

Formato de Presentación

ACIPET

Diseño de sartas de inyección de agua para recobro mejorado en pozos con arquitectura Slim Hole

Autor(es): Melo Abdala Andrés, Ecopetrol S.A., Molano Puerto David, Ecopetrol S.A., Artunduaga Paris María, Ecopetrol S.A., Mejía Tito Javier, Ecopetrol S.A., Dallos Hugo, Baker Hughes

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 papel de la perforación y el completamiento es crítico en la optimización de los procesos de inyección de agua para recobro mejorado, siendo cada día más retador lograr reducciones de costos, mejorar los factores de recobro, obtener información y adicionalmente, lograr descarbonizar nuestras operaciones.

Como metodología para lograr los objetivos, se desarrolló un nuevo estado mecánico en diámetros más pequeños o "Slim Hole" (9-5/8" x 7" x 5"), el cual, para viabilizar su aplicabilidad desde el completamiento, requirió la evaluación de los dispositivos de inyección de agua disponibles en la industria. Posteriormente se mejoraron las herramientas de inyección de agua seleccionadas las cuales permiten regular el caudal inyectado por intervalo y reducir el riesgo operativo durante la ejecución y operaciones necesarias durante la vida útil del pozo (cambio de regulación), además de incorporar sistemas de adquisición de datos (sensores de presión y temperatura).

Adicionalmente y previo a la expansión de esta aplicación, se puso en marcha un piloto de instalación de una sarta de inyección selectiva en un pozo existente con el fin de evaluar el desempeño de las herramientas durante su instalación, así como la capacidad de los sensores de adquirir los datos de presión, temperatura y caudal.

Este diseño combinado de construcción de pozo permitirá la reducción los costos de (CAPEX) en un 5 a 6%, además de una reducción de costos en las operaciones de adquisición de datos (registros de ILT) en un 80 a 90%. Como beneficios adicionales, se contemplan una reducción de emisiones de 380 Tn CO₂ por pozo.

Este nuevo desarrollo permitirá una mejor implementación a futuro de patrones de inyección de agua en sistemas de recobro mejorado más efectivos y eficientes, optimizando costos de CAPEX y OPEX, reduciendo huella de carbono y permitiendo un mejor gerenciamento del yacimiento a partir del análisis y procesamiento de la información, generando nuevos flujos de trabajo que permitan finalmente incrementar el factor de recobro.

Matriz de selección y criterios de evaluación

Las operaciones de recobro mejorado mediante el proceso de inyección de agua requieren control y seguimiento de los volúmenes inyectados en cada uno de los intervalos, de manera que se pueda predecir la respuesta en los pozos influenciados en cada patrón de inyección, evitando fenómenos de canalización que dejan atrás volúmenes importantes de reservas.

Los sistemas selectivos de inyección de agua están diseñados para permitir la inyección de fluidos desde cabeza de pozo a diferentes

zonas o yacimientos empleando una misma sarta de inyección (Figura 1). Cada zona se segmenta empleando empaques de asentamiento mecánico o hidráulico. El fluido es bombeado desde superficie a través de la tubería e inyectado a cada intervalo a través de los reguladores, los cuales son los encargados de ajustar y controlar el volumen inyectado independiente de la presión en cabeza o la presión de formación. El sistema de regulación debe tener la capacidad de compensar los cambios de presión diferencial y mantener un volumen constante en cada zona.

Existen diferentes sistemas de herramientas que permiten realizar el proceso de inyección de agua, estos sistemas cuentan con tres componentes principales, a) *dispositivo de alojamiento del regulador de flujo (DARF)*, este es permanente y hace parte de la sarta de inyección de agua, permite la comunicación entre la sarta de inyección y la formación a través de los puertos de flujo, b) *herramienta de aislamiento (HA)*, su función es aislar de manera temporal los puertos de comunicación del dispositivo de alojamiento (a) permitiendo bajar la sarta de inyección a la profundidad de asentamiento y evitando un asentamiento prematuro de los empaques hidráulicos y por último c) *herramienta de regulación de inyección (HRI)*, el cual tiene como función regular los volúmenes de inyección de agua de manera precisa y con la mínima caída de presión posible.

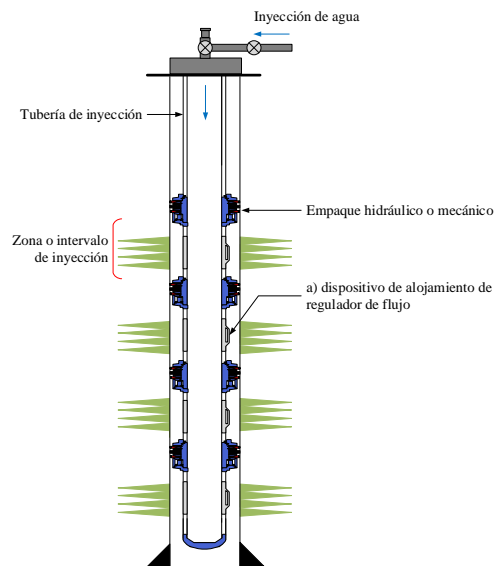


Figura 1. Esquema pozo inyector de agua selectivo

Existen diferentes sistemas de inyección de agua desarrollados, siendo los mandriles excéntricos y válvulas reguladoras, la alternativa más empleada a nivel global, adicionalmente se dispone de niples de inyección con válvulas de inyección regulables tipo “tubing mounted”.

Teniendo en cuenta como objetivo la implementación de un estado mecánico tipo Slim Hole (Figura 2), se estableció un proceso de selección y evaluación de las herramientas y dispositivos de inyección de agua disponibles, estableciendo los siguientes criterios para el conjunto de dispositivo de inyección y la herramienta en la cual se instalaría (mandril o niple de inyección).

Criterios de selección

- *Diámetros externo e interno y longitud:* los diámetros externos del *DARF* deben permitir su instalación dentro de un revestimiento de 5” 15 lb ft (diámetro interno de 4.408”, drift 4.283”) generando el menor arrastre durante la operación de instalación, adicionalmente deben tener un diámetro interno equivalente al diámetro interno de la tubería de inyección de 2 3/8” 4.7 lb/ft (1.995”) permitiendo el paso de herramientas de registros de producción para la medición y monitoreo de los caudales de inyección para evaluación y ajuste de la regulación de los *HRI* y por último, permitir la instalación de al menos 4 intervalos de regulación (mínima rigidez de la sarta).
- *Rango de tensión (HRI):* se debe contar con el mayor rango de tensión disponible en la *HRI*, esto a fin de incrementar el rango de trabajo en las operaciones de recuperación del dispositivo como una acción de mitigación al riesgo de atrapamiento o pesca en fondo.
- *Capacidad de regulación:* la *HRI* debe tener la capacidad de ajustar y controlar el volumen inyectado independiente de la

presión en cabeza o la presión de formación. El sistema de regulación debe tener la capacidad de compensar los cambios de presión diferencial y mantener un volumen constante en cada zona.

- *Capacidad de adquisición de data:* con el fin de mantener el monitoreo de los caudales de inyección por cada intervalo y ajustar la caída de presión (ΔP_{HRI}) es necesario contar con la capacidad de adquirir datos de caudal, presión y temperatura.
- *Riesgo de intervención (sistema):* Este criterio de evaluación es cualitativo (alto, medio y bajo) y se debe evaluar según la experiencia adquirida con los diferentes sistemas, cual de todos ofrece el menor riesgo operativo en sus diferentes fases, instalación inicial, recuperación de *HA* e instalación de *HRI*.

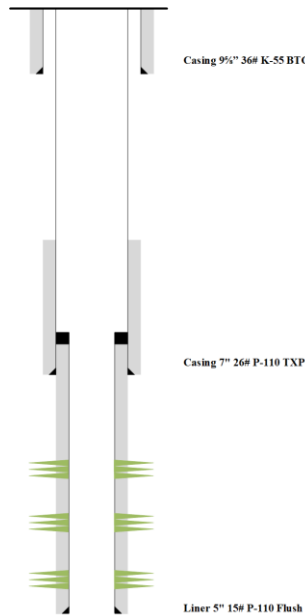


Figura 2. Estado mecánico pozo Slim Hole

Con los criterios arriba establecidos se procedió a elaborar una matriz de selección para los diferentes sistemas, expresada en la Tabla 1.

	Criterio de evaluación	Valor	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
<i>HRA</i>	Diámetro externo (pulgadas)	4.158" (1/8" por debajo del drift)			
	Diámetro interno (pulgadas)	1.995" Diámetro interno tubería de inyección – 2 3/8" 4.7 lb/ft			
	Longitud (pies)	+/- 8			
<i>HRI</i>	Rango de tensión (lbs)	$\geq 36,000$			
	Capacidad de regulación	Requerida			
	Capacidad de adquisición de data	Requerida, presión, temperatura y caudal			
<i>Sistema</i>	Riesgo operativo	Bajo			

Tabla 1. Matriz de criterios de evaluación para sistemas de inyección de agua

A continuación, se presentan las características técnicas de cada uno de los sistemas evaluados, *sistema 1* – Mandril de inyección de

Diseño de sartas de inyección de agua para recobro mejorado en pozos con arquitectura Slim Hole

agua excéntrico, válvula de regulación de 1,5” y dummy valve de 1,5”, *sistema 2* – Mandril de inyección de agua excéntrico, válvula de regulación de 1.0” y dummy valve de 1.0” y *sistema 3* – niple de inyección, válvula regulable de 1.87” y camisa de aislamiento de 1.87”

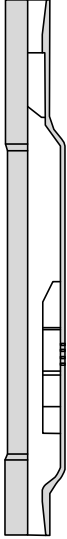
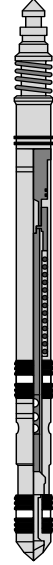
Mandril de inyección de agua	Característica	Valor	Válvula de inyección	Característica	Valor
	Diámetro externo (pulgadas)	+/- 4.740		Rango de tensión (lbs)	+/- 36,000
	Diámetro interno (pulgadas)	1.995		Capacidad de regulación	Sistema de platina perforada y resorte
	Longitud (pies)	+/- 10		Capacidad de adquisición de data	Indirecta – Registros ILT y DTS

Tabla 2. Características técnicas - *sistema 1* – Mandril de inyección de agua excéntrico, válvula de regulación de 1.5” y dummy valve de 1.5”

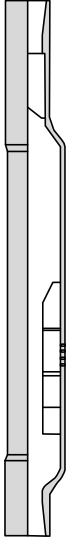
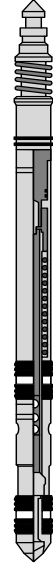
Mandril de inyección de agua	Característica	Valor	Válvula de inyección	Característica	Valor
	Diámetro externo (pulgadas)	+/- 4.260		Rango de tensión (lbs)	+/- 13,200
	Diámetro interno (pulgadas)	1.995		Capacidad de regulación	Sistema de platina perforada y resorte
	Longitud (pies)	+/- 7.8		Capacidad de adquisición de data	Indirecta – Registros ILT y DTS

Tabla 3. Características técnicas - *sistema 2* – Mandril de inyección de agua excéntrico, válvula de regulación de 1.0” y dummy valve de 1.0”

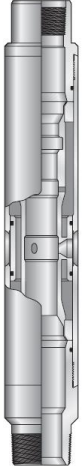

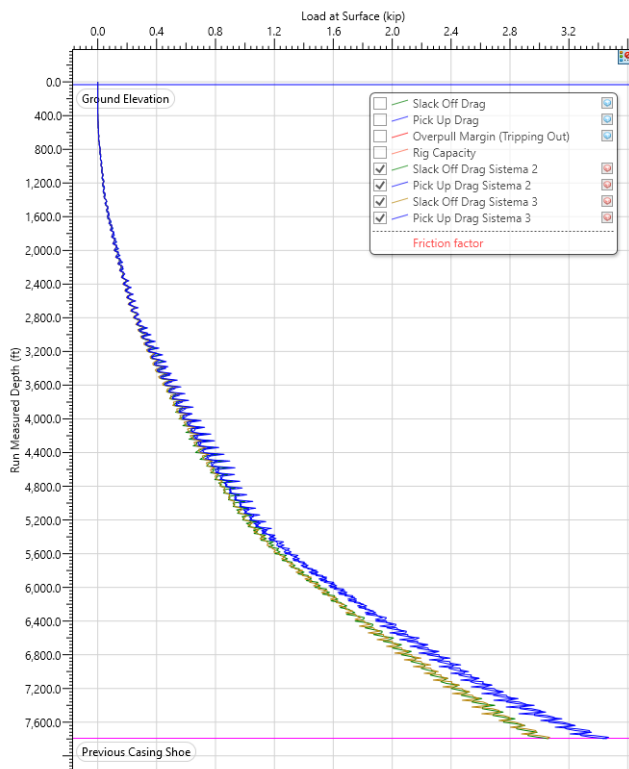
Niple de inyección	Característica	Valor	Válvula regulable	Característica	Valor
	Diámetro externo (pulgadas)	+/- 3.750		Rango de tensión (lbs)	+/- 56,000
	Diámetro interno (pulgadas)	1.995		Capacidad de regulación	Sistema de platina perforada y resorte
	Longitud (pies)	+/- 5		Capacidad de adquisición de data	Indirecta – Registros ILT y DTS*

Tabla 4. Características técnicas - sistema 3 – niple de inyección, válvula regulable de 1.87” y camisa de aislamiento de 1.87”

Según las características técnicas de cada uno de los componentes de los sistemas evaluados, se llevaron a cabo simulaciones de torque y arrastre para determinar el comportamiento de la instalación de la sarta de inyección en un pozo tipo a una profundidad de 7,632 ft con una desviación máxima de 27°, empleando un factor de fricción para hueco revestido de 0.25 y considerando 4 intervalos de inyección selectiva (empaque + *DARF*). Debido al diámetro externo del sistema 1, el cual se encuentra 0.457” por encima del drift del revestimiento de 5” 15 lb/ft, no es posible simular o considerar estas herramientas, por lo tanto, se descartaron automáticamente. A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones para los sistemas 2 y 3:



	Sistema 2	Sistema 3
Arrastre subiendo (klbs)	4.3	3.2
Arrastre bajando (klbs)	3.7	2.9

Figura 3. Factores de arrastre (subiendo y bajando) sistemas 2 y 3

3 vs. Profundidad

A pesar de existir una diferencia entre los arrastres de ambos sistemas, siendo ligeramente mayor el arrastre en el sistema 2, esto no es un impedimento para la instalación de estas herramientas en la sarta de inyección selectiva.

Se validaron igualmente las condiciones operativas de “buckling” helicoidal y sinusoidal en ambos sistemas (Figura 4a y Figura 4b), teniendo como resultado la inexistencia de efectos de “lock up” asociados con rigidez o diámetros externos que impidan llevar la sarta de inyección y accesorios a la profundidad deseada.

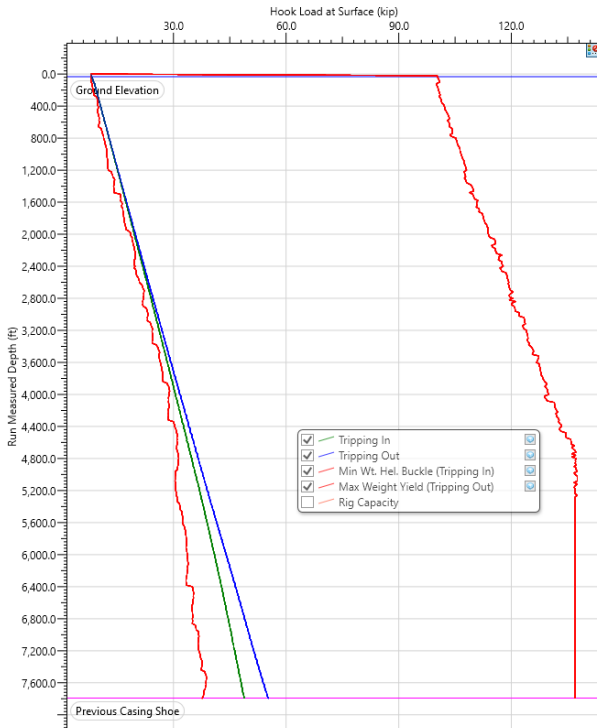


Figura 4a. Pesos subiendo y bajando vs. Profundidad - Sistema 2

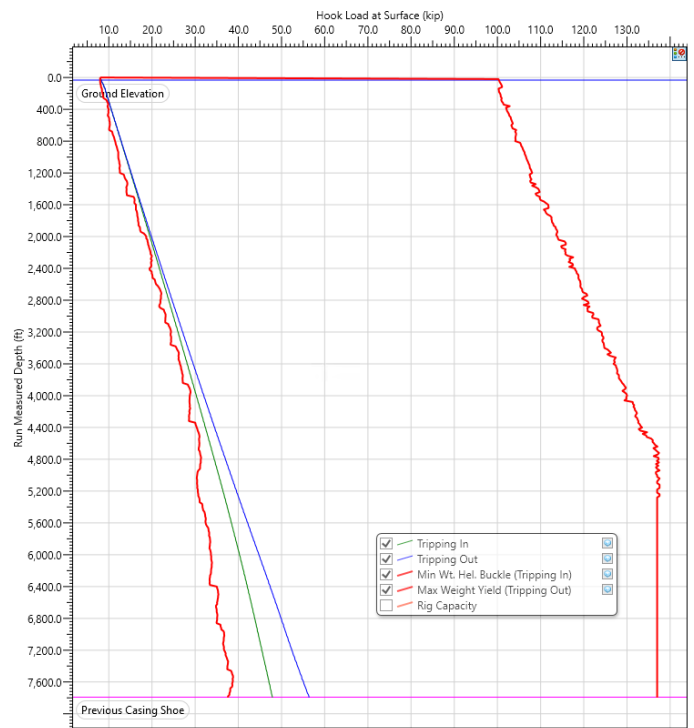


Figura 4b. Pesos subiendo y bajando vs. Profundidad - Sistema 3

Con la información y discusión arriba establecida, se completó la evaluación para los tres sistemas a continuación:

	Criterio de evaluación	Valor	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
<i>DARF</i>	Diámetro externo (pulgadas)	4.158” (1/8” por debajo del drift)	+/- 4.740	+/- 4.260	+/- 3.750
	Diámetro interno (pulgadas)	1.995”	1.995”	1.995”	No aplicable*
	Longitud (pies)	+/- 8	10’	7.5’	5’
<i>HRI</i>	Rango de tensión (lbs)	≥ 36,000	36,000	13,200	56,000
	Capacidad de regulación	Requerida	Si	Si	Si
	Capacidad de adquisición de data	Requerida, presión, temperatura y caudal	Indirecta – Registros ILT y DTS	Indirecta – Registros ILT y DTS	No aplicable*
<i>Sistema</i>	Riesgo operativo	Bajo	Alto	Medio	Bajo

Tabla 5. Matriz de criterios de evaluación para sistemas de inyección de agua

Como se puede evidenciar, las características técnicas del sistema 3 (niple de inyección, válvula regulable de 1.87" y camisa de aislamiento de 1.87") son más deseables, principalmente en cuanto al rango de tensión que permite una mayor maniobrabilidad en las operaciones de instalación y recuperación de los HRI. Sin embargo, este diseño por ser "tubing mounted", el HRI no se encuentra instalado en un bolsillo lateral como en el caso de los mandriles excéntricos, permitiendo el paso de herramientas de registros de producción o fibra óptica para distribución de temperatura o DTS ("Distributed Temperature Sensing"); por el contrario, se encuentra al centro de la tubería de inyección presentando una gran falencia en cuanto a los requerimientos para un pozo inyector de agua selectivo.

Esta restricción se manejó adicionando sensores de presión y temperatura memorizados como parte del HRI y a partir de esta mejora al diseño, el diámetro interno del sistema pierde importancia ya que no se requiere correr registros de inyección o ILT ("Injection Logging Tool") para adquirir datos de presión, temperatura de inyección, y caudales inyectados en cada intervalo. El nuevo diseño, incluyendo los sensores se representa en la figura No. 5.

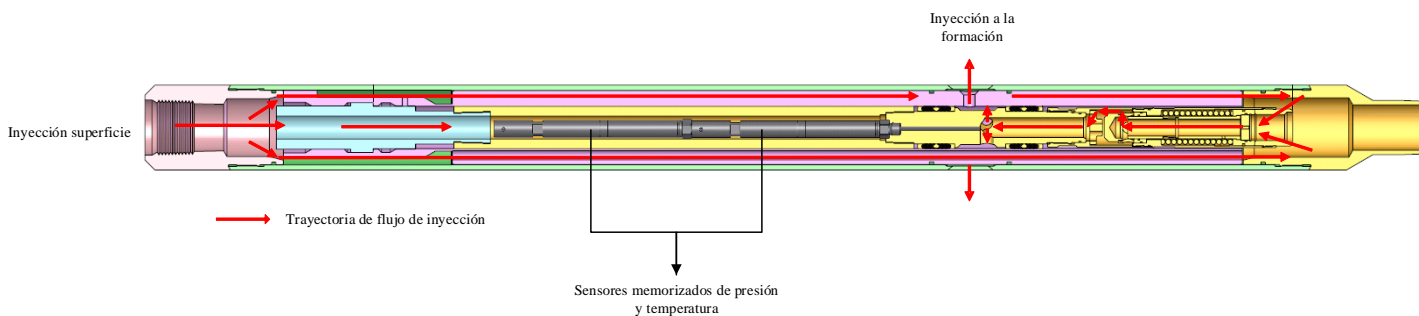


Figura 5. Sistema 3 – Niple de inyección, válvula regulable de 1.87" y camisa de aislamiento de 1.87" modificado incluyendo sensores de presión y temperatura memorizados

Implementación del piloto y evaluación de resultados

Previo a la implementación masiva de esta tecnología y con el objetivo de confirmar los beneficios teóricos del sistema, se implementó un piloto de campo, el cual consistió en la instalación de una sarta selectiva con cuatro intervalos de inyección en un pozo existente. Se establecieron una serie de KPI's ("Key Performance Indicators") que permitieran evaluar el desempeño del sistema. De igual manera se definieron los criterios de selección para el pozo candidato escogido, los cuales fueron establecidos de la siguiente manera:

- Desviación máxima 55°
- DLS ("Dog Leg Severity") máximo 3°/100 ft
- Condición de integridad óptima (barreras de aislamiento primarias y secundarias probadas)

Ya que no se cuenta en la actualidad con pozos perforados en estados mecánicos Slim Hole, se debía emplear un pozo en diámetro convencional (13 3/8" x 9 5/8" x 7") y se instalaría el sistema 3 empleando empaques de asentamiento hidráulico de 7" x 3 1/2" y crossovers de 3 1/2" x 2 3/8" para permitir la instalación de las DARF de 2 3/8". El estado mecánico instalado se presenta en la figura 6.

Los KPI's establecidos se evaluaron con un criterio excluyente, es decir cumplió o no cumplió y se dividieron en dos secciones, 1) validación de aseguramiento de calidad y control QAQC ("Quality Assurance and Quality Control") con el objetivo de certificar la calidad, integridad y desempeño de los componentes de acuerdo con unas pruebas de taller establecidas en conjunto con el fabricante de estas y 2) Operacionales. cuyo propósito era verificar la factibilidad de llevar el completamiento a fondo y adicionalmente, recuperar las HA e instalar las HRI según lo establecido en el plan de completamiento, así como la confirmación de la adquisición de la data de presión, temperatura y caudal. El resumen de los KPI's se encuentra, junto con su respectiva evaluación en la tabla 6.

- *Prueba de presión del sistema DARF- HA:* Se realizó una prueba de presión ajustando la bomba a 4000 psi por 30 minutos garantizando probar por encima de la máxima presión de asentamiento de los empaques de inyección.
- *Compatibilidad HA / Herramienta de corrida/recuperación y HRI /Herramienta de corrida/recuperación:* Se realizó la prueba de compatibilidad de HA, HRI y la herramienta de corrida/recuperación, realizando el procedimiento de recuperación e

instalación exitosamente, previo a la ejecución del trabajo.

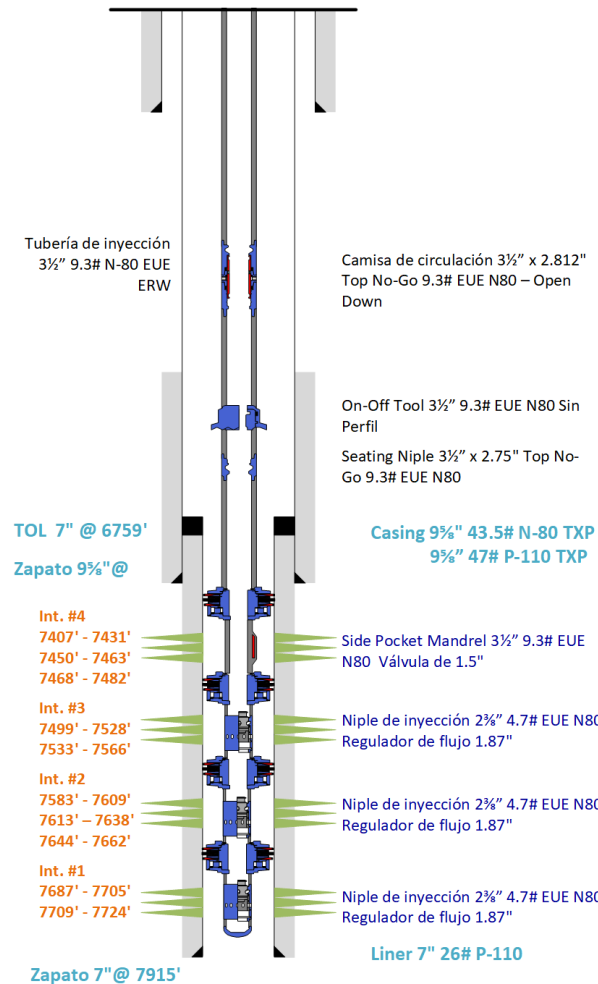


Figura 6. Estado mecánico instalado en el pozo piloto con el sistema 3

- *Generación curva de inyección de HRI y validación de adquisición de datos de los sensores P&T* Se realizó un banco de pruebas con el fin de validar el caudal y presión de regulación del sistema, instalando tres aperturas de válvula diferentes. Una vez instaladas, se presurizó el sistema iniciando con 200 psi hasta 1800 psi, registrando el flujo en cada etapa de presión. De acuerdo con los resultados obtenidos, el flujo resultante no varía significativamente con el aumento de presión, observándose una variación de +/- 10% del valor diseñado. Así mismo se validó la adquisición adecuada de datos de las memorias de presión y temperatura, mediante la generación de datos en el banco de pruebas y posterior descargue de datos y validación de su veracidad.
- *Integridad del sistema DARF- HA:* En la implementación del piloto se observó integridad de sistema, al presurizar exitosamente para la operación de asentamiento de los empaques y posteriormente para validar la integridad.
- *Cambio de HA por HRI:* Se realizó el procedimiento de recuperación e instalación exitosamente en los cuatro intervalos.
- *Adquisición de datos:* Se recuperaron exitosamente los sensores y se descargó la data, siendo posible realizar el análisis de la información adquirida.

No.	KPI's	Escala	Evaluación
1	Prueba de presión del sistema DARF – HA Prueba de presión a la máxima presión de prueba/asentamiento de los empaques de la sarta de inyección.	Cumple No Cumple	Cumple
2	Prueba de compatibilidad HA – Herramienta corrida/recuperación Se debe realizar la instalación - desinstalación en taller de la HA, empleando la herramienta de corrida/recuperación, suministrada por la compañía de slickline asignada al servicio	Cumple No Cumple	Cumple
3	Prueba de compatibilidad HRI – Herramienta de corrida/recuperación Se debe realizar la instalación - desinstalación en taller HRI empleando la herramienta de corrida/recuperación, suministrada por la compañía de slickline asignada al servicio	Cumple No Cumple	Cumple
4	Ajuste y generación curva de la HRI Se debe realizar una prueba de banco para validar el caudal y presión de regulación del sistema	Cumple No Cumple	Cumple
5	Validación de la adquisición de datos de los sensores de P&T de la HRI Se debe diseñar la prueba de banco para determinar la adquisición adecuada de datos de las memorias de P&T, así como la capacidad de descargar la data adquirida por los sensores	Cumple No Cumple	Cumple
6	Integridad del sistema DARF – HA El sistema debe mantener la presión de prueba y presión máxima de asentamiento de los empaques	Cumple No Cumple	Cumple
7	Cambio de HA por HRI Se debe validar la capacidad de recuperar a superficie HA e instalación de la HRI (con y sin sensores de P&T)	Cumple No Cumple	Cumple
8	Adquisición de datos Se debe poder recuperar a superficie HRI con sensores P&T, permitir la descarga de la información para su posterior análisis de variables de presión, temperatura y caudal.	Cumple No Cumple	Cumple

Tabla 6. KPI “Key Performance Indicators” para la evaluación del desempeño del sistema.

Lecciones aprendidas y mejores prácticas del piloto implementado

- Los procesos de QAQC permiten una mayor confiabilidad durante las operaciones de completamiento mitigando potenciales tiempos no operativos y fallas de las herramientas.
- Es necesario asegurar la igualdad de los niveles de fluido en el anular y la sarta de inyección durante la operación de bajada en el pozo, ya que la sarta baja completamente aislada. Esta práctica previene la activación prematura de los empaques de asentamiento hidráulico y la exposición de las HA a presiones de colapso o estallido innecesarias.
- Una vez se planea la recuperación de las HA e instalación de las HRI, se debe mantener la condición de sobre balance en el pozo (presión hidrostática > presión de formación). Esta condición operativa evita el aporte de hidrocarburos del pozo hacia el interior de la sarta de inyección, lo cual puede complicar la operación de instalación de las HRI.

Beneficios y ventajas del diseño

Al contar con un diseño Slim Hole para completar pozos inyectores selectivos de recobro mejorado, se pueden evaluar tres grandes aspectos los cuales cuentan con los siguientes beneficios identificados:

Beneficios técnicos:

- Se cuenta con un rango de tensión más amplio, 42.8 Klbs adicionales en la *HRI (herramienta de regulación de inyección)*, comparando los sistemas 2 y 3. Este rango representa una mayor maniobrabilidad en las operaciones de instalación y recuperación de los HRI, permitiendo aplicar mayor tensión en caso de atrapamiento por asentamiento de sólidos u otro tipo de depósito que dificulte su recuperación, mitigando potenciales rupturas de la herramienta que conllevaría a operaciones de pesca complejas, potencialmente abandonando intervalos de inyección.
- Adquisición de datos permanente. Al tener los sensores memorizados adquiriendo información de manera constante durante el periodo de duración de las baterías (alrededor de 6 meses), se puede contar con una gran cantidad de información del pozo inyector que permite evaluar el impacto de las variables que afectan la inyección, tales como, el cierre temporal de pozos productores, cambios en la P_{wf} , variaciones en la presión de inyección, entre otros, generando nuevos flujos de trabajo que permitan un mejor gerenciamiento del patrón de inyección.

Beneficios económicos

- Reducción en costos de construcción de pozo (CAPEX). Este tipo de pozos, al ser de menor tamaño, consumen una menor cantidad de materiales (tamaños de revestimiento y tuberías menores, menores volúmenes de cemento y lodos, etc.) y servicios además de ejecutarse en un menor periodo de tiempo. El estimado de reducción de costos es de 5% a 6%.
- Reducción de costos para adquisición de datos (OPEX). Al contar con los sensores memorizados, se torna innecesario realizar registros de inyección o ILT, por lo tanto, los ahorros en esta área pueden llegar a un 80 a 90%.

Beneficios ambientales

- Como se mencionó anteriormente, el hecho de reducir el tamaño de los tubulares permite una reducción en la huella de carbono. Se estima una equivalencia de 1.85 Ton de CO₂ por cada tonelada de acero producida ¹, por lo tanto, este diseño permite la reducción de alrededor de 380 Tn de CO₂ por pozo, generando un impacto positivo en las metas de descarbonización de la industria del petróleo y gas a nivel local y global.

¿Qué sigue?

Se proyecta la masificación del sistema seleccionado, con los beneficios anteriormente descritos. Adicionalmente, con la información adquirida, se diseñarán flujos de trabajo que permitan analizar la data y materializar un incremento en el factor de recobro, permitiendo un mejor gerenciamiento del patrón de inyección del campo.

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento a los ingenieros Liliana Guarín, Magda Montañez, Edwin Rodríguez y María Paula Polanía de Ecopetrol S.A. quienes hicieron parte del equipo que participó en este desarrollo.

¹ Christian Hoffmann, Michel Van Hoey, and Benedikt Zeume, “Decarbonization challenge for steel”, McKinsey & Company, abril 2020