

## ACIPET

### Retos de una aplicación de ESP invertida para manejo de agua

Raul Darío Jimenez, Pilar Aguinaga, Camilo González, Nestor Devia, Juan Camilo Pascuas, Baker Hughes Colombia; Mayra Lagos, Ecopetrol S.A.

Categoría: Marque con una "X"

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

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

#### Resumen

La situación actual de la industria petrolera y el recurrente cambio en los precios del petróleo, han impulsado a las compañías en buscar alternativas para reducir sus costos operativos y sus inversiones sin afectar sus operaciones y producción. Adicional buscan opciones innovadoras para incrementar su producción a través de mecanismos de recobro. Bajo este contexto, se toma como referencia una operación de Ecopetrol en los llanos Orientales de Colombia que ha decidido utilizar un pozo productor ya existente, para convertirlo en un pozo inyector y simultáneamente utilizar el equipo Electro-sumergible -ESP modificado, para ser utilizado como bomba inyectora, de modo tal que su instalación resultaría de forma "invertida" a la convencional.

Se presentan varios retos para llevar a cabo este tipo de soluciones. Por ejemplo, se hace necesario la modificación de dos de los componentes más importantes del bombeo electro-sumergible como el sello y el motor; el sello al tener que instalarse al revés, se modifica para mantener sus características de aislamiento de fluidos, expansión, absorción y ecualización de aceite, de otro lado, el motor requiere el diseño de un nuevo cabezal para conectar el cable de potencia, y al mismo tiempo conectarse la tubería colgante de inyección. Adicional, se presentan retos en el sensor, el sentido de giro y procedimientos de acople e instalación que deben ser estudiados y resueltos.

Los beneficios de este sistema invertido, se puede encontrar el manejo de presiones menores en superficie en comparación con los sistemas tradicionales, reducción del capex para proyectos de inyección, tiempo record de conversión de un pozo productor a inyector, reducción de espacio en superficie ideal para pozos Offshore, mayor flexibilidad, independencia, entre otros.

Este completamiento con ESP invertido es el primero en la región latinoamericana, es de resaltar que es el primero de su tipo en el mundo en inyección por tubing desde superficie.

#### Introducción

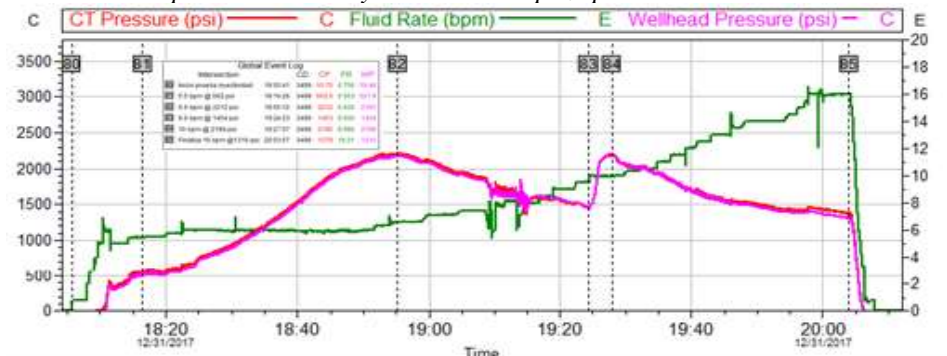
Desde la crisis que vivió la industria del petróleo y gas en los años 2014 a 2016, y a lo largo de su historia, los operadores y empresas de servicios trabajan de la mano para buscar alternativas novedosas y diferentes a los problemas de producción. Se da como resultado múltiples aproximaciones a la solución de estos, contemplando diferentes aspectos que permiten evaluar con más detalle y de forma acertada la solución que ofrezca ventajas adicionales a las manejadas tradicionalmente.

El campo de implementación del proyecto es uno de los mayores activos de la compañía estatal en Colombia. Está localizado en el departamento del Meta aproximadamente a 30 km de su capital Villavicencio, y aproximadamente 100 km al suroriente de la capital del País. A partir del año 2014, se realizan pruebas de inyección continua de agua en la unidad K2 con fines de evaluar el recobro mejorado, para logrado determinar una influencia importante del frente de agua en los conos de los pozos productores, generando un cambio en el corto plazo en el patrón de presiones del agua. Al incrementar las presiones, el acuífero tendrá menos influencia y bancos no drenados podrían moverse a los pozos productores.

El pozo en estudio durante su etapa como productor (aproximadamente 1 año marzo 2015 a marzo 2016), acumulo cerca de 5.000 Bls de petróleo, 200.000 Bls de agua y 0 pies cúbicos de gas. Por lo tanto, se avaló la inyección de agua en el área central del yacimiento (K1-K2), y la conversión de ser pozo productor a inyector, de acuerdo con las pruebas de inyectividad realizadas que presentan un potencial de inyección de 20.000 barriles de agua por día. En diciembre de 2016, se instaló sarta de Metal Skin para aislar los intervalos productores de aceite, y se realizó conversión del pozo a inyector de agua, ya para diciembre de 2017 se realizó estimulación para mejorar la inyectividad de la formación. El pozo pasó de caudal de bombeo máximo de 2 barriles por minuto a 2700 psi, a un caudal de bombeo de 16 barriles por minuto a 1310 psi, cumpliéndose con la proyección esperada para el campo. En la gráfica 1 se muestra el comportamiento de la prueba de inyectividad final en el pozo.

**Gráfica 1**

*Prueba de comportamiento de inyectividad en el pozo post-estimulación*



**Fuente.** Compañía operadora estatal de Colombia

Teniendo en cuenta los resultados aceptables de inyectividad y las condiciones benévolas del pozo, se resuelve seleccionar un equipo bajo las premisas que se presentan en la tabla 1, que permita mantener la inyección de agua en la unidad K2 y a su vez aporte en la mejora de producción de petróleo de los pozos de influencia.

**Tabla 1**

*Premisas de selección del sistema de inyección*

<b>Aplicación</b>	Caudal, presión, temperatura e inyectividad.
<b>Equipos</b>	Disponibilidad, tecnología, back ups.
<b>Facilidades</b>	Disponibilidad de agua, tratamientos, ubicación de instalaciones.
<b>Espacio disponible en superficie</b>	Tamaño del equipo, suministro eléctrico.
<b>Acceso y ubicación del pozo</b>	Permisos, diseño de ubicación, factores ambientales y comunidades aledañas.
<b>Consumo de Energía</b>	OPEX, disponibilidad, factores de servicio.
<b>Mantenimiento</b>	Repuestos, índice de fallas, duración.
<b>Operación</b>	Facilidad, flexibilidad, entrenamiento.
<b>Restricciones en superficie</b>	Manejo de altas presiones en superficie, doble barrera para manejo de altas presiones.

**Fuente.** Elaboración propia de los autores

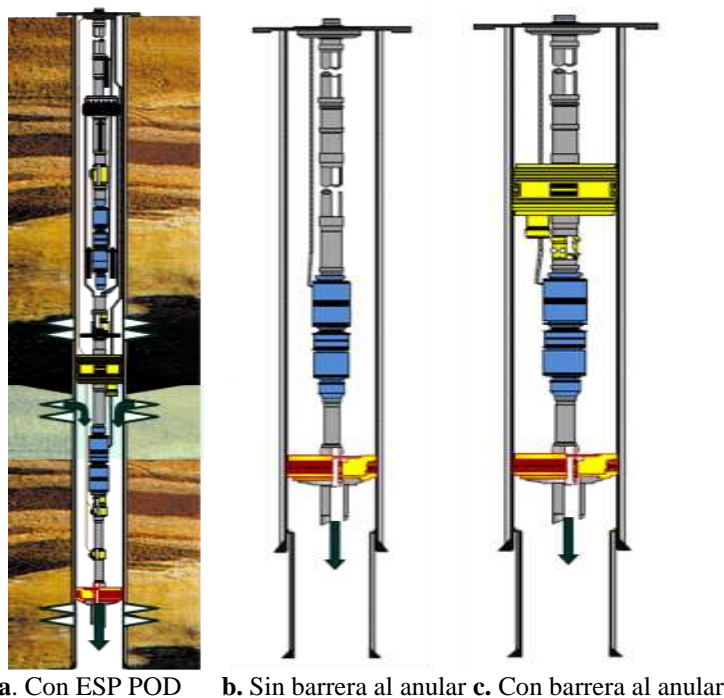
Bajo todos estos criterios de evaluación previamente mencionados, y basados en el análisis de los mismos, se realiza la instalación de un sistema de inyección con bomba ESP invertida y se obtienen los resultados esperados.

Una pregunta recurrente del proyecto es ¿Por qué utilizar un equipo ESP modificado? Se debe tener en cuenta que se requiere la contratación de una torre de Work Over lo que hace más costosa la intervención, bajo indagación para dar una respuesta acertada cabe resaltar que esta tecnología no pretende reemplazar las bombas horizontales de inyección, las cuales son versátiles y han demostrado que son funcionales y cumplen con su objetivo. En este caso, se suministró una alternativa diferente para apoyar el objetivo de inyección en un tiempo limitado, mantener al mínimo el Footprint debido a limitaciones de espacio en superficie e independizar el control de un Pad de inyección. Si bien en este caso se utilizó una torre de Work Over, es una instalación somera por lo que se simplifica el proceso de instalación.

Teniendo en cuenta que la tecnología de ESP invertida cumplió con las expectativas de este proyecto, se abre un panorama amplio de configuraciones para bombear fluido por debajo de la bomba ESP, o también tener sistemas rotativos debajo de la ESP que ayuden en el desempeño de producción o mejoren el índice de falla. Dentro de las principales configuraciones con bomba ESP invertida se pueden contemplar diferentes completamientos, descritos en la imagen 1, para el caso de manejo de agua.

### Imagen 1

*Algunas diferentes configuraciones con bomba ESP Invertida*



Fuente. Elaboración propia de los autores

Las configuraciones de la **imagen 1 a, b y c.** solo contempla algunas posibilidades de mejoramiento de producción (inversión de cono de agua **imagen 1 a.**) y/o manejo del agua en fondo. Sin embargo, con esta tecnología pueden estudiarse y desarrollarse proyectos por ejemplo para separación más eficiente del gas y/o agua que se faciliten al tener sistemas rotativos por debajo del motor.

## Aplicación ejecutada con un equipo ESP invertida

Bajo la necesidad de reducir la tasa de vertimiento en fuentes hídricas, se toma la decisión de realizar la conversión del pozo productor a inyector venciendo los siguientes retos:

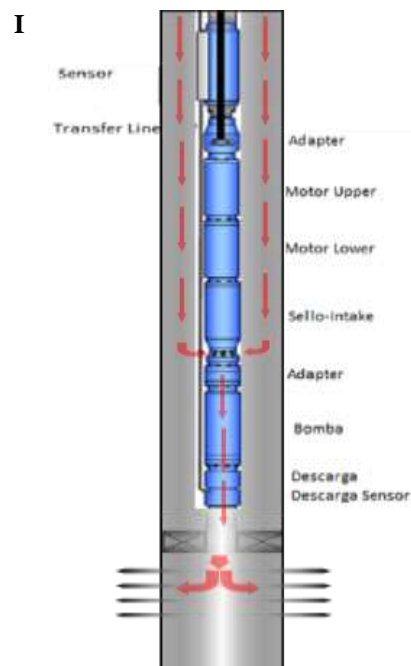
- Mantener una inyección permanente y evitar paradas por mantenimiento.
- Obtener una mayor flexibilidad en tasas de inyección y manejo de frecuencias.
- Minimizar tanto como sea posible adecuaciones en facilidades, equipos en superficie y trabajos de obra.
- Optimizar los tiempos de puesta en marcha del equipo de inyección (tiempos de entrega).
- Utilizar la infraestructura y facilidades actualmente disponibles para garantizar la inyección con el fin de reducir costos asociados.

Dado lo anterior, en la evaluación de las alternativas para inyección, la compañía operadora con base en lecciones aprendidas de pozos previos, observa que en la solución planteada de instalar en pozo un **Sistema Electrosumergible Invertido** reducirá considerablemente tres factores críticos en el proyecto: **tiempo** (entrega de equipos, tubería, entre otros), **capex** (obra civil, adecuaciones en superficie), **tasa de vertimiento en fuentes hídricas** (cumplimiento Lic. Ambiental).

El equipo ESP Invertido, como su nombre lo indica, es una bomba electrosumergible instalada en dirección opuesta al convencional, es decir, de arriba hacia abajo con una configuración: sensor, motor, sellos, intake y bombas mostradas en la imagen 2., cuyo principio hace que el fluido que viene desde superficie a través de las facilidades de producción entre por la tubería y con un juego de camisas alimente el anular, permitiendo que el intake tome el agua desde allí presurizándola por medio de la bomba y por debajo del empaque inyecte a la formación. Para lograr esto fue necesario enfrentarse a varios retos de ingeniería y ajustes en los procedimientos de instalación, lo que permitió que el diseño, desarrollo, instalación y operación fueran exitosos.

### Imagen 2

ESP Invertido. Equipo para inyección de agua



Fuente. Elaboración propia de los autores

## Diseño del sistema de inyección del pozo

De acuerdo con los resultados de la prueba de inyectividad y validaciones de la operadora, fueron suministrados los siguientes datos de la tabla 2, como entrada para realizar el diseño de la bomba de inyección invertida cuyos resultados se detallan en la tabla 3.

**Tabla 2**

*Data de entrada de diseño*

<b>Parámetros Zona de Inyección</b>	
<b>Índice de Inyectividad</b>	11.1 bpd/psi
<b>Presión Estática</b>	3150 psi
<b>Parámetros de la bomba</b>	
<b>Profundidad de la bomba</b>	7000 ft MD
<b>Flujo de Inyección</b>	Hasta 20000 bwpd
<b>Parámetros de tubería de Inyección</b>	
<b>Tubería de Inyección</b>	4 ½ EUE 12.75 lb/ft

Fuente. Compañía operadora estatal de Colombia

**Tabla 3**

*Datos esperados según data de diseño*

<b>Desempeño de Influjo</b>	
<b>Presión estática en cabeza Head Pressure</b>	30psi
<b>PI</b>	2222 BPD/psi
<b>Condiciones al Intake</b>	
<b>PIP</b>	2993 psi
<b>QIP</b>	20.4 KBPD
<b>Condiciones a la Descarga</b>	
<b>Qdp</b>	20 KBPD

Fuente. Autograph PC. Cortesia Baker Hughes

De acuerdo con la información suministrada de diseño y los cálculos referentes al caudal y potencia, se requiere el equipo relacionado a continuación en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Componentes del equipo ESP invertido*

<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
<b>Bomba</b>	Bomba para 15000 barriles (Invertida)
<b>Motor</b>	540HP motor
<b>Sello-Intake</b>	Triple bag seal with built-in Intake (Equipo especial)
<b>Adapter</b>	Seal – Pump adapter (Equipo especial)
<b>Motor head</b>	Motor head (Equipo especial)
<b>Sensor</b>	Sensor de variables de presión y temperatura de fondo

Fuente. Elaboración propia de los autores

## Distribución final de la instalación de la ESP invertida

Teniendo en cuenta todas las consideraciones del diseño y componentes adicionales requeridos en el alcance del trabajo, no solo del equipo ESP, sino también de la instalación de la sarta de inyección. A continuación, en la imagen 3 y la tabla 5, se muestra la distribución final instalada el 6 de noviembre de 2019 en el pozo en estudio y como es el funcionamiento del sistema en seis pasos generales.

1 El agua es suministrada desde superficie e ingresa al pozo por la tubería de producción.

2 Por medio de dos camisas abiertas al anular se alimenta el espacio anular entre la tubería de producción y el casing del agua de superficie.

3 El agua ingresa al equipo ESP por medio del Intake ubicado debajo del ensamble sello-motores-sensor.

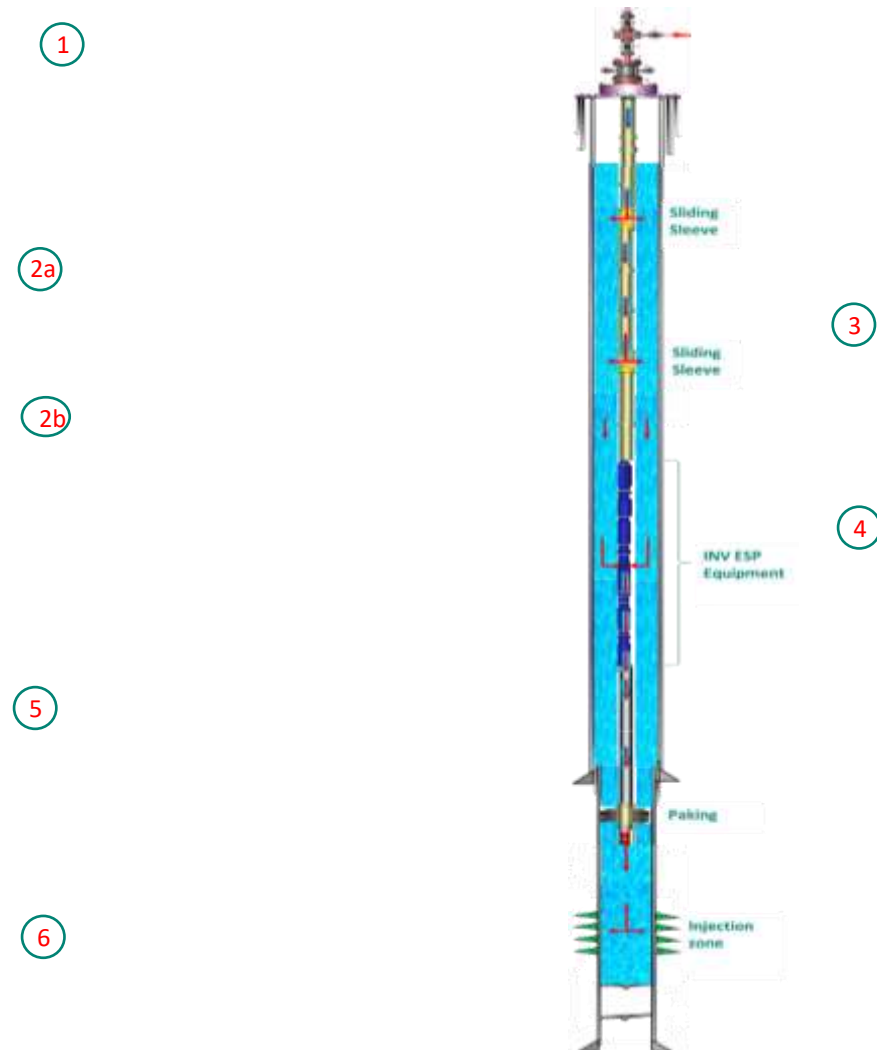
4 El agua es impulsada por la bomba hacia la descarga y hacia la tubería de inyección debajo del equipo ESP.

5 La tubería debajo del equipo ESP se conecta con un empaque posicionado en el liner de 7.

6 Se realiza la inyección del agua de acuerdo con los parámetros de diseño. TDH puesto por la bomba directamente en la zona de inyección.

Imagen 3

*Distribución final de instalación del equipo ESP invertido*



Fuente. Elaboración propia de los autores

**Tabla 5**

*Sarta de Inyección*

<b>Descripción</b>	<b>Desde (ft)</b>	<b>Hasta (ft)</b>
Tubing Hanger ESP 11" OD x 5-1/2" LTC	26.00	27.08
01 Landing Joint Jta 5-1/2" LTC, J-55, 15.5 Lb/Ft	27.08	55.94
X-Over 5 1/2" LTC x 4 1/2"	55.94	56.71
Pup Joint 4-1/2" EUE Box x Pin x 4 ft	56.71	60.75
Pup Joint 4-1/2" EUE Box x Pin x 6 ft	60.75	66.71
206 Tubing Joint 4 1/2" EUE, 12.75 lb/ft N-80	66.71	6527.23
Pup Joint 4-1/2" EUE Box x Pin x 6 ft	6527.23	6533.29
Camisa 4-1/2" eue Box x Pin (OPEN)	6533.29	6538.06
Pup Joint 4-1/2" EUE Box x Pin x 4 ft	6538.06	6542.14
2 Tubing, 4-1/2" EUE Box x Pin	6542.14	6603.41
Pup Joint 4-1/2" EUE Box x Pin x 6 ft	6603.41	6609.52
Camisa 4-1/2" eue Box x Pin (OPEN)	6609.52	6614.30
Pup Joint 4-1/2" EUE Box x Pin x 4 ft	6614.30	6618.38
9 Tubing, 4-1/2" EUE Box x Pin	6618.38	6898.89
Crossover 3 1/2 EUE 8RD BOX x 4 1/2 EUE 8RD BOX	6898.89	6899.90
Pup Joint 3-1/2" EUE Pin x Pin x 4 ft	6899.90	6909.29
Check Valve	6909.29	6909.84
Gauge carrier and Sensor	6909.84	6916.09
X- Over BOX EUE 3-1/2"@3-1/2"	6916.09	6916.57
X-Over PIN TO PIN (2-3/8" @ 3-1/2")	6916.57	6916.87
MOTOR HEAD ADAPTER	6916.87	6917.93
Motor Upper 270 HP	6917.93	6947.00
Motor Lower 270 HP	6947.00	6976.08
Seal + Intake	6976.08	6984.12
Kit Adapter	6984.12	6984.34
Pump (Inverted)	6984.34	7007.76
Discharge (Inverted)	7007.76	7008.27
Discharge Pressure Sub	7008.27	7009.14
Pup Joint, 3-1/2" EUE Pin x Pin	7009.14	7018.56
Crossover 3 1/2 EUE 8RD BOX x 4 1/2 EUE 8RD BOX	7018.56	7019.57
1 Tubing, 4-1/2" EUE Pin x Pin (Tube without box)	7019.57	7050.43
8 Tubing, 4-1/2" EUE Box x Pin (Biseladas)	7050.43	7297.34
Crossover 4 1/2" HYD 513pinx4 1/2" EUE	7297.34	7298.55
10 Juntas de 4 1/2" HYD513	7298.55	7607.92
Crossover 3 1/2 EUE Pin Down x 4 1/2" HYD513 box	7607.92	7609.22
Seating Nipple 2.75 F, 3-1/2 EUE Box x Pin	7609.22	7610.36
Packing	7610.36	7611.14
LOWER SEAL SUB	7611.14	7612.85
SPACER TUBE 10' 3.625" STUB ACME	7612.85	7625.20
LOWER SEAL SUB	7625.20	7627.97

**Fuente.** Compañía operadora estatal de Colombia

- **La bomba**

Se considera para este diseño una bomba de 15000 barriles en su punto de mejor eficiencia. De acuerdo a su diseño opera hasta 20000 bfpd, ideal para la versatilidad de caudales requeridos. En cuanto a eficiencia es alta en comparación con otros sistemas ESP, carga en el eje baja, y demás parámetros detallados en la tabla 6. se encuentra operando dentro de rangos normales sin afectar ningún componente.

**Tabla 6**

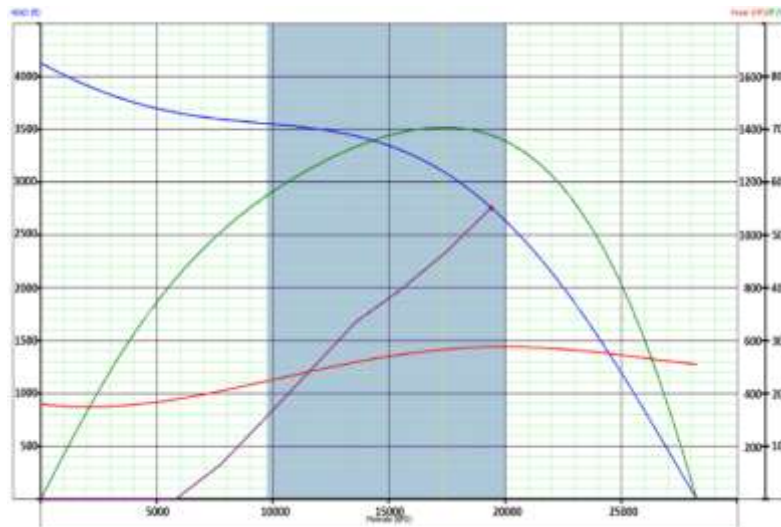
*Operación de la bomba a máximo flujo*

<b>Presión de Intake</b>	2993 psi
<b>Presión de Descarga</b>	4197 psi
<b>Flujo</b>	19382 BPD
<b>Frecuencia</b>	65 HZ
<b>Eficiencia de la bomba</b>	68.88%
<b>Carga del eje</b>	42.58%

**Fuente.** Autograph PC. Cortesia Baker Hughes

**Gráfica2.**

*Punto de operación de la bomba de acuerdo con el diseño*



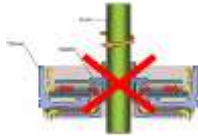
**Fuente.** Autograph PC. Cortesia Baker Hughes

La bomba requirió una modificación en su ensamble, y no en sus componentes al utilizar retenedores adicionales para sostener el peso de las etapas al estar en posición invertida y detenida. También se tuvo en cuenta las siguientes condiciones operacionales detalladas en las **imágenes 4, 5 y 6** para asegurar la operación correcta al estar invertida.

- **Sentido de giro.** La operación estándar de la bomba gira en sentido de las manecillas del reloj. Al realizar la inversión de la bomba el giro se altera quedando en contra de las manecillas del reloj para su operación estándar, por lo tanto, esta premisa debe tenerse en cuenta al identificar el giro correcto en el motor. A continuación, se muestran en las **imágenes 4, 5 y 6** cómo se altera el sentido de giro en la bomba.



**Imagen 4.** Etapa en posición vertical (Instalación convencional. Giro en sentido de manecillas del reloj)



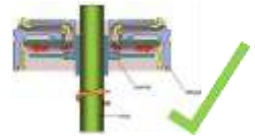
Fuente. Baker Hughes (Handbook)

**Imagen 5.** Etapa rotada 90°



Fuente. Baker Hughes (Handbook)

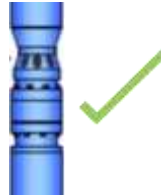
**Imagen 6.** Etapa rotada 180° (Invertida. Sentido contrario a manecillas del reloj)



Fuente. Baker Hughes (Handbook)

La bomba invertida se acopla al sello (con intake incorporado) uniendo las dos bases de los componentes difiriendo de la conexión base – cabeza estándar. Por lo tanto, se diseñó un adaptador que permite la conexión de estas dos bridas y permitiendo la inversión de una parte del BHA, se muestra en la **imagen 7**. Este adaptador permite la conexión por tornillos de ambos componentes.

**Imagen 7.** Acople bomba-Intake conexión correcta de flanches



Fuente. Elaboración propia de los autores

- **El motor**

Que se selecciona para esta aplicación corresponde a dos motores en tándem para proveer un total de 540HP / 4000Voltios / 85Amperios, trabaja dentro de sus parámetros operativos como se muestra en la **tabla 7**, con una refrigeración ideal para el caudal y dirección de fluido de superficie a fondo (agua fresca entre 110 y 150°F) y operando en el mejor punto de eficiencia energética.

En el caso del tándem de motores seleccionados para este proyecto se debe instalar como se realiza convencionalmente; es decir, los motores se instalan en la parte de arriba del BHA, pero no invertidos. Por lo tanto, se requiere un motor Lower para la conexión al sello y un motor Medium para la conexión a la cabeza de motor diseñada especialmente para este proyecto.

Los motores de la compañía ESP no usan como estándar los Lockplates (lamina de metal soldada entre el housing y su base o cabeza) porque el giro del sistema va en el sentido de las manecillas del reloj y no hay riesgo de destoque de estos componentes en transcurso de la operación. Sin embargo, para esta aplicación se colocaron debido a que el giro forward del motor será en contra de las manecillas del reloj por tener la bomba invertida.

### Imagen 8

Instalación del tándem de motores para el Sistema ESP Invertido



Fuente. Elaboración propia de los autores

**Tabla 7**

*Operación del motor a máximo flujo (19.4 KBPD @ 64.9hz)*

<b>Carga del motor</b>	98.83 %
<b>Voltaje de motor</b>	4324 V
<b>Amperios de motor</b>	84.21 A
<b>Temperatura de motor</b>	184.2 °F
<b>Velocidad de fluido</b>	5.291 ft/s
<b>Eficiencia</b>	86%
<b>Factor de Potencia</b>	81%
<b>Carga del eje</b>	44.46 %

Fuente. Autograph PC. Cortesia Baker Hughes

- **El Sello-Intake**

Este no presenta altas cargas en su eje, ni en la zapata de empuje, al igual que no presenta grandes pérdidas de aceite por expansión y contracción en las cámaras del sello a causa de temperaturas, ya que estas son bajas. En la **tabla 8**, muestra un resumen del comportamiento del sello el cual está dentro de los parámetros operativos para garantizar el run life esperado.

**Tabla 8**

*Operación del sello a máximo flujo*

<b>Temperatura del aceite del cojinete</b>	208.2 °F
<b>Carga del cojinete de empuje</b>	22.52%
<b>Capacidad de la cámara utilizada (de arriba a abajo)</b>	34%, 30%, 28%
<b>Carga del eje</b>	44.45 %

Fuente. Autograph PC. Cortesia Baker Hughes

Dentro del mismo housing del sello se encuentra el intake, denominado Sello-Intake. Este debe mantener en funcionamiento sus características esenciales de aislamiento de fluidos, ecualización de aceite, transmisión de carga, soporte de la carga axial, entre otras funciones, teniendo en cuenta que el ingreso del fluido en el intake está en la base del sello y no en la cabeza como se acostumbra. Por eso se utiliza un sello especial para aplicaciones con ESP invertido.

El sello invertido no es instalado y servido igual que los sellos convencionales, ya que tienen un procedimiento diferente. Los puertos de admisión del intake y la base del sello no tienen comunicación hidráulica, por lo tanto, no hay mezcla o contacto de aceite con el fluido del pozo. En caso de requerir ecualización de presión debido a la expansión de aceite la realizara a través de las válvulas cheque y de alivio ubicadas en la base del sello.

- **La cabeza de motor**

Al tener un motor medium como la parte superior del ensamble, no cuenta con la conexión al MLE. Es por eso que se diseñó una cabeza de motor para que permitiera esta conexión eléctrica, y también la conexión mecánica y no hidráulica a la tubería de inyección que pueda resistir todo el peso del ESP y así dejar colgado el equipo ESP en este punto.

- **El sensor**

No se puede utilizar un sensor convencional para ESP, ya que el sensor estaría ubicado encima del tándem de motores en la cabeza lejos

del punto estrella. Es por eso que se selecciona un sensor de parámetros de fondo de presión, temperatura y vibraciones que tiene cableado independiente del cable de potencia del motor, para su alimentación de voltaje y transmisión de datos, el cual se ubica en un gauge Carrier que se instala encima del equipo ESP. El gauge carrier se modifica para medir la presión de descarga a través de la instalación de un tubo capilar de ¼ desde el anti-vibration clamp hasta la sub-descarga de la bomba.

El sensor de fondo seleccionado no dispone de una conexión directa entre sensor-motor para la medición de la temperatura del motor como sucede en los completamientos ESP convencionales. Se plantea una solución alternativa, en la cual se realiza la medición de temperatura de motor de forma indirecta, estimándola por una serie de cálculos a partir de otras variables de fondo medidas por sensor y del medidor de flujo instalado en superficie. Este cálculo es similar al realizado por un software de diseño y basado en un balance de calor tomando ventaja que el fluido a bombear es el agua, el cálculo se realiza continuamente durante la operación del equipo y resuelve según sean las variables de fondo y flujo, a través de un algoritmo con la opción de ser cargado en el variador, o bien, programado en un PLC independiente.

- **Las camisas**

Se instalan dos camisas abiertas para asegurar que no haya restricción de flujo en el caudal a través de los puertos, que permitan comunicar la tubería de producción de 4 ½” con el anular. Las camisas tienen en los puertos de salida un área superior al área interna de la tubería con el fin de evitar erosión.

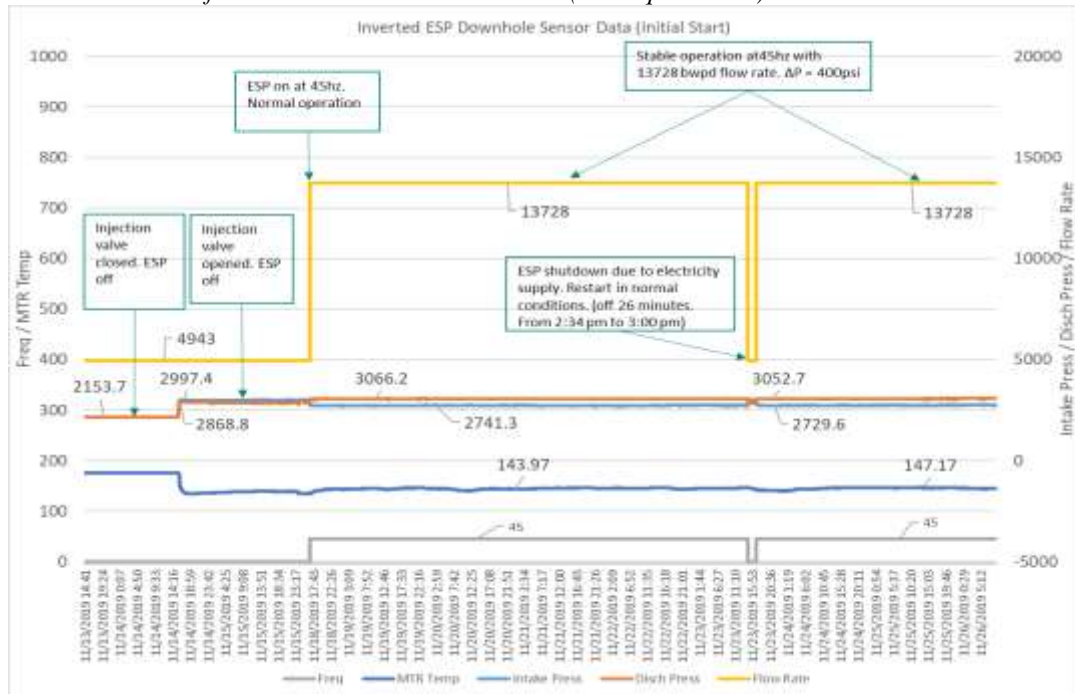
Se rediseñan las camisas para permitir una sección lo suficientemente amplia sin puerto de flujo de salida para ubicar allí el cable, y otra sección para ubicar el cable TEC del sensor teniendo como premisa que estos dos cables no deben juntarse para que el cable de potencia no afecte o genere ruido en la comunicación del cable del sensor.

- **La puesta en marcha**

A continuación, en la **gráfica 3**, se muestra como fue el comportamiento en especial de las presiones y caudales una vez se terminó la instalación y se puso en marcha el equipo ESP invertido en noviembre 2019.

**Gráfica 3**

*Data de sensor de fondo de la bomba ESP Invertida (Arranque Inicial)*

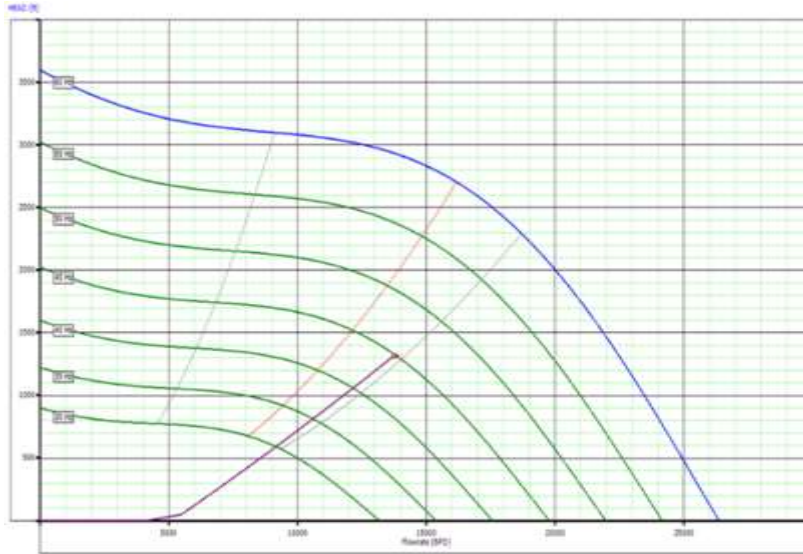


**Fuente.** Elaboración propia de los autores

En la **gráfica 4** y **tabla 10**, se observa el Match de la operación del equipo, evidenciando que la bomba opera en rango, el caudal de Inyección 13728 bwpd @ 45hz y la posibilidad de incrementos de frecuencia para aumentar la tasa de inyección según la necesidad.

#### Gráfica 4

*Match de operación de la bomba a 45hz*



**Fuente.** Autograph PC (Software Corporativo)

#### Tabla 10

*Match de operación a 45hz*

<b>Presión de Intake</b>	2727 psi
<b>Presión de Descarga</b>	3297 psi
<b>Caudal de flujo</b>	13728 BPD
<b>Frecuencia</b>	45 HZ
<b>Eficiencia de la bomba</b>	68.23%
<b>Carga del eje</b>	20.73%

**Fuente.** Autograph PC. Cortesia Baker Hughes

Las protecciones en este sistema se simplifican debido a la menor cantidad de instrumentación comparado con un sistema convencional de Hpump.

En la etapa de diseño se revisó uno de los casos de flujo de 13000 bwpd arrojando como resultado que el consumo de potencia estaría alrededor de 261.6 KVA, y el predictivo y match con flujo de 13728 bwpd arrojó un consumo real de potencia de 252.6 KVA en operación a 45hz, el cual es ligeramente menor que el esperado según diseño y satisfaciendo las necesidades energéticas de la operación.

## Observaciones finales

Después de varios años en operación del equipo ESP invertido para inyección de agua, se logra recopilar los siguientes resultados:

- Se eliminó los requerimientos de obras civiles y mecánicas en superficie, el sistema es ideal para locaciones con espacios reducidos o pozos offshore.
- Favoreció la conversión del pozo productor a inyector en menor tiempo ya que en comparación con un sistema convencional al no requerir materiales de alta presión en superficie se manejan menores tiempos de entrega.
- Eliminó alrededor de \$50 KUSD al año del costo de las rutinas de mantenimiento (personal y materiales) de las bombas de superficie convencionales.
- Las facilidades eléctricas son similares a los demás sistemas de levantamiento del campo y por tal razón no se requiere mayor adquisición para la operadora.
- Contribuyo con las metas ambientales de vertimiento en fuentes hídricas de la zona (cero barriles) de la compañía operadora ya que con este sistema se inyecta el 10 % del agua tratada en el campo con menores paradas del equipo.
- Permitió contar con una tasa de inyección alta de Agua directamente en la zona objetivo.
- Mitigó importantemente riesgos operativos, restricciones e impactos ambientales ya que no se tienen altas presiones en superficie, ni en la bomba, ni en la línea que llega al cabezal del pozo.
- Redujo el tiempo de reactivación operativa en caso de cortes eléctricos 26 minutos vrs 60 minutos de un sistema convencional (por presurización y/o empaquetamiento de fluido en las líneas).
- El equipo ESP Invertido garantiza sumergencia en todo momento inclusive en cortes eléctricos o cierre de válvulas a diferencia del sistema convencional lo que favorece la integridad del equipo.
- Se mantiene una columna que permite tener sumergencia de la bomba y al mismo tiempo control sobre los influjos o back Flow, disminuyendo costos de intervención por pérdida de Inyectividad en la sarta.
- Mayor rango de frecuencia operativa en comparación con los motores de superficie, lo cual permite mayor flexibilidad de caudal.
- Instalación 100 % controlada en temas operativos y HSE.
- Puesta en marcha exitosa que cumplió la promesa de valor esperado de la etapa de diseño.
- Primer y único sistema ESP Invertido bajo esta configuración y especificaciones de inyección en el mundo.
- Se redujo la cantidad de CAPEX requerido normalmente para proyectos de inyección de agua. Ahorro de Aproximadamente \$100KUSD al operador por costo relacionado con obras civiles e instrumentación de superficie utilizados en los métodos de inyección de agua convencionales.

El sistema ESP invertido fue retirado del pozo en octubre 2021 con casi 2 años de operación sin encontrar deteriorado sus componentes más allá del desgaste normal debido a la operación. De esta manera se demuestra que el sistema ESP invertido funciona para esta aplicación de inyección de agua en fondo y es una tecnología que se puede desarrollar aún más para otro tipo de configuraciones donde se requieran sistemas rotativos debajo del motor.

## Reconocimientos

En la ejecución y práctica de este proyecto participaron personal de soporte de ingeniería local y de casa matriz quienes aportaron su conocimiento y tiempo para el rediseño de los componentes que lo requirieron, personal de campo quienes aportaron la mano de obra, cooperación e interés por el éxito de las pre-inspecciones, pre-ensambles, instalación, puesta en marcha y monitoreo, otras líneas de producto de la compañía que dedicaron también su tiempo a la integración de sus productos de una manera confiable y oportuna.

Un especial reconocimiento a la compañía operadora quien también aportó su recurso humano para el análisis de factibilidad, aspectos técnicos del proyecto y elaboración del presente documento. Y por supuesto por mantener la confianza en la compañía ESP para la materialización de tecnologías que permiten el continuo mejoramiento de los sistemas en la industria de Oil & Gas, que buscan constantemente métodos más eficientes que ayuden a nivel global y como empresa a tener procesos de extracción y producción más limpios. Tal como en este caso, ser pioneros en los sistemas ESP con equipos rotativos por debajo del motor que abre una gran oportunidad de soluciones como por ejemplo para el manejo más eficiente de gas, control de conificación, sistemas dumptflood entre zonas, entre otros.

## Nomenclatura

ESP: Electro Submersible Pumping

## Referencias

- Book: *Submersible Pump Handbook 11th edition*, Baker Hughes Incorporated 200 W. Stuart Roosa Dr. Claremore, Oklahoma 74017 <  
www.bakerhughes.com/artificial-lift>
- Procedure: *Baker Hughes procedure*, AL-GLB-PRE-TRABAJO-104539 Rev. A, 2017
- Case history: “Inverted ESP Mitigated Water Cut”, Maximized Natural Production, Generating USD 10 Million Incremental Annual Revenue, Middle East, 2017.