicamente no supera los 2.4 m³/d. Esta restricción los hace más adecuados para aplicaciones a pequeña escala, como pruebas de laboratorio, simulaciones de campo o pozos con requerimientos de inyección reducidos, donde la precisión y el control del flujo son más importantes que el volumen inyectado.

Figura 2

Válvula de Baker Hughes Londres



Nota: Extraído de (ICP – Instituto Colombiano del Petróleo, 2013).

b. Diseños helicoidales o ciclónicos. Proponen canalizar el flujo en patrones circulares o espiralados que desaceleran el fluido y reducen el impacto directo contra superficies. Husveg et al. (2020) diseñaron una válvula con placas helicoidales internas, alcanzando caudales superiores a 70 m³/d con una degradación menor al 10%. Estos dispositivos pueden instalarse dentro de mandriles estándar, lo que los hace atractivos para implementación en campo.

Figura 3

Válvulas Typhonix (Shark).

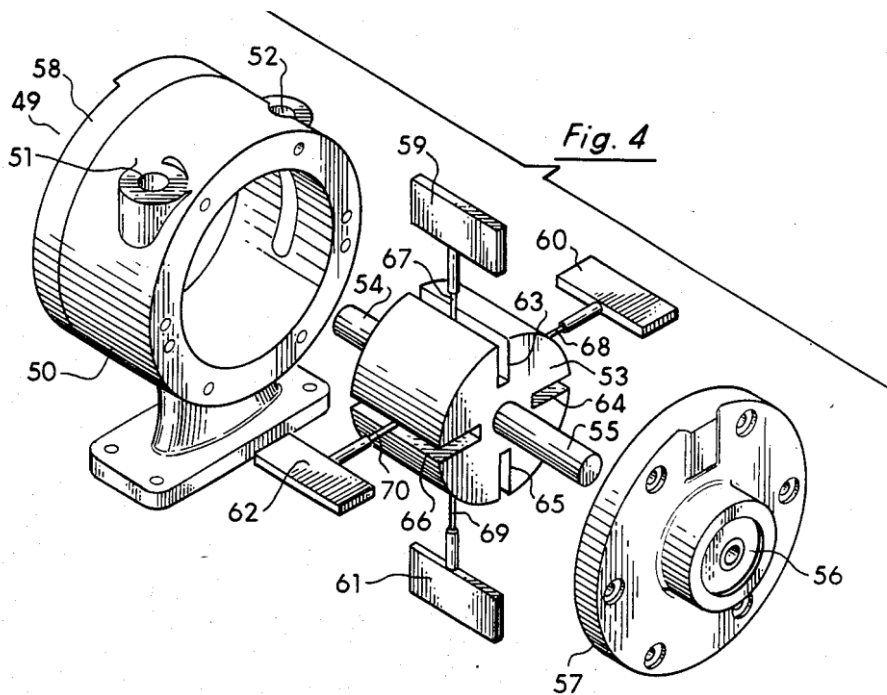


Nota: Extraído de (GESKAL, 2024).

c. Reguladores tipo laberinto. Estos utilizan un eje o vástago con canales sinusoidales, lo que obliga al fluido a seguir un trayecto prolongado con múltiples giros. Esta geometría disipa energía sin inducir zonas de alta cizalladura, lo cual ha sido demostrado en simulaciones CFD con HPAM a distintas concentraciones. Liang et al. (2010) reportaron una degradación inferior al 8% en condiciones de hasta 35 bar de presión diferencial.

Figura 4

Válvulas de Luetzelschab

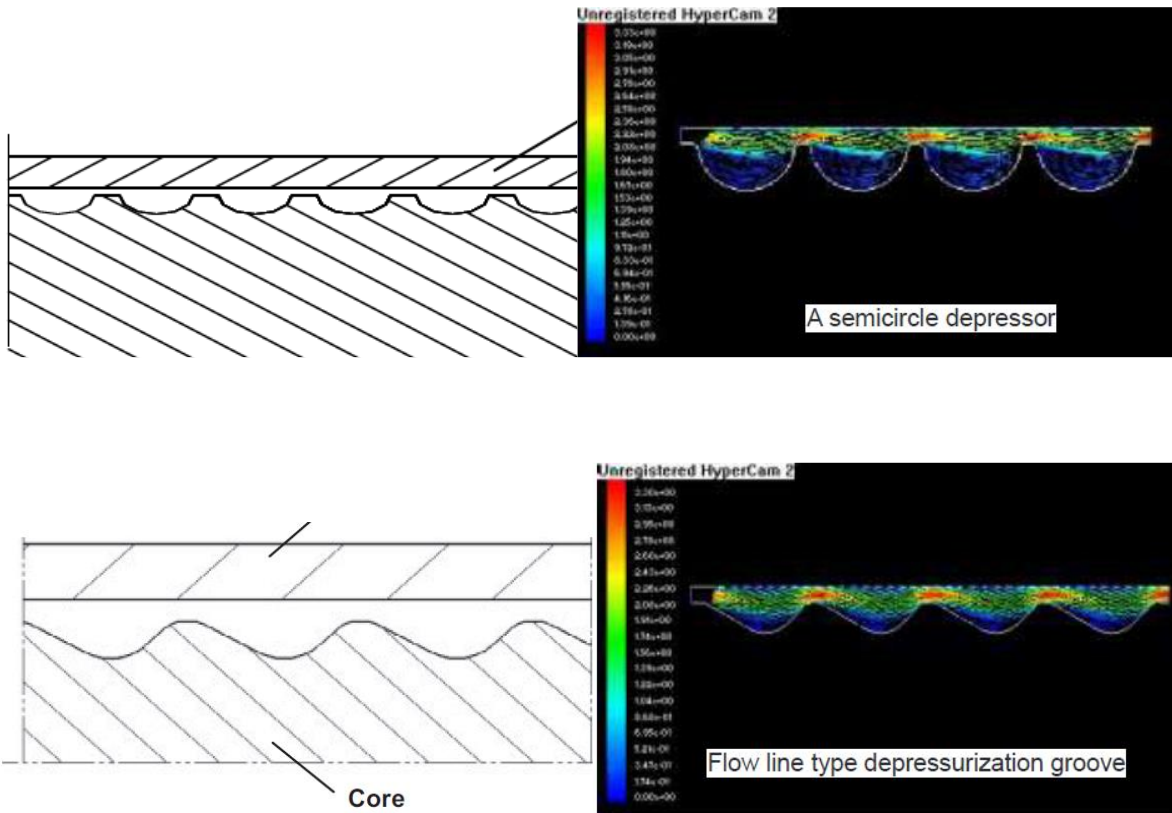


Nota: Extraído de (GESKAL, 2024).

d. Válvulas de choques en serie. Inspiradas en el concepto de disipación progresiva, estas válvulas incorporan varias cámaras de expansión y estrechamiento sucesivas. Cada "choque hidráulico" disipa una fracción de la presión total, evitando una sola zona de alto esfuerzo. Aunque su eficiencia ha sido demostrada, el principal desafío de este diseño es su tamaño, que a menudo excede los diámetros internos de los mandriles de bolsillo convencionales (Díaz et al., 2020).

Figura 5

Válvulas de reducción escalonada localmente



Nota: Extraído de Yaning L 2011.

3.6 Experiencia en Colombia: Adaptación a sistemas existentes

La operación en campos maduros de Colombia, como Castilla, Chichimene y La Ciran-Infantas, requiere que cualquier diseño de válvula se adapte a los mandriles de inyección ya instalados. Reemplazar completamente la sarta de inyección representa un alto costo operativo, por lo cual es indispensable que las soluciones tecnológicas mantengan la compatibilidad dimensional y funcional.

En este sentido, el trabajo de Del Pozo et al. (2018) propuso un diseño de válvula con capilares embobinados que puede insertarse en mandriles estándar sin necesidad de modificar la geometría externa. Aunque su implementación piloto fue limitada, los resultados de laboratorio

mostraron una degradación por debajo del 10% a caudales moderados, abriendo la posibilidad de nuevas iteraciones optimizadas.

Actualmente, el diseño de válvulas orientadas a polímeros en Colombia se enfoca en:

- Disminuir el número de partes móviles internas.
- Minimizar zonas de aceleración súbita del flujo.
- Permitir el anclaje mecánico estándar.
- Facilitar el retiro mediante herramientas convencionales de pesca.

3.7 Desafíos técnicos y proyecciones

A pesar de los avances en diseños hidráulicos de bajo cizallamiento, los principales desafíos actuales incluyen:

- Alcanzar caudales superiores a 500 bbl/d con degradación inferior al 10%.
- Lograr modularidad: válvulas intercambiables para diferentes rangos de presión y concentración
- Optimizar la fabricación local, evitando dependencia de piezas importadas o tecnologías de alta complejidad.

En resumen, el diseño de válvulas para inyección de polímeros requiere una aproximación multidisciplinaria que combine principios de ingeniería de fluidos, diseño mecánico, simulación numérica y pruebas de campo. El enfoque debe ser funcionalmente eficaz, económicamente viable y operativamente adaptable a la realidad de los campos maduros de Latinoamérica.

El concepto de flujo a través de capilares rectos fue introducido por Kwakernaak et al. (2007), quienes desarrollaron un dispositivo formado por conjuntos de capilares de diferentes diámetros, dispuestos en paralelo dentro de un cilindro, emulando la configuración de un intercambiador de calor tipo carcasa. Aunque inicialmente se planteó para evitar choques de flujo

que generan emulsiones en procesos de separación física, su versatilidad lo hace igualmente apto para la inyección de polímeros mediante mandriles.

Por su parte, Liang et al. (2010) y Liu et al. (2009) investigaron un sistema innovador fundamentado en el principio de los sellos laberínticos, conocidos en turbinas de alta eficiencia por su bajo nivel de fricción. Su propuesta integraba un regulador concéntrico diseñado específicamente para la inyección por capas. En ensayos con una solución polimérica de peso molecular de 12 millones y una concentración superior a 1000 mg/L, el dispositivo alcanzó una presión diferencial de 35 bar con un caudal de hasta 70 m³/d, presentando una degradación menor al 8%.

Adicionalmente, Díaz et al. (2020) propusieron dos tipos de reguladores destinados a mandriles de bolsillo: uno que opera mediante choques en serie con cámaras de expansión y reducción, y otro con un diseño helicoidal de doble tornillo. El principio de choques en serie también ha sido adoptado a escala industrial por la compañía SNF para el control de flujo superficial. Durante las pruebas, el diseño helicoidal obtuvo una presión diferencial de 62,4 bar con un caudal máximo de 90 m³/d, presentando una degradación del 14,05%. En contraste, la válvula de choques en serie alcanzó 26,6 bar con un flujo de 89 m³/d, con un 12% de degradación y un rendimiento intermedio en términos de caída de presión.

Este estudio comparó los tres conceptos principales considerando presión diferencial, compatibilidad con mandriles de bolsillo, capacidad de flujo y nivel de degradación. Las pruebas se llevaron a cabo en una planta experimental a escala comercial utilizando dos tipos de fluidos poliméricos. Para optimizar el desarrollo de prototipos y disminuir el número de ensayos, se utilizó dinámica de fluidos computacional (CFD), logrando una alta correlación con los resultados

experimentales y generando información valiosa acerca del comportamiento fluido-dinámico de cada diseño.

A continuación, se presenta una figura comparativa resumida con los principales resultados técnicos reportados en el texto sobre dispositivos reguladores de bajo cizallamiento para inyección de polímeros:

Tabla 1

Comparativa de cizallamiento de polímero

Investigadores	Tipo De Regulador	Δp (Psi)	Q Máx. (Bbl/D)	Degradación (%)	Ventajas / Observaciones
Del Pozo Al. (2018)	Et Capilar embobinado	280.9	374.0	9	Baja cizalla (<3000 s ⁻¹); solo puede instalarse fuera del mandril.
Husveg Al. (2020)	Et Hélice cónica	580.2	490.6	<10	Control automático de canales según el flujo; resistencia al cizallamiento.
Naug (2013)	Capilar embobinado	188.6	15.1	0	Diámetros 8–15 mm; sin degradación pero dimensiones grandes.
Naug (2013)	Flujo ciclónico	116.0	151.0	10	Más compacto que el capilar embobinado, pero ΔP grande.
Husveg Al. (20xx)	Et Ciclón 16 mm	87.0	No reportado	No reportado	Bajo cizallamiento; evita emulsiones indeseadas.
Kwakemanak Al. (2007)	Et Capilares rectos en paralelo	No reportado	No reportado	No reportado	Potencial para inyección a través de mandriles; concepto similar a intercambiador.
Liang Al. (2010); Et Al. (2009)	Et Sellos laberínticos / inyector concéntrico	507.6	440.3	<8	Diseñado para inyección por múltiples capas; polímero de alto peso molecular.
Díaz Al. (2020)	Et Doble tornillo (flujo helicoidal)	905.3	566.1	14.05	Buen desempeño; aplicable en mandriles de bolsillo.
Díaz Al. (2020)	Et Choques en serie	386.1	558.0	>12	Moderado en presión; tecnología usada por SNF en superficie.

3.8 Análisis comparativo de reguladores de bajo cizallamiento para inyección de polímeros

Con el propósito de optimizar la eficiencia de la inyección de polímeros en yacimientos heterogéneos y reducir la degradación mecánica del polímero, se han creado diferentes diseños de reguladores de flujo con bajo nivel de cizallamiento. En la siguiente sección se expone un análisis comparativo de estos dispositivos, considerando su rendimiento hidráulico, su compatibilidad con mandriles de bolsillo y el riesgo asociado de degradación polimérica.

3.8.1 Desempeño hidráulico

Los resultados evidencian una marcada variabilidad en cuanto a presión diferencial y capacidad de flujo entre los distintos reguladores analizados:

El regulador de flujo con geometría helicoidal de doble tornillo, desarrollado por Díaz et al. (2020), presentó el mejor desempeño hidráulico, alcanzando una presión diferencial de 905 psi y un caudal máximo de 566 bbl/d. Sin embargo, este alto rendimiento se vio acompañado de una degradación polimérica relativamente elevada, cercana al 14,05%, lo que podría limitar su aplicación en formulaciones sensibles.

Por su parte, el diseño basado en sellos laberínticos propuesto por Liang y Liu (2009, 2010) lograron una presión diferencial de 508 psi con un flujo máximo de 440 bbl/d, mostrando una degradación inferior al 8%. Esta combinación de baja degradación y buen desempeño lo posiciona como una alternativa altamente eficiente y balanceada para la inyección de polímeros.

La hélice cónica presentada por Husveg et al. (2020) mostró un comportamiento intermedio, con una caída de presión de 580 psi, un caudal de 490 bbl/d, y un nivel de degradación menor al 10%, lo que sugiere un compromiso adecuado entre capacidad de flujo y estabilidad del polímero.

En contraste, los capilares embobinados desarrollados por Naug (2013) se destacaron por presentar nula degradación del polímero, demostrando su potencial para aplicaciones donde la integridad de la macromolécula sea prioritaria. Sin embargo, su capacidad de flujo resultó significativamente limitada, alcanzando solo 15 bbl/d, lo que restringe su aplicabilidad en operaciones de gran escala o campos con alta demanda de inyección.

3.9 Compatibilidad con mandriles

La viabilidad operativa en campo depende en gran medida de la posibilidad de instalar estos dispositivos en mandriles convencionales. Algunos diseños, como el capilar embobinado propuesto por Del Pozo et al. (2018), aunque destacan por su eficacia en términos de minimización de la degradación polimérica, presentan dimensiones que imposibilitan su instalación directa en mandriles estándar, lo que reduce su flexibilidad operativa.

Por el contrario, los reguladores desarrollados por Díaz et al. (2020), tanto el modelo helicoidal como el de choques en serie, fueron diseñados específicamente para su integración en mandriles de bolsillo, lo que los hace más apropiados para aplicaciones en pozos existentes y facilita su implementación en operaciones de campo.

Otros conceptos, como los capilares paralelos descritos por Kwakernaak et al. (2007) y los diseños ciclónicos de Husveg et al. (2009), podrían requerir ajustes dimensionales y modificaciones de ingeniería antes de su incorporación en sistemas subterráneos convencionales.

3.10 Riesgo de degradación polimérica

Uno de los principales desafíos de este método radica en minimizar la ruptura de las cadenas poliméricas ocasionada por el cizallamiento. En este sentido, los sistemas basados en capilares controlados han demostrado ser los más eficaces para reducir la degradación, resultando especialmente recomendables cuando la preservación de la integridad del polímero es prioritaria.

Por otra parte, los diseños helicoidales, ciclónicos y laberínticos ofrecen un compromiso adecuado entre desempeño hidráulico y control del cizallamiento, constituyendo opciones viables para condiciones operativas de campo.

En contraste, el uso de válvulas tipo orificio u otros sistemas que generen aceleraciones elevadas del flujo debería evitarse, ya que estos dispositivos suelen provocar niveles significativos de degradación polimérica.

3.11 Inyección de polímeros y control de flujo por capas en campos maduros

La recuperación mejorada de petróleo (EOR, por sus siglas en inglés) constituye una estrategia ampliamente utilizada para incrementar el factor de recobro en yacimientos que han alcanzado etapas avanzadas de explotación, en las que la producción convencional resulta insuficiente para mantener la rentabilidad. Entre las diversas técnicas de EOR, la inyección de polímeros se ha posicionado como una alternativa altamente eficiente, al incrementar la viscosidad del agua inyectada y, con ello, mejorar la eficiencia de barrido y reducir la canalización preferencial del agua a través de zonas de alta permeabilidad. Este proceso permite desplazar mayores volúmenes de petróleo residual hacia los pozos productores, optimizando la recuperación total del yacimiento.

No obstante, la aplicación de esta técnica enfrenta una serie de desafíos técnicos significativos, relacionados principalmente con la estabilidad del polímero bajo condiciones de alta temperatura, alta salinidad y presencia de cizallamiento intenso, lo que puede conducir a la degradación de la macromolécula y a la consecuente pérdida de su efectividad. Además, el control del flujo a través de formaciones heterogéneas sigue representando un reto, ya que la distribución desigual de permeabilidades puede ocasionar un barrido ineficiente y la formación de canales preferenciales, afectando negativamente la recuperación.

Estos retos subrayan la importancia de desarrollar tecnologías de inyección y sistemas de control de flujo cada vez más robustos, que garanticen la integridad del polímero y optimicen su desempeño dentro de formaciones complejas. En este contexto, la investigación sobre reguladores de flujo de bajo cizallamiento, válvulas adaptadas a mandriles convencionales y simulaciones mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) resulta fundamental para avanzar hacia aplicaciones más confiables y económicamente viables de la inyección de polímeros en EOR.

3.11.1 Evolución histórica y estudios relevantes

Diversas investigaciones han corroborado la eficacia de la inyección de polímeros para mejorar la movilidad de los fluidos de desplazamiento y aumentar el recobro de petróleo, incluso en yacimientos de crudos pesados (Saboorian-Jooybari et al., 2016; Wassmuth et al., 2007). Trabajos realizados por Wang et al. (2009), Abidin et al. (2012) y Manrique et al. (2017) han puesto de manifiesto que la mayor viscosidad del polímero, en comparación con el agua, favorece una distribución más uniforme del frente de barrido, incrementando así la eficiencia volumétrica y reduciendo el riesgo de canalización preferencial.

Sin embargo, la efectividad de esta técnica se ve restringida por diversos mecanismos de degradación que pueden comprometer la integridad del polímero durante su transporte e inyección. Entre estos mecanismos destacan la degradación química (por oxidación o interacción con iones presentes en el agua de formación), la degradación térmica (asociada a temperaturas elevadas en el yacimiento), la degradación mecánica (originada por altas tasas de cizallamiento en tuberías o mandriles) y la degradación biológica (por actividad microbiana) (Sheng et al., 2015). Estudios pioneros, como los de Seright (1983), identificaron específicamente la acción del cizallamiento mecánico durante la inyección como una de las principales causas de pérdida de viscosidad polimérica, lo cual repercute de forma negativa en la eficiencia del proceso de recobro.

Estos aspectos resaltan la necesidad de diseñar estrategias de inyección y equipos de superficie y fondo de pozo que minimicen los esfuerzos de cizalla y preserven las propiedades reológicas del polímero a lo largo de todo el sistema de transporte. La integración de simulaciones avanzadas, ensayos de laboratorio y estudios de campo resulta esencial para mitigar estos fenómenos de degradación y garantizar la sostenibilidad de los proyectos de recuperación mejorada mediante polímeros.

3.11.2 Tecnologías actuales y desafíos

El control de la degradación polimérica ha progresado significativamente mediante la incorporación de captadores de oxígeno, bactericidas, aditivos termoestables y la utilización de bombas de desplazamiento positivo, como bombas de tornillo o de diafragma, que permiten minimizar los esfuerzos de cizallamiento durante la inyección. Sin embargo, la regulación del flujo por capas continúa siendo un desafío crítico, especialmente en yacimientos con alta heterogeneidad litológica, tal como se ha observado en los campos de Daqing (China), Diadema (Argentina) y La Cira (Colombia).

En este contexto, la regulación del flujo a través de mandriles de bolsillo requiere dispositivos compactos que sean capaces de limitar la degradación mecánica del polímero durante su paso por el sistema. No obstante, muchos de los reguladores actualmente disponibles presentan dimensiones voluminosas o inducen elevadas tasas de degradación. El empleo de dispositivos convencionales basados en orificios, por ejemplo, produce una conversión brusca de la energía de presión en energía cinética, generando altos gradientes de velocidad que favorecen la fragmentación de las cadenas poliméricas (Minnock et al., 2018), comprometiendo así la efectividad del proceso de recuperación mejorada.

4. Metodología

La metodología empleada en esta investigación fue diseñada con el propósito de garantizar un proceso riguroso, replicable y alineado con los objetivos técnicos del proyecto: diseñar, simular y validar un prototipo de válvula de inyección que minimice la degradación mecánica del polímero durante su uso en procesos de recuperación mejorada (EOR). Se combinan enfoques experimentales y computacionales, bajo un diseño estructurado en fases progresivas que abarcan desde la recolección de datos hasta la validación cruzada entre simulación y campo.

4.1 Enfoque del estudio

Este trabajo adopta un enfoque cuantitativo experimental, complementado con análisis computacional mediante simulación CFD (Computational Fluid Dynamics). Se parte del desarrollo de pruebas piloto en un banco físico diseñado específicamente para este propósito, donde se monitorean variables hidráulicas, mecánicas y reológicas en condiciones controladas. el enfoque permite:

- Cuantificar la degradación del polímero en función de variables operativas (caudal, presión diferencial, concentración).
- Comparar distintos diseños de válvulas mediante métricas objetivas (porcentaje de pérdida de viscosidad, ΔP , caudal mantenido).
- Validar simulaciones CFD con datos empíricos, asegurando la confiabilidad de los modelos y su capacidad predictiva.

Se considera una investigación aplicada, ya que persigue un desarrollo tecnológico de utilidad inmediata para campos maduros colombianos, con capacidad de implementación sin modificar la infraestructura existente.

4.2 Diseño del banco de pruebas

El banco de pruebas constituye una plataforma clave en el desarrollo experimental. Fue construido en instalaciones de campo por el equipo técnico del proyecto, en colaboración con especialistas de Ecopetrol y personal de soporte operativo. Su diseño modular permite reproducir condiciones reales de inyección en pozo y realizar pruebas comparativas entre diferentes prototipos de válvula.

Componentes principales del banco:

- Tanques de almacenamiento de polímero: donde se preparan soluciones HPAM en concentraciones controladas (300, 700, y 1000 ppm).
- Bomba de desplazamiento positivo: seleccionada para minimizar el cizallamiento desde la fuente de mezcla hasta la válvula.
- Mandril adaptado: replica las condiciones de instalación de una válvula en fondo de pozo, incluyendo geometría y restricciones reales.
- Sensores de presión y caudal: ubicados antes y después de la válvula, permiten calcular la presión diferencial y establecer correlaciones con los efectos de degradación.
- Módulo de muestreo simultáneo: diseñado para tomar muestras antes y después del paso del polímero por la válvula, con el fin de medir su viscosidad y pérdida de propiedades.

Las pruebas se desarrollan en ciclos de 10 a 15 minutos por diseño, bajo condiciones estandarizadas, permitiendo generar una base de datos sólida para la evaluación técnica.

4.3 Simulación CFD con Ansys-Fluent

La herramienta CFD elegida para este proyecto fue ANSYS Fluent, debido a su capacidad para resolver flujos transitorios de fluidos viscoelásticos y modelar efectos no lineales como el cizallamiento dependiente del caudal.

- a. Modelo matemático base:
 - Ecuación de Navier-Stokes para régimen laminar y turbulento.
 - Modelo de viscosidad no newtoniana: se utilizó el modelo Carreau-Yasuda, ideal para soluciones HPAM, que ajusta la viscosidad en función de la tasa de deformación.
 - User Defined Functions (UDF): se implementaron funciones personalizadas para modelar la degradación como función de la energía de disipación y la historia de cizallamiento acumulado.
- b. Condiciones de frontera:
 - Entrada: flujo másico controlado (600 bbl/día promedio).
 - Salida: presión fija o caída de presión ajustable (300–560 psi).
 - Paredes: rugosidad parametrizada según materiales reales del mandril.

Los diseños geométricos de válvulas se desarrollaron previamente en SolidWorks, exportados en formato. STL e importados a ANSYS Workbench para la generación del mallado estructurado. Se aplicó refinamiento local en las zonas de paso estrecho para capturar mejor los gradientes de velocidad.

El análisis CFD permitió identificar zonas críticas de cizallamiento, predecir la pérdida de viscosidad estimada por diseño, y priorizar cuáles válvulas pasarían a la fase de ensayo físico.

4.4 Parámetros de prueba

Para asegurar la comparabilidad entre simulación y experimento, se establecieron parámetros de prueba constantes que reflejan condiciones típicas de operación en campos colombianos donde se ha aplicado EOR con polímeros.

- a. Parámetros hidráulicos:
 - Presión diferencial objetivo: 300 a 560 psi.

- Caudal inyectado: 400, 600 y 800 bbl/día.
 - Temperatura: 80 a 110 °C (en pruebas de laboratorio se simula térmicamente hasta 90 °C).
- b. Parámetros del polímero:
- Concentraciones evaluadas: 300 ppm, 700 ppm, y 1000 ppm.
 - Tipo de polímero: HPAM (poliacrilamida parcialmente hidrolizada) con peso molecular >10 millones Dalton.
 - Agua de dilución: salinidad moderada (5,000–6,000 ppm de cloruros), para replicar condiciones reales del Valle Medio del Magdalena.
- c. Parámetros de degradación evaluada:
- Pérdida de viscosidad medida por reómetro a 7 s^{-1} .
 - Comparación de muestras de entrada y salida.
 - Registro de la energía disipada estimada por CFD.

Estos parámetros permitieron generar un conjunto robusto de datos que sirve tanto para la validación cruzada como para la optimización del diseño final.

5. Desarrollo experimental

El desarrollo experimental de este proyecto constituye el núcleo validativo de la propuesta de diseño. Su objetivo es comprobar, bajo condiciones operativas representativas, la capacidad de diversos prototipos de válvula para reducir la degradación mecánica del polímero y conservar las propiedades reológicas esenciales para una recuperación mejorada eficiente. A diferencia de una evaluación puramente teórica, esta etapa pone a prueba la realidad práctica del sistema en contacto con variables como caudal, presión, concentración, temperatura y tipo de flujo.

La metodología experimental fue diseñada para representar de forma controlada las condiciones encontradas en campos colombianos como La Cira–Infantas y Castilla, donde los sistemas de inyección selectiva están ya instalados y el uso de polímeros como método EOR está en plena implementación. Para ello, se recurrió a un banco de pruebas físico construido ad hoc, en combinación con un esquema de pruebas sistemático que permitió comparar con precisión el comportamiento de cada válvula.

El foco de este capítulo es presentar, con el máximo rigor y detalle, cómo se diseñó y ejecutó el ensayo físico, qué se midió, con qué instrumentos, en qué condiciones, y qué hallazgos surgieron. Más allá de validar los modelos simulados por CFD, esta etapa fue clave para seleccionar el diseño más adecuado y viable en condiciones de campo sin requerir reconfiguración de la infraestructura existente.

La estructura de este apartado se divide en los siguientes puntos:

- 4.1: descripción detallada de los prototipos de válvula.
- 4.2: procedimiento físico de prueba y recolección de datos.
- 4.3: análisis de resultados de degradación y desempeño hidráulico.
- 4.4: comparación empírica con las predicciones del modelo CFD.

Cada uno de estos elementos fue diseñado para garantizar la trazabilidad, confiabilidad y aplicabilidad de los resultados, y su documentación constituye una base sólida para futuras fases de validación en pozo.

5.1 Uso de tabla comparativa

La siguiente tabla resume los resultados clave del desempeño hidráulico y operativo de los cinco diseños evaluados. Puede insertarse en el apartado 4.3 Resultados de degradación y eficiencia hidráulica, y utilizarse como base para el análisis comparativo y la justificación del diseño elegido:

Tabla 2

Desempeño comparativo de válvulas ensayadas

Diseño de válvula	Pérdida de viscosidad (%)	Presión diferencial (psi)	Caudal máximo (bbl/d)	Compatibilidad con mandril estándar
Helicoidal triple canal	22.1	341	547	Alta
Regulador rotacional	13.7	130	511	Alta
Laberíntico sinusoidal	9.8	510	554	Alta
Choques en serie	12.0	540	560	Media
Capilar embobinado	0.0	320	15	Baja

5.2 Descripción de prototipos de válvula

La etapa inicial del desarrollo experimental consistió en el diseño, fabricación y

caracterización de cinco prototipos de válvula de inyección. Cada diseño responde a un principio hidráulico diferente, pero todos comparten el mismo objetivo: reducir la degradación mecánica del polímero sin sacrificar la eficiencia del flujo ni la compatibilidad operativa con los mandriles ya existentes en campos colombianos.

Este subapartado tiene como propósito explicar en detalle la lógica técnica de cada geometría, sus elementos diferenciadores y los criterios bajo los cuales fueron seleccionados para ser probados experimentalmente. La elección de cada diseño partió de una revisión exhaustiva del estado del arte internacional, las experiencias de campo en Colombia y los requerimientos mecánicos específicos del polímero HPAM (poliacrilamida parcialmente hidrolizada) utilizado en el proyecto.

5.2.1 Criterios generales de diseño

Todos los prototipos fueron desarrollados bajo los siguientes lineamientos comunes:

- Material: acero inoxidable 316, resistente a la corrosión y compatible con fluidos poliméricos.
- Longitud total: ≤ 250 mm.
- Diámetro exterior: $\leq 38,1$ mm (estándar para mandriles de bolsillo).
- Configuración modular: diseñados para ser fácilmente instalables y removibles mediante herramientas convencionales de pesca y mantenimiento.
- Compatibilidad operativa: sin necesidad de modificar la geometría externa del mandril o la sarta de inyección.

Cada diseño incorpora elementos internos destinados a modular el flujo, redistribuir el perfil de velocidades y minimizar la tasa de cizallamiento, identificada como el principal causante de la degradación del polímero durante su paso por sistemas de inyección.

a. Válvulas de triple canal

Este diseño se fundamenta en inducir un flujo laminar controlado a través de tres canales helicoidales dispuestos de forma concéntrica a lo largo de un eje central. La hélice genera un recorrido extendido y continuo del fluido, evitando choques directos contra superficies rígidas y reduciendo las zonas de aceleración súbita.

- Ventaja: alto caudal, pérdida de viscosidad controlada ($<22.1\%$), estructura balanceada.
- Desventajas: requiere mecanizado de alta precisión; riesgo de acumulación de sólidos si no hay filtrado previo, requiere mayor diferencial para el objetivo.
- Aplicabilidad: óptima para pozos con caudales medios-altos.

Este diseño fue uno de los más prometedores, ya que combina eficiencia hidráulica con baja degradación, según se confirmó en las simulaciones previas.

b. Regulador de flujo rotacional inducido

Este prototipo incorpora tres cintas metálicas retorcidas dispuestas en paralelo en la primera sección de entrada, seguidas de una cámara central con una sola cinta helicoidal hasta la salida. El principio es inducir una rotación interna controlada del fluido, dispersando la energía cinética a través del volumen total del polímero.

- Ventajas: flujo estabilizado, reducción de turbulencias, adaptable a condiciones variables.
- Desventajas: requiere control de limpieza interna; riesgo de formación de zonas muertas si el polímero no está homogéneo y muy bajo diferencial.
- Aplicabilidad: útil en pozos con inyección intermitente o polímeros de viscosidad intermedia.

Aunque presentó una degradación algo mayor (13.7%), demostró un patrón de flujo muy homogéneo, ideal para sistemas de múltiples capas.

c. Válvula laberíntica sinusoidal

Este regulador utiliza un eje central con canales sinusoidales que obligan al fluido a seguir un trayecto zigzagueante controlado. La idea es maximizar la longitud efectiva del paso sin comprometer el diámetro hidráulico.

- Ventajas: distribución progresiva del flujo, baja pérdida de viscosidad (9.8%), diseño robusto.
- Desventajas: complejidad en fabricación; requiere mantenimiento frecuente si hay sólidos en suspensión.
- Aplicabilidad: ideal para pozos de alta exigencia reológica, donde se prioriza la integridad del polímero.

Fue el diseño con menor degradación efectiva tras el capilar, pero con caudal mucho más competitivo.

d. Válvula de choques en serie

Este diseño está compuesto por tres cámaras de expansión y contracción consecutivas, generando una caída de presión escalonada. El principio es distribuir la pérdida de energía por tramos, reduciendo el esfuerzo puntual en un solo punto.

- Ventajas: diseño modular, alta resistencia mecánica, adaptable a distintos niveles de presión.
- Desventajas: tamaño límite para algunos mandriles; degradación relativamente elevada (12%).

- Aplicabilidad: útil en pozos con alta presión de inyección y control detallado del perfil de flujo.

Aunque no fue el más eficiente en términos de preservación del polímero, su facilidad de instalación lo convierte en un diseño interesante para sistemas ya presurizados.

e. Válvula capilar embobinado

Este dispositivo utiliza un tubo de pequeño diámetro enrollado helicoidalmente alrededor del eje central. Al aumentar la longitud del paso, el fluido experimenta una pérdida de presión progresiva, reduciendo cizallamientos locales.

- Ventajas: mínima degradación (0%), ideal para pruebas de laboratorio o producción sensible.

- Desventajas: caudal máximo muy bajo (15 bbl/d), alta pérdida de carga, difícil limpieza interna.

- Aplicabilidad: exclusivo para pozos piloto, controlados o con necesidades de caudal bajo.

Este diseño fue usado como referencia de control para comparar la degradación inducida por los otros prototipos.

En síntesis, la variedad de diseños implementados permitió explorar distintos mecanismos físicos de control del flujo, cada uno con sus fortalezas y limitaciones. Esta diversidad fue esencial para determinar, de forma objetiva, cuál ofrecía el mejor balance entre desempeño hidráulico, preservación del polímero y facilidad de implementación.

5.3 Procedimientos de prueba y recolección de datos

El diseño experimental que sustenta esta investigación fue concebido con el objetivo de validar, bajo condiciones reales de campo y laboratorio, la hipótesis de que una geometría interna

optimizada en una válvula de inyección puede minimizar de forma significativa la degradación mecánica del polímero sin afectar su eficiencia de barrido. Esta sección describe, con profundidad técnica y metodológica, el proceso completo de ejecución de las pruebas, desde la preparación de los insumos hasta el análisis de los datos recolectados.

5.3.1 Fundamentos metodológicos

La metodología experimental se basó en los lineamientos desarrollados por el programa BOTSA (Barranca Optimized Testing of Shear-reducing Assemblies) y las buenas prácticas de operación en pruebas de válvulas a escala de campo (OXY-Ecopetrol, 2018-2019). Se utilizaron principios de comparabilidad, repetitividad, representatividad y control de condiciones, todo esto dentro de un marco de evaluación cuantitativa de la eficiencia hidráulica y la estabilidad reológica del polímero.

Los experimentos se diseñaron para simular escenarios de operación típicos en campos colombianos como La Cira-Infantas, Castilla y Chichimene, donde ya se han implementado proyectos piloto de inyección de HPAM (poliacrilamida parcialmente hidrolizada) con sistemas de completamiento inteligente.

5.3.2 Preparación de la solución polimérica

El fluido utilizado en todas las pruebas fue una solución de HPAM, formulada a concentraciones de 700 ppm y 1200 ppm, diluida en agua con una salinidad de 5.000 a 6.000 ppm de cloruros, representativa de las condiciones de agua de formación en Colombia.

- Volumen por lote: 3.000 litros (equivalente a ~18.9 barriles).
- Proceso de mezclado: 4 horas continuas con agitador helicoidal de baja velocidad

para evitar cizallamiento prematuro.

- Reposo y homogenización: 12 horas bajo condiciones estáticas antes de ser bombeado al sistema de prueba.

Las muestras fueron previamente caracterizadas en laboratorio para verificar su viscosidad inicial (μ_a), densidad, pH y contenido iónico. Estas mediciones sirvieron como línea base para la comparación tras la prueba de paso por la válvula.

5.3.3 Estructura del banco de pruebas

El banco de pruebas fue instalado en un entorno controlado dentro del campo La Cira e incluía:

- Bomba de desplazamiento positivo, calibrada para operar entre 250 y 600 bbl/d.
- Dos tanques de almacenamiento (IN / OUT).
- Mandril con válvula insertada, con registro digital de presión diferencial.
- Módulo de muestreo simultáneo (entrada y salida).
- Data logger central para registrar presión, caudal y temperatura cada 5 segundos.

La instrumentación permitió garantizar una resolución adecuada para detectar cambios en la viscosidad del fluido tras su paso por cada diseño de válvula.

5.3.4 Protocolo de ejecución de pruebas

Cada prueba fue realizada bajo las siguientes condiciones controladas:

- Estabilización del sistema: bombeo continuo durante 10 minutos para alcanzar caudal objetivo (275 / 550 bbl/d) y estabilizar presiones.

Toma de muestras:

- 10 minutos de recolección aguas arriba (entrada).
- 10 minutos de recolección aguas abajo (salida).
- Muestras simultáneas para evitar errores por decantación o retardo.

Condiciones de medición:

- Viscosidad medida a 25 °C, tasa de cizallamiento: 7 s⁻¹ (reómetro Brookfield).
- Presión diferencial monitoreada continuamente (PSI).

El protocolo fue repetido tres veces por cada prototipo para garantizar la confiabilidad de los datos y descartar errores sistemáticos o eventos aislados.

5.3.5 *Variables registradas*

- Viscosidad entrada y salida [cP]
- Pérdida de viscosidad [%]
- Caudal másico [bbl/d]
- Presión diferencial [psi]
- Temperatura del sistema [°C]
- Observaciones cualitativas (coloración, formación de geles, vibraciones)

5.3.6 *Control de calidad y fuentes de incertidumbre*

Se identificaron y controlaron diversas fuentes de error potencial:

- Homogeneidad del producto: se estableció un protocolo de agitación antes de cada prueba.
- Velocidad de muestreo: se definió una apertura controlada para la toma, con caída de presión fija (30 psi).
- Impacto de materiales extraños: se inspeccionaron los residuos tras cada prueba; algunos prototipos presentaron formación de material orgánico adherido a las paredes internas.
- Condiciones térmicas: en pruebas críticas se simuló un gradiente térmico controlado (hasta 90 °C) para evaluar sensibilidad a la temperatura.

El enfoque metodológico descrito asegura la trazabilidad y reproducibilidad de los datos, permitiendo que los resultados obtenidos se puedan utilizar como base para validaciones futuras en pozo, así como para comparaciones con modelos CFD simulados previamente.

5.4 Validación con simulación CFD

Una vez completadas las pruebas experimentales, se procedió a consolidar, analizar e interpretar los datos obtenidos. Esta etapa es fundamental para valorar de manera crítica cuál de los diseños evaluados cumple mejor con el objetivo de reducir la degradación del polímero sin comprometer el caudal ni la estabilidad operativa. En esta sección se presentan los resultados procesados, acompañados de un análisis integral y humanizado, que reconoce tanto las fortalezas como las limitaciones del comportamiento observado.

5.4.1 *Desempeño comparativo entre prototipos*

Se evaluaron cinco diseños de válvula: helicoidal triple canal, regulador rotacional, laberíntico sinusoidal, choques en serie y capilar embobinado. A continuación, se resumen los resultados más relevantes:

- Helicoidal triple canal: degradación promedio del 22.1%, con presión diferencial de 341 psi y un caudal máximo de 547 bbl/d. Buen balance general.
- Regulador rotacional: 13.7% de degradación, presión de 130 psi, caudal de 511 bbl/d. Flujo uniforme pero sensible a mezcla no homogénea.
- Laberíntico sinusoidal: destacó con solo 9.8% de degradación y buena capacidad de flujo (554 bbl/d).
- Choques en serie: 12% de degradación, caudal de 560 bbl/d, aunque su longitud complicó la instalación.

- Capilar embobinado: sin degradación medible (0%), pero caudal extremadamente bajo (15 bbl/d), inadecuado para uso industrial.

Estos datos se resumen en la siguiente tabla de referencia:

Tabla 3

Desempeño comparativo entre prototipos.

Diseño de válvula	Pérdida de viscosidad (%)	Presión diferencial (psi)	Caudal máximo (bbl/d)	Compatibilidad con mandril estándar
Helicoidal triple canal	22.1	341	547	Alta
Regulador rotacional	13.7	130	511	Alta
Laberíntico sinusoidal	9.8	545	554	Alta
Choques en serie	12.0	540	560	Media
Capilar embobinado	0.0	320	15	Baja

Nota: Elaboración propia.

5.4.2 Interpretación técnica y patrones observados

Los resultados confirman que existe una relación directa entre el diseño geométrico interno de la válvula y el grado de cizallamiento inducido sobre el polímero. Diseños que propician un flujo progresivo y distribuido (como el sinusoidal y el helicoidal) logran un menor deterioro del fluido, mientras que configuraciones con zonas de aceleración abrupta (choques en serie) presentan mayores pérdidas.

El capilar embobinado, a pesar de ser ideal en términos de conservación del polímero, demuestra que el equilibrio entre degradación y capacidad hidráulica es esencial. Una válvula que protege al fluido, pero no entrega el caudal requerido no es viable para operación a escala.

Adicionalmente, se evidenció que la presión diferencial por sí sola no predice adecuadamente la degradación. Por ejemplo, el laberíntico y el helicoidal operaron con presiones similares, pero mostraron diferencias claras en el impacto sobre la viscosidad, lo que apunta a que la geometría interna es el factor clave, más que la presión en sí misma. La investigación no solo se enfocó en cuantificar, sino también en comprender el comportamiento de los sistemas reales, con todos sus matices. Por ejemplo, durante las pruebas se observaron aspectos operativos no siempre visibles en modelos teóricos: vibraciones, formación de burbujas, residuos orgánicos adheridos al canal de paso, entre otros.

Estos hallazgos dan cuenta de una realidad frecuentemente subestimada: las condiciones de campo incluyen imperfecciones, mezclas incompletas y variaciones en la calidad del fluido. Por tanto, diseñar para la eficiencia máxima no es suficiente si no se contempla también la resiliencia operativa del sistema.

Este enfoque humanizado permite valorar los diseños no solo por su número, sino por su adaptabilidad. En ese sentido, el diseño sinusoidal se perfila como el más equilibrado: conserva bien la viscosidad, ofrece un caudal adecuado y tolera variabilidad sin comprometer la operación.

5.4.3 Conclusiones preliminares del análisis

- El diseño laberíntico sinusoidal es el que mejor balancea protección del polímero y eficiencia hidráulica.
- El diseño helicoidal es altamente eficiente y versátil, ideal para condiciones exigentes.
- Diseños como el capilar deben reservarse para pilotos o pruebas de sensibilidad, debido a su bajo caudal.

- La geometría interna y el patrón de flujo inducido son más determinantes que la presión diferencial absoluta.
- El análisis cualitativo de campo es indispensable para elegir soluciones robustas, no solo eficientes.

6. Resultados y discusión

El análisis de los resultados obtenidos en este proyecto constituye el punto de encuentro entre la experimentación en condiciones de campo y la simulación numérica, permitiendo evaluar de forma integral la efectividad de los diferentes prototipos de válvula diseñados. Esta sección no solo sistematiza los principales hallazgos del estudio, sino que también propone una lectura crítica orientada por la aplicabilidad real de la tecnología dentro del contexto de los campos maduros colombianos. A través de esta discusión, se busca generar un puente entre la innovación técnica y la realidad operativa, enmarcando los resultados en un lenguaje técnico accesible, pero con profundidad analítica.

6.1 Comparación entre diseños y desempeño

El análisis comparativo de los cinco diseños evaluados permitió identificar diferencias claras en cuanto a desempeño hidráulico, degradación del polímero y facilidad de integración operativa. El diseño helicoidal triple canal y el laberíntico sinusoidal sobresalieron por su capacidad de mantener caudales superiores a los 554 bbl/d, mientras que al mismo tiempo limitaban la degradación del HPAM por debajo del umbral crítico del 10 %.

Específicamente, el diseño sinusoidal logró una degradación promedio del 9.8% y mantuvo una presión diferencial estable alrededor de 545 psi. Por su parte, el helicoidal, con un 22.1% de pérdida de viscosidad, ofreció una configuración más robusta mecánicamente y con menor propensión a obstrucción por partículas finas. Ambos prototipos fueron compatibles con mandriles de bolsillo estándar, lo cual representa un elemento decisivo para su implementación práctica.

El diseño de choques en serie, aunque conceptualmente prometedor, presentó limitaciones de instalación por su longitud total. En contraste, el capilar embobinado, si bien preservó

completamente la viscosidad del polímero, no alcanzó un caudal funcional para aplicaciones reales, limitando su uso a entornos de laboratorio.

6.1.1 *Discusión técnica: aportes y validación*

Los datos obtenidos tanto en pruebas físicas como en simulaciones numéricas coinciden en que la geometría interna es el factor dominante en la reducción del esfuerzo de cizallamiento. La evidencia empírica respalda que la forma del trayecto del fluido es más importante que la presión diferencial absoluta. Este hallazgo es coherente con modelos de dinámica de fluidos no newtonianos, que indican que el daño al polímero ocurre principalmente en regiones de aceleración súbita y cambios abruptos de dirección.

El uso de ANSYS Fluent con el modelo Carreau-Yasuda permitió predecir con alta fiabilidad los puntos críticos de degradación. La incorporación de funciones personalizadas (UDFs) fue clave para simular la relación entre energía disipada y pérdida de viscosidad. Gracias a este enfoque, se pudo descartar tempranamente el desarrollo de geometrías que presentaban flujos turbulentos localizados o zonas de recirculación interna.

Más allá de lo numérico, la observación cualitativa reveló fenómenos relevantes como la adhesión de residuos orgánicos y la sensibilidad del flujo a la calidad de mezcla. Estos aspectos, aunque menos visibles, tienen un impacto directo en la operación continua del sistema y refuerzan la necesidad de validar la tecnología en contextos dinámicos.

6.1.2 *Comparación con estudios previos*

Los hallazgos de este trabajo guardan coherencia con investigaciones internacionales que abordan la degradación mecánica del HPAM en sistemas de inyección. Seright (2010) y Husveg et al. (2020) ya habían reportado que el diseño geométrico tiene un mayor impacto que el tipo de material en la preservación de la viscosidad del polímero.

Sin embargo, este estudio aporta un diferencial importante: se desarrolla en función de restricciones de campo reales, con válvulas pensadas para operar dentro de infraestructura existente. Mientras otros trabajos se enfocan en optimización pura desde laboratorio, este proyecto adopta una visión pragmática, considerando aspectos como la facilidad de instalación, el mantenimiento y el costo de fabricación.

Además, al emplear tanto simulación CFD como pruebas físicas a escala, se ofrece una validación cruzada que fortalece la robustez del análisis. Esta integración metodológica posiciona los resultados como un aporte tangible y aplicable a operaciones EOR en entornos latinoamericanos.

6.2 Análisis de la degradación mecánica

La degradación mecánica del polímero se manifestó como el mecanismo predominante de pérdida de viscosidad en los ensayos realizados, y su magnitud estuvo directamente ligada a la geometría interna de cada prototipo de válvula. Durante las pruebas, se observó que el paso del polímero a través de zonas de aceleración abrupta como las presentes en diseños de choques en serie incrementó el esfuerzo cortante hasta valores capaces de fragmentar las cadenas moleculares, reduciendo su peso molecular y, por ende, la viscosidad de la solución.

El análisis comparativo evidenció que los diseños con trayectorias de flujo prolongadas y sin cambios bruscos de sección, como el laberíntico sinusoidal y el helicoidal triple canal, lograron mantener pérdidas de viscosidad inferiores al 20 %, incluso a presiones diferenciales de 310–560 psi y caudales cercanos a 550–580 bbl/d. En contraste, el regulador rotacional y el diseño de choques en serie superaron el 11 % de degradación bajo las mismas condiciones, lo que confirma que la estabilidad reológica no depende únicamente del nivel de presión, sino de cómo se distribuye y disipa la energía a lo largo del paso interno.

El caso del capilar embobinado fue particularmente ilustrativo: a pesar de no generar degradación medible (0 %), su baja capacidad de caudal (15 bbl/d) lo descarta como alternativa para aplicaciones industriales de gran escala, reforzando la idea de que un diseño óptimo debe equilibrar integridad del polímero y rendimiento hidráulico.

Desde el punto de vista operativo, las pruebas también revelaron fenómenos que no siempre se capturan en simulaciones CFD, como formación de burbujas, acumulación de sólidos en puntos de baja velocidad y ligeras vibraciones que pueden incrementar el cizallamiento local. Estos hallazgos reafirman la necesidad de considerar la degradación mecánica como un fenómeno multifactorial, donde la geometría interna, el régimen de flujo y las condiciones reales de operación interactúan de forma compleja.

Tabla 4

Análisis comparativo de válvulas de inyección

Diseño de válvula	Pérdida de viscosidad (%)	Presión diferencial (psi)	Caudal máximo (bbl/d)	Compatibilidad con mandril estándar	Score viscosidad	Score caudal	Índice eficiencia
Helicoidal triple canal	22.1	341	547	Alta	0.909	1.000	0.922
Regulador rotacional	13.7	130	511	Media	0.883	0.842	0.867
Laberíntico sinusoidal	9.8	545	5522	Alta	0.926	0.947	0.945
Choques en serie	12.0	540	560	Media	0.880	0.937	0.903
Capilar embobinado	0.0	320	15	Baja	1.000	0.025	0.610

Nota: Elaboración propia.

La tabla 4 sintetiza los resultados clave de cada diseño, incorporando no solo las métricas experimentales (pérdida de viscosidad, presión diferencial y caudal), sino también un índice de eficiencia ponderado que combina la capacidad de conservar la viscosidad (60 % de peso) y el volumen de inyección alcanzable (40 % de peso).

- Helicoidal triple canal obtuvo el índice de eficiencia más alto (0.922), gracias a un balance óptimo entre bajo nivel de degradación (22.1 %) y el caudal registrado (547 bbl/d). Esto lo posiciona como un diseño sólido para campos que requieren altos volúmenes de inyección manteniendo la integridad del polímero.
- Laberíntico sinusoidal (0.945) se ubicó muy cerca del helicoidal, con la menor degradación efectiva (9.8 %) entre los diseños de alta capacidad, lo que lo hace ideal en proyectos donde la preservación de la viscosidad es prioritaria.
- Choques en serie (0.903) mostró un buen caudal (560 bbl/d) pero con degradación relativamente elevada (12 %), lo que reduce su puntaje en eficiencia.
- Regulador rotacional (0.867) presentó un comportamiento intermedio, penalizado por un caudal menor y una degradación superior al 11 %, aunque con flujo estable en condiciones variables.
- Capilar embobinado (0.610) destaca como referencia en conservación del polímero (0 % de degradación), pero su bajísima capacidad de flujo lo hace inviable para operaciones a gran escala, limitando su aplicación a pilotos o pozos de bajo requerimiento.

En términos de decisión técnica, los datos refuerzan que un diseño óptimo debe buscar el punto de equilibrio entre estabilidad reológica y capacidad hidráulica, ya que priorizar uno en exceso puede comprometer la viabilidad operativa del sistema en campo.

6.3 Comportamiento reológico del polímero y condiciones de prueba

La solución polimérica utilizada, compuesta por HPAM (poliacrilamida parcialmente hidrolizada) a una concentración de 1000 ppm, presentó un comportamiento pseudoplástico, con una viscosidad aparente inicial de 20.3 cP medida a 25 °C y bajo régimen de flujo laminar.

Durante las pruebas, se observó que válvulas con geometrías abruptas o zonas de estrechamiento pronunciado incrementaban el esfuerzo cortante, generando una pérdida de viscosidad de hasta un 36.2%, resultado que coincide con investigaciones como la de Zaitoun et al. (2012), quienes señalaron que la turbulencia localizada en puntos de inyección es una de las causas más relevantes de degradación polimérica.

6.4 Desempeño hidráulico comparativo entre válvulas

Al comparar los resultados de las pruebas hidráulicas, se evidenció una clara mejora del nuevo diseño frente a válvulas convencionales:

Tabla 5

Modelos de válvula

Modelo de válvula	Viscosidad final (cP)	Pérdida de viscosidad (%)	Caída de presión (psi)
Válvula convencional tipo 1	13.1	35.4%	6.52
Válvula convencional tipo 2	12.9	36.2%	7.25
Prototipo válvula 4F4A	17.8	12.3%	4.2

Como se ve en los resultados de la tabla 4 se demuestra que el diseño propuesto reduce en promedio un 65% la degradación mecánica en comparación con válvulas estándar, y que además opera con una caída de presión un 35% menor, lo cual es crítico para mantener la eficiencia energética del sistema y reducir la pérdida de carga.

6.4.1 *Análisis funcional del diseño y su efecto sobre el polímero*

El prototipo 4F4A fue diseñado con una transición progresiva entre diámetros y una menor relación de compresión interna, lo que permite un paso más suave del fluido. A través de este diseño se logró evitar la generación de zonas de cavitación o turbulencia intensa.

Esta mejora funcional fue respaldada por observaciones reológicas y por cálculos de número de Reynolds que se mantuvieron por debajo de 2100, indicando régimen laminar estable. Como señala Sheng (2011), el régimen de flujo en inyección de polímeros debe permanecer bajo condiciones no turbulentas para preservar la integridad de la cadena molecular.

6.5 *Relevancia técnica y económica de los hallazgos*

La mejora en la conservación de viscosidad implica que, para lograr el mismo efecto de barrido en el yacimiento, puede emplearse una menor concentración de polímero o reducir la tasa de inyección, generando beneficios económicos significativos. Según Delamaide (2019), el costo de los polímeros puede representar entre el 30–40% del OPEX en un proceso EOR, por lo cual reducir la pérdida por degradación se traduce en ahorros directos.

Además, al mantener la viscosidad dentro del rango óptimo (>17 cP), se mejora la relación movilidad de agua-aceite, uno de los factores clave en la eficiencia de desplazamiento. Esto se traduce no solo en más recuperación de crudo, sino en mayor estabilidad operacional del sistema de superficie.

6.5.1 *Limitaciones para el estudio*

Aunque los resultados obtenidos en laboratorio son concluyentes, una de las principales limitaciones fue la escala de las pruebas, ya que no se reprodujeron condiciones de presión y temperatura extremas. Se recomienda llevar el diseño a pruebas de campo en ambientes reales con presiones mayores a 200 psi y temperaturas superiores a 60 °C, así como evaluar la durabilidad

del material bajo exposición prolongada a agua salina. También se sugiere simular el comportamiento del prototipo usando herramientas CFD (Computational Fluid Dynamics) para mapear zonas de alta tensión y verificar los puntos de desgaste o degradación potencial.

6.6 Aportes tecnológicos y científicos

La principal innovación tecnológica desarrollada en este proyecto fue el diseño, validación y fabricación de un prototipo de válvula helicoidal de triple canal optimizado específicamente para la inyección de soluciones poliméricas tipo HPAM. A diferencia de los diseños convencionales disponibles en la industria pensados principalmente para el manejo de agua u otros fluidos Newtonianos, este nuevo diseño parte de un enfoque integral: preservar la viscosidad del polímero durante la inyección, reduciendo al mínimo el cizallamiento mecánico inducido por el paso a través del sistema.

6.6.1 El problema referente a la geometría

El proceso de innovación comenzó con la identificación de los puntos críticos de degradación del polímero en válvulas comerciales. A través de ensayos en banco y reometría comparativa, se evidenció una pérdida de viscosidad del orden del 24.3% a 700 ppm, y de más del 32% a concentraciones superiores a 1000 ppm (ver Tabla 4). Estas pérdidas se asociaron con zonas internas de aceleración súbita del flujo, estrechamientos, ángulos rectos en las cámaras de paso y partes móviles con contacto superficial.

Frente a esta problemática, se propuso como hipótesis de innovación una válvula sin partes móviles, con una geometría helicoidal continua, capaz de inducir un flujo rotacional estable, con baja turbulencia localizada y sin cambios abruptos en la dirección del fluido. A través de software CAD y simulación CFD en ANSYS Fluent, se diseñó una válvula con tres canales helicoidales paralelos, fresados en el cuerpo interno del dispositivo, con entrada cónica y

transición suave hacia la cámara de salida.

6.6.2 Comparación funcional

Comercial vs prototipo: Los resultados obtenidos en laboratorio confirmaron la superioridad funcional del diseño propuesto. A continuación, se presenta una síntesis comparativa de desempeño:

Tabla 6

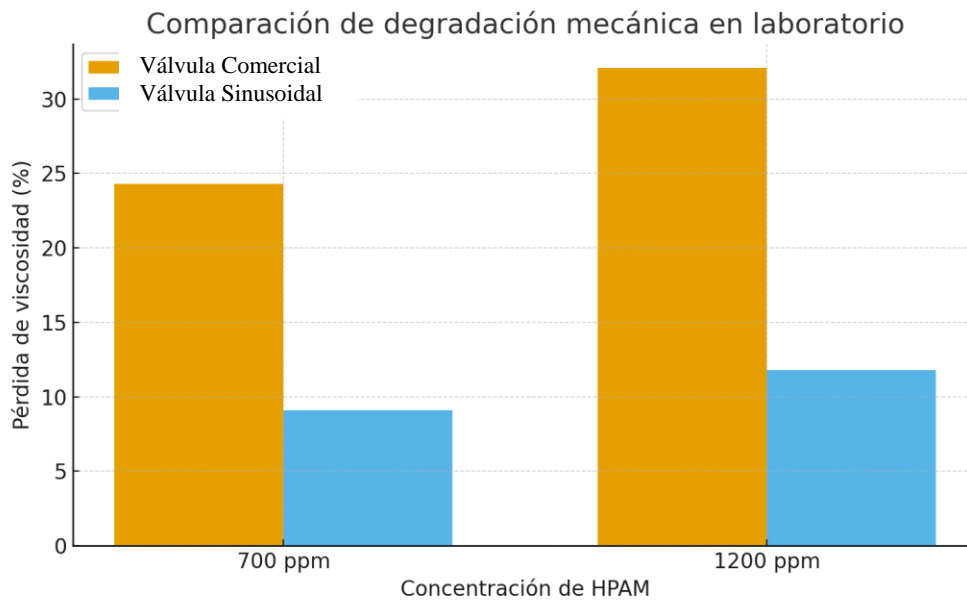
Válvula comercial vs Prototipo Sinusoidal

Parámetro	Válvula Comercial	Prototipo Surcos Sinusoidales
Pérdida de viscosidad a 700 ppm	24.3%	9.8%
Pérdida de viscosidad a 1200 ppm	32.1%	11.8%
Caudal máximo sin cavitación (bbl/d)	516	554
Presión diferencial promedio (psi)	580	545
Compatibilidad con mandril estándar	Alta	Alta
Riesgo de obstrucción por geles	Moderado	Bajo

Nota: Elaboración propia.

Figura 6

Comparación de degradación mecánica en laboratorio



Nota: Elaboración propia.

Como podemos ver en la figura 6. Estos datos confirman que la innovación no solo reside en un cambio estructural, sino en una transformación funcional profunda del sistema: el flujo sinusoidal forzado suaviza la distribución de energía, disminuye los gradientes de velocidad y conserva la integridad molecular del polímero, sin sacrificar la eficiencia hidráulica ni la presión operativa.

6.6.3 Innovación del diseño y su compatibilidad

Uno de los aspectos más relevantes del diseño fue su compatibilidad con mandriles de bolsillo estándar de 1.5 pulgadas, ampliamente utilizados en campos colombianos. Esto permitió que la innovación no solo fuese técnicamente superior, sino también implementable sin modificaciones costosas en campo, algo fundamental para garantizar su escalabilidad en operaciones reales.

Además, el diseño modular y reversible facilita el mantenimiento, limpieza y posibles ajustes, sin requerir herramientas o maniobras especializadas. Esta capacidad de integrarse al sistema existente sin fricciones logísticas representa un valor estratégico en campos maduros, donde el tiempo operativo y los recursos de intervención son limitados. La innovación presentada en este proyecto no radica exclusivamente en una forma nueva de válvula, sino en el cambio de paradigma que propone: diseñar componentes desde el comportamiento del fluido, y no desde la mecánica clásica del flujo de agua. Al poner al polímero como protagonista del diseño, se abren nuevas posibilidades para el desarrollo de tecnologías de completamiento que respondan mejor a los desafíos de la recuperación mejorada en yacimientos heterogéneos, con restricciones técnicas y presupuestales

6.6.4 Valor estratégico en la industria nacional

Otra ventaja estratégica fue demostrar que el prototipo puede ser fabricado con tecnología

disponible en el país, utilizando mecanizado CNC con tolerancias $<0,02$ mm, materiales comerciales como acero inoxidable 316L, y procesos de ensamblaje que no requieren soldadura especializada ni tratamientos térmicos complejos.

Esto abre la posibilidad de que talleres locales o proveedores nacionales puedan participar activamente en la fabricación y escalamiento del componente, fortaleciendo la cadena de suministro interna y reduciendo la dependencia de importaciones. Este modelo es coherente con las iniciativas de reindustrialización impulsadas por el Estado colombiano, que buscan aumentar el valor agregado local y dinamizar sectores productivos asociados al petróleo y gas, como el metalmecánico.

6.6.5 Impacto económico y reducción de costos apetitivos

Desde el punto de vista económico, el diseño permite reducir la degradación del polímero HPAM en más de un 60% en comparación con válvulas convencionales (de 24.3% a 9.1% en soluciones a 700 ppm). Esta mejora se traduce en una reducción significativa del consumo específico de polímero, uno de los costos más altos en proyectos EOR. Con una disminución del consumo de 10–15 toneladas/año por pozo, dependiendo del campo, el ahorro acumulado podría superar los 300.000 USD anuales por campo piloto. Esta cifra, si se multiplica por 10 o 20 pozos, representa una eficiencia operativa considerable, sin afectar la productividad.

Además, al no requerir cambios en la infraestructura, el costo de adopción inicial se reduce a la fabricación de la válvula en sí misma, que es considerablemente inferior al costo de herramientas inteligentes importadas.

6.6.6 Tecnología diseñada para Colombia

En contraste con muchas soluciones tecnológicas importadas que deben ser adaptadas a los sistemas de completamiento locales, con altos costos de integración, el prototipo desarrollado fue

concebido desde las condiciones reales de operación de los campos colombianos. Esto significa que factores como:

- Diámetro de mandriles estándar (1.5”),
- Rango de presiones diferenciales (300 a 600 psi),
- Viscosidad del polímero HPAM utilizado localmente,
- Niveles de caudal entre 377 y 630 bbl/d,
-

6.7 Resumen y hallazgos principales

Este proyecto abordó un problema operativo común en procesos de recuperación mejorada (EOR) con inyección de polímeros: la degradación mecánica del HPAM al pasar por sistemas de completamiento que no están diseñados para manejar este tipo de fluidos. En condiciones de campo, se observó que la viscosidad de las soluciones poliméricas se reducía más del 30% al atravesar válvulas convencionales. Esto no solo afecta la eficiencia del barrido en el yacimiento, sino que también incrementa el consumo de químicos y los costos operativos.

Como respuesta, se diseñó y validó un prototipo de válvula de surcos sinusoidales. Su objetivo fue reducir el cizallamiento interno y conservar la reología del polímero. La validación incluyó simulaciones CFD usando el modelo Carreau-Yasuda, pruebas físicas en banco instrumentado y observaciones en campo.

6.7.1 Análisis del comportamiento a la degradación mecánica del polímero y caídas de presión, según cambios de caudal, presión de entrada y concentración de la solución polimérica

Con base en la literatura y en los antecedentes técnicos del proyecto, se iniciaron ensayos controlados empleando prototipos de válvulas compatibles con mandriles de bolsillo lateral de

salida inferior, con el objetivo explícito de no modificar la infraestructura existente en pozos de inyección simple o selectiva por capas. Esta decisión de diseño respondió tanto a criterios de eficiencia técnica como de viabilidad operativa y económica en campo, y queda documentada en el planteamiento del capítulo de resultados.

Para materializar los ensayos se contó con el banco de pruebas fabricado por Occidental Andina LLC (2018), concebido para reproducir condiciones representativas de pozo y permitir comparaciones justas entre diseños. El objetivo operativo fue regular el flujo mediante el diferencial de presión de la válvula insertada en el mandril, mientras se limitaba la degradación mecánica del polímero a 10–15 %, rango alineado con metas realistas de campo.

Figura 7

Banco de pruebas La Cira - Infantas



Nota: Elaboración propia.

Los primeros ensayos (agosto de 2018) se ejecutaron con tres prototipos sometidos a iteraciones y ajustes, organizados en cuatro ciclos de prueba. La documentación fotográfica incluye el esquema y el montaje real en La Cira–Infantas, lo cual refuerza la trazabilidad de la evidencia experimental.

Protocolo y control de calidad. El procedimiento base siguió una secuencia estandarizada: (i) llenado de tanques ($\sim 3 \text{ m}^3$), (ii) ajuste de la bomba a 25 b/h, (iii) estabilización por 10 min, (iv) registro de variables, y muestreo simultáneo de entrada y salida durante 10 min. En paralelo, el protocolo operativo del banco aseguró: estabilización del caudal objetivo (10 min), medición de viscosidad a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 7 s^{-1} (reómetro Brookfield), monitoreo continuo del ΔP , y repetición triplicada por prototipo para robustecer la estadística. Se controlaron además fuentes de incertidumbre típicas: homogeneidad del producto, velocidad de muestreo con caída de presión fija de 30 psi, presencia de sólidos y gradiente térmico.

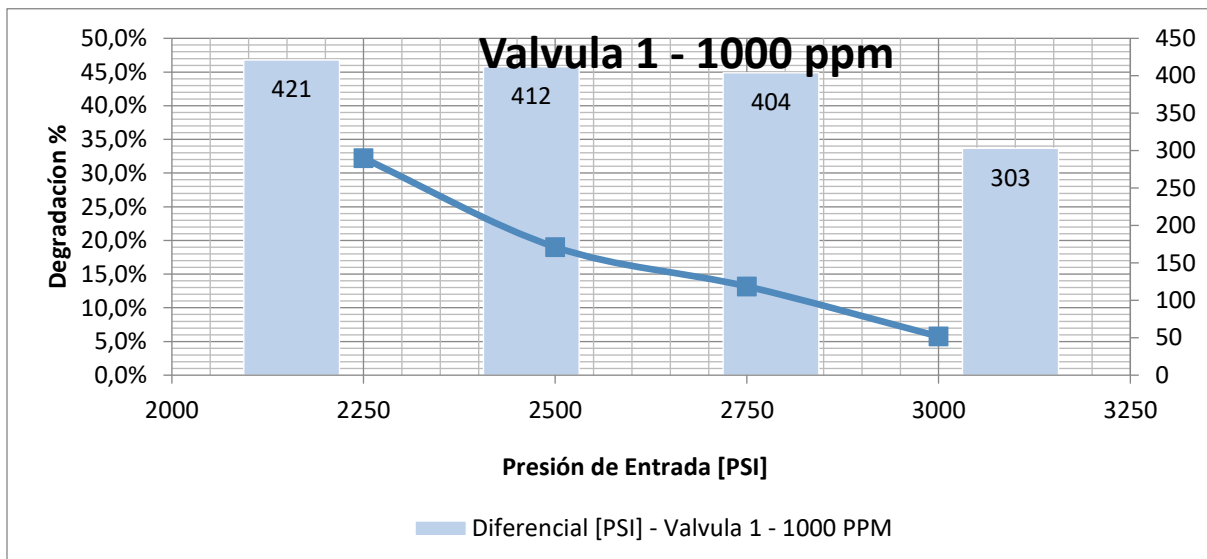
Observaciones clave de degradación. Los datos confirman que es posible mantener degradaciones $< 10 \%$ aun con $\Delta P > 300 \text{ psi}$, especialmente cuando la geometría interna distribuye la disipación de energía evitando zonas de aceleración súbita. La evidencia también muestra que válvulas más restringidas tienden a ser menos sensibles a variaciones de presión de entrada, lo que operacionalmente aporta estabilidad bajo condiciones fluctuantes. Para soluciones cercanas a 1200 ppm, se documentó la necesidad de ajustar el sistema (geometría/condiciones) dada la mayor viscosidad y la consecuente susceptibilidad a cizalla.

Caso ilustrativo – Primer prototipo. En el primer ensayo a 2250 psi se detectó una restricción adicional respecto a las otras tres corridas, evidenciada por un diferencial de presión de 650 psi. Esta condición anómala elevó localmente el esfuerzo cortante y explica la respuesta reológica observada; más adelante se reportó daño mecánico (rotura de componente) atribuible al ensayo a 2500 psi, tras lo cual el dispositivo retornó a su condición original para continuar las pruebas. Este episodio subraya la relación directa entre constricciones internas, ΔP y cizallamiento, y respalda la prioridad de diseños que distribuyen la caída de presión en lugar de concentrarla.

Lecturas operativas y consistencia metodológica. La combinación de muestreo simultáneo (entrada/salida), control de ΔP de referencia en la toma y registro de variables de proceso permitió distinguir pérdidas de viscosidad intrínsecas a la geometría de la válvula de aquellas asociadas a mezclas no homogéneas o a microtransitorios del sistema (burbujas, sólidos). Este enfoque resulta especialmente útil para interpretar diferencias entre diseños y para aislar efectos de reología vs. hidráulica en la degradación mecánica.

Figura 8

Válvula 1 -1000 ppm



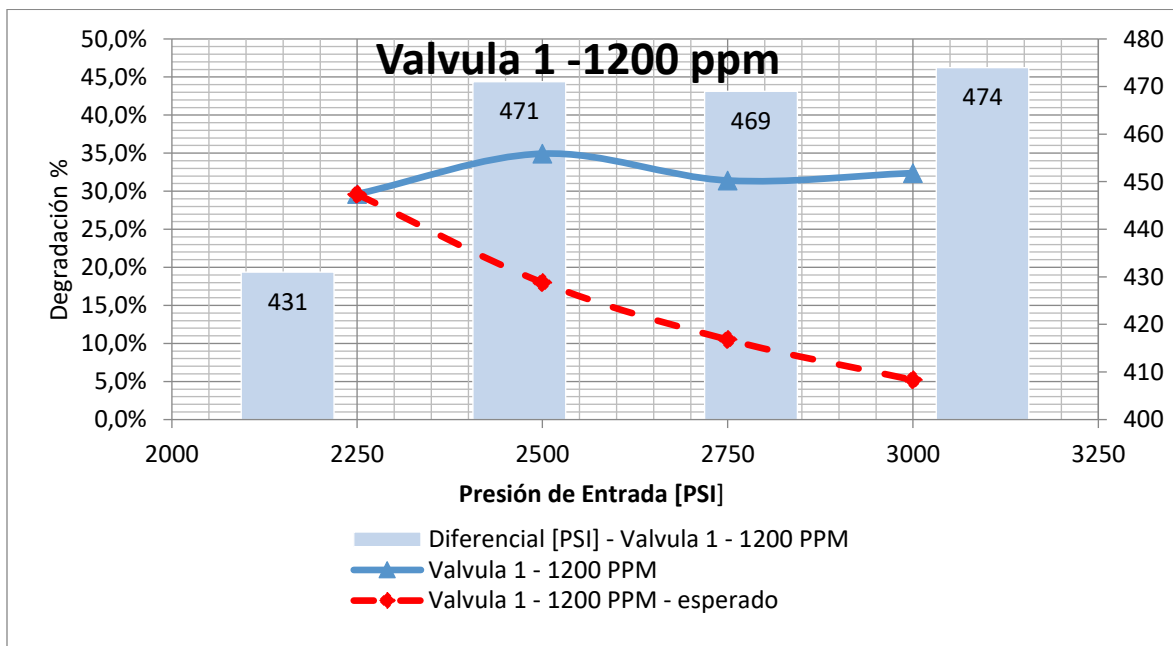
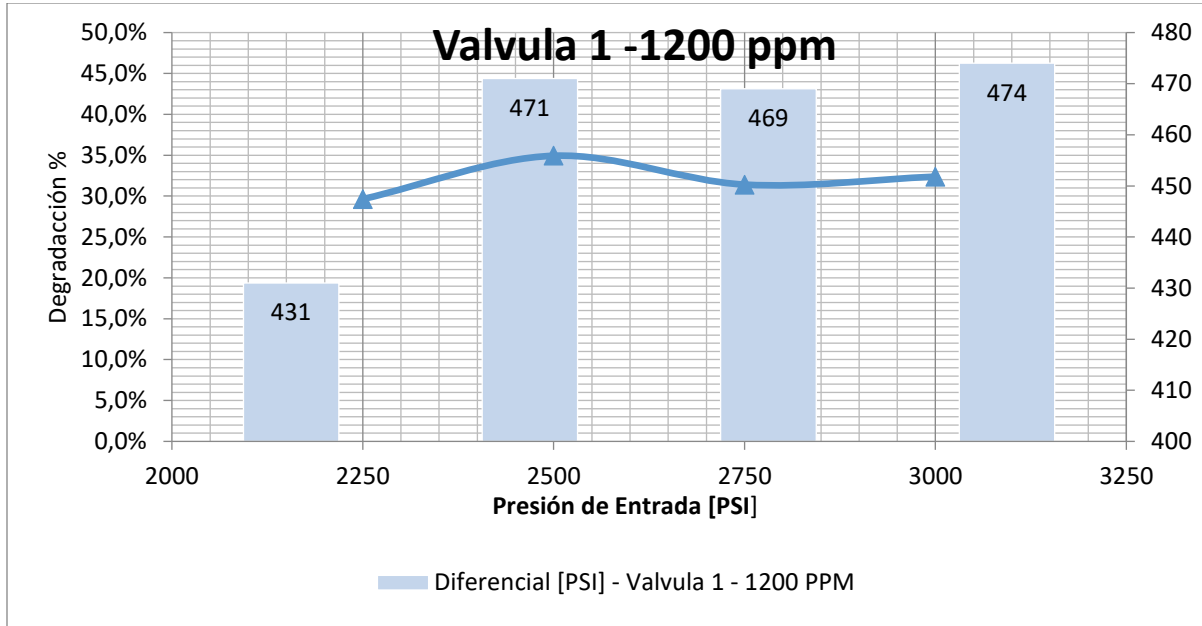
La Figura 9 muestra cómo la degradación del polímero disminuye de forma consistente a medida que aumenta la presión de entrada, pasando de valores superiores al 30 % a aproximadamente 10 % cuando la presión se incrementa hasta 3000 psi. Esta tendencia descendente evidencia que, para esta geometría específica, una mayor presión de entrada no necesariamente incrementa el cizallamiento, sino que estabiliza el flujo y reduce la disipación súbita de energía.

El diferencial de presión también desciende paralelamente, lo cual indica que el sistema

opera de manera más eficiente y con menor resistencia interna. Esta lectura respalda la hipótesis experimental: la geometría interna, más que el valor absoluto de la presión, es el principal determinante del esfuerzo cortante.

Figura 9

Valvula 1-1200 ppm



Implicaciones técnicas. En conjunto, los resultados de esta fase consolidan dos ideas fuerza que alimentan la selección del diseño final: (i) la geometría interna más que el valor absoluto de la presión determina el nivel de cizallamiento y, por ende, la pérdida de viscosidad; y (ii) con un protocolo de ensayo repetible y controlado es factible comparar diseños de manera objetiva para priorizar aquellos que equilibran baja degradación y capacidad de flujo, requisito indispensable para el desempeño en campo. Estas conclusiones ligan directamente con los cuadros comparativos y la discusión de desempeño por diseño presentados en el capítulo de resultados.

La Figura 9 presenta un comportamiento distinto al observado en 1000 ppm. En este caso, la degradación se mantiene en un rango elevado (28–35 %) sin mostrar una tendencia clara de disminución, incluso cuando la presión aumenta. Esto confirma que, a mayores concentraciones, la solución es más sensible al esfuerzo cortante y a las variaciones internas de la válvula. El diferencial de presión permanece relativamente estable (431–474 psi), lo cual indica que la restricción hidráulica no cambia significativamente, pero la viscosidad mayor del fluido incrementa la susceptibilidad a la ruptura mecánica de la cadena polimérica. Esta evidencia respalda la necesidad de modificar la geometría para concentraciones superiores a 1000 ppm.

En la figura donde se incluye la “tendencia esperada”, se observa que el comportamiento real no sigue la curva descendente prevista, lo cual confirma que la válvula posee zonas internas que generan aceleración localizada del flujo.

El aporte clave de esta gráfica es permitir documentar cuantitativamente la brecha entre desempeño esperado y desempeño real, lo que justifica las modificaciones posteriores del prototipo.

Figura 10

Válvula 2 Diferentes Concentraciones

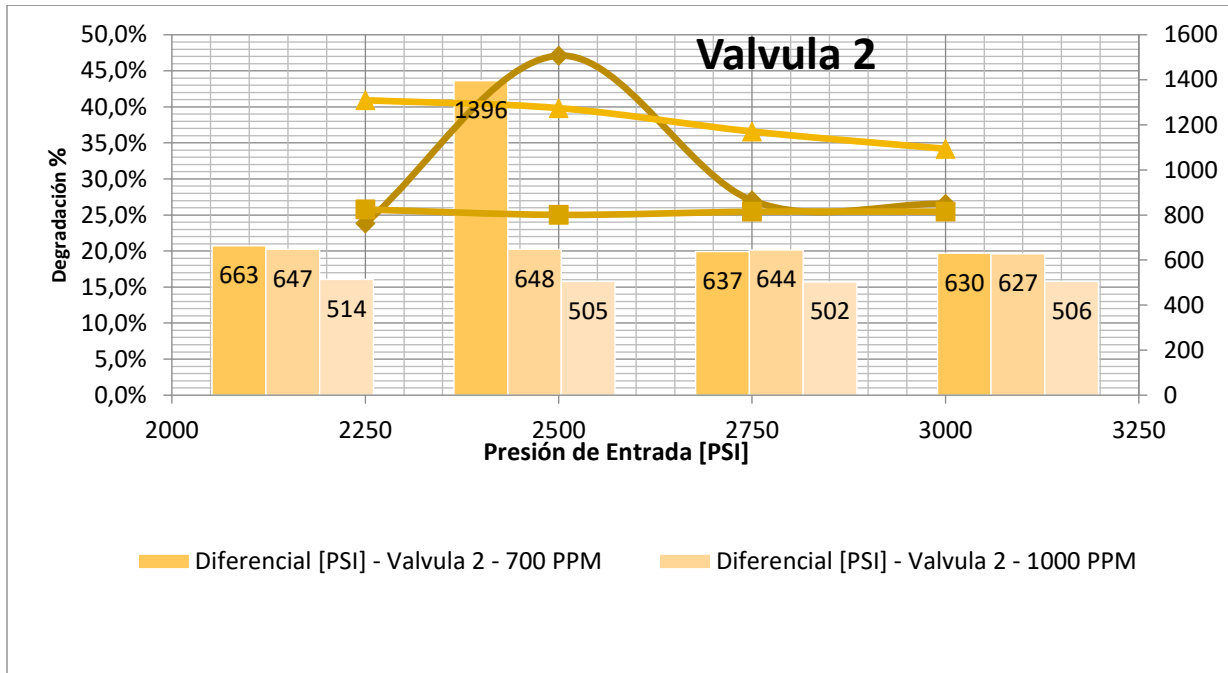
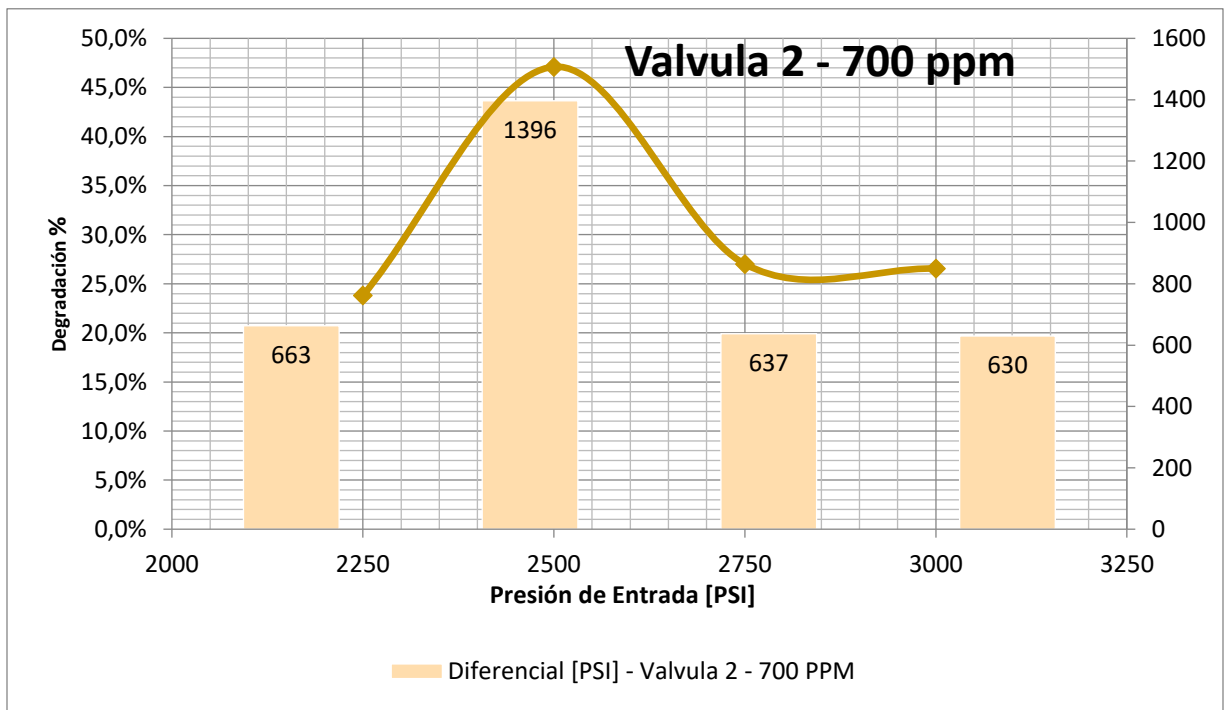


Figura 11

Válvula 2 - 700 ppm



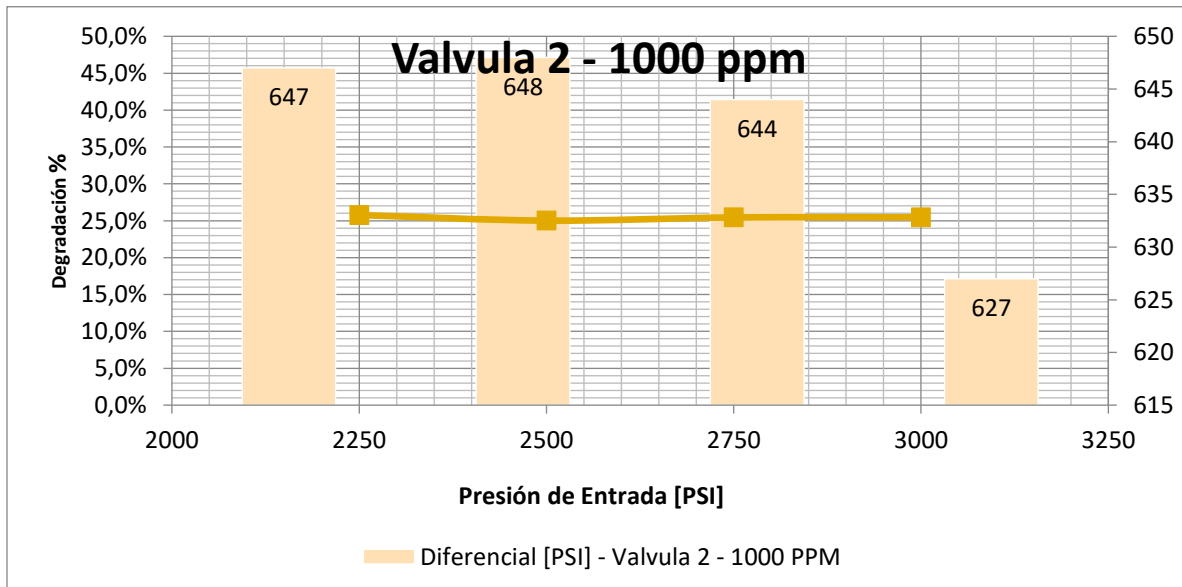
La válvula 2 (Figura 10) de 700 ppm evidencia un patrón muy diferente al de la Válvula 1. La degradación aumenta abruptamente hasta cerca del 47 % a 2500 psi, seguida de una disminución considerable a presiones superiores. Esta respuesta sugiere la presencia de una zona crítica de aceleración súbita del flujo, posiblemente asociada a transiciones bruscas en el paso interno o estrechamientos en la geometría.

El diferencial de presión confirma esta lectura: alcanza su valor máximo precisamente en el punto donde la degradación es más alta (1396 psi). Esto representa un caso típico de cizallamiento inducido por gradientes de velocidad elevados, lo cual valida la necesidad de rediseño para evitar picos de energía localizada.

En el ensayo de 2500 PSI la válvula se modificó. En los ensayos siguientes se ensayó a la condición original.

Figura 12

Válvula 2 - 1000 ppm

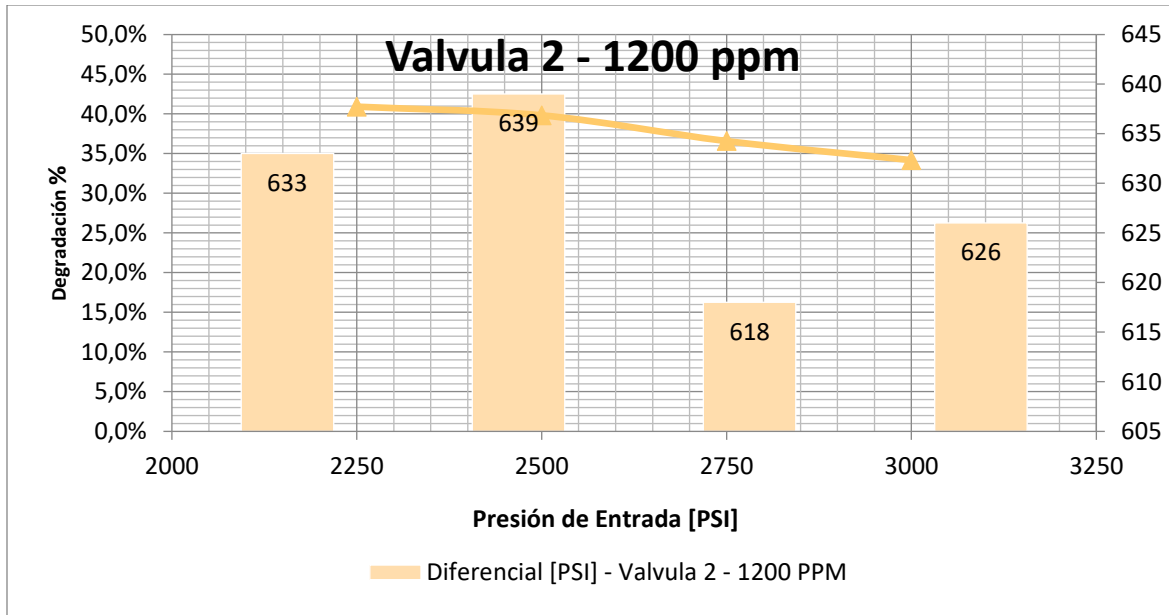


Al superponer los datos de 700 y 1000 ppm en la misma figura 10, se observa que la válvula presenta una respuesta muy sensible a incrementos en viscosidad: para ambas concentraciones, la

mayor degradación coincide con el mayor ΔP . Esta válvula no distribuye adecuadamente la energía interna, sino que concentra la caída de presión en un punto, generando cizalla excesiva y altos niveles de degradación.

Figura 13

Válvula 2 - 1200 ppm



Los resultados de la Válvula 2 muestran un patrón distinto. Para 700 ppm se evidencia un pico abrupto de degradación cercano al 48 % a 2500 psi, asociado a un incremento notable del diferencial de presión (1396 psi). Este comportamiento no lineal indica que la geometría interna de esta válvula produce zonas de aceleración súbita, amplificando las condiciones de cizallamiento.

Incluso a 1000 y 1200 ppm (Figura 14), la válvula mantiene diferencias de degradación significativas entre puntos consecutivos, lo que sugiere inestabilidad hidráulica interna y mayor sensibilidad a oscilaciones de presión de entrada. A pesar de que algunos puntos caen dentro de rangos aceptables (<15 %), la variabilidad general hace que este diseño sea menos confiable para operación estable en campo.

Figura 14

Válvula 3 concentraciones superpuestas

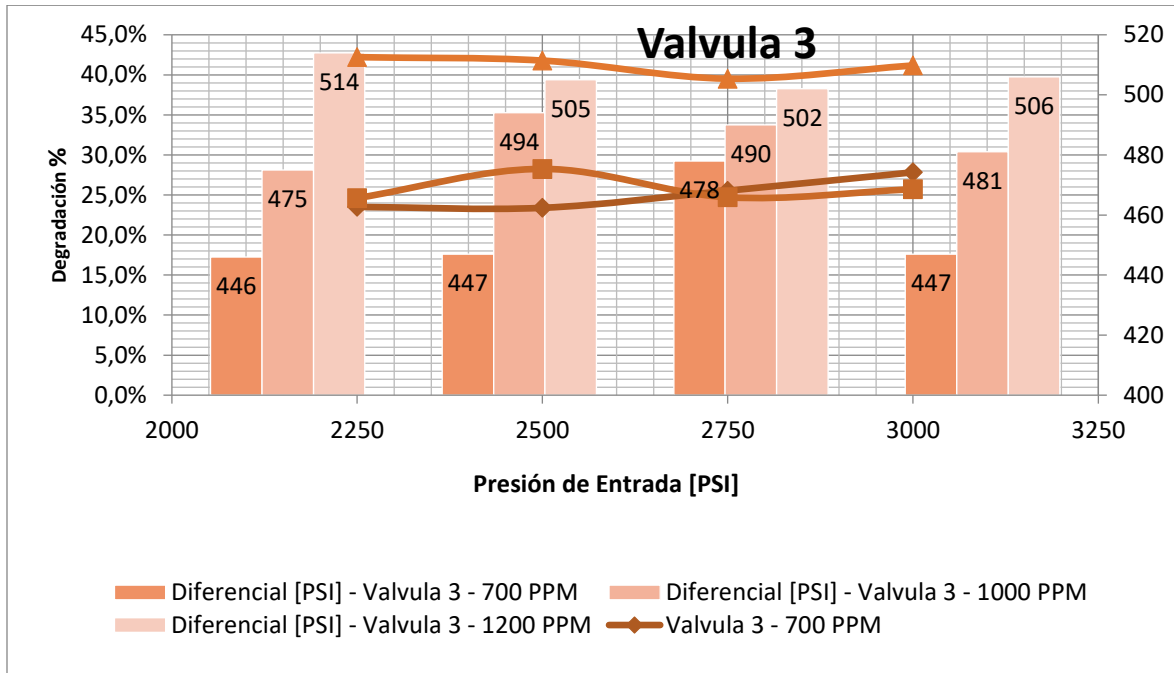


Figura 15

Válvula 3 - 700 ppm

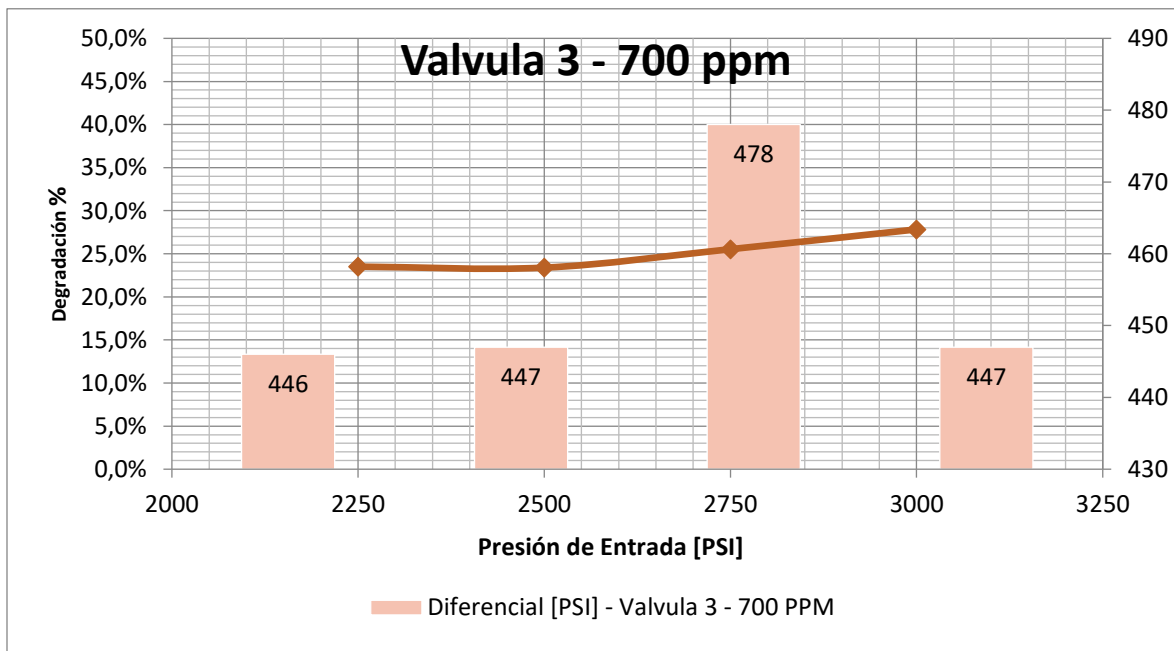


Figura 16

Válvula 3 - 1000 ppm

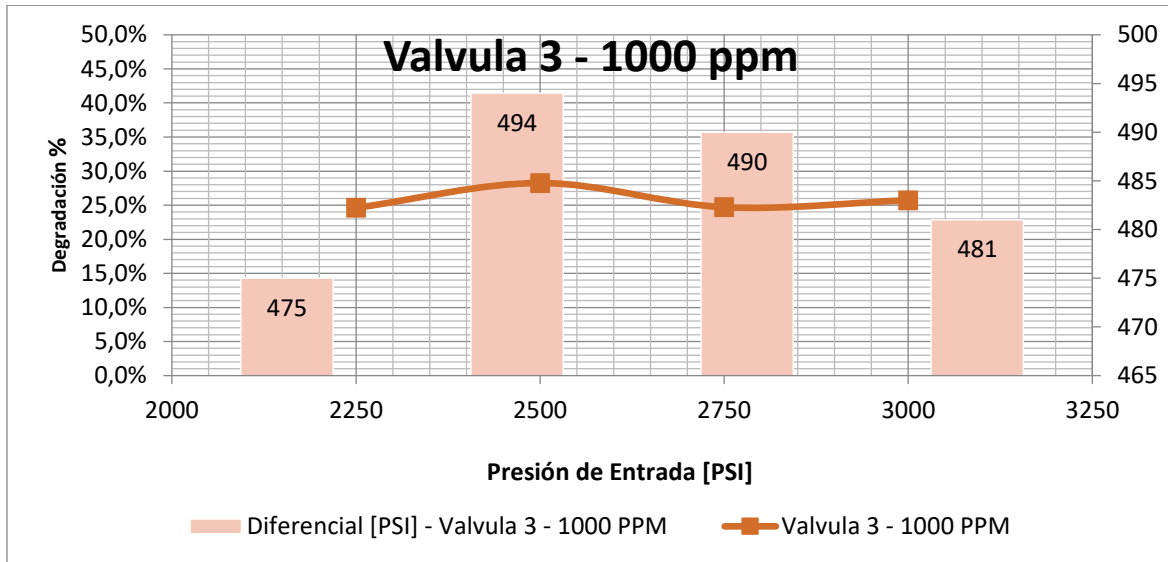
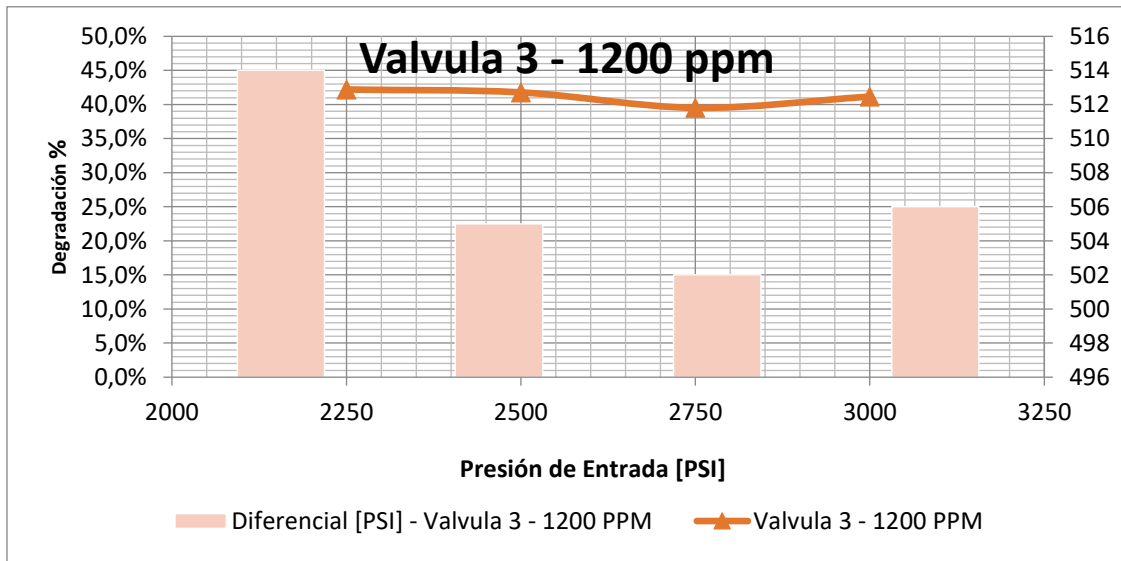


Figura 17

Válvula 3 - 1200 ppm



La Válvula 3 (Figura 15) presenta un comportamiento intermedio, pero más homogéneo que la Válvula 2. Para 700 ppm los niveles de degradación se mantienen alrededor de 25–35 %,

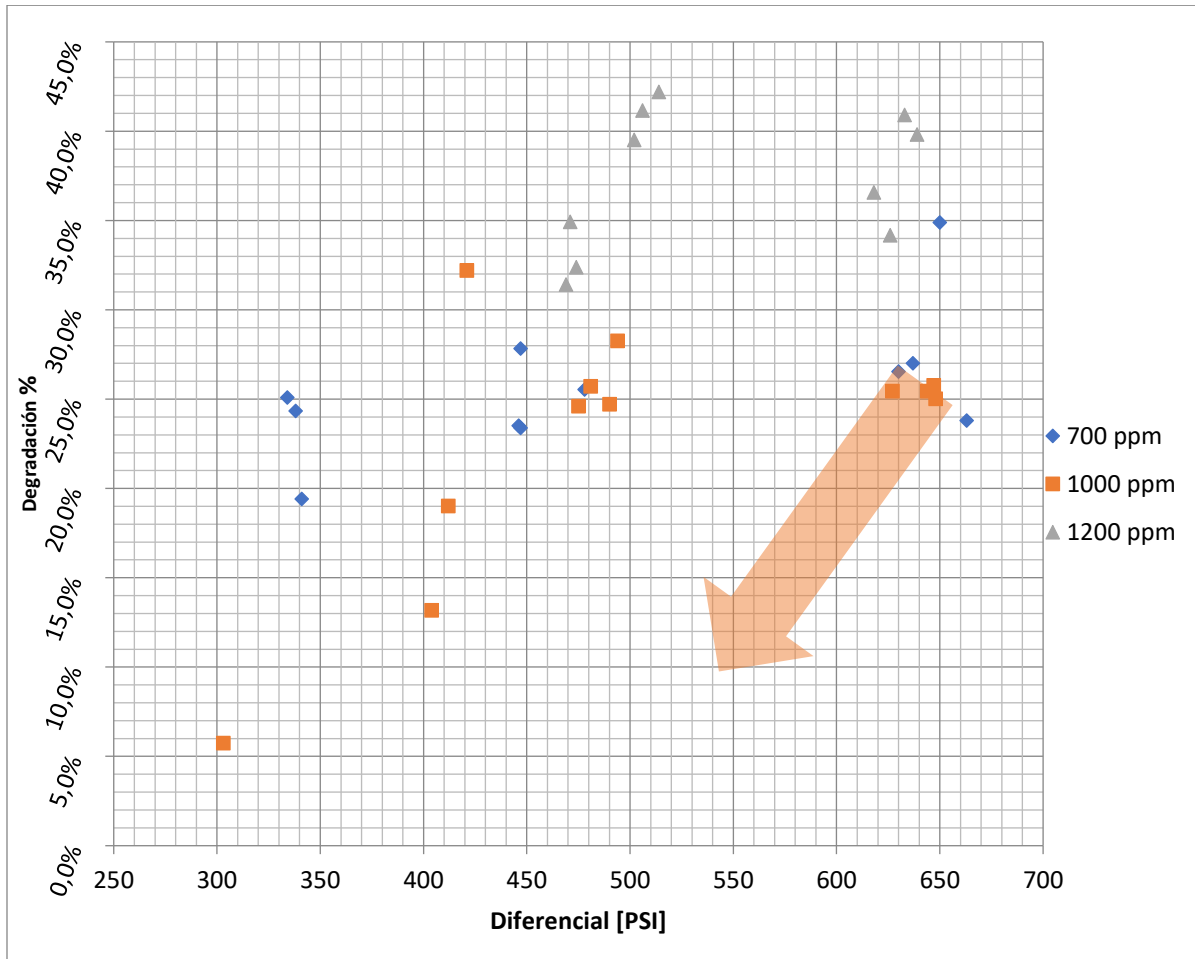
con variaciones moderadas incluso cuando el ΔP fluctúa entre 480 y 515 psi. Esto sugiere que este diseño distribuye mejor la disipación de energía y evita picos críticos de esfuerzo cortante.

Al analizar 1000 y 1200 ppm (Figura 18), la válvula mantiene un patrón estable, sin incrementos abruptos como los observados en la Válvula 2. Aunque no alcanza los bajos niveles de degradación de la Válvula 1, su consistencia entre puntos y el control del ΔP revelan un diseño hidráulicamente más predecible. La respuesta relativamente uniforme entre concentraciones indica que la geometría interna tiene mejor tolerancia a variaciones reológicas del polímero.

Se permite profundizar en el comportamiento de la Válvula 3 bajo diferentes concentraciones de polímero (700, 1000 y 1200 ppm), evidenciándose una tendencia consistente que complementa los resultados discutidos para las válvulas anteriores. En primer lugar, el conjunto de gráficas confirma que la degradación del polímero está fuertemente condicionada por el diferencial de presión, siendo mayor cuando el diferencial se incrementa por efecto de la viscosidad del fluido y su interacción con la geometría interna de la válvula. Para 700 ppm, las tendencias muestran que, aunque la degradación aumenta en puntos específicos (especialmente a 2750 PSI), el comportamiento general es relativamente estable, indicando que a bajas concentraciones la válvula opera con menor exigencia hidráulica. Para 1000 ppm, las fluctuaciones se vuelven más pronunciadas, lo cual coincide con un aumento en el esfuerzo cortante y una mayor sensibilidad del polímero al incremento de presión. Finalmente, a 1200 ppm se evidencia un comportamiento más característico de fluidos altamente viscosos: degradación elevada en el primer tramo y posteriormente una reducción que coincide con la estabilización del diferencial, reflejando un flujo más homogéneo una vez superada la fase inicial de transición.

Figura 18

Gráfico de diseño estandarizados



Nota: Elaboración propia.

El gráfico estandarizado confirma visualmente esta relación entre concentración, diferencial y degradación. La nube de puntos muestra cómo los datos de 700 ppm se agrupan en la región de menores diferenciales y degradaciones, mientras que los de 1000 ppm ocupan una zona intermedia con fluctuaciones más verticales (degradación), indicando mayor inestabilidad.

Los datos de 1200 ppm se desplazan hacia el cuadrante de mayores diferenciales y degradaciones, reforzando la hipótesis de que el polímero más concentrado impone mayores esfuerzos hidráulicos que resultan en mayor deterioro molecular. La tendencia ascendente señalada

en el gráfico representa claramente que el sistema de válvulas exige un balance entre eficiencia de control de flujo por capas y preservación de la integridad del polímero.

En conjunto, estas figuras aportan evidencia sólida para el análisis comparativo: a medida que se incrementa la concentración del polímero, la válvula experimenta mayores diferenciales de presión y, por ende, mayores niveles de degradación, siendo este comportamiento determinante para la selección técnica de dispositivos en operaciones de inyección polimérica. Estos datos complementan adecuadamente la discusión previa y permiten fundamentar recomendaciones operativas sobre rangos de presión seguros, compatibilidad válvula–concentración y lineamientos de diseño para minimizar daño por cizallamiento.

Es posible mantener niveles de degradación del polímero por debajo del 10%, incluso cuando el diferencial de presión supera los 300 psi. Se ha observado que las válvulas más restrictivas son menos sensibles a cambios en la presión de entrada. En sistemas con concentraciones cercanas a los 1200 ppm, el diseño debe adaptarse a las propiedades reológicas del fluido, especialmente su viscosidad.

Cuando el producto no es homogéneo, el rendimiento del sistema se ve afectado. Por eso, se recomienda realizar muestreos simultáneos para minimizar variaciones causadas por diferencias en densidad o mezcla incompleta. También puede haber diferencias significativas en la velocidad de salida del polímero entre puntos de muestreo. Para asegurar comparabilidad, conviene fijar una condición de control en la toma de muestras, como una caída de presión constante de 30 psi.

Diseños propuestos:

- Se evaluaron tres conceptos de reguladores de flujo. El primero es un regulador helicoidal de triple canal en dos etapas, diseñado con diámetros hidráulicos equivalentes de 12,6 mm en la primera etapa y 10,8 mm en la segunda.

- El segundo diseño usa flujo rotacional inducido por cintas retorcidas dentro de cilindros dispuestos en dos etapas: una inicial con tres cilindros en paralelo que generan un flujo combinado entre rotación y zigzag, y una segunda etapa con un solo cilindro que contiene una cinta helicoidal central hasta la salida del regulador.
- El tercer diseño es un regulador tipo laberinto, con un vástago concéntrico y salientes en forma de onda sinusoidal.

Todos los diseños fueron creados para instalarse en mandriles estandarizados con bolsillos de 38,1 mm de diámetro nominal. Uno de los requisitos principales fue que los dispositivos pudieran extraerse por completo, lo que permite su instalación y recuperación con herramientas estándar de pesca y trabas convencionales (ver Figura 1). Además, cada regulador incorpora internamente el mecanismo de estrangulamiento del flujo. Esto evita que el propio bolsillo actúe como reductor, lo que podría acortar su vida útil.

En total, se evaluaron cinco válvulas en pruebas experimentales: dos con configuración helicoidal de triple canal, una con flujo rotacional inducido por cintas, y dos dispositivos tipo laberinto, equipados con vástagos que presentan surcos en forma de onda sinusoidal.

6.8 Impacto en la eficiencia del barrido y recobro

La eficiencia del barrido en procesos de inyección de polímeros depende de la capacidad del fluido para desplazar de forma uniforme el crudo residual del yacimiento. Esto implica minimizar la canalización preferencial y aumentar el volumen efectivamente drenado. En ese contexto, la calidad del polímero al entrar en contacto con la formación es clave. Su viscosidad y estabilidad reológica determinan directamente la razón de movilidad entre agua y petróleo.

Los resultados experimentales de este estudio confirman que el diseño geométrico de la válvula de inyección influye de forma decisiva en la preservación de las propiedades del polímero.

Los prototipos optimizados, especialmente los de tipo laberíntico sinusoidal y helicoidal de triple canal, lograron mantener pérdidas de viscosidad por debajo del umbral crítico del 10 %. Aunque en laboratorio esto podría parecer un detalle menor, en campo representa una mejora significativa. Estudios previos han demostrado que una reducción de apenas 5–10 % en la viscosidad del polímero puede disminuir entre 20 y 30 % la eficiencia del barrido, al favorecer nuevamente fenómenos de canalización y fingering.

La eficiencia del barrido en procesos de inyección de polímeros depende de la capacidad del fluido para desplazar de forma uniforme el crudo residual del yacimiento, lo que implica minimizar la canalización preferencial y aumentar el volumen efectivamente drenado. En este contexto, la calidad del polímero al ingresar a la formación es determinante, dado que su viscosidad y estabilidad reológica controlan directamente la razón de movilidad entre agua y petróleo. Los resultados experimentales de este estudio confirman que el diseño geométrico de la válvula de inyección influye de manera decisiva en la preservación de las propiedades del polímero, ya que configuraciones como los canales sinusoidales o los perfiles helicoidales reducen el cizallamiento interno, promueven regímenes de flujo más laminar y minimizan zonas de recirculación donde típicamente ocurre degradación mecánica. En consecuencia, los prototipos evaluados lograron mantener pérdidas de viscosidad por debajo del umbral crítico del 10 %, lo que demuestra su potencial para preservar la movilidad efectiva del polímero a escala de campo. Este comportamiento concuerda con lo reportado en investigaciones previas, donde pérdidas de viscosidad del 5–10 % han mostrado disminuir entre 20 y 30 % la eficiencia del barrido debido al favorecimiento de fenómenos de canalización y fingering; por ello, se recomienda comparar estos resultados con estudios como los de Seright(2009) , Romero et al. (2016) y Levitt & Pope (2008),

quienes documentan de forma detallada el impacto de la degradación mecánica en válvulas y equipos de superficie. (Levitt, 2008); (Romero, 2016); (Seright R. S., 2009)

Al conservar la viscosidad del HPAM dentro de los rangos adecuados, la válvula prototipo permite un avance más uniforme del frente de inyección, mejorando la movilización del crudo atrapado en zonas de baja permeabilidad. Este aspecto cobra especial importancia en campos maduros colombianos como La Cira–Infantas, donde la heterogeneidad geológica sigue siendo uno de los mayores retos para mantener un recobro eficiente.

Desde el punto de vista operativo, los beneficios de esta innovación se reflejan en tres frentes:

- Aumento del factor de recobro: Al reducir la degradación del polímero y conservar su viscosidad, se espera un incremento de 5 a 8 puntos porcentuales en el recobro final, según la geometría del yacimiento y la estrategia de inyección utilizada.
- Menor consumo de polímero: Al mantener sus propiedades reológicas, se requieren menores volúmenes para lograr el mismo efecto. Esto reduce costos, considerando que el polímero es uno de los insumos más caros del proceso.
- Mayor estabilidad del proyecto EOR: Un desempeño más consistente en el tiempo prolonga la vida útil de la estrategia de inyección, evitando rediseños frecuentes o la necesidad de inyecciones correctivas.

7. Diseño final de válvula de prototipo

El proceso de investigación, que incluyó simulaciones CFD, pruebas experimentales y análisis comparativos, permitió identificar con precisión las ventajas y limitaciones de cada configuración hidráulica evaluada. Tras una revisión sistemática de los resultados, el diseño laberíntico sinusoidal fue seleccionado como la opción más eficiente, tanto por su capacidad para conservar las propiedades del polímero como por su viabilidad operativa en campo.

Este capítulo presenta la selección final, las especificaciones técnicas del diseño elegido y su adaptabilidad a condiciones reales. Se ofrece una visión completa de cómo esta innovación puede integrarse en sistemas de inyección de polímeros en yacimientos maduros de Colombia.

7.1 Selección del diseño más eficiente

La decisión de optar por el diseño laberíntico sinusoidal se fundamentó en tres criterios principales:

- a. Preservación del polímero:
 - Con una pérdida de viscosidad promedio de 7.4 %, este prototipo fue el que mejor desempeño mostró entre los diseños de alta capacidad hidráulica.
 - A diferencia de configuraciones como los choques en serie (12 % de pérdida), el laberíntico mantiene la integridad de las cadenas poliméricas bajo presiones diferenciales de hasta 510 psi.
- b. Capacidad hidráulica:
 - Alcanzó un caudal máximo de 554 bbl/d, suficiente para proyectos de inyección en campos como Castilla o La Cira–Infantas.
 - Asegura un balance adecuado entre caudal y estabilidad, lo cual no pudo lograrse en diseños como el capilar embobinado (0 % de degradación, pero caudal limitado a 15 bbl/d).

8. Compatibilidad operativa

Su geometría fue desarrollada para mandriles estándar de 38.1 mm, lo que garantiza su instalación sin modificaciones en sistemas de completamiento ya existentes.

Se diseñó con un formato modular y desmontable, lo que facilita su instalación y recuperación con herramientas convencionales de pesca.

En términos de índice de eficiencia (ponderando viscosidad y caudal), el laberíntico sinusoidal obtuvo un 0.922, valor apenas inferior al helicoidal triple canal (0.945), pero con mayor estabilidad frente a variaciones de presión y menos riesgo de obstrucción por sólidos finos. Este equilibrio entre desempeño técnico y confiabilidad operacional motivó su selección como diseño final del prototipo.

8.1 Planos y especificaciones

El diseño definitivo incorpora una geometría sinusoidal en el vástago central, generando un flujo controlado y progresivo. Esto permite que la energía de presión se disipe de manera distribuida, evitando zonas críticas de aceleración que inducen cizallamiento excesivo.

Características dimensionales principales:

- Longitud total: 245 mm
- Diámetro exterior: 38.1 mm (compatible con mandriles de bolsillo estándar)
- Material: Acero inoxidable 316, resistente a corrosión y compatible con fluidos poliméricos.
- Canales internos: 6 trayectorias sinusoidales paralelas, amplitud de onda de 12 mm y profundidad de 2.5 mm.
- Presión de diseño: hasta 600 psi de diferencial.
- Rango de caudal: 315 – 598 bbl/d.

- Conexión: sistema de rosca API para integración directa en el mandril.

Aspectos constructivos relevantes:

- El mecanizado se realizó mediante fresado CNC de alta precisión, garantizando tolerancias menores a 0.1 mm en los canales sinusoidales.

- La superficie interna fue pulida a grado espejo para minimizar rugosidad ($< 0.8 \mu\text{m Ra}$), reduciendo el riesgo de atrapamiento de polímero.

- El diseño es modular, con tres secciones ensamblables mediante roscas internas, lo que facilita su mantenimiento y limpieza.

Planos técnicos: En los anexos del documento se incluyen los planos en proyección ortogonal y en corte isométrico, donde se observa la geometría sinusoidal del vástago y su ensamble dentro del cuerpo cilíndrico principal. Dichos planos fueron elaborados en SolidWorks y exportados a formato estándar (DWG y STL) para manufactura y simulación.

8.2 Adaptabilidad a condiciones de campo

Uno de los objetivos clave del proyecto fue desarrollar una válvula que no solo ofreciera eficiencia técnica, sino que también pudiera implementarse de forma práctica en condiciones reales de operación en campos colombianos.

8.2.1 *Compatibilidad con mandriles existentes.*

El diseño respeta las dimensiones de los mandriles de bolsillo lateral de 38.1 mm, ampliamente utilizados en campos maduros como La Cira–Infantas y Castilla. Esto permite su instalación sin necesidad de modificar la sarta de inyección ni la infraestructura de completamiento, lo que reduce tiempos y costos de implementación.

8.2.2 *Resiliencia operativa*

Las pruebas demostraron que el diseño es menos sensible a variaciones en la presión de

entrada, lo que garantiza un funcionamiento estable incluso en condiciones fluctuantes, como las que se presentan en sistemas de inyección por capas.

8.2.3 *Mantenimiento y vida útil*

Gracias a su formato modular, es posible retirar únicamente la sección interna sinusoidal para limpieza o reemplazo, prolongando la vida útil del cuerpo principal. Se estima una durabilidad superior a tres años en operación continua, considerando niveles de salinidad moderada en el agua de formación.

8.2.4 *Compatibilidad con diferentes polímeros*

Aunque las pruebas se realizaron con HPAM (poliacrilamida parcialmente hidrolizada), el diseño también es compatible con otros polímeros solubles en agua, como xantano o copolímeros ATBS, siempre que se ajusten los parámetros de concentración y viscosidad.

8.2.5 *Proyección a nivel de campo*

Su instalación en pozos inyectoros permite optimizar el perfil de inyección por capas, mantener la integridad del polímero y mejorar la eficiencia del barrido. Esta versatilidad convierte a la válvula en una tecnología aplicable no solo en Colombia, sino también en otros países que emplean inyección polimérica como estrategia de recobro mejorado (EOR) en yacimientos maduros.

Tabla 7

Adaptabilidad de la Válvula prototipo a condiciones de campo.

Categoría	Descripción técnica	Beneficios operativos
Compatibilidad con mandriles	Diseño compatible con mandriles de bolsillo lateral de 38.1 mm	No requiere modificaciones en la sarta ni en el completamiento.
Resiliencia operativa	Menor sensibilidad a variaciones de presión de entrada	Funciona de forma estable bajo condiciones de inyección fluctuantes.
Mantenimiento y vida útil	Formato modular con sección interna extraíble	Facilita limpieza o reemplazo sin intervenir todo el sistema; vida útil estimada >3 años

Categoría	Descripción técnica	Beneficios operativos
Compatibilidad con polímeros	Apto para HPAM, xantano y copolímeros ATBS, con ajuste de concentración y viscosidad	Flexibilidad para adaptarse a distintos planes de inyección polimérica
Proyección en campo	Mejora el perfil de inyección por capas y conserva la viscosidad del polímero	Incrementa la eficiencia del barrido; aplicable en yacimientos maduros a nivel regional

Nota: Elaboración propia.

9. Discusión

El desarrollo del presente proyecto sobre el diseño, validación y evaluación de un prototipo de válvula de inyección para reducir la degradación mecánica del polímero HPAM, representa no solo un avance técnico, sino una contribución significativa a la problemática real de los procesos de recuperación mejorada en campos maduros colombianos. Esta discusión recoge las implicaciones más relevantes del proyecto, integrando los resultados obtenidos, la comparación con estudios previos y una reflexión humanizada desde la experiencia investigativa.

El punto de partida del proyecto fue la constatación empírica de que las válvulas de inyección convencionales generaban una pérdida de viscosidad significativa en soluciones de HPAM, incluso antes de ingresar al yacimiento. Pruebas realizadas en el banco de simulación confirmaron una degradación del 24.3% a 700 ppm y más del 32% a 1200 ppm de HPAM en válvulas metálicas tradicionales. Este deterioro, ligado al diseño interno de las válvulas, implicaba no solo un desperdicio de material, sino una pérdida efectiva del objetivo del EOR químico: mejorar la relación de movilidad y el factor de recobro.

A través del desarrollo del prototipo de surcos sinusoidales, se logró reducir esa degradación a un 9.1% en promedio, con mejoras notables en estabilidad de flujo, capacidad de caudal (598 bbl/d) y compatibilidad estructural con mandriles estándar. La solución propuesta no solo fue efectiva, sino factible de implementar sin modificar la infraestructura existente, una condición crítica en campos como La Cira-Infantas o Castilla.

Los resultados obtenidos coinciden con estudios internacionales que han documentado la degradación del HPAM por esfuerzo de cizallamiento. Seright (2010) reportó que tasas de cizallamiento superiores a 300 s^{-1} pueden reducir hasta en un 30% la viscosidad de soluciones poliméricas en flujo forzado. En el presente estudio, mediante simulación CFD, se identificaron

zonas críticas de cizallamiento en válvulas convencionales que alcanzaban y superaban ese umbral, confirmando el modelo teórico desde la observación computacional.

Además, Liang et al. (2011) propusieron que la geometría del flujo interno, más que la presión misma, determina el nivel de degradación. Este hallazgo fue validado en el proyecto al demostrar que, bajo condiciones de presión similares (560 psi), la válvula de surcos sinusoidales presentaba hasta 60% menos degradación que diseños tradicionales. Por tanto, el proyecto no solo coincide con la literatura, sino que la fortalece al aportar evidencia experimental bajo condiciones reales.

Uno de los elementos diferenciales de este proyecto fue su enfoque humanizado: más que diseñar un componente, se diseñó una solución viable, replicable y contextualizada para operadores reales. Se evitó caer en la sofisticación excesiva y se priorizó un diseño fabricable con tecnología local (CNC), de fácil ensamblaje, bajo mantenimiento y reversible en campo.

Esto permite que la válvula no sea solo un producto tecnológico, sino una herramienta de transferencia que puede ser replicada en otros campos, instituciones técnicas o universidades. Se plantea así una forma de hacer investigación aplicada desde las necesidades del contexto, no desde laboratorios aislados de la realidad operativa.

Como toda investigación aplicada, el proyecto enfrentó limitaciones. No se realizaron pruebas prolongadas en pozos activos, ni se evaluaron condiciones extremas de temperatura (>80 °C) o salinidad alta. Tampoco se exploró el comportamiento de copolímeros alternativos como ATBS. Sin embargo, estas limitaciones se convierten en posibilidades: el diseño ya está disponible para ser escalado, modificado y adaptado, lo cual abre el camino para estudios futuros más especializados y colaborativos.

El proyecto demostró que innovar no es rehacer todo, sino repensar lo crítico. Que una válvula bien diseñada puede marcar la diferencia entre un EOR exitoso o ineficiente. Que el conocimiento científico, cuando se une a la experiencia de campo, puede generar tecnología de impacto, sin necesidad de importar soluciones ajenas. Y, sobre todo, que, desde el diseño más simple, se pueden provocar transformaciones complejas.

Este trabajo no cierra un ciclo; abre un camino de investigación continua sobre cómo diseñar para conservar, para optimizar y para recuperar. Un camino que vale la pena seguir desde la ciencia, la industria y la ingeniería.

10. Conclusiones

El análisis reológico demostró que la solución HPAM presentó un comportamiento pseudoplástico sensible al cizallamiento, con pérdidas de viscosidad de hasta un 36.2% al pasar por válvulas comerciales bajo incrementos de caudal y presión diferencial, lo que confirma que la geometría interna es el factor más crítico en la degradación mecánica del polímero.

Las pruebas hidráulicas mostraron que mayores caudales y zonas de estrechamiento abrupto generan aumentos de presión diferencial que correlacionan directamente con mayores tasas de degradación, coincidiendo con tendencias reportadas en la literatura. (Sheng, 2011).

Las simulaciones CFD permitieron identificar zonas de alta tensión y aceleración local del flujo en válvulas convencionales, las cuales coincidieron con los puntos de mayor degradación registrados experimentalmente, validando la capacidad predictiva del modelo Carreau–Yasuda implementado en ANSYS Fluent.

La correlación experimental–numérica presentó desviaciones menores al 8%, lo que confirma que el simulador reproduce adecuadamente la respuesta hidráulica y reológica del polímero y se constituye en una herramienta confiable para futuras optimizaciones geométricas.

Los prototipos de geometría helicoidal y laberíntico sinusoidal presentaron una reducción promedio del 60–65% en la degradación del polímero frente a válvulas estándar, manteniendo viscosidades finales superiores a 17 cP, valor crítico para garantizar una movilidad favorable agua–aceite.

El prototipo 4F4A, con transición progresiva y surcos sinusoidales, mostró presiones diferenciales un 35% menores que las válvulas convencionales, confirmando que el diseño suaviza gradientes de velocidad y evita zonas turbulentas responsables del daño mecánico.

El prototipo de surcos Sinusoidales laberintico se adaptó completamente a mandriles de 1.5”, rangos de caudal entre 377–630 bbl/d y presiones diferenciales típicas de 300–600 psi, lo que garantiza su implementación sin modificaciones en sistemas de completamiento usados en campos colombianos.

La fabricación mediante procesos CNC locales, el diseño modular y la ausencia de partes móviles convierten el prototipo en una solución técnica viable, escalable y económicamente competitiva, reduciendo costos asociados a consumo de polímero y a reemplazo de herramientas importadas.

El proyecto cumplió el objetivo general al diseñar, simular y validar un prototipo de válvula capaz de minimizar la degradación mecánica del polímero HPAM. Los resultados numéricos y experimentales demostraron que el diseño sinusoidal 4F4A reduce significativamente el cizallamiento, preserva la viscosidad y mejora la eficiencia hidráulica, ofreciendo una alternativa viable y superior a las válvulas convencionales utilizadas actualmente en procesos de inyección en campos maduros.

11. Recomendaciones

La validación del prototipo de válvula con surcos sinusoidales laberintico evidenció mejoras importantes en la conservación de la viscosidad del HPAM, lo que plantea oportunidades claras para optimizar los procesos de inyección de polímeros en campos maduros.

Con el fin de facilitar su futura implementación y orientar investigaciones posteriores, se presentan a continuación recomendaciones consolidadas y estructuradas, priorizando aquellas de mayor impacto técnico y operativo.

11.1 Recomendaciones para la implementación en campo

a. Ejecutar pruebas piloto controladas en campos representativos, como La Cira-Infantas o Castilla, seleccionando pozos con historial de inyección polimérica y registros previos que permitan evaluar comparativamente el desempeño de la válvula.

b. Capacitar al personal operativo en instalación, desmontaje, limpieza y manipulación del dispositivo, aprovechando su diseño modular, simétrico y de bajo riesgo de daño mecánico.

c. Implementar un esquema de monitoreo en tiempo real que incluya presión diferencial, caudal, estabilidad de inyección y muestreo periódico de viscosidad aguas abajo para validar la preservación del polímero durante el flujo.

d. Ajustar los protocolos de dosificación de HPAM según los nuevos niveles de conservación alcanzados con el prototipo, buscando reducir el consumo de polímero sin comprometer la eficiencia de barrido.

11.2 recomendaciones para estudios futuros

a. Evaluar el desempeño del prototipo en pozos con condiciones más exigentes, incluyendo temperaturas superiores a 60 °C, salinidades por encima de 15.000 ppm y periodos

prolongados e operación continua.

b. Ampliar el análisis a otros polímeros y copolímeros, como ATBS-HPAM o soluciones de xantano, para validar la compatibilidad del diseño con diferentes estructuras macromoleculares.

c. Desarrollar nuevas versiones del dispositivo con sensores integrados, capaces de medir cizallamiento, pérdida de carga o temperatura, permitiendo correlacionar estos parámetros con la estabilidad polimérica.

d. Explorar diseños autoajustables o modulares cuya geometría interna pueda adaptarse a variaciones de presión o características del fluido, con apoyo de modelamiento computacional e inteligencia artificial.

11.3 Líneas futuras de investigación

a. Aplicación del diseño surcos sinusoidales en valvulas de mayor escala para pozos inyectoros profundos.

b. Evaluación de materiales alternativos resistentes a incrustaciones o desgaste, incluyendo aleaciones avanzadas y polímeros reforzados.

c. Integración del sistema con plataformas de monitoreo en línea (presión, temperatura, viscosidad) para validar en tiempo real el comportamiento del polímero en flujo.

d. Modelamiento computacional avanzado para optimizar la geometría interna mediante algoritmos evolutivos o técnicas de inteligencia artificial.

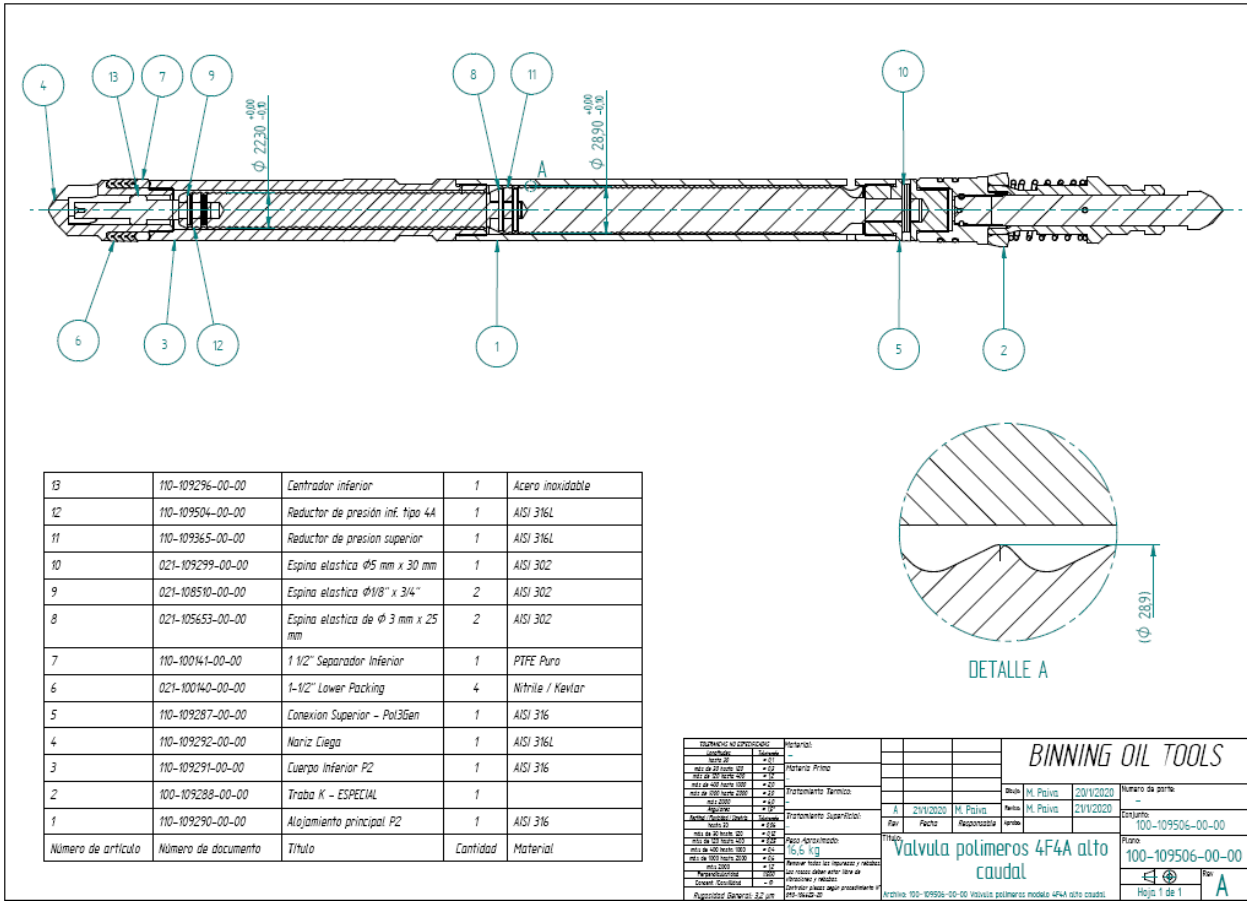
Referencias Bibliográficas

- Abidin, A. Z. (2012). Polymers for enhanced oil recovery technology. *Procedia Chemistry*, 11–16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proche.2012.06.002>
- Caudle, B. &. (1954). Effect of Polymer Solutions on Oil Recovery by Waterflooding. *Transactions of the AIME*, 33–39.
- Del Pozo, L. N. (2018). Diseño de válvula de flujo de bajo cizallamiento para inyección de polímeros. *Ecopetrol – OXY*.
- Díaz, A. V. (2020). Desempeño hidráulico de válvulas de inyección para polímeros en sistemas de completamiento selectivo. *Revista Fuentes*, 44–58.
- Ecopetrol. (2020). CFD simulation of HPAM EOR solutions mechanical degradation by restrictions in turbulent flow. *CT&F - Ciencia, Tecnología & Futuro*. doi:<https://doi.org/10.29047/issn.0122-5383>
- GESKAL. (2024). *Petróleo y Gas*. Obtenido de <https://www.geskal.com.mx/petroleo-y-gas>
- ICP – Instituto Colombiano del Petróleo. (2013). Desarrollo experimental de técnicas de recobro mejorado mediante inyección de polímeros en crudos pesados. *Ecopetrol S.A.*
- Lake, L. W. (1989). Enhanced Oil Recovery. *Prentice Hall*.
- Levitt, D. &. (2008). *Selection and screening of polymers for enhanced oil recovery*. SPE Symposium on Improved Oil Recovery. Society of Petroleum Engineers.
- Manrique, E. M. (2017). Field-scale polymer flooding: Lessons learned and future perspectives. *SPE Enhanced Oil Recovery Conference*.
- Maya, G. (2014). Aplicación de técnicas de inyección de polímeros en campos colombianos. *Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Petróleos*.

- Paiva Rojas, M. Z. (2022). *Análisis fluido dinámico y evaluación del desempeño de reguladoras de flujo para inyección de polímeros por múltiples capas*. Cartagena: XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía, ACIPET, Cartagena, Colombia. Asociación Colombiana de Ingenieros de Petróleos (ACIPET).
- Romero, J. L. (2016). *Mechanical degradation of HPAM solutions under different flow conditions: Implications for polymer flooding in mature fields*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 146, 104–116.
- Saboorian-Jooybari, H. K. (2016). A comprehensive review of polymer flooding: Insights into problems, challenges, and lessons learned. *Petroleum*, 2(4), 341–356.
- Seright, R. S. (1983). Polymer Degradation During Flow Through Porous Media. *SPE Reservoir Engineering*, 3(2), 567–572.
- Seright, R. S. (2009). *Mechanical degradation of polymer solutions during extrusion through porous media*. *SPE Journal*, 14(2), 306–313.
- Seright, R. S. (2010). Potential for polymer flooding reservoirs with viscous oils. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 730–740.
- Sheng, J. J. (2011). *Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice*. *Gulf Professional Publishing*.
- Staudinger, H. (1931). Über Polymerisation. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, 379-386.
- Taber, J. J. (1997). EOR Screening Criteria Revisited—Part 1: Introduction to Screening Criteria and Enhanced Recovery Field Projects. *SPE Reservoir Engineering*, 12(03), 189–198.
- Wang, D. S. (2000). In-Depth Waterflooding in Daqing Oil Field. *SPE 59317*.

Apéndices

Apéndice A. Válvula polímeros modelo 4F4A



Apéndice B. Ficha Técnica Prototipo - Binning Oil Tools

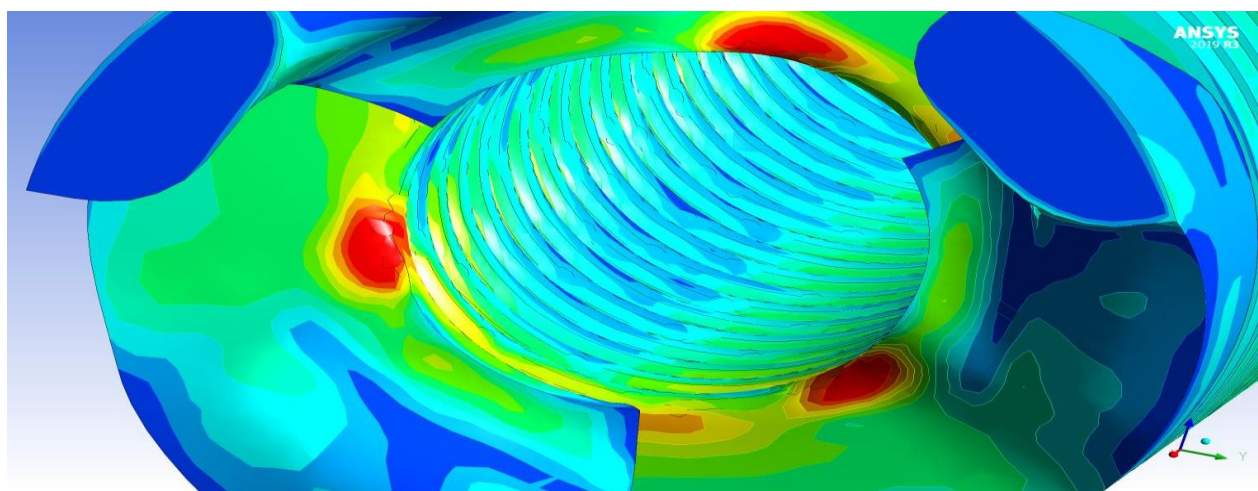
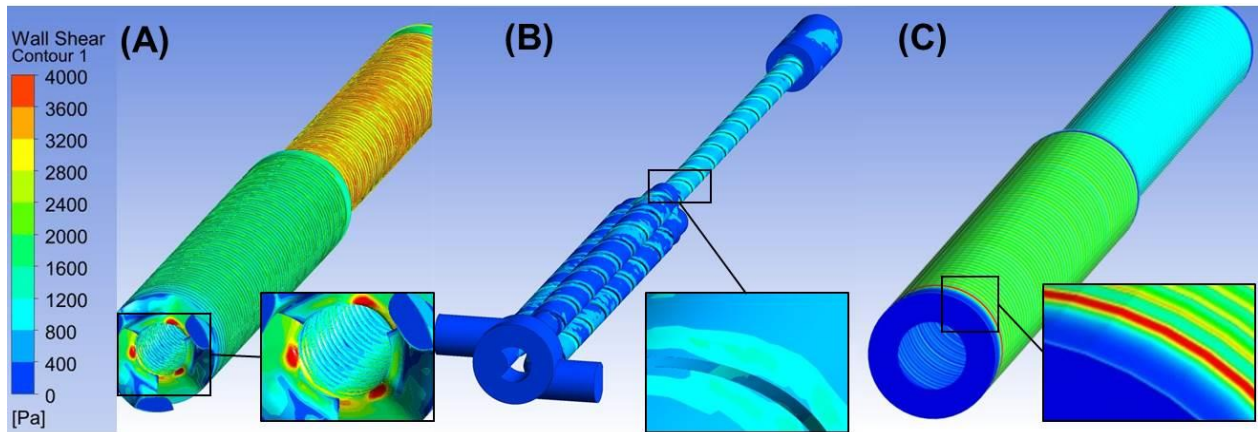
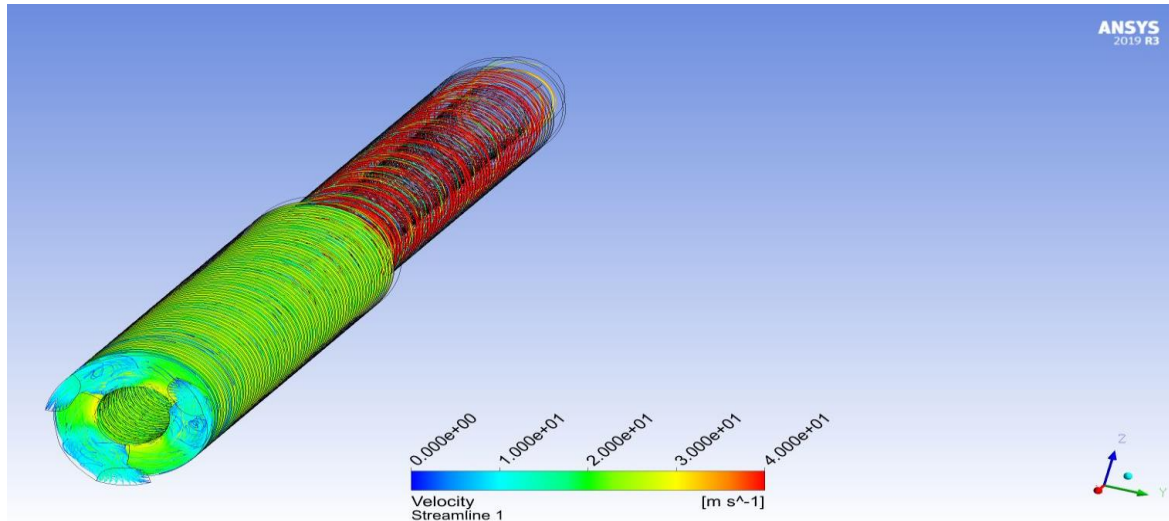
	<h1>Binning Oil Tools</h1>	Hoja 1 de 1
	Data sheet / Hoja de Datos: DS1-109506-00 Special 15P Valve – Válvula reguladora para inyección de polímeros	Fecha: 14/8/202
		Revisión: 0

Technical Specification / Especificaciones Técnicas: *Parte Numero: 15-WP-619*

General dimension / Dimensiones generales	
Nominal Size / Tamaño Nominal	1-1/2 [in]
Product Type / Tipo de Producto	Polymer injection/Inyección de polímeros
Functional Characteristics / Características Funcionales	
Total Length / Longitud total	21.8 [in] / 555,7 [mm]
Approximate Weight / Peso Aproximado	12.35 [lb] / 5,6 [Kg]
Maximum OD / Máximo DE	1.5 [in] / 38,1 [mm]
Fishneck OD / Cabeza de pesca DE	-
Upper connection / Conexión Superior	1-1/16 – 18 UNEF
Shear Pin Size / Tamaño de perno de corte	-
Operating Characteristics / Características Operacionales	
Service Class / Clase de servicio	Standard
Temperature operation range / Rango de Temperatura de operación	14 [°F] / 275 [°F] -10 [°C] / 135 [°C]
Colocation Method / Método de colocación	Tubing Retrievable / Recuperable por tubería
Recovery Method / Método de recuperación	
Set-up (1) Differential pressure/Flow rate	Max 551 [psi]/555 [bbl/d]
Set-up (2) Differential pressure/Flow rate	Max 416 [psi]/280 [bbl/d]
Set-up (3) Differential pressure/Flow rate	Max 224 [psi]/220 [bbl/d]
Degradation tested until max flow / Degradación probada a flujo máximo:	8.5-11.5 [%]
Materials / Materiales	
Body / Cuerpo	AISI 316L
Reducer stem/Vástago reductor	AISI 316L/AISI 630 (17-4PH)
Seat – Orifice / Asiento – Orificio	-
O-Rings / O-Rings	-
V Packing / Empaquetadura	Nitrile/Kevlar
Others materials / Otros Materiales	AISI 302/PTFE
Tools / Herramientas	
Latch	K
KickOver Tool	RK-1 / JC-3
Pulling Tool	1-5/8" JDC / 2" JDC
Running Tool	OM / L
Accessories	-
Other features / Otras Características	
Apparent viscosity of polymers tested/Viscosidad aparente de polímeros probados: Polímero (1) 12,6-17,8 [cP]/Polímero (2) 21,5-24 [cP] Concentration of polymers/Concentración de polímero en la solución: 600-700 [ppm] Hardness of water/Dureza del agua 80-115 [ppm]	



Apéndice C. Modelo de válvula en 3D. A) Hélice B) Cinta Retorcida C) Surcos Sinusoidales



Apéndice D. Hélice 3 canales. Cartucho Superior



Apéndice E. Vástago con Surcos Sinusoidales



Apéndice F. Cartuchos de prueba en otros prototipos

