

Optimización de Válvulas de Control de Inyección de agua y polímeros para mejoramiento de la recuperación secundaria en tuberías con mandriles

Autor(es): J.P. Torne¹, A. Prada², G. S. Perez², M. F. Parra², N. J. Hernandez², F. Diaz³

¹ JPT Consulting and Services, ² Ecopetrol S.A, ³ ACIPET,

Categoría: Marque con una "X"

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.

Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

RESUMEN

El control de la inyección de agua en procesos de recuperación secundaria, que se realiza en yacimientos con múltiples zonas y arenas abiertas a inyección en Colombia es importante para optimizar y controlar el proceso que permite mantener la presión de yacimiento, desplazar el petróleo residual y sostener la producción de campos maduros. La incorporación de polímeros a los procesos de inyección de agua ha probado ser efectiva para mejorar el recobro, sin embargo, se hace necesario garantizar la integridad del polímero durante la inyección por tuberías y válvulas reduciendo la degradación de la viscosidad, mediante control del diseño mecánico para reducir la fricción y controlar la caída de presión y el caudal de inyección. Se han diseñado válvulas con múltiples etapas de reductores y cámaras de expansión siguiendo un diseño mecánico especial el cual ha sido patentado con Ecopetrol con el desarrollo de un procedimiento de predicción de la degradación del polímero dependiendo de la presión diferencial y el caudal.

Las válvulas permiten igualmente la inyección estable y eficiente de agua optimizando el proceso con menor costo, menores inventarios y menores requerimientos de servicio que se reflejan en mejores resultados operacionales en campos maduros.

INTRODUCCION

La recuperación mejorada de hidrocarburos implica varias técnicas de mejoramiento de la producción secundaria entre las cuales se encuentra la inyección de agua y más recientemente de polímeros con el objetivo de mejorar el desplazamiento y barrido de los hidrocarburos remanentes en la formación aun después de la producción inicial o recuperación primaria. Esta técnica se utiliza ampliamente en campos maduros a nivel mundial y en particular en Colombia se utiliza en campos como Casabe y La Cira Infantas ^(1,2).

La inyección de agua y más recientemente de polímeros permite desplazar el petróleo remanente y mantener la presión del yacimiento lo cual es importante en campos maduros y en yacimientos con múltiples arenas. Algunas formaciones depletadas han producido por mucho tiempo existiendo como consecuencia pozos de muy baja producción o marginales. En este caso la optimización técnica del proceso de recuperación secundaria es muy importante, razón por la cual se realiza la inyección selectiva; usando mandriles y válvulas reguladoras o de flujo.

En yacimientos de múltiples capas heterogéneas (yacimientos estratificados) como es el caso más extendido, se hace necesario regular el caudal de inyección, de cada arena; dependiendo de las propiedades petrofísicas (permeabilidad y porosidad) y presiones de cada arena. De esta manera se optimiza y se asegura un barrido o frente de desplazamiento uniforme en el yacimiento.

Dentro de las técnicas de inyección de yacimientos laminares o de múltiples capas, se ha desarrollado una técnica de completamiento de los pozos inyectoras basada en el uso secuencial de mandriles de bolsillo con empacaduras que aíslan cada zona o paquete de arenas, de tal manera que se hace posible inyectar de manera selectiva cada uno de los mandriles (paquetes de arenas), asegurando un

cubrimiento o eficiencia vertical de la inyección (Figura 1). Esta sarta de producción o inyección selectiva requiere el uso de válvulas reguladoras de flujo, las cuales se puedan remover de cada mandril para cambio por ajuste del caudal de flujo o para la realización de servicio a la válvula.

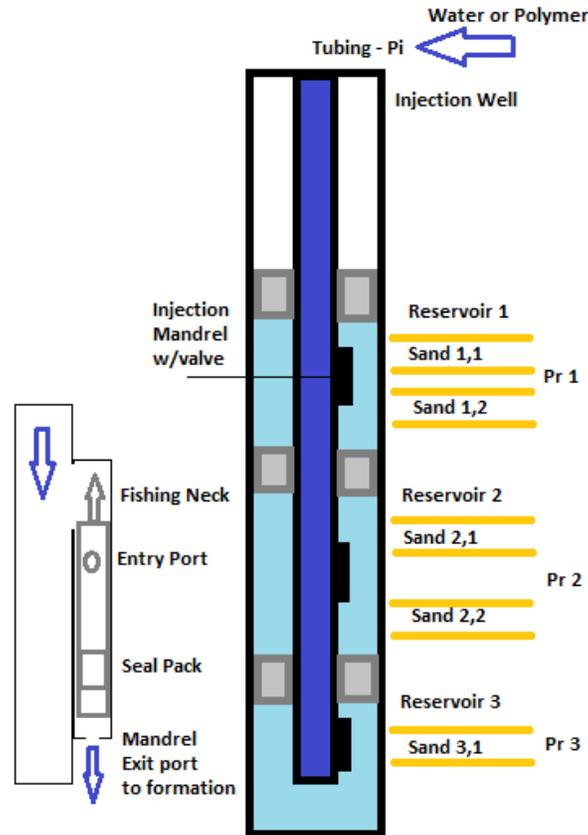


Figura 1. Esquema General de Inyección Selectiva y Válvula de Control de Inyección

El desarrollo de la tecnología de válvulas de control de inyección de agua a través de mandriles se basa en los desarrollos de válvulas de “gas lift”, cuyo desarrollo se realizó hace ya más de 50 años^(3,4). Esta tecnología se adaptó desde los años 90^(5,6) a la inyección de agua en yacimientos de múltiples capas⁽⁷⁾ con diferentes propiedades petrofísicas y presiones permitiendo el control selectivo y optimización del proceso de recuperación secundaria. Es importante considerar que los diseños de las válvulas de control de inyección de agua usados, deben tener en cuenta las propiedades físicas del agua, que corresponde a un fluido distinto al gas, con características diferentes en compresibilidad, densidad, viscosidad y fricción. En algunos diseños similares a los reguladores para gas lift, se intentó mantener la presión constante usando auto-regulación a través de un mecanismo compensado por la fuerza de un resorte para mantener los cambios de presión y caudal relativamente constantes; en otros se utilizaron reguladores fijos para controlar la presión y el caudal en forma similar a una válvula convencional de reguladores o “chokes”⁽⁸⁾. Igualmente es importante revisar y mejorar los diseños usados para agua vs polímeros para controlar, estimar y prevenir la degradación de la viscosidad del polímero, al pasar por las restricciones o cambios de presión en las válvulas.

Considerando la importancia de optimizar costos y mejorar los procesos de inyección que en campos maduros y marginales es crítico, se planificó en conjunto con Ecopetrol S.A en 2016 a través del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y la gerencia de Ingeniería del Campo Casabe; el cual es un campo maduro con inyección de agua,⁽⁹⁾ la revisión de los diseños de válvulas existentes, buscando la manera de optimizar dichos diseños para reducir el costo y aumentar la eficiencia de la manufactura y los procesos asociados a la operación y al aseguramiento del control de las tasas de inyección por cada zona con diferentes propiedades petrofísicas. Se buscó la optimización del tiempo de desgaste y servicio de las válvulas y, finalmente, mejorando la medición de parámetros de yacimiento en condiciones dinámicas, asegurando mediciones en cada uno de los mandriles.

Se revisaron las técnicas de control de presión y caudal y se modeló la posibilidad de usar reductores múltiples en tándem que permitieran controlar la caída de presión (presión de entrada menos presión de salida) intercalando cámaras de expansión o “dámper” la cual es una

técnica utilizada para reducir vibraciones y estabilizar la respuesta de sistemas de inyección. Se hicieron pruebas experimentales que resultaron positivas, el desarrollo permitió con base en las pruebas y simulación establecer modelos y curvas de corrección las cuales permiten definir de acuerdo a los requerimientos basados en las propiedades y presión de cada zona y los requerimientos de caudal suministrados por el ingeniero de diseño de control de inyección, el tamaño adecuado de los reductores en tándem para el control de inyección.

Como resultado de este desarrollo se realizó el mejoramiento de la válvula como dispositivo desarrollándose un sistema de reductores en tandem tanto para control de agua, como control de la degradación de agua con polímeros. Adicionalmente se desarrolló una herramienta para el diseño de los módulos de la válvula; el cual permite seleccionar el tamaño de los orificios para controlar la tasa de inyección de acuerdo a los requerimientos de la zona y del ingeniero de control de inyección, reduciendo el daño o degradación esperado del polímero en cada zona. Adicionalmente esta válvula puede ser usada como válvula choque en superficie para controlar desde superficie la inyección optimizando el costo del arreglo para poder utilizar el mismo arreglo de bombas y presión para varios pozos. Los resultados obtenidos en general se presentan en este artículo.

DESCRIPCION BASICA DEL EQUIPO

El sistema puede ser dividido en módulos los cuales se instalan en los mandriles usando una válvula. Los módulos pueden ser instalados en válvulas convencionales o pueden ser instalados en válvulas mejoradas como la desarrollada conjuntamente que permite utilizar módulos más largos y módulos especializados para polímeros o para medición. En total se tienen tres módulos principales: módulo de control de inyección en tándem estándar, módulo de control de inyección en tándem extendido y módulo de control de inyección para polímeros en tándem. Los módulos pueden ser utilizados en superficie en un arreglo especial controlando el caudal y la presión diferencial para un pozo específico cuando se necesita reducir la presión en cabeza optimizando la energía usada y manteniendo una presión de inyección uniforme a lo largo del campo por razones de logística y costo. La válvula integral se presenta en a Figura 2.

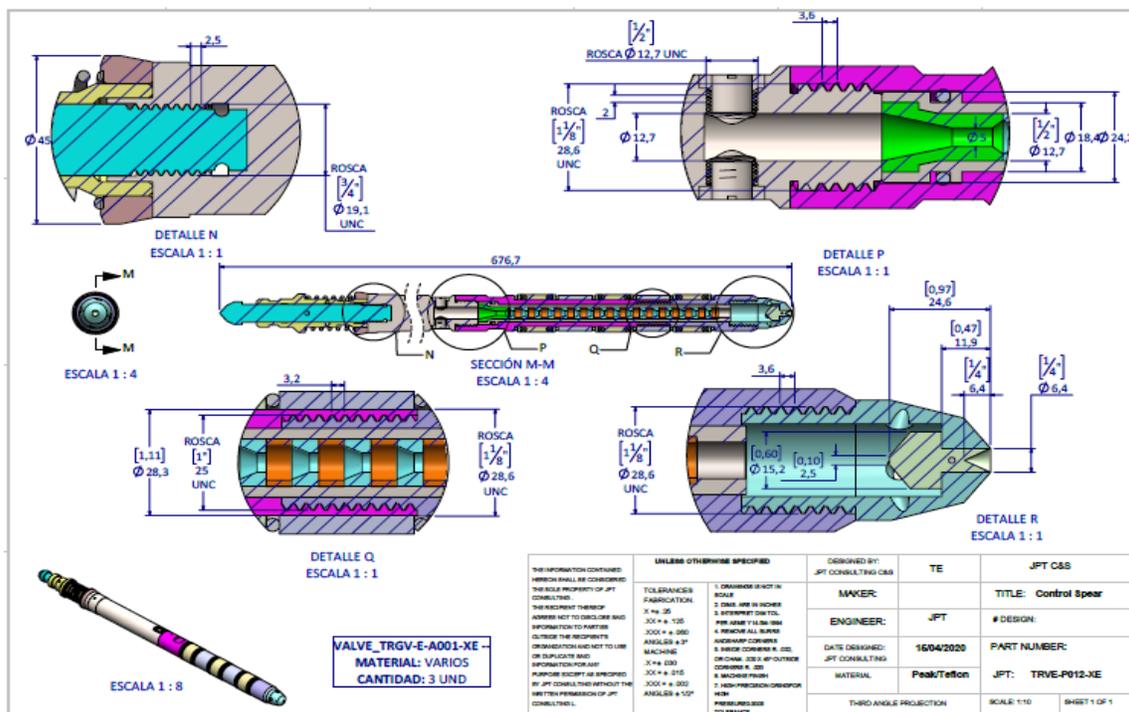


Figura 2. Válvula Integral Mejorada para aplicaciones en inyección de agua, polímeros, ciega y medición

La válvula mejorada incluye las siguientes mejoras con respecto a las válvulas convencionales las cuales se basan en la amplia experiencia de Ecopetrol en procesos de inyección de agua, requerimientos y observaciones:

- 1) Reducción de número de piezas que constituyen la válvula para optimizar inventario y simplicidad en el diseño para reducir el costo de manufactura.

- 2) Uso de acero inoxidable no magnético para prevenir oxidación y extender el tiempo de vida útil optimizando costos.
- 3) Entrada y salida para balancear el flujo, y diseño de cámaras internas que evitan cambios abruptos que pudieran ocasionar daño en las válvulas ocasionados por chorros de agua tipo jet o daño en el polímero por cambios abruptos de presión y caudal.
- 4) El diseño modular permite intercambiar reductores en tándem dual con orificios para inyección convencional de agua o el sistema especial para control de inyección de polímeros con múltiples reductores y cámaras de fabricación cónica especial para minimizar el daño y cizallamiento del polímero.
- 5) Diseño para la salida de fluido tipo nariz cónica para facilitar la corrida e instalación y permite instalar un sistema tipo dardo para prevenir contraflujo de manera sencilla.
- 6) Area de sello amplia que permite múltiples arreglos para optimizar el sello en mandriles usados con desgaste interno.
- 7) Diseño único para múltiples aplicaciones con cambios menores como en el caso de inyección de agua, polímero, válvula ciega o “dummy” y válvula para medición en memoria de presión y caudal en condiciones dinámicas o estáticas.
- 8) Múltiples opciones de sellos con sistema “V-pack” (sistema patentado por Chevron que permite una mejor área de sello que el sistema tipo “O-ring” con tolerancias mayores a 5 milésimas de pulgada como es el caso de la válvula en el mandril, y es recomendado hasta 1000psi por cada uno como máxima presión diferencial. El sistema permite usar de manera versátil desde 4 unidades (4000psi máximo) hasta 12 unidades (12.000psi máximo).

El sistema regulador se fabrica en acero inoxidable siendo básicamente un arreglo de tubos cilíndricos con agujeros de acuerdo al requerimiento de la zona específica de cada pozo con posibilidad de combinar diferentes tamaños para el superior e inferior en el caso de agua y un arreglo de 9 hasta 17 reductores en tándem con agujeros iguales de acuerdo al requerimiento específico de cada zona del pozo con un diseño cónico especial para minimizar el daño/corte del polímero como se muestra en a Figura 3.

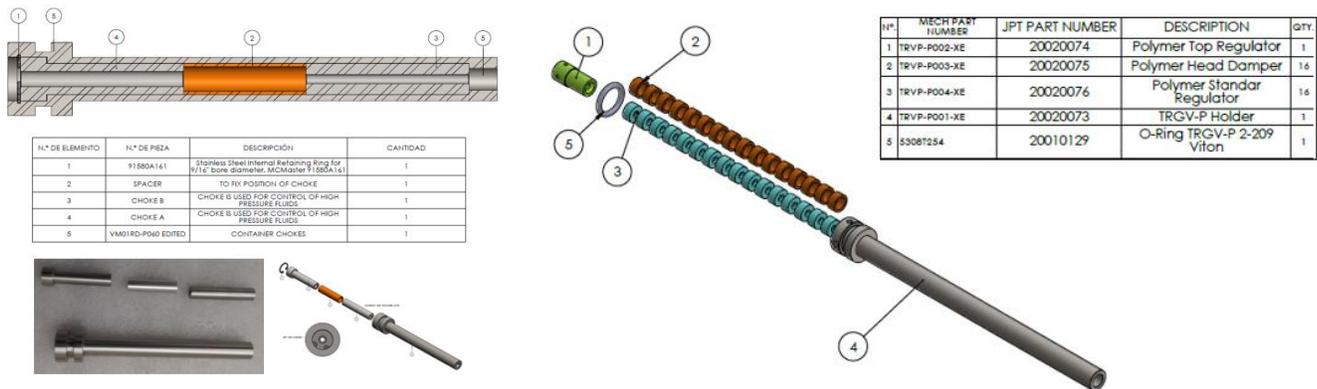


Figura 3. Módulos de control de Inyección estándar y de Polímeros

FUNDAMENTO TEORICO Y DESARROLLO DEL MODELO Y CURVAS PARA PREDICCIÓN Y RESPUESTA

El fundamento teórico del funcionamiento de los módulos de control usando reductores (“chokes”) múltiples en tándem se basa en la ley de Poiseuille la cual permite relacionar cambios en la presión con respecto a cambios en el flujo en tubos cilíndricos ^(10,11) como se muestra en la Figura 4. La fuerza de fricción o “drag force” permite balancear las condiciones, en el caso particular de los reductores en tándem se considera la viscosidad del agua o del polímero siendo los parámetros principales de control rugosidad, fricción y longitud.

$$\text{POISEUILLE'S LAW}$$

$$Q = \frac{\Delta P r^4 \pi}{\eta L 8}$$

Figura 4. Ley de Poiseuille para tubos cilíndricos (3)

La combinación de reductores para controlar mayores caídas de presión diferencial con un caudal similar se hace combinando reductores múltiples en tándem intercalando cámaras de expansión que tienen un efecto de amortiguar los cambios en presión y caudal. El sistema usado de cámaras de expansión es tipo “dámper” y ha sido usado en motores de dos tiempos y en la salida de gases de los mismos ⁽¹²⁾

como se muestra en la Figura 5. Existen otras aplicaciones del sistema que básicamente permite una reducción de velocidad con los beneficios asociados de estabilización del flujo y reducción de la fricción asociada aumentando el tiempo de vida del dispositivo.

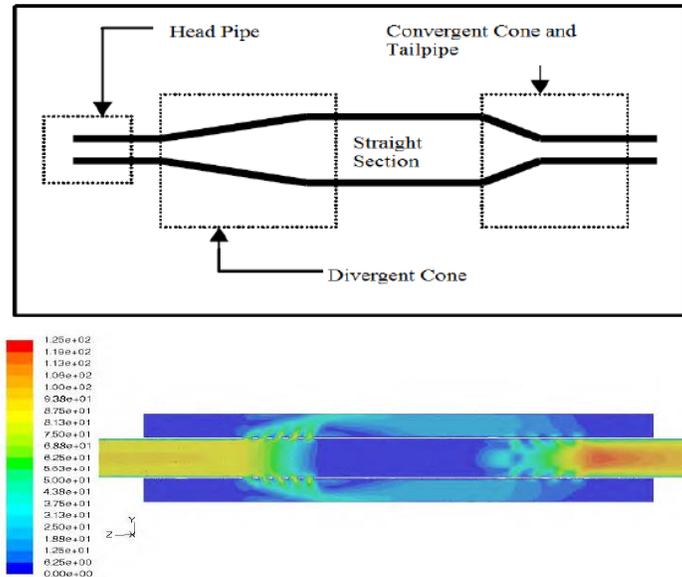


Figura 5. Componentes de una cámara de expansión y análisis por elementos finitos del flujo

En el caso particular del diseño de los reductores múltiples en tándem, se realizaron pruebas de campo con un módulo preliminar diseñado a partir de la respuesta teórica para un reductor como se muestra en la Figura 6, en el caso particular del dispositivo diseñado para campo se utilizaron inicialmente tres reductores y dos cámaras de expansión, se obtuvo una respuesta diferente a la respuesta teórica que había sido observado y se describe en muchas aplicaciones como el coeficiente de flujo para levantamiento por gas del líquido.

Choked Flow of Control Valves

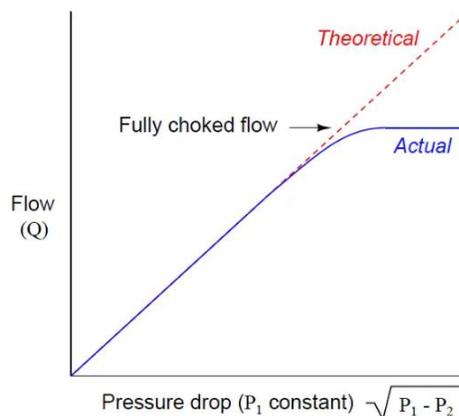


Figura 6. Respuesta teórica de un regulador (<https://instrumentationtools.com/choked-flow-of-control-valves/>)

Los datos de campo permitieron obtener la regresión polinómica para encontrar la mejor aproximación como se muestra en la Figura 7. Se realizó la comparación de datos con simulaciones basadas en análisis de elementos finitos usando el programa de diseño mecánico Solidworks marca registrada de Dassault Systèmes lo cual permitió entender cómo afectan a la respuesta del sistema la rugosidad y fricción de los reductores además de la longitud de los mismos. Se integró el efecto de la cámara de expansión en el sistema la cual permite amortiguar cambios en el flujo mejorando la respuesta del sistema.

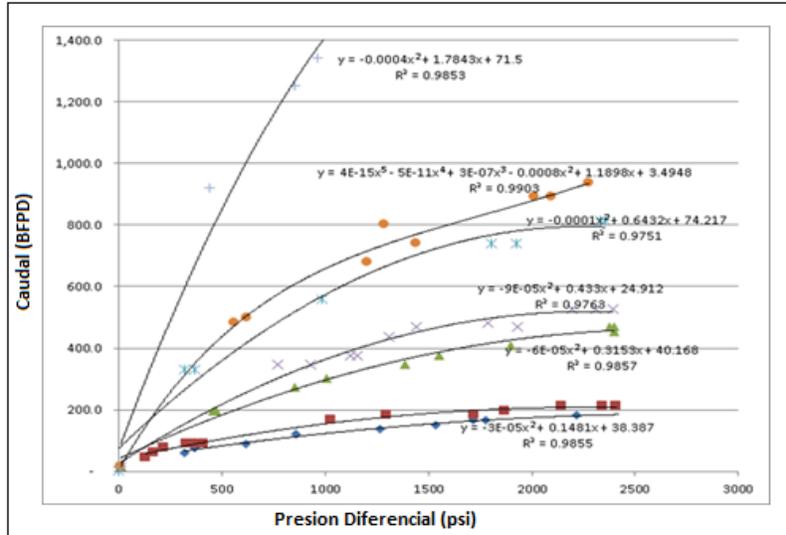


Figura 7. Datos obtenido vs regresión y modelo desarrollado

Se realizaron simulaciones para cada combinación de reductores en elementos finitos estableciendo el polinomio del modelo para cada combinación. La simulación específica para la combinación de un sistema con reductor superior de 3mm y reductor inferior de 3mm de longitud 2 pulgadas y cámara de expansión de 3 pulgadas se muestra en la Figura 8. El uso de simulaciones y modelamiento con elementos finitos permitió optimizar el diseño con mayor simplicidad y respuesta similar a dos reductores y una cámara de expansión encontrando el mejor modelo y la influencia de la fricción y rugosidad en el modelo y respuesta del sistema. La respuesta final del modelo permitió reproducir los datos experimentales con el modelo generando las curvas de diámetros adicionales y permitiendo la expansión del sistema de manera sistemática y coherente.

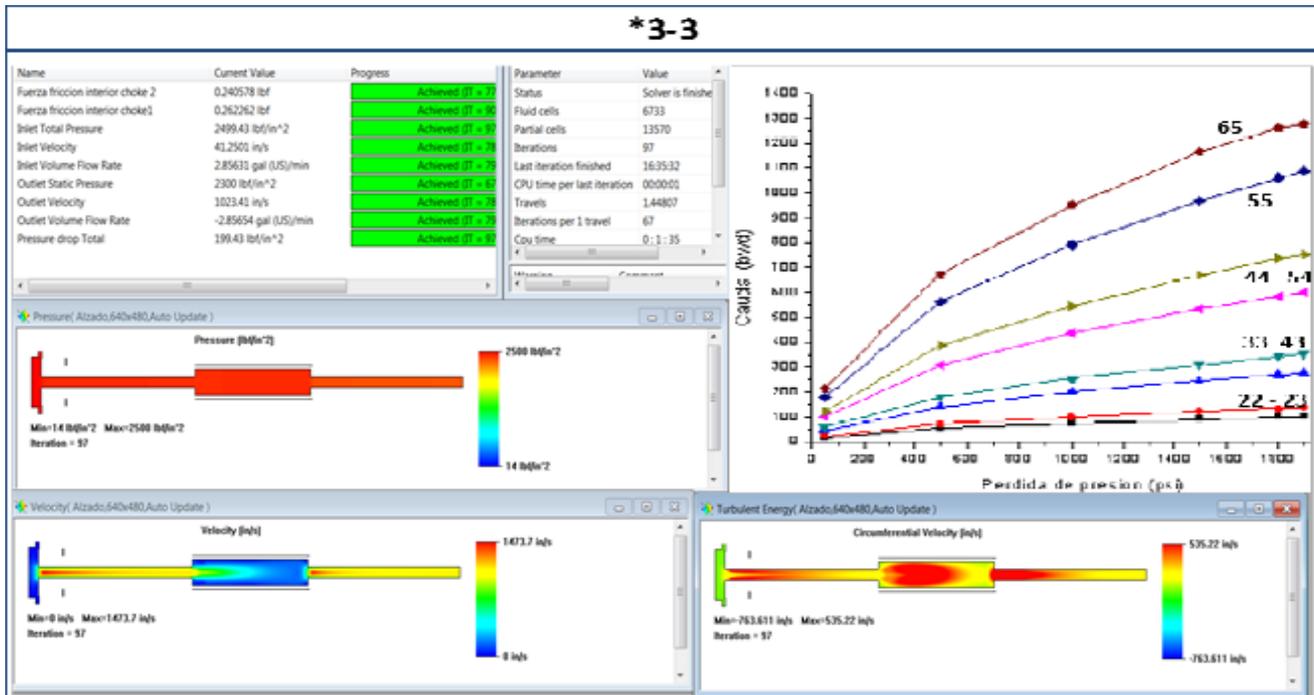
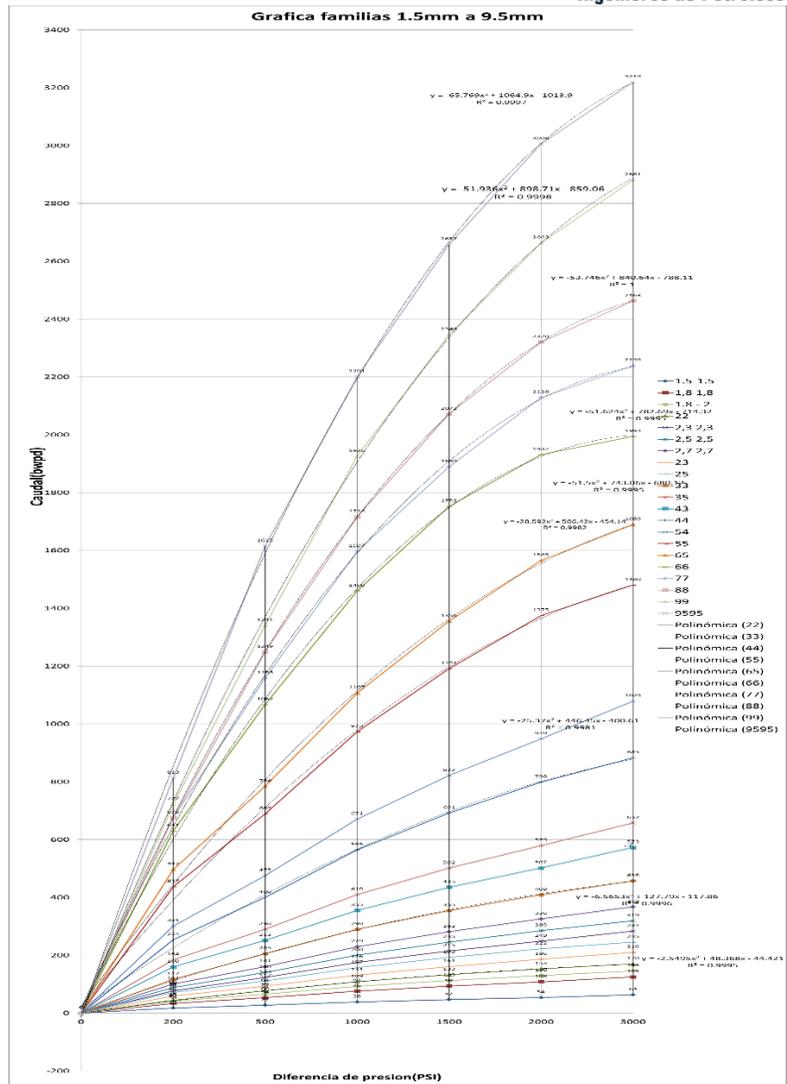
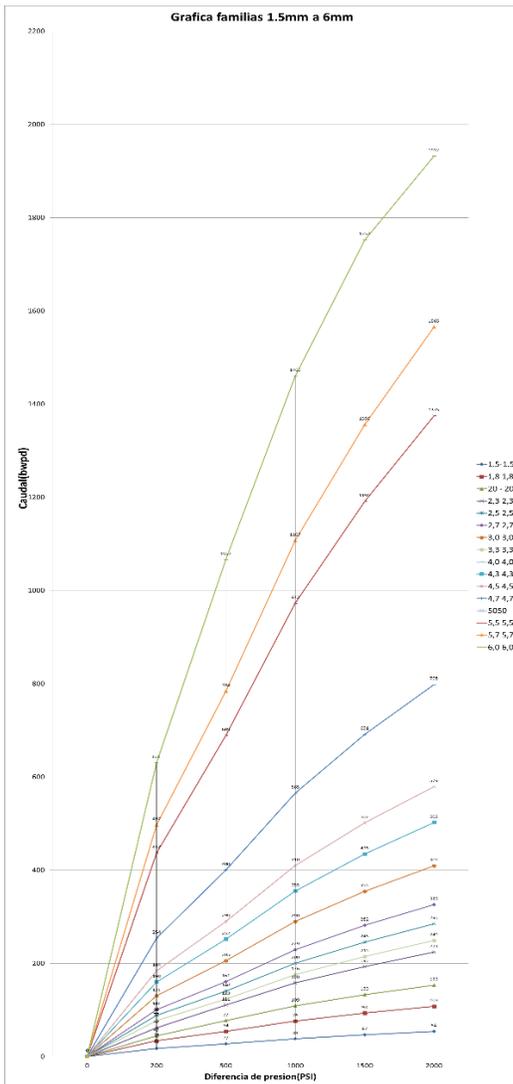


Figura 8. Modelamiento con elementos finitos de la respuesta del sistema logrando respuesta similar a datos experimentales

Posteriormente se expandieron las opciones para diferentes caudales y presiones diferenciales obteniendo una familia de curvas y un software que permite diseñar y predecir la respuesta del módulo de control de inyección en tándem estándar como extendido (Figura 9).



Grafica 9. Graficas de respuesta del sistema para e modulo estándar y el modulo extendido (derecha).

Los resultados que se muestran en la Figura 9 indican que el modulo estándar permite regular utilizando diferentes combinaciones de orificios hasta 1800 BFPD y unos 2500 psi mientras en modulo extendido permite regular hasta 3300 BFPD con presiones diferenciales de hasta 4000 psi. La última versión de la válvula permite reductores de hasta 14 mm que teóricamente deberían permitir extender el rango de regulación en caudal y presión diferencial aún más para aplicaciones en superficie o pozos muy depletados con zonas de alta permeabilidad que pueden tomar caudales elevados. Considerando la metodología innovadora asociada al uso de reductores en tándem y el desarrollo de un modelo que permite predecir y planificar de esta manera el diseño de los pozos inyectores ⁽¹³⁾.

Posteriormente en 2018/2019 se hizo el desarrollo del sistema para polímeros haciendo un diseño preliminar el cual fue validado en simulación tipo CFD para polímero tipo HPAM hasta 1000 cp de viscosidad determinando el daño y los factores que influyen en el mismo, el proceso fue documentado y publicado en 2020 ⁽¹⁴⁾. Las pruebas de campo indicaron una respuesta aceptable en daño y caudal. El daño fue medido determinando el cambio de viscosidad del polímero en agua antes y después de la válvula en las facilidades de Ecopetrol y Oxy en campo La Cira Infantas para diferentes caudales y diferenciales de presión con una bomba especialmente controlada. Se hicieron mejoras y se hizo una segunda secuencia de mediciones mostrando mejoría al disminuir el daño aumentando el rango dinámico. El sistema demostró ser predecible y repetible y permite seleccionar los reguladores para un daño a diferentes concentraciones de polímero y para diferentes caudales y presiones diferenciales. El diseño utilizado se presenta en la Figura 10.

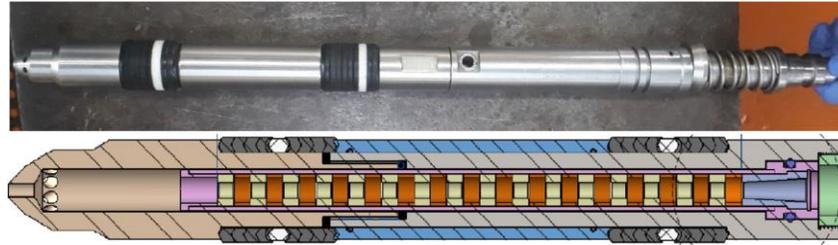


Figura 10. Válvula para polímeros diseñada y reguladores internos en tándem para polímeros

En general, el daño está relacionado a los siguientes parámetros para el sistema tándem y en general:

- 1) Diferencia de presión entre la entrada y salida de las secciones: <120psi
- 2) Régimen de Flujo y Velocidad del fluido: < 50FPM en velocidad, se convierte a caudal utilizando la constante PC
- 3) Fricción y rugosidad – Es importante el proceso de manufactura teniendo efecto en secciones largas como espirales
- 4) Ángulos y bordes en las formas mecánicas: Diámetro >4mm / se recomienda forma cónica
- 5) Cambios abruptos de condiciones PVT

La respuesta en presión y caudal del sistema después de modelamiento se muestra en la Figura 11. Se puede observar como la presión va cayendo por etapas en cada una de las secciones cumpliendo las premisas para minimizar el daño

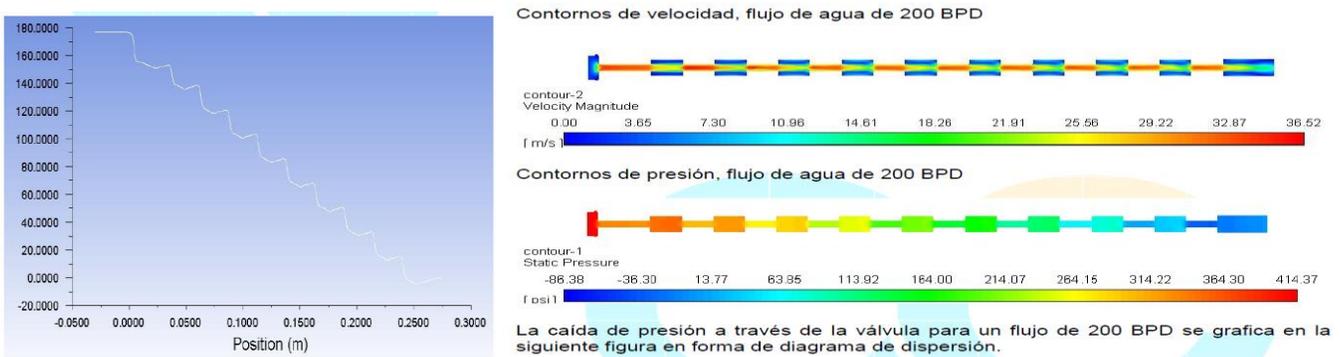


Figura 11. Simulación de respuesta de reductores en tándem a la presión y caudal

En teoría el uso de más secciones debería permitir mayores diferenciales pero la respuesta del sistema es similar en caída de presión vs caudal al sistema desarrollado inicialmente y muestra después de 600 a 1000BFPD dependiendo del tamaño del reductor una respuesta plan con respecto a incrementos de presión que se reflejan en mayores daños a la salida del módulo como se muestra en la Figura 12. En cuanto al caudal es interesante observar el efecto de las cámaras de expansión, siendo mayor el daño en el primer regulador.

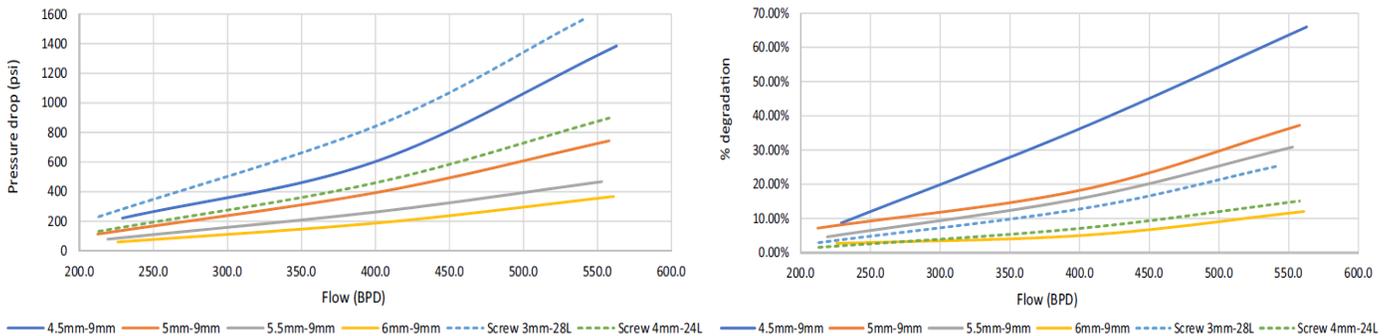
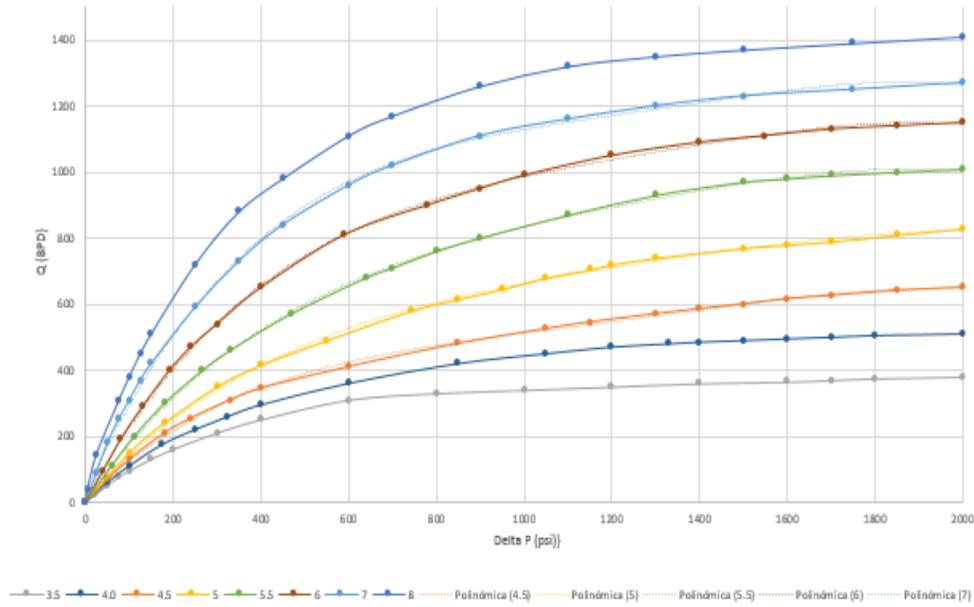


Figura 12. Respuesta experimental del módulo tándem para polímeros (14)

La respuesta final del modelo desarrollado para el sistema se presenta en la Figura 13 y se basa en las pruebas realizadas y el modelo de degradación desarrollado para polímero HPAM. Los límites caudal para una degradación menor a 30% están en aproximadamente unos 800BFPD para una presión diferencial variable de 300 a 1200psi. Se está trabajando en un módulo diferente para lograr mayores caudales y diferenciales manteniendo el daño por debajo del 30% como máximo, idealmente menor a 10%.

TRGV-P - Q (BFPD) vs DeltaP (PSI) - 500ppm



TRGV-P - Q (BFPD) vs % Degradacion - 500ppm

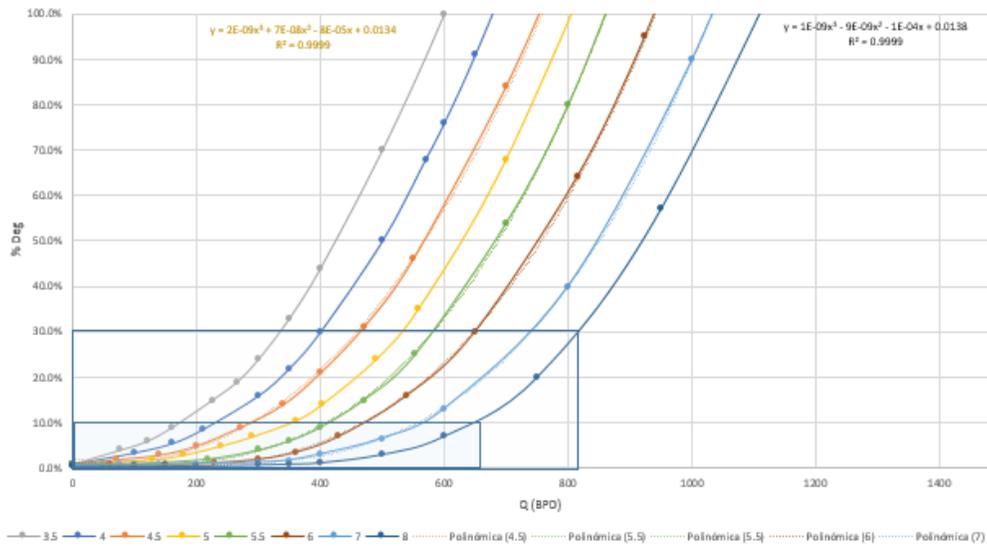


Figura 13. Curvas de caudal vs presión diferencial y daño vs caudal para el modulo en tándem para polímeros

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos en general han sido positivos, se hicieron pruebas controladas del módulo de regulación en tándem en algunos pozos mostrando buenos resultados en cuanto a estabilización del caudal de inyección especialmente cuando se presentan variaciones en presión de inyección en cabeza o superficie. En el sistema tradicional con reguladores variables cambios tan pequeños cercanos 50 psi se reflejaban en cambios del caudal de hasta 200 BFPD como se aprecia en la Figura 14.

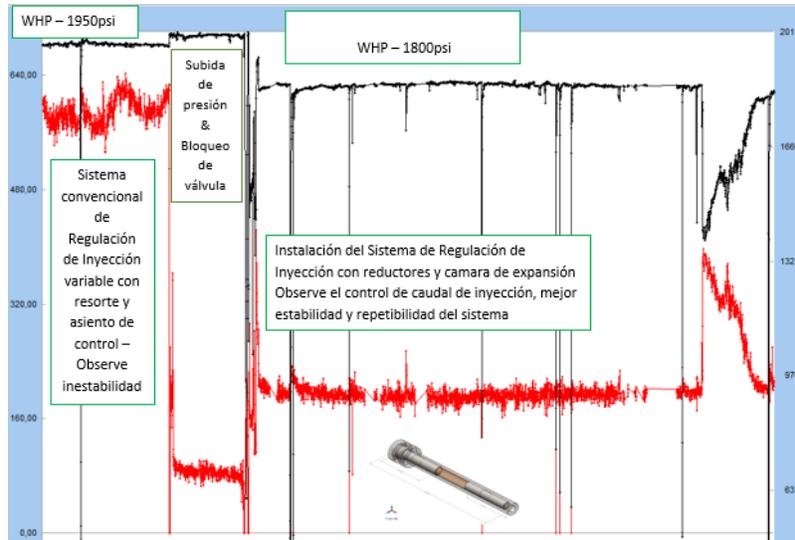


Figura 14. Respuesta típica de sistema de reguladores en tándem vs sistema tradicional variable

DISCUSION Y RECOMENDACIONES

Se hicieron pruebas de desgaste del módulo y se estimó el tiempo útil del reductor en 8 años en condiciones de bajo caudal y baja presión diferencial, se ha encontrado que en promedio los reductores pueden durar hasta 2 años en condiciones extremas mientras el sistema convencional no pasa de varios meses.

El uso de acero no magnético y el sistema en tándem con cámara de expansión han probado ser eficientes y optimizar el proceso de inyección reduciendo el costo y maximizando los beneficios o cual es de mucha importancia en campos maduros donde cualquier mejora al sistema puede determinar si el campo es rentable o llega a su límite económico.

Igualmente se han podido lograr beneficios que son adicionales al costo mismo del sistema como son mayor estabilidad en la inyección se refleja en mejoras en la producción de manera estable y medible, mayor tiempo de vida de los equipos se refleja en menores intervenciones con línea de acero para hacer servicio a válvulas y mandriles que salen de las condiciones requeridas de inyección, menor cantidad piezas y componentes se reflejan en menor inventario y el uso de vástagos para proteger el cuero interno de la válvula ha permitido reducir el costo de reemplazo y repuestos al ser requeridos únicamente reductores de reemplazo. La suma de la mayor eficiencia puede reflejarse en un 30 a 50% de optimización promedio del proceso de inyección y la eficiencia que se refleja en costos directos.

Se ha observado que es importante el uso de módulos de reductores fijos tándem con cámaras de expansión en el pozo sin mezclar sistemas de inyección, especialmente si estos son variables, ya que se ha observado en las simulaciones y en la práctica que el pozo encuentra su punto de balance y estabilidad con os reguladores tándem o TRGV (Tandem Regulator Valve). Igualmente al ser más robustos que otros sistemas, es importante asegurar el sistema de sello para evitar fugas en especial cuando hay zonas ladronas que requieren mayor control con reductores más pequeños y mayores diferenciales.

CONCLUSIONES

En general el sistema ha mostrado ser altamente confiable, se han instalado cerca de 1000 módulos los cuales han operado dentro de los requerimientos y diseño de caudales requeridos de acuerdo a las condiciones del yacimiento y presiones diferenciales conocidas. En promedio los reguladores tienen una duración de 2-4 años lo cual es muy positivo y permite reducir los costos asociados a servicios de línea para instalación y remoción.

En general el sistema ha cumplido el objetivo de mejorar la eficiencia a un precio menor de os equipos sin contar la extensión del tiempo de vida de cada módulo de manufactura nacional, este hecho combinado con mejoras en la eficiencia de todo el proceso se refleja en mayor rentabilidad en campos maduros en Colombia. La introducción de la válvula completa permite extender aún más los tiempos de reemplazo de reductores, extender el rango de operación y permite la operación con polímeros como fluido de inyección.

Nuevas tecnologías seguramente van a ser necesarias para continuar el proceso de mejoramiento de los sistemas de inyección como la introducción de válvulas que permitan medir presión de yacimiento en modo estático o presión y caudal de inyección en modo dinámico;

mejoramiento de los módulos de control para polímero que permitan un daño controlado a mayores caudales y mayores diferenciales de presión. La innovación reflejada en patentes y nuevos procesos introducida por pequeñas empresas es importante para los nuevos retos de la industria que se reflejan en recuperación con procesos secundarios, manejo de agua, optimización de procesos y costo. El apoyo de Ecopetrol y en general las operadoras a las empresas que se arriesgan a emprender nuevos caminos y probar otras tecnologías mejorando los procesos es importante y beneficia a todos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Ecopetrol S.A por el permiso otorgado para la presente publicación.

REFERENCIAS

- (1) Amaya, Mauro et al: Casabe, revitalización de un campo maduro, Oil Field Review, Schlumberger, Primavera 2010
- (2) Ecopetrol: De lo Social a lo Técnico, Proyecto Cira Infantas. Primer Simposio Campo Escuela Universidad Industrial de Santander UIS, 2007
- (3) Surles, Jack: US2963036 - Means to passing fluid thru tubing walls. USPTO Sun Oil Company. Dec1960
- (4) Brown, Norman: US3101735 - Side Pocket Mandrel with Automatic Valve. USPTO US Industries. Aug1963
- (5) Terrak, Ben: US US5042584 – Stacked Water Regulator and Method of Use. USPTO McMurray Oil Tools. Aug1991
- (6) Pringle et al: US6227302 – Apparatus and Method for controlling fluid flow in a wellbore. USPTO Cameo Intl. May2001
- (7) Moreno, Jorge: US7784553B2 – Downhole Water Flow Regulator. USPTO Weatherford/Lamb. Aug2010
- (8) AONG Manager: What does choke valve mean. Jul2018, <https://www.arab-oil-naturalgas.com/what-does-choke-valve-mean/>
- (9) Navas, E., Jimenez, R., Caldera, G., Ortiz, J., Agudelo, O., Hernández, M., López, J., Mora, G. (2020): Análisis integrado del proceso de inyección de agua en el campo Casabe: una estrategia para reducir la incertidumbre y mejorar la eficiencia de recobro. Revista Fuentes, el reventón energético, 18(2), 123-133, <https://doi.org/10.18273/revfue.v18n2-2020008>
- (10) Gudmundson, J.R.: Pressure Drop in Petroleum Production Operations. Norweigan Institute of Technology. Trondheim. Feb1995
- (11) Tahmassebi, Amirhessam: Fluid Flow through Carbon Nanotubes and Graphene Based nanostructures. University of Akron. Research Gate. Aug2015. <https://www.researchgate.net/publication/315444340>
- (12) Pengavhane, S. et al: Experimental and CFD Analysis of a Perforated Inner Pipe Muffler for the Prediction of Backpressure. India, Pune. International Journal of Engineering and Technology (IJET). ISSN : 0975-4024 Vol 5 No 5 Oct-Nov 2013
- (13) Prada, Alvaro, Perez Mora, Gerson, Torne, Juan P.: NC2016/0001122 - SISTEMA MÚLTIPLE DE REDUCTORES FIJOS EN SERIE PARA CONTROL DE PRESIÓN Y DE CAUDALES EN VÁLVULAS DE INYECCIÓN DE AGUA PARA SARTAS SELECTIVAS. Superintendencia de Industria y Comercio SIC - Resolución N° 41911. Colombia. Sep2019
- (14) Diaz, F.A., Torne, Juan P., Prada, Alvaro, Perez Mora, Gerson: Shear degradation model of HPAM solutions for the design of regulator valves in polymer flooding EOR. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology (2020) 10:2587–2599. May2020. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00905-5>