

**VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL ELECTRO-PCP EN UN CAMPO
DE LOS LLANOS ORIENTALES**

JOHN JAVER SÁNCHEZ MORENO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2019

**VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL ELECTRO-PCP EN UN CAMPO
DE LOS LLANOS ORIENTALES**

JOHN JAVIER SANCHEZ MORENO

**Trabajo de grado para optar el título de Especialista en Gerencia de
Hidrocarburos**

DIRECTOR

JOHN ALEXANDER LEON

M.Sc ingeniero de petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2019

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos:

A Dios y a mi Virgencita María Auxiliadora por sus bendiciones y protección siempre!

A mi familia por su apoyo incondicional.

Al ingeniero John León por su disposición como director del presente trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN...	12
1. OBJETIVOS.....	13
1.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2. SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	14
2.1 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE.....	14
2.1.1 Equipo de superficie	14
2.1.2 Equipo de fondo.....	16
2.2 BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS PCP	19
2.2.1 Equipos de superficie.....	19
2.2.2 Equipos de subsuelo.....	21
2.2.3 Funcionamiento	28
2.3 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON CAVIDADES PROGRESIVAS ESPCP.....	29
2.3.1 Características y beneficios	31
2.3.2 Componentes del sistema ESPCP	31
2.3.3 Equipos de superficie.....	34
3. SELECCIÓN DE POZOS CANDIDATOS	38
3.1 CREACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	38
3.1.1 Procedimiento	38
3.1.1.1 Recopilación de la información.	38
3.1.1.2 Análisis de la información.	38
3.1.2 Caudal (Q_L).....	38
3.1.3 Índice de productividad (IP).	39
3.1.4 Índice de frecuencia de fallas (IFF).	39

3.1.5 Matriz de resultados.....	39
3.1.6 Criterios de selección.....	39
3.1.7 Aplicación de la metodología de análisis	41
3.1.7.1 Historia.....	42
3.1.7.2 Producción	42
4. INFORMACIÓN PARA DISEÑO DE LOS EQUIPOS.....	43
4.1 DATOS DE DISEÑO CAMPO ESTUDIO	43
4.2 CONDICIONES ESPECIALES PARA EL DISEÑO, INSTALACIÓN, ARRANQUE Y OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS:	44
4.2 BASES DE DISEÑO	45
4.3 REQUERIMIENTOS EQUIPO DE FONDO ESP	46
4.3.1 Componentes.....	46
4.4 ACCESORIOS DE INSTALACIÓN	46
5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL.....	52
5. 1 OFERTAS SONDEO DE MERCADO Y ESCENARIO BASE	55
5.2 ESCENARIO PILOTO ESPCP BORETS:	57
5.3 ESCENARIO PILOTO ESPCP SCHLUMBERGER:	58
5.5 EVALUACIÓN CASO ESPCP BORETS	60
5.6 EVALUACIÓN CASO ESPCP SCHLUMBERGER	62
6. CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFÍA.....	65

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Partes del motor BES	16
Figura 2. Bomba Centrífuga.....	17
Figura 3. Equipo de Superficie y de Fondo del Sistema de Bombeo Electrosumergible.	18
Figura 4. Componentes de un Sistema PCP	22
Figura 5. Partes principales de la bomba PCP	23
Figura 6. Ancla de Torque	26
Figura 7. Centralizador de Varillas.....	27
Figura 8. Funcionamiento de una bomba de cavidades progresivas.	29
Figura 9. Sección transversal de una PCP	29
Figura 10. Componentes de un Sistema ESPCP.....	30
Figura 11. Eje Flexible.	32
Figura 12. Caja Reductora.....	33
Figura 13. Diseño de diferentes estructuras ESPCP	37
Figura 14. Comportamiento de flujo de la bomba	48
Figura 15. Sensibilidad del VPN según energía y descuentos potenciales Borets.	61
Figura 16. Sensibilidad del VPN según energía y descuentos potenciales Schlumberger.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparación sistemas de levantamiento artificiales	36
Tabla 2. Criterios de selección de cada parámetro.....	39
Tabla 3. Justificación de los criterios de selección de cada parámetro.....	39
Tabla 4. Datos diseño de los equipos de fondo	43
Tabla 5. Listado componentes equipo de fondo ESP.	46
Tabla 6. Accesorios para instalación del equipo de fondo.	46
Tabla 7. Parámetros de diseño para el sistema de levantamiento artificial pozo JS-001H	53
Tabla 8. Costo promedio de un sistema ESP de 2000 BFPD.....	57
Tabla 9. Costo sondeo de mercado sistema ESPCP Borets.	58
Tabla 10. Costo sondeo de mercado sistema ESPCP Schlumberger.	59
Tabla 11. Proyección de tarifas de energía por vigencia.	60
Tabla 12. Resultados de la evaluación económica ESPCP Borets.....	60
Tabla 13. Resultados de la evaluación económica ESPCP Schlumberger.....	62

RESUMEN

TITULO: VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ELECTRO-PCP EN UN CAMPO DE LOS LLANOS ORIENTALES*

AUTOR: JOHN JAVIER SANCHEZ MORENO

PALABRAS CLAVES: Levantamiento Artificial, Sistema de Bombas de Cavidades Progresivas, Sistema de Bombas Electro sumergibles, Crudo Pesado.

DESCRIPCIÓN

Cuando la energía natural de un yacimiento no es suficiente para llevar los fluidos a superficie o si el volumen de estos en superficie no representa una ganancia en dinero, se hace necesario seleccionar un sistema de levantamiento artificial (SLA) que permita incrementar el caudal de crudo en superficie sin comprometer la integridad del pozo y las instalaciones, por eso es importante realizar una adecuada selección del SLA teniendo las características del yacimiento, fluidos y locación, para garantizar la operación optima de los pozos y que generen valor a la compañía. Para este estudio se quiere evaluar técnicamente y económicamente el comportamiento de un sistema que contemple la unión de una bomba electrosomergible y una bomba PCP en un mismo completamiento del pozo y así determinar las condiciones operacionales óptimas para poder optimizar la producción y energía consumida por los equipos. La selección de los equipos se realiza por medio de simulación numérica donde indica las características de cada bomba de levantamiento a instalar en el pozo y de esta forma poder predecir el comportamiento del yacimiento y los fluidos actuando bajo el Sistema de Levantamiento Artificial seleccionado.

En el análisis realizado se pudo observar que el avance tecnológico permitió lograr soluciones técnicamente viables, que ofrecen ahorros de energía en comparación con el sistema BES convencional que varía entre en 13% y 29%. Pero revisando el costo del equipo de fondo actual supera el 90% de los costos requeridos para un sistema ESP convencional, lo que no compensa los ahorros de energía, por lo que el caso estudio es inviable económicamente para los dos casos evaluados.

* * Proyecto de grado

** Facultad de ingeniería fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de Petróleos. Especialización de Gerencia de Hidrocarburos. Director M. Sc John Alexander Leon Pabon

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL-ECONOMIC VIABILITY FOR THE IMPLEMENTATION OF AN ELECTRO-PCP LIFTING SYSTEM IN A FIELD OF THE EASTERN PLAINS*

AUTHOR: SANCHEZ MORENO, JOHN JAVIER**

KEY WORDS: Artificial Lifting, Progressive Cavity Pump System, Submersible Electro Pump System, Heavy Crude.

DESCRIPTION

When the natural energy of a reservoir is not enough to bring the fluids to surface or if the volume of these on the surface does not represent a profit in money, it is necessary to select an artificial lift system (SLA) that allows increasing the flow of oil on the surface without compromising the integrity of the well and the facilities, that is why it is important to make an adequate selection of the SLA having the characteristics of the reservoir, fluids and location, to guarantee the optimal operation of the wells and that generate value to the company. For this study we want to evaluate technically and economically the behavior of a system that contemplates the union of an electric submersible pump (ESP) and a progressive cavity pump (PCP) in the same completion of the well and thus determine the optimal operational conditions to optimize the production and energy consumed by the equipment. The selection of equipment is made by means of numerical simulation where it indicates the characteristics of each lift pump to be installed in the well and in this way to be able to predict the behavior of the reservoir and the fluids acting under the selected Artificial Lifting System.

In the analysis realized, it observed that the technological advance allowed to achieve technically viable solutions, which offer energy savings in comparison with the conventional ESP system that varies between 13% and 29%. But reviewing the cost of the current fund equipment exceeds 90% of the costs required for a conventional ESP system, which does not compensate the energy savings, so the case study is economically unfeasible for the two cases evaluated.

* Graduation project

** Faculty of physicochemical engineering. School of Petroleum Engineering. Specialization in Hydrocarbon Management. Director M. Sc John Alexander Leon Pabon

INTRODUCCIÓN

En la industria de los hidrocarburos es indispensable contar con estrategias innovadoras que apalanquen las buenas prácticas del mercado para mejorar, administrar el comportamiento del yacimiento y optimizar de manera adecuada la producción del campo.

De esta manera las nuevas tecnologías de los sistemas de levantamiento ayudan a potenciar las condiciones adversas que se puedan presentar en campos con altos cortes de agua – relación agua petróleo (WOR), manejo, tratamiento y disponibilidad del agua. Para ello el activo debe contar con estos mecanismos transformadores de energía para reducir costos, aumentar rentabilidad - factor de recobro y disminuir la tasa de declinación del yacimiento, en pro de controlar eficientemente los recursos.

Por eso es importante realizar estudios tecnológicos como el sistema de bombeo electrosumergible con cavidades progresivas ESPCP, que se caracteriza por ser una combinación entre un motor sumergible y una bomba de cavidad progresiva PCP, la bomba es impulsada desde la base de la misma, esta tecnología combina las ventajas de la aplicación PCP con la confiabilidad de los motores ESP, obteniendo ahorros significativos en energía.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de la viabilidad técnica – económica para la implementación de un sistema de levantamiento artificial Electro – PCP en un campo de los llanos orientales.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Describir y comparar los sistemas de levantamiento artificial convencionales en el campo estudio (bombeo electrosumergible – Bombeo de cavidades progresivas) con respecto al sistema Electro – PCP a implementar en campo.

Elaborar una metodología que permita seleccionar los pozos candidatos a implementar el sistema de levantamiento artificial Electro – PCP en campo.

Evaluar el comportamiento del sistema de levantamiento artificial Electro – PCP en los pozos seleccionados implementando simulación numérica.

Realizar un análisis económico de los sistemas de levantamiento artificial convencionales en campo (bombeo electrosumergible - bombeo de cavidades progresivas con respecto al sistema Electro – PCP a implementar en campo.

2. SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

La selección e implementación de un sistema de levantamiento artificial depende de las condiciones y las necesidades del pozo, por tal razón a continuación se explicará brevemente los dos sistemas de levantamiento artificial convencionales que conforman el sistema de levantamiento de bombeo electrosumergible con cavidades progresivas ESPCP con el fin de conocer sus principales características.

2.1 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

El bombeo electrosumergible es un sistema de levantamiento que se caracteriza bomba centrífuga que está acoplada con un motor, transformando la energía eléctrica en energía de presión la cual impulsa la columna de fluido de un nivel determinado hasta superficie.

El sistema ESP está compuesto por dos equipos, uno de superficie y uno de fondo.

2.1.1 Equipo de superficie

- **Cabezal de Pozo:** El cabezal puede ser de dos tipos: cabezal tipo Hércules, se utiliza en pozos con baja presión en el anular y en instalaciones no muy profundas, estos poseen un colgador de tubería tipo cuña y un pasaje para el cable. El cabezal tipo roscado se utiliza en operaciones costa afuera, pozos con alta presión de gas en el anular o para instalaciones muy profundas. El cabezal de boca de pozo debe estar equipado con un empaque cerrado alrededor del cable y la tubería de producción para evitar fugas de gas o la surgencia imprevista del pozo.

- **Generador de Potencia eléctrica:** Es el equipo que genera la potencia eléctrica necesaria para la operación de fondo. El principal medio para la generación de la potencia eléctrica en un campo es un generador de corriente alterna AC. Estos generadores convierten la energía mecánica en energía eléctrica la cual se transmite a través del sistema de transmisión y de distribución.
- **Transformador Reductor (SDT):** Se encarga de reducir el voltaje de la línea de alta tensión al voltaje requerido en la entrada del variador de velocidad o del controlador, si se tiene un generador no es necesario emplear el transformador reductor SDT.
- **Variador de frecuencia:** Es el equipo encargado de controlar la frecuencia de trabajo del motor de la bomba, por lo tanto se puede aumentar o disminuir la velocidad de la misma. La velocidad es directamente proporcional a la frecuencia de operación, por lo tanto el caudal entregado por la bomba de acuerdo a su velocidad puede ser controlado por la variación de la frecuencia suministrada, teniendo en cuenta los límites de carga que pueda soportar el motor.
- **Transformador Elevador (SUT):** Se encarga de incrementar el voltaje que sale del controlador de frecuencia al voltaje nominal requerido por el motor para que opere eficientemente¹.
- **Caja de venteo:** Está localizada entre el cabezal del pozo y el tablero de control, en esta se une el cable de potencia que suministra la energía al motor con el equipo de superficie. Su principal función es ventear cualquier migración de gas proveniente del pozo a través del cable de potencia².

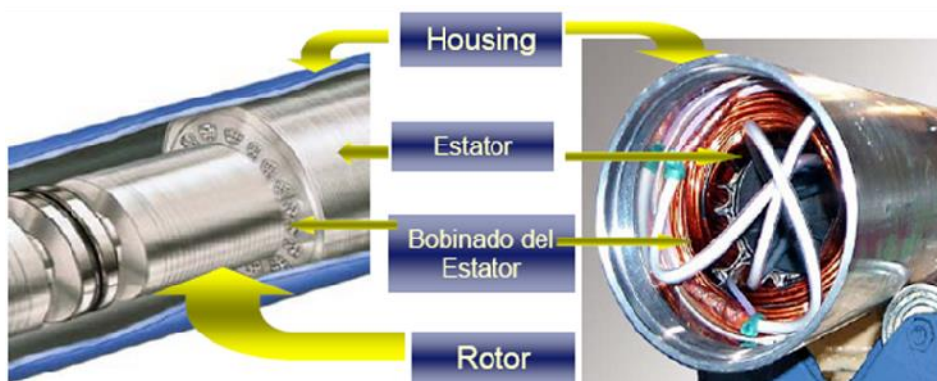
¹ PEÑA, Fredy. Trabajo de Grado Bombeo Electrosumergible - Descripción, diseño y monitoreo. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2005. p.: 58

² PEÑA, Óp. cit., p.: 58.

2.1.2 Equipo de fondo

- **Motor:** Los motores utilizados en bombeo electrosumergible pueden ser motores de inducción, trifásicos, tipo jaula de ardilla y dos polos. Está diseñado de acuerdo a los requerimientos de potencia de cada etapa, el gradiente de fluido y la cabeza total dinámica a levantar. Estos motores son llenados con aceite mineral altamente refinado y con alta resistencia dieléctrica para soportar las condiciones a las cuales es sometido, ver figura 1.

Figura 1. Partes del motor BES

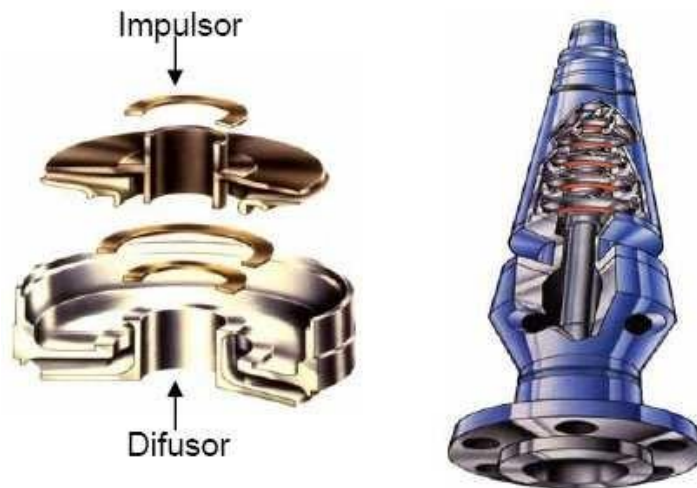


Fuente: PEÑA, Fredy. *Tesis de grado BES – Descripción, Diseño y Monitoreo*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2005.

- **Sello Protector:** Este sello conecta el eje del motor a la bomba o al separador de gas. Sus principales funciones son evitar que el fluido del pozo contamine el fluido dieléctrico del motor, absorber esfuerzos que transmite el eje de la bomba.
- **Entrada de la bomba (Intake):** Es un ensamblaje mecánico a través del cual pasa el fluido del pozo al interior de la bomba, también sirve para darle rodamiento que absorbe los esfuerzos axiales que transmite el eje.

- **Cable de Potencia:** Es uno de los componentes más importantes y delicados del sistema BES. Su función es transmitir la energía eléctrica desde la superficie al motor y transmitir las señales de presión y temperatura registradas por el sensor de fondo a la superficie.
- **Bomba Centrífuga:** Está conformada por un número determinado de etapas y cada etapa permite bombear una cantidad de fluido de acuerdo al diseño de la misma, el número de etapas a utilizar depende del caudal que se quiera levantar. Cada etapa consiste en un impulsor rotativo y un difusor estacionario, los cuales le dan la energía al fluido, ver figura 2 y 3.

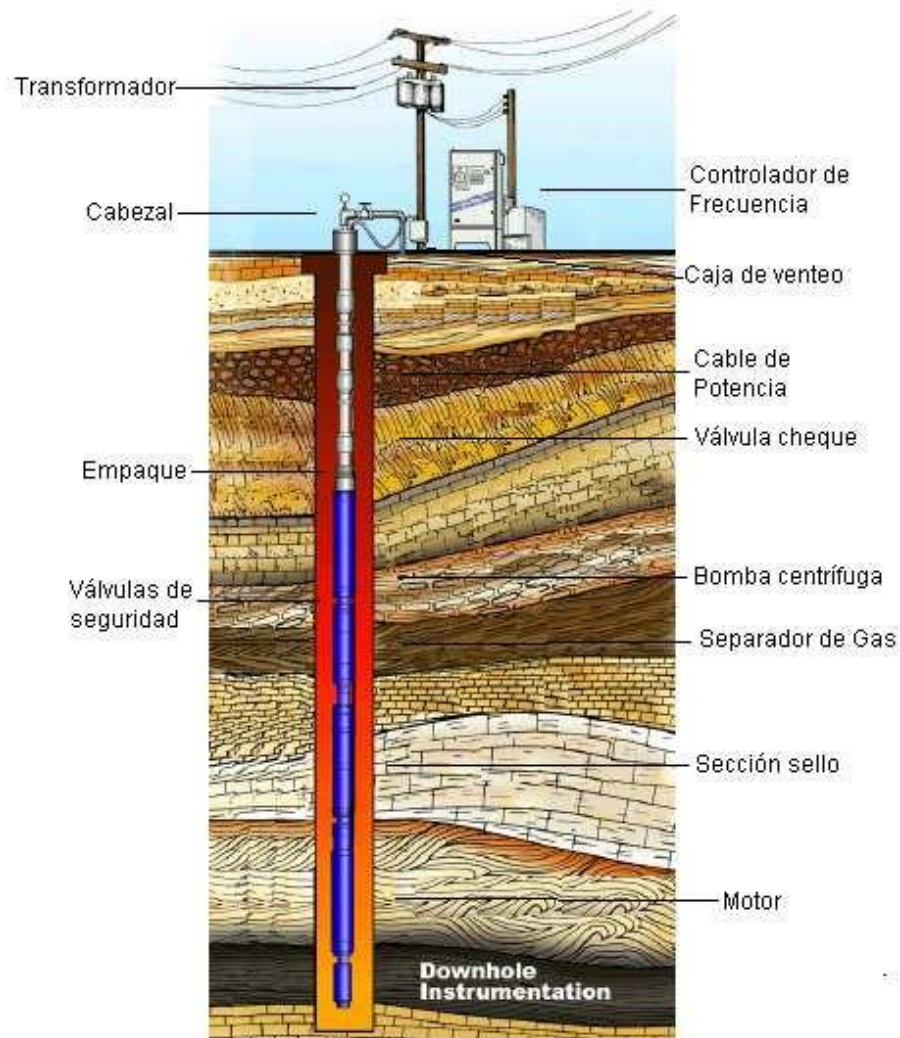
Figura 2. Bomba Centrífuga



Fuente: MENDOZA, Erick. Evaluación Técnico Económica del desempeño del Bombeo Electrosumergible como nuevo sistema de levantamiento artificial para el campo Cantagallo. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2005.

Entre los elementos complementarios del sistema están el separador de gas, válvulas cheque y *bleeder*, centralizadores, protectores de cable, herramienta en Y, empaquetaduras, conectores eléctricos y sistema de inyección de líquidos³.

Figura 3. Equipo de Superficie y de Fondo del Sistema de Bombeo Electrosumergible.



Fuente: Modificado de MENDOZA, Erik. *Tesis de grado BES para el Campo Cantagallo*. Universidad Industrial de Santander, 2005.

³ MENDOZA, Erick. Evaluación Técnico Económica del desempeño del Bombeo Electrosumergible como nuevo Sistema de Levantamiento Artificial para el Campo Cantagallo. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2005.

2.2 BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS PCP

La bomba por cavidades progresivas (PCP) fue inventada en 1932 por un Ingeniero Aeronáutico francés llamado René Moineau, quien estableció la empresa llamada *PCM POMPES S.A.* para la fabricación de la misma.⁴

En Colombia el primer sistema de BCP se instaló en 2003 en el campo Rubiales ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales, por medio de este sistema de levantamiento artificial se empezó el desarrollo de este campo⁵.

Este sistema de levantamiento está compuesto por equipos de superficie y de subsuelo. A continuación se detallan los más importantes.

2.2.1 Equipos de superficie Los equipos de superficie deben ser capaces de proveer la energía requerida por el sistema, por tal razón debe cumplir con lo siguiente:

Suspender la sarta de varillas y soportar la carga axial del equipo de fondo. Entregar el torque requerido en el vástago.

Rotar el vástago a la velocidad requerida. Prevenir la fuga de fluidos en la superficie.

- **Cabezal de Rotación:** Este es un equipo de accionamiento mecánico instalado en la superficie directamente sobre la cabeza de pozo. Consiste en un sistema de rodamientos o cojinetes que soportan la carga axial del sistema, un sistema de freno (mecánico o hidráulico) que puede estar integrado a la estructura del

⁴ CHACÍN, Nelvy. Bombeo por cavidad progresiva: Operación, Diagnóstico, Análisis de Falla y Trouble Shooting [online]. Workshop Internacional. [El Tigre, Venezuela]: ESP OIL, Sept. 2003. p.: 8. Disponible en la Web: <<http://es.scribd.com/doc/66822580/Bombeo-de-Cavidad-Progresiva>>.

⁵ RUBIO, C. y AGUDELO, P. Comparative Analysis of Production Method with PCP Systems at Rubiales Oil Field [online, membresía SPE, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander]: SPE 114191. Colombia: Weatherford Colombia Limited, 2008. p.: 1.

cabezal o ser un dispositivo externo, y un ensamblaje de instalación que incluye el sistema de empaque para evitar la filtración de fluidos a través de las conexiones de superficie.

- **Motor:** La principal función del motor en el sistema es proveer la potencia requerida para generar el movimiento de rotación que se le debe suministrar al rotor. La potencia es función directa del torque y esta relación está expresada en la siguiente ecuación:

$$P_{\text{requerida}} = C \cdot T_{\text{sarta}} \cdot N / \mu_{\text{transmisión}}$$

Donde:

$P_{\text{Requerida}}$ = Potencia total requerida por el sistema (Kw o BP). T_{Sarta} = Torque total sobre la sarta de varillas (N*m o Lbs.*ft.). N = Velocidad de rotación del sistema (rpm).

$\mu_{\text{Transmisión}}$ = Eficiencia de transmisión (%).

C = Constante (Métrico: $1,504 \cdot 10^{-2}$ o Ingles: $1,917 \cdot 10^{-6}$).

- **Sistema de Transmisión:** Es el dispositivo utilizado para transferir la energía desde la fuente de energía primaria (motor eléctrico o de combustión interna) hasta el cabezal de rotación. Existen tres tipos de sistema de transmisión tradicionalmente utilizados: sistema con poleas y correas, sistema de transmisión a engranajes, Sistema de transmisión hidráulica.
- **Sistema de Correas y Poleas:** La relación de transmisión con poleas y correas debe ser determinada dependiendo del tipo de cabezal seleccionado y de la potencia/torque que se deba transmitir a las varillas de bombeo (a la BCP). En el caso de los cabezales sin cajas reductoras (Directos) la relación es directa y viene determinada por la velocidad del motor y la velocidad requerida por el sistema.

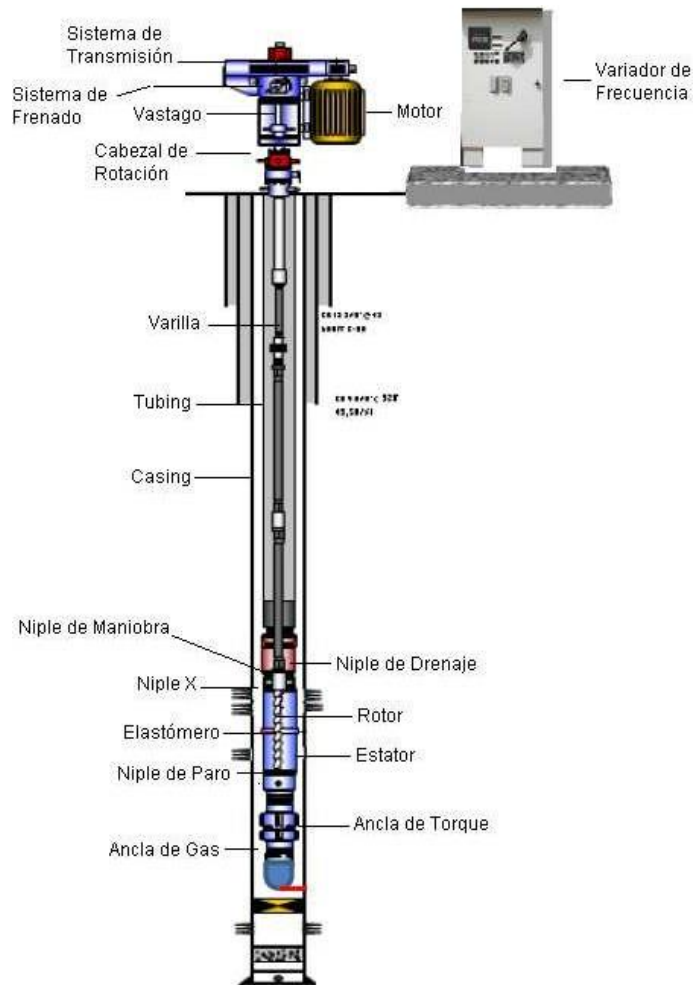
- **Sistema de Frenado:** La segunda función importante del cabezal es la de frenado que requiere el sistema una vez y rota en marcha inversa, llamado “*Back-Spin*”. Cuando un sistema BCP está en operación, una cantidad significativa de energía se acumula en forma de torsión sobre las varillas. Si el sistema se para repentinamente, la sarta de varillas de bombeo libera esa energía girando en forma inversa para liberar torsión.
- **Variadores de Frecuencia:** Estos equipos son utilizados para brindar flexibilidad al cambio de velocidad en corto tiempo y sin recurrir a modificaciones mecánicas en los equipos. El Variador de frecuencia rectifica la corriente alterna requerida por el motor y la modula electrónicamente produciendo una señal de salida con frecuencia y voltaje diferente. Al variar la frecuencia, varía la velocidad de rotación ya que ambas son proporcionales, finalmente al variar la velocidad de operación, varía la producción⁶.

2.2.2 Equipos de subsuelo

- **Rotor:** El rotor se fabrica con acero altamente resistente, mecanizado con precisión en un torno especial y se recubre con una capa de material con alta resistencia a la abrasión por medio de un proceso electroquímico de cromado. El rotor a diferencia de los elastómeros se mecanizan a diferentes diámetros y espesores de cromado, la variación de estos dos parámetros permiten un ajuste fino de la interferencia. Este se conecta a una sarta varillas de bombeo las cuales le transmiten el movimiento de rotación desde la superficie (accionamiento o impulsor). Ver figura 4.

⁶ RAMÍREZ, Laura. Evaluación del Sistema de Levantamiento por Cavidades Progresivas para Crudos Pesados en los Campos Teca y Nare. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia: 2006. p.: 49-55

Figura 4. Componentes de un Sistema PCP



Fuente: Modificado de ORTEGA, Daniel et al. *Lecciones Aprendidas y Mejores Prácticas en Campos Colombianos*. Canadá 2010.

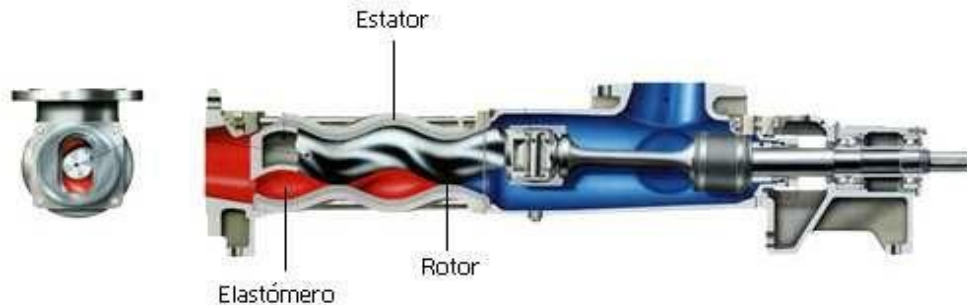
- **Estator:** El estator es un cilindro de acero (o tubo) revestido internamente con un elastómero sintético (Polímero de alto peso molecular), moldeado en forma de hélice enfrentadas entre sí, cuyos pasos son el doble del paso de la hélice del rotor.⁷

⁷ CHACÍN, Óp. cit., p.: 29.

- **Elastómero:** Son la base del sistema BCP en el que esta moldeado el perfil de doble hélice del estator⁸. El Elastómero constituye el elemento más “delicado” de la Bomba de Cavidades Progresivas de su correcta determinación y su interferencia con el rotor depende en gran medida la vida útil de la PCP. El Elastómero reviste internamente al Estator y es un polímero de alto peso molecular con la propiedad de deformarse y recuperarse elásticamente, esto hace que se produzca la interferencia entre el Rotor y el Estator la cual determina la hermeticidad entre cavidades contiguas y en consecuencia la eficiencia de la bomba (bombeo). Los Elastómeros deben presentar resistencia química para manejar los fluidos producidos y excelentes propiedades mecánicas para resistir los esfuerzos y la abrasión.

Los Elastómeros más utilizados en la aplicación PCP, poseen bases Nitrílicas (convencionales), Hidrogenación Catalítica (Elastómeros Hidrogenados) y Fluoroelastómeros. Ver figura 5.

Figura 5. Partes principales de la bomba PCP



Fuente Interplant S.A

⁸ HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas [online]. Oil Production.net [Argentina]: Versión 1, 2008, [Citado: Marzo 3 de 2009]. Disponible en la Web: <http://www.oilproduction.net/cms/index.php?option=com_content&view=114:manual-de-bombeo-de-cavidades-progresivas-pcp&catid=47:pcp-cavidades-progresivas&Itemid=96>. p.: 10

- **Niple de Paro:** El Niple de Paro es un tubo de pequeña longitud, el cual se instala bajo el Estator. Sus funciones son:
 - Servir de punto tope al rotor cuando se realiza el espaciado del mismo.
 - Brindar un espacio libre al rotor de manera que permita la libre elongación de la sarta de varillas durante la operación del sistema.
 - Impedir que el rotor y/o las varillas lleguen al fondo del pozo en caso de producirse rotura o desconexión de estas últimas.
 - Servir de punto de conexión para accesorios tales como anclas de gas o anti-torque, filtros de arena, etc.

- **Niple de Maniobra:** El movimiento excéntrico de la cabeza del rotor junto con el acople de unión a la primera varilla, describe un círculo de diámetro mayor que su propio diámetro. El diámetro que permitiría este movimiento es de $D+2E$, donde:
 - “D” es el mayor de los dos diámetros, el de la cabeza del rotor o el diámetro externo del acople.
 - “E” es la excentricidad de la bomba (dato suministrado por el fabricante).

El niple de maniobra debe contar con un diámetro interno mayor que el resultado obtenido con la expresión $D+2E$. En cuanto a su longitud, la misma deberá ser la suficiente de manera de garantizar que la cabeza del rotor (en condiciones de operación) se encuentre en el interior del dicho niple.

- **Niple de Drenaje:** Se utiliza para desalojar el crudo de la tubería de producción en aquellos casos cuando no es posible sacar el rotor de la bomba. La mayoría de los niples de drenaje se activan aplicando presión interna a la tubería de producción.

- **Niple X:** Se utiliza con el fin de detectar agujeros o uniones defectuosas en la sarta de tubería, se acostumbra realizar una prueba de presión durante la

operación de bajada de la misma. Para realizar esta prueba se puede instalar un niple de asiento “X”, sobre el estator de la bomba, en el cual se asienta una válvula fija con pescante, la cual es fácil de recuperar luego de la prueba.

Si el pozo presenta problemas de corrosión y la tubería es re-utilizada, es recomendable asentar la válvula en el niple “X” e ir probando a medida que se bajan los tubulares, por ejemplo, cada 10 tubos; de esa manera es más fácil detectar y corregir la existencia de algún tubo defectuoso⁹.

- **Ancla de Torque:** Al girar la sarta en el sentido de las agujas del reloj, se realiza la acción de girar la columna también hacia la derecha, es decir hacia el sentido de desenrosque de la tubería. A esto se suman las vibraciones producidas en la columna por las ondas armónicas ocasionadas por el giro de la hélice del rotor dentro del estator. La combinación de ambos efectos puede producir el desprendimiento del tubing. El ancla de torque evita este problema. Cuanto más la columna tiende al desenrosque, más se ajusta el ancla. Debe ir siempre instalada debajo del estator, elemento de la columna donde el esfuerzo de torque es mayor. No siempre es necesaria su instalación, ya que en bombas de menor caudal a bajas velocidades o bajas profundidades, no se tienen torques importantes y/o se producen grandes vibraciones. No obstante, es recomendable en todos los casos¹⁰. Ver figura 6.

⁹ CHACÍN, Óp. cit., p.: 30-33

¹⁰ HIRSCHFELDT, Óp. cit., p.: 12.

Figura 6. Ancla de Torque



Fuente: FLORES, Pablo. *Análisis Técnico Económico para un pozo con SLA con Bombas de Cavidad Progresiva en el Campo Sacha*. Quito, Octubre de 2009.

- **Ancla de Gas:** La eficiencia volumétrica del PCP, al igual que la de otros tipos de bombas, es afectada de manera significativa por la presencia de gas libre en su interior. Anclas de gas es el nombre que comúnmente se emplea para referirse a los separadores estáticos gas-líquido de fondo de pozo, generalmente la separación gas – líquido ocurre fuera del ancla desviándose el gas al espacio anular entre el revestidor y la tubería de producción y el líquido es enviado a la bomba, sin embargo, las anclas de gas no son 100% eficientes por lo que una porción del mismo es arrastrado a su interior y de allí a la bomba.
- **Centralizador de Varillas:** Los centralizadores de varillas se suelen colocar sólo en aquellos pozos con desviaciones o inclinaciones muy pronunciadas para evitar el desgaste de varillas/tubería y reducir el torque. El cojinete de los centralizadores son de plástico duro para resistir las incrustaciones de arena, aromáticos, H_2S , CO_2 , un buen diseño de su ubicación alarga la vida útil de las varillas y el tubing¹¹. Ver figura 7.

¹¹ FLORES, Pablo. *Análisis Técnico Económico para un pozo X con levantamiento artificial con Bombas de Cavidad Progresiva en el Campo Sacha* [online]: Trabajo de grado [Quito, Ecuador]: Octubre de 2009. Disponible en la Web: <<http://repositorio.eppetroecuador.ec/bitstream/20000/100/1/T-UCE-083.pdf> >

Figura 7. Centralizador de Varillas.



Fuente: FLORES, Pablo. *Análisis Técnico Económico para un pozo con SLA con Bombas de Cavidad Progresiva en el Campo Sacha*. Quito, Octubre de 2009.

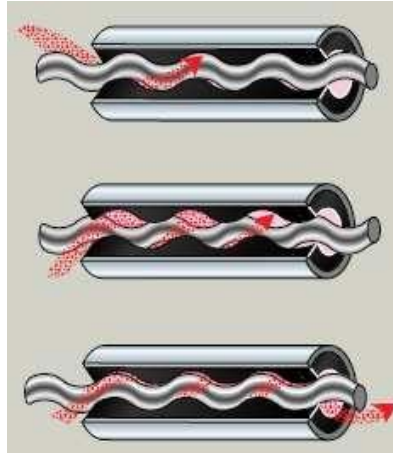
- **Tubing:** En caso de haber instalado un ancla de torque, la columna se arma con torque óptimo API, correspondiente a su diámetro. Si existiera arena, aún con ancla de torque, se debe ajustar con el torque máximo API, de este modo en caso de quedar el ancla atrapada, existen más posibilidades de librarla, lo que se realiza girando la columna hacia la izquierda. Si no hay ancla de torque, se debe ajustar también con el máximo API, para prevenir el desenrosque del tubing.
- **Trozo de Maniobra:** Es una varilla corta la cual es muy importante instalar encima del rotor cuando el sistema gira a una velocidad superior a 250 rpm. Debido a su longitud y al movimiento excéntrico del motor que se transmite directamente a ella, la varilla instalada tiende a doblarse y rozar contra las paredes del interior de la tubería de producción.
- **Varillas de Bombeo API:** Son las encargadas de transmitir el movimiento rotatorio generado por el sistema de impulsión en superficie al rotor de la bomba. Las varillas en este sistema soportan la carga axial generada por el propio peso de la sarta, más el par de torsión debido al movimiento rotatorio. La combinación de estas dos fuerzas nos da el esfuerzo total que debe soportar el sistema, el mismo que tiene el valor máximo en el extremo superior de la sarta de varillas

(eje de impulsión) cuyo valor no debe sobrepasar los 140000 psi. Los diámetros máximos utilizados están limitados por el diámetro interior del tubing.

2.2.3 Funcionamiento El sistema de levantamiento artificial por cavidades progresivas PCP, consiste de una bomba de desplazamiento positivo conformada por dos partes principales, un rotor de acero de forma helicoidal de n lóbulos que gira dentro de un estator en forma de helicoide de $n+1$ lóbulos. La geometría y las dimensiones de estas piezas son tales que cuando el rotor se inserta a dentro del estator, se forma una doble cadena de cavidades estancas (alvéolos). Las dimensiones del rotor y el estator están diseñadas de manera que producen una interferencia, la cual crea líneas de sello que definen las cavidades. Cuando el rotor gira a dentro del estator, los alvéolos avanzan a lo largo del eje de la bomba sin cambiar de forma, tampoco de volumen lo que trasvasa el fluido desde la succión de la bomba hasta la descarga. El rotor es accionado desde la superficie por un sistema impulsor que transmite el movimiento rotativo a la sarta de varillas la cual se encuentra conectada al rotor. Al girar el rotor, estas cavidades se desplazan (o progresan), en un movimiento combinado de traslación y rotación, que se manifiesta en un desplazamiento helicoidal de las cavidades desde la succión de la bomba, hasta su descarga¹². Ver figura 8 y 9.

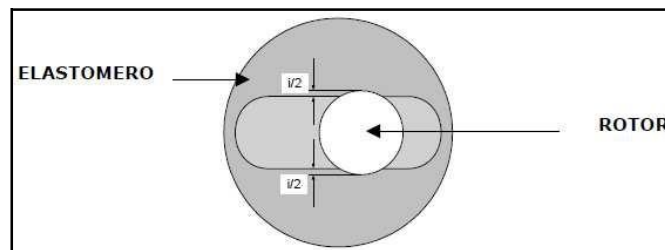
¹² CHACÍN, Óp. cit., p.: 12

Figura 8. Funcionamiento de una bomba de cavidades progresivas.



Fuente: HIRSCHFELDT, M. (2008). *Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas*, Argentina. OilProduction.net

Figura 9. Sección transversal de una PCP

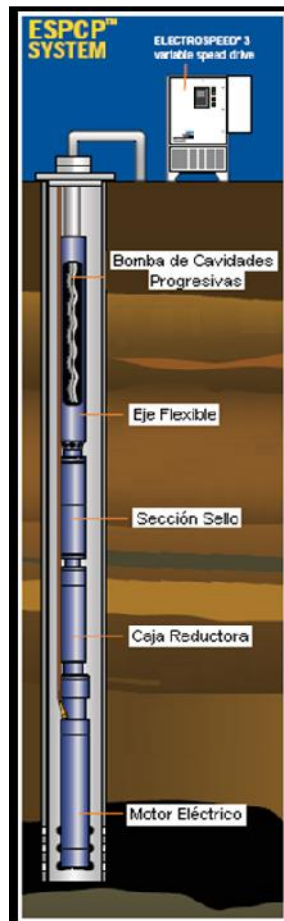


Fuente: CHACÍN, N. (2003). *Bombeo por cavidad progresiva*, Venezuela. ESP OIL.

2.3 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON CAVIDADES PROGRESIVAS ESPCP

El sistema de bombeo electrosumergible con cavidades progresivas ESPCP se caracteriza por ser una combinación entre un motor sumergible y una bomba de cavidad progresiva PCP, la bomba es impulsada desde la base de la misma, esta tecnología combina las ventajas de la aplicación PCP con la confiabilidad de los motores ESP. Ver figura 10.

Figura 10. Componentes de un Sistema ESPCP



Fuente: Ingeniería de Aplicaciones Baker Hughes Colombia. 2009.

El sistema ESPCP incluye en el sistema de fondo, una caja reductora (GRU) patentada por *Baker Hughes*, que se incorpora en el sistema para reducir la velocidad del motor para la operación de la bomba PCP e incrementa el torque suministrado a la bomba. El motor utilizado para manejar el GRU es el mismo que se utiliza en un sistema tradicional ESP. Igualmente incluye un eje flexible, una bomba PCP, una sección de sellos y la conexión a superficie a través de un cable. El desgaste mecánico entre la sarta de varillas y la tubería ha sido un problema significativo en pozos desviados. La tecnología ESPCP elimina las varillas y expande el rango de operación de los sistemas PCP, particularmente en pozos horizontales o desviados. En aplicaciones de fluidos muy viscosos la eliminación

de sarta de varillas alberga una zona de mayor flujo en la tubería de producción, disminuyendo las pérdidas de flujo e incrementando la eficiencia del sistema.

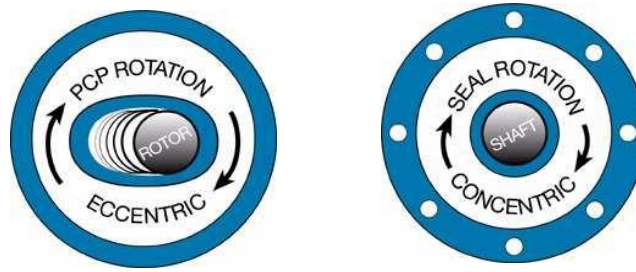
2.3.1 Características y beneficios

- Sistema con alta eficiencia volumétrica. Reducción de gastos de operación.
- Sistema con menos varillas. Elimina el desgaste mecánico entre la tubería y las varillas en pozos horizontales y desviados.
- Aumento de capacidad de torque. Permite motores más pequeños para manejar el sistema.
- Diseño de doble engranaje planetario. Aumento de la fiabilidad y optimización del motor y velocidad de bombeo.
- Sistema de solo aceite. Elimina la necesidad de sistemas múltiples para aceite y sellos para el motor y reductor de engranajes.
- Alta eficiencia del separador de gas horizontal. Proporciona eficiencia en la separación del gas en pozos desviados y horizontales.
- Consumo Optimizado. Permite la tasa de flujo máximo a la menor caída de presión.
- A través del tubing transmite la implementación del sistema. Se remueven los problemas asociados a giro inverso (*Back-spin*).

2.3.2 Componentes del sistema ESPCP

- **Eje Flexible:** Convierte la rotación excéntrica de la bomba en rotación concéntrica del sello, transfiere el empuje al sello y está diseñado para altas cargas radiales. Ver figura 11.

Figura 11. Eje Flexible.



Fuente: MALLIN; Bill. ESPCP. *Ingeniería de Aplicaciones Baker Hughes Colombia*. 2009.

- **Sección Sello:** Previene que el fluido del pozo y contaminantes ingresen a la caja reductora y el motor, también permite que el aceite del motor y la caja reductora se expanda o contraiga, además iguala la presión interna del motor, la caja reductora y la presión del fluido en el pozo amortiguando el empuje generado desde la bomba.
- **Caja Reductora (GRU):** Este componente se utiliza debido a que los sistemas PCP giran más lento que los motores ESP. Los motores eléctricos estándar giran aproximadamente a 3600 rpm a 60 Hz, pero el rango típico de operación de las PCP está entre 100 a 500 rpm (Ver figura 15). Además utiliza aceite dieléctrico de alta resistencia y posee sistema de doble planetario, el cual puede reducir la velocidad de 9 a 11 veces las rpm originales. Este diseño permite retener más del 98% de la eficiencia del motor. Ver figura 12.

Figura 12. Caja Reductora.

- Reducción 9:1

- (60 Hz) 3500 RPM Entrada = 389 RPM Salida
- (50 Hz) 2917 RPM Entrada = 324 RPM Salida

- Reducción 11.5:1

- (60 Hz) 3500 RPM Entrada = 304 RPM Salida
- (50 Hz) 2917 RPM Entrada = 254 RPM Salida



Fuente: MALLIN; Bill. ESPCP. *Ingeniería de Aplicaciones Baker Hughes Colombia*. 2009.

La GRU también cumple con otro requerimiento de la PCP y es proporcionar un mayor torque, necesario para superar el ajuste de interferencia entre el rotor y el estator. El diseño de la GRU permite la reducción de la velocidad y el aumento de torque de salida, permitiendo que el motor trabaje más fácil a lo largo de la vida útil del sistema.

- **Motor:** Es el que provee giro y torque al eje de la bomba, está especificado para una determinada potencia, voltaje, corriente y frecuencia, está constituido por rotores y cojinetes ensamblados a lo largo de un eje, insertado dentro de un estator bobinado, contiene aceite sintético para garantizar correcta lubricación de los cojinetes, para su correcta refrigeración, necesita de un flujo circulando a través de su diámetro exterior.

Para el funcionamiento de este sistema se debe asegurar ciertas condiciones y equipos en superficie, los cuales se nombran a continuación:

2.3.3 Equipos de superficie

- **Suministro Eléctrico en Superficie:** Se requiere de una fuente de poder para alimentar eléctricamente el controlador en superficie y el variador de acuerdo a los KVA que se requieren para operar el equipo ESPCP (mínimo 50 KVA). En caso de utilizar un generador eléctrico, es muy importante que este sea apto para trabajar con variadores de frecuencia, esto con el objeto de poder sobrellevar los armónicos generados. El generador debe proporcionar 480 VAC trifásico en la salida. Si se utiliza una línea de electricidad, usualmente el voltaje disponible es de mediana tensión (entre 13.2 a 34 KV).
- **Transformador SDT (*Shift Down Transformer*):** Este elemento es necesario si se utiliza un suministro eléctrico de mediana tensión. El objetivo es reducir el Voltaje de la línea de suministro a 480 VAC para alimentar el variador. Este componente usualmente es proporcionado por la operadora de acuerdo al suministro eléctrico que se disponga en campo (por ejemplo 13200-480 o 34500-480). Si se utiliza un generador, no se requiere de este componente.
- **Variador de Frecuencia:** Este elemento permite controlar la frecuencia del motor de fondo y por consiguiente la producción del pozo. Este componente protege el sistema mediante la detección de condiciones cambiantes, como el flujo o la presión que podrían causar daños. Se pueden programar alarmas y límites en el variador, permitiendo cambios automáticos para optimizar la producción y las condiciones de operación.
- **Transformador SUT (*Shift Up Transformer*):** Este elemento se requiere para elevar el voltaje de salida del variador de 480V al voltaje requerido por el motor de fondo del equipo ESPCP (1100 a 4100 V).

- **Caja de Venteo:** Permite la conexión eléctrica entre el equipo de superficie y el cable que proviene del equipo de fondo.
- **Skid:** Se refiere a la instalación en superficie (caseta) en donde se instalan todos los equipos de superficie. Adicionalmente ofrece protección al equipo y ofrece suministro eléctrico para otros elementos de apoyo (por ejemplo iluminación interna). El *skid* debe estar correctamente instalado sobre una planchada y con conexión a tierra.
- **Cable:** El cable conecta el motor de fondo con el sistema de control de superficie y tiene varias configuraciones que se adaptan tanto a las propiedades del fluido como a la geometría del pozo. Se puede encontrar cable redondo y plano, el cable redondo tiene mejores propiedades eléctricas, pero hay casos en los que por cuestiones de espacio debido al diámetro del pozo se requiere utilizar cable plano para minimizar daños.
- **Mitigación de Armónicos:** Es posible instalar un dispositivo de mitigación de armónicos antes del variador de frecuencia con el fin de garantizar, aunque su implementación no es obligatoria. El sistema de mitigación escogido igualmente debe ajustarse a la potencia del variador de frecuencia¹³

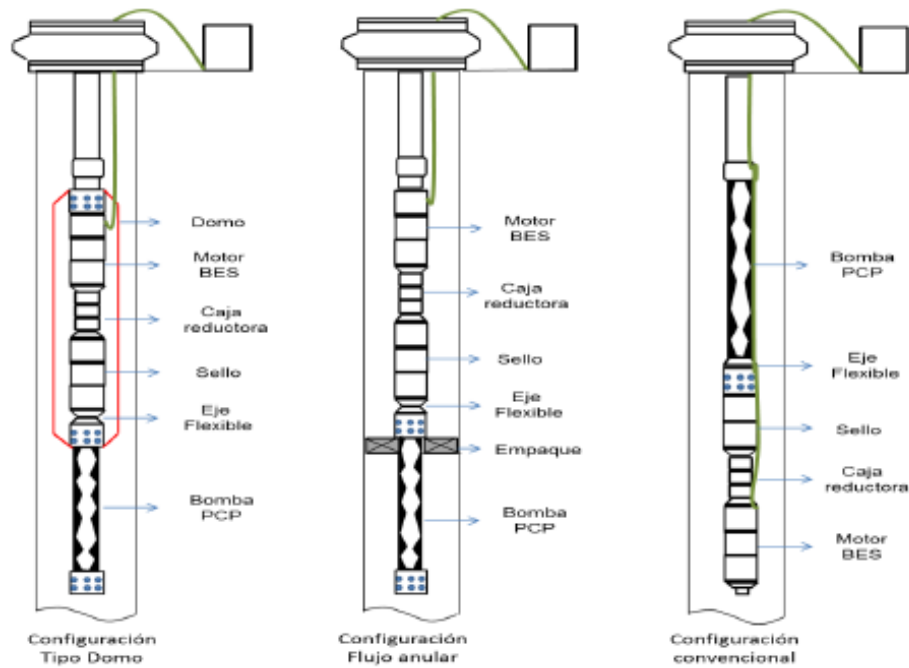
¹³ SHIRLEY, Kathy. Electrical Submersible Progressing Cavity Pump Systems [online]. Articles Pumps [Stuart Roosa Dr., Claremore]: Baker Hughes Centrilift, Abril de 2008. Disponible en la Web: < <http://www.pump-zone.com/topics/pumps/progressing-cavity/electrical-submersible-progressing-cavity-pump-systems> >

Tabla 1. COMPARACIÓN SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIALES

DESCRIPCIÓN	PCP	ESP	ESPCP
CRUDO PESADO	* * * * *	*	* * * * *
ARENA	* * * * *	*	* * * * *
POLIMERO	* * * * *	*	* * * * *
POZOS DESVIADO	*	* * * * *	* * * * *
CAUDAL	* *	* * * * *	* * * *
PROFUNDIDAD BOMBA	* *	* * * * *	* * * *
RESISTENCIA A LA TEMPERATURA	* * *	* * * *	* * *
EFICIENCIA BOMBA	* * * * *	* *	* * * * *
TRANSFERENCIA EFICIENCIA	* *	* * * * *	* * * *
HSE	* * *	* * * * *	* * * * *
CONFIABILIDAD	* * *	* * * * *	* * * *
COSTO (FONDO DE POZO)	* * * *	* * *	* *

Fuente: Publicación SPE, aplicación de ESPCP en campos costa afuera China, año 2010

Figura 13. Diseño de diferentes estructuras ESPCP



TIPO		OBJETIVO	CARACTERISTICAS
Invertido	Domo	Caudales muy bajos	Aumenta la velocidad del fluido mediante el motor
	Flujo anular	Casos especiales	Disponibilidad de mayor tamaño radial
Convencional		Comunmente usado	La misma estructura con ESP

Fuente: Publicación SPE, aplicación de ESPCP en campos costa afuera de China, año 2010

3. SELECCIÓN DE POZOS CANDIDATOS

Se creó una metodología para seleccionar los pozos con las condiciones necesarias que requiere el sistema de levantamiento de bombeo electrosumergible con cavidades progresivas (ESPCP) para poder llevar a cabo el estudio de viabilidad técnica y económica de los pozos del campo estudio. A continuación se describe en que consiste y el procedimiento llevado a cabo.

3.1 CREACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

3.1.1 Procedimiento

3.1.1.1 Recopilación de la información. En este primer paso se buscará la información de cada pozo (historia, caudales, presiones, niveles, sistemas de levantamiento implementados, profundidad, diámetros de *casing* y *tubing*, fallas, entre otros) y se organizará para poder definir los parámetros base con los cuales se hará la selección de los pozos.

3.1.1.2 Análisis de la información. Una vez organizada la información, se definieron los parámetros de selección de los pozos, teniendo en cuenta las características del sistema de levantamiento a implementar, los cuales serán caudal, índice de productividad e índice de frecuencia de fallas.

3.1.2 Caudal (Q_L). se tomarán los valores de la producción de cada pozo y se irán almacenando, de este modo, cuando se tengan todos los datos se identificará cuales presentan los caudales adecuados (caudales altos).

3.1.3 Índice de productividad (IP). El índice de productividad se calculará con la información recopilada (caudal, presiones, niveles, etc.).

3.1.4 Índice de frecuencia de fallas (IFF). este índice se calculará tomando las fallas por varilla o tubería rota que ha tenido cada pozo a partir del año 2016 hasta el año 2018 y el tiempo real activo, o sea el tiempo que ha estado produciendo (eliminando el tiempo por intervenciones y problemas), en ese mismo período.

3.1.5 Matriz de resultados Cuando se haya calculado los parámetros para cada pozo, se realizará una matriz de resultados, de esta forma se hará la clasificación de los pozos con mejores condiciones y finalmente se seleccionará el pozo objeto de estudio.

3.1.6 Criterios de selección En la siguiente tabla se muestran los criterios que se tendrán en cuenta para cada parámetro y de este modo seleccionar los pozos con las mejores características para la implementación del sistema ESPCP. Ver tabla 2 y 3.

Tabla 2. Criterios de selección de cada parámetro.

CONVENCIONES	PARÁMETROS DE SELECCIÓN		
	Q*	IP**	IFF***
	> 240	> 0,5	> 1
	150 < Q < 239	0,25 < IP < 0,49	0,5 < IFF < 0,99
	60 < Q < 149	0,01 < IP < 0,24	0 < IFF < 0,49

Tabla 3. JUSTIFICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN DE CADA PARÁMETRO.

PARÁMETRO	JUSTIFICACIÓN
CAUDAL	Caudal > 240 BPD, fue seleccionado debido a la experiencia del campo con el sistema PCP.

PARÁMETRO	JUSTIFICACIÓN
	Caudal > 60 BPD, porque es el mínimo caudal que se debe manejar para poder llevar la arena a superficie en el campo estudio.
IP	(0,01) se tomó este valor porque es la mínima capacidad de aporte de fluidos del yacimiento hacia el pozo registrada. (0,5) se tuvo en cuenta este valor para asegurar una productividad media.
IFF	Los índices de falla de los campos que presentan un comportamiento similar en los llanos orientales

En la tabla 2 en el cuadro de convenciones los colores indican:

- **Verde:** Son los pozos que presentan las mejores condiciones requeridas para la implementación del sistema ESPCP, cumpliendo con los criterios definidos para cada parámetro.
- **Amarillo:** Son pozos que presentan buenas características pero con objeto de optimización, ya que para la selección se le dará prioridad a los pozos que posean las mejores condiciones o el más alto índice de frecuencia de fallas.
- **Rojo:** Son los pozos que no cumplen con las condiciones y por lo tanto no son candidatos para la implementación del sistema.
- **Guion (-):** Indica los pozos que no tienen información sobre las fallas presentadas o no tienen registros de niveles de fluidos.

En esta tabla se muestran los principales criterios de selección, estos se deben tener en cuenta ya que la matriz de resultados se dará en base a estos parámetros y con estas convenciones para hacer más fácil la interpretación de la misma.

En la tabla 3 se justifican los criterios utilizados para la selección de los pozos. En cuanto a los parámetros, el caudal se tomó como uno porque el sistema ESPCP esta diseñado para manejar altos caudales, por esto, se tuvo en cuenta como criterio un caudal > 240 BPD debido a las experiencias que se han tenido en los campos con

los sistemas PCP (manteniendo la relación $Bls \cdot 100RPM$). El caudal >60 BPD se tomó como criterio pensando en los problemas de arenamiento¹⁴.

Este sistema se debe asegurar buena producción, tomando así como segundo parámetro el índice de productividad, ya que este se define como la capacidad aporte de fluidos desde el yacimiento hacia el pozo.

Los criterios que se definieron para el índice de productividad se basaron principalmente en que estos yacimientos son maduros y se toma como 0.5 para asegurar una productividad media y el de 0.01 porque de todos los IP que se calcularon este fue el mínimo reportado.

El índice de frecuencia de fallas se dejó como parámetro debido a la criticidad de fallas que se presenta en estos campos ocasionadas por la alta desviación de los pozos y con el objetivo de aprovechar una de las ventajas más atractivas del sistema ESPCP que es no utilizar varillas y así reducir los costos por intervenciones.

3.1.7 Aplicación de la metodología de análisis Inicialmente se revisaron pozos que han tenido sistemas de levantamiento por bombeo electrosumergible y bombeo por cavidades progresivas para tener información de estos sistemas estando en funcionamiento y tener bases para analizar la implementación del sistema ESPCP y así llevar a cabo un estudio más completo.

La metodología se aplicó a pozos que actualmente se encuentran activos, primero revisando la información a nivel de campo y finalmente a nivel de pozo, de la siguiente manera:

¹⁴ CAMACHO Andrés y VILLAMIZAR Yudy. Análisis de la velocidad de flujo en los pozos del Activo Llanito de Ecopetrol S.A para determinar el arrastre o la depositación de la producción de arena. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2010. 33 -51 p.

3.1.7.1 Historia La historia de los pozos es fundamental para poder llevar a cabo el desarrollo del estudio, ya que proporciona información de los problemas que han presentado los pozos a lo largo de su vida productiva.

Se recopila la información para cada pozo, tal como los sistemas de levantamiento que ha tenido implementados, fecha de perforación, tipo de completamiento, *survey*, formaciones, entre otros.

3.1.7.2 Producción Se revisa documento de potenciales de los pozos del campo, la zona productora, la producción bruta, la producción neta, el BS&W, la producción de gas, y el tipo de sistema de levantamiento artificial que tiene implementado.

4. INFORMACIÓN PARA DISEÑO DE LOS EQUIPOS.

4.1 DATOS DE DISEÑO CAMPO ESTUDIO.

En la siguiente tabla se presentan los datos necesarios para dimensionar el equipo ESPCP que aplican para la prueba a realizar en el campo estudio. El máximo ángulo de desviación que tendrán los pozos en la sección tangente donde se instalara el equipo ESPCP es de 80° y hasta 6 °/100' de DLS. Se debe tener en cuenta los siguientes parámetros para la modelación del equipo, ver tabla 4.

Tabla 4. Datos diseño de los equipos de fondo.

PARAMETRO	DESCRIPCION ESPCP	UNIDAD	OBSERVACIONES
Tipo de pozo	Horizontal		JS-001H
Punto medio de perforados (MD)	4214	pies	
Punto medio de perforados (TVD)	2683	pies	
Profundidad de asentamiento mínima (MD)	2700	pies	
Casing (Asentamiento de la bomba)	7	in	
Tubing	3.5	in	
Presión Estática	1072	psi	
IP estimado (bfpd/psi)	4.7	(Bls/psi)	
Caudal óptimo estimado (bfpd)	1575	BFPD	
Rango IP (Min - Max) (bfpd/psi)	1.5-3	(Bls/psi)	
Rango de producción (Min - Max) (bfpd)	1300-2100	BFPD	
Presión Fluyente (psi)	329	psi	

PARAMETRO	DESCRIPCION ESPCP	UNIDAD	OBSERVACIONES
Nivel de fluido dinámico (ft)	1930	ft	Nivel de fluido dinámico estimado
BSW (%)	90%	%	
GOR	5 - 8	scf/sbl	
Gravedad API	12.8	°API	
Salinidad (ppm Cl)	800	mg/L	Promedio salinidad agua de producción
Presión de burbuja (pb)	80	psi	
Temperatura de yacimiento (°F)	145	°F	
N2, CO2 Molar	0,542 - 0,306	% Molar	
Viscosidad del crudo (cp) @ pb	731	cp	
Temperatura @ viscosidad reportada (°F)	145	°F	
THP (psi)	150 - 180	psi	

4.2 CONDICIONES ESPECIALES PARA EL DISEÑO, INSTALACIÓN, ARRANQUE Y OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS:

- Los equipos ESPCP deberán estar en capacidad de entregar el caudal óptimo del diseño a una velocidad inferior a las 300 RPM.
- La operación para la tasa máxima de diseño no puede superar los 350 RPM.
- Los diseños de los equipos de fondo deben estar ajustados al caudal óptimo según los parámetros suministrados, pero en caso de desviación de la productividad del pozo la bomba debe estar en capacidad de cubrir el rango de producción solicitado.

- Históricamente en el campo estudio se ha usado para las aplicaciones de PCP convencional, bombas con elastómero de alto Nitrilo, en caso de sugerir un elastómero diferente se revisará y se realizará pruebas de hinchamiento de los elastómeros.
- Se recomienda diseñar con suficiente cabeza de levantamiento para que la eficiencia inicial de la bomba y el ajuste rotor-estator no comprometa la eficiencia final de la bomba y el tiempo de vida de la misma.

4.2 BASES DE DISEÑO.

Para realizar las simulaciones, se deberán utilizar las siguientes correlaciones:

Correlaciones de flujo:

Correlación del pozo en la sección vertical: Hagedorn & Brown (1963)

Correlación del pozo en la sección horizontal: Beggs & Brill (1973)

Correlaciones de fluidos:

Petróleo muerto: Glaso

Saturado: Kartatmodjo

Sub/saturado: Ghetto & Villa (heavy oil)

Densidad del petróleo: Standing

Compresibilidad de petróleo: Vázquez & Beggs

Factor volumétrico del petróleo: Vázquez & Beggs

4.3 REQUERIMIENTOS EQUIPO DE FONDO ESP.

4.3.1 Componentes: Los equipos de fondo ESPCP deben estar conformados por los componentes que se presentan en la Tabla 5. Estos componentes deben seleccionarse de acuerdo con el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones correspondientes.

Tabla 5. Listado componentes equipo de fondo ESP.

Item	Componente
1	Sensor de Fondo
2	Motor PMM con capacidad de operar a menos de 500 RPM y desarrollar el torque suficiente para las condiciones de operación de la PCP.
3	Sello (s) o protector (es) para el motor PMM. Doble protector con cámaras en la configuración B-B-L, con doble bolsa y zapata de alta carga.
4	Cámara de empuje para Bombas de cavidades progresivas
5	Bomba PCP: Incluye (si aplica) rotor, estator, acoples y extensiones
6	Accesorios y demás acoples para la bomba PCP y el motor
7	Cable plano No. 4 AWG sin capilar, aislante de goma EPDM, 5KV, resistente al crudo, cubierto de plomo, coraza recubierta de acero galvanizado, conductor sólido de cobre, para 450 °F.

4.4 ACCESORIOS DE INSTALACIÓN.

Se debe tener en cuenta que como parte de la instalación del equipo de fondo que se deben suministrar todos los accesorios que se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Accesorios para instalación del equipo de fondo.

Item	Accesorios de instalación	Cantidad	Unidad
1	Caja de venteo	1	Unidad
2	Válvula cheque 3 1/2" X 3 1/2" EU, 8RD		
3	Válvula de drenaje 3 1/2" X 3 1/2" EU, 8RD	1	Unidad

Item	Accesorios de instalación	Cantidad	Unidad
4	Kit de instalación	1	Unidad
5	Aceite dieléctrico	Requerido	Galón
6	Kit de empalme para cable de potencia	1	Unidad
7	Centralizador de motor	1	Unidad
8	Protector de cables sobre equipo	1	Unidad
9	Redres Kit para válvula de drenaje	2	Unidad
10	Superbandas	Requeridos	Unidad

Se ejecuta diseño en AutographPC teniendo en cuenta las recomendaciones anteriores.

Pump: 590-E-2600-LIFTEQ [450Series]

Seal: 513GSB3DB LS

GearBox: Reduction 11.4:1 [538.0Series]

Motor: 562SP_ 125HP 1890V/ 41A (60 Hz)

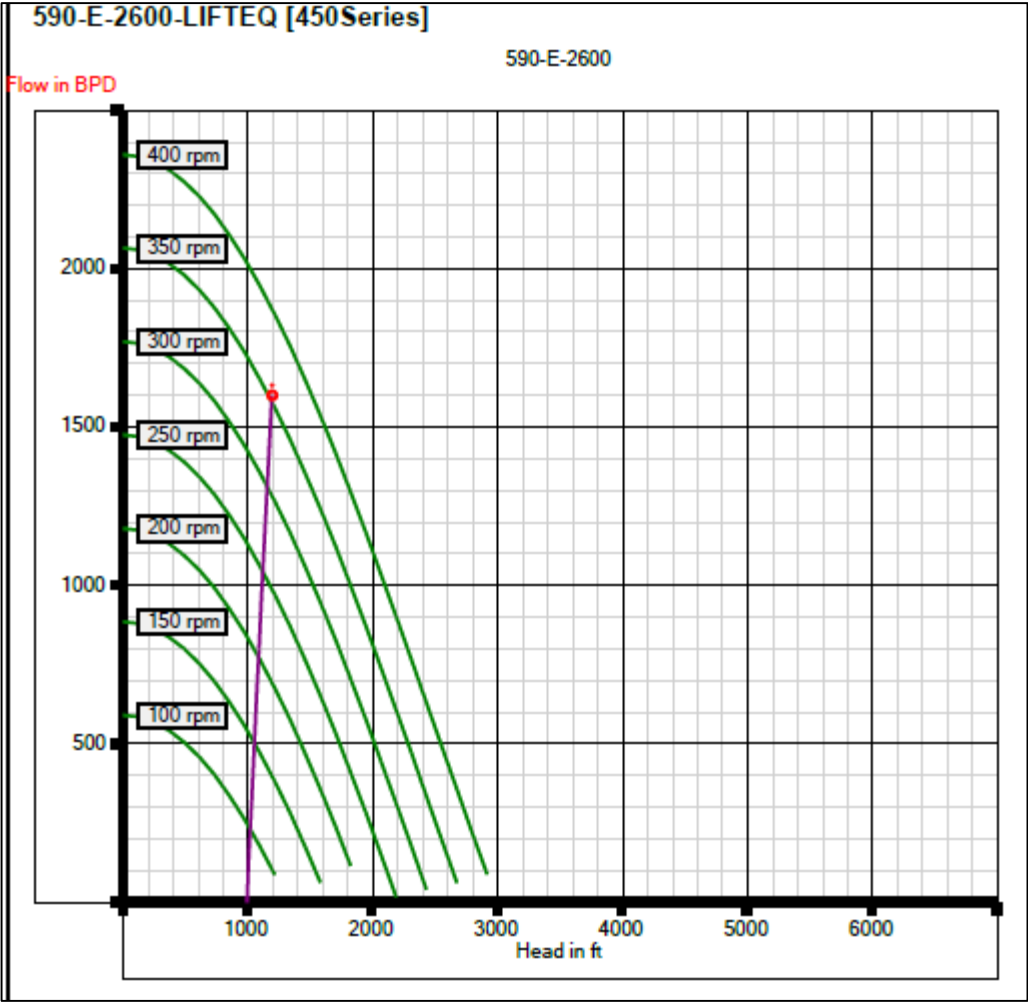
Cable: #6 CELF 5kV ,2746ft

MLE: #4 MLE-KLHT 5kV ,30.0ft

Controller: VSD 2250-VT 260kVA 480V/ 313A

Sensor: none

Figura 14. Comportamiento de flujo de la bomba.



Fuente: AutographPC™ V9.5 File: ESPCP.apcx

Input Parameters:

Fluid Properties:

Oil Gravity 13.0 °API
Water Cut 97.3 %
SG water 1.01 rel to H2O
SG gas 0.8 rel to air
Produced GOR 10.0 scf/STB
Bot Hole Temp 150.0 °F
Surf Fluid Temp 120.0 °F

Gas Impurities:

N2 = 0 %
H2S = 0 %
CO2 = 0 %

Dead Oil Viscosity:

°F:	Cp:
85.0	148.0
135.0	48.4
148.0	20.0

Bubble Point Pressure

PB = 80.0psia

Inflow Performance:

DatumMD 2940 ft
PerfsMD 2940 ft
Datum Static P 950.0 psi
PI 20.5 BPD/psi
IPR Method = Composite IPR

Target:

Pump Intake Setting Depth
(measured) 2776 ft
Desired Flow 1800 BPD
Gas Sep Eff 0 %
Tbg Surf Press 110.0 psi
Csg Surf Press 1.0 psi

Casing & Tubing: Roughness = 0.00108 in

Casing ID (in) 6.386
Tubing ID (in) 2.992
Vertical Depth (ft) 3240
Measured Depth (ft) 3240

Correlations PVT:

Dead Visc: User's table	Saturated Visc: Beggs & Robinson	UnderSaturated: Vasquez & Beggs	Gas Visc: Lee
Oil Compress: Kartoatmodjo	Formation Vol: Standings	Z factor: Hall & Yarborough	Bubble Point P: Standings

Correlations Multiphase:

Tubing Flow: Hagedorn & Brown
Casing Flow: Hagedorn & Brown

Operating Parameters / Selection:

Design Point:

Desired flow (total)	1600 BPD	Frequency	60.8 Hz
% water	97.3 %	GOR into pump	10.0 scf/STB
% Gas into pump	0.0 %	TDH	1192 ft
		Friction Losses	8.363 psi

Pump Selection:

<u>Intake</u>	
Pressure	801.4 psi
Flowrate	1632 BPD
Specific Gravity	0.989 rel-H ₂ O
Viscosity	1.151Cp
Pump Pressure Load	20%
Pump Vol Efficiency	77%
85-1800 by Apergy // 5.35 bpd/rpm	

Discharge

1312 psi
1630 BPD
0.99 rel-H ₂ O
1.251Cp

Pump Selected:

450590-E-2600-LIFTEQ
Pshaft RPM = 359.5
Shft HP @ 60.8 Hz = 29.13
Required Motor HP at 60.0 Hz = 25.17

Seal Selection:

Seal angle (set depth) = 0 Deg fm vert.
No sand present

No Temp Avail
Chamber Cap Used (Top to Bot)=
12% 10% 9%

Motor/Seal Oil type = PC-92

Seal Selected : CENTRspec GSB3DB LS [513 Series]
Options : H8 IL
No comments

Shaft load = 29 %

Motor Selection:

Terminal Voltage	=1718.3 V
Motor Current	=17.5 A
Load acc to N.P.	=20.1 %
Shaft Load	=2.6 %

Fluid Speed	=2.175ft/s
Eff/PF	=81.8% / 52.86%
Internal Temp	=199.7°F
Motor Selected:	SP_
	125HP 1890V 41A [562Series]

No comments *NOTE: Motor ratings at 60Hz

Cable Selection:

Surface Length	50.0ft
Tubing Length	2748ft
MLE length	30.0ft
Surface Temp	120°F

Wellhead Voltage	1758.3V
Wellhead kVA	53.3kVA
Voltage Drop	40.0V
Cond Temp (main)	156.8°F
Temp Rating	500.0°F

Surface Cable

#4 CELF5.0kV 50.0ft
No comments

Main Cable

#6 CELF5.0kV 2748ft

MLE Cable

#4 MLE-KLHT5.0kV 30.0ft

Controller Selection:

Surface kW	28.7kW
Input kVA	33.0kVA
System kW	29.7kW
Max Ctrl Current	64.1A
Power Cost/kWH	0.05\$/kWH
Total Power Cost	= \$1070/month
No comments	

Voltage Input	480.0V
Max Well Head Volts	1758V
Target Frequency	60.8Hz (6.88V/Hz)
Start Frequency	19.1Hz
Step-up Trafo	3.663 ratio
Selected: VSD 2250-VT	260kVA/ 480V/ 313A

Con estos parámetros se simula de manera eficientemente con las siguientes premisas:

- Para este caso, con un caudal máximo de 1600 bbl.
El punto de diseño es 1450 bbl.
- La bomba es una Sandy 85-1800 que produce 5.34 bpd/rpm, suministrada por Apergy.
- Se realiza la simulación en APC utilizando una bomba de la serie E (mismo diámetro) ligeramente más grande afectando un poco más la eficiencia volumétrica.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL.

El pozo seleccionado para la evaluación de la tecnología ESPCP es el JS-001H. Entre las características principales para la selección de este pozo se encuentran:

Pozo horizontal con una sección tangente para el asentamiento de la bomba mayor a 150 ft.

Bajo índice de productividad, por lo que los requerimientos de tasa de extracción están dentro de los rangos de evaluación requeridos para la prueba ESPCP.

El pozo cuenta con un sistema ESP activo y una bomba diseñada para manejar bajos caudales (menos de 3000 BFPD), la cual cuenta con predictivos de consumo de energía disponibles y que pueden ser usados para comparar los beneficios de la prueba ESPCP.

Aunque la mayor población potencial para la tecnología se encuentra en la zona norte del campo, es preferible realizar la prueba, ya que cuenta con más facilidades para su monitoreo y control, y las propiedades del fluido y del Yacimiento son extrapolables a ambos campos.

Para la prueba piloto se solicitó a dos empresas de servicio la oferta técnico económica.

Las empresas de servicios son:

Borets Services Ltd Sucursal Colombia.

Schlumberger Artificial Lift.

Los parámetros de diseño que se tuvieron en cuenta para la evaluación de la evaluación técnica de la ofertan se presentan en la siguiente tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de díselo para el sistema de levantamiento artificial pozo JS-001.

FORMATO HOJA DE DATOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL					
PRODUCCIÓN DE CRUDO Y GAS VICEPRESIDENCIA DE DESARROLLO Y PRODUCCION					
PCG-F-160			Elaborado: 21/04/2015		Ver
DATOS DEL POZO					
Fecha	01/02/2019			Pozo	JS-001
Campo	Estudio			Yacimiento	ARENAS BASALES
Pozo Nuevo				Rediseño	
Mantenimiento	X			Cambio de SLA	
Reacondicionamiento				SLA Anterior	
GEOMETRIA DEL POZO					
Vertical				Condiciones especiales (marque con una X)	
Desviado				Empaque	
Horizontal		X		Camisa	
Multilateral				Pescado	
				Colapso	
Diámetro interno de revestimiento (Asentamiento de la bomba)	7" OD; 23 lb/ft; K-55; BTC; R-3.	Pulg		Tapon	
Diámetro externo de tubería de producción	4-1/2" - 11.6. lb/ft	Pulg		Otros (Descripcion)	
Diámetro interno de tubería de producción	4	Pulg			
Profundidad media de perforaciones MD	3798' (MD)	Pies			
Notas:					
INFORMACION ACTUAL DE EQUIPOS DE SUPERFICIE					
Transformador SDT / DUAL	Capacidad (KVA)	1000		Voltaje de red	34500
Variador	Capacidad (KVA)	320			
	Voltaje de operación (V)	480			
Bombeo electrosomergible y cavidades progresivas con motor de fondo					
Transformador SUT	Capacidad (KVA)	320			
Bombeo de cavidades progresivas					
Motor de superficie	Capacidad (HP)			Cabezal	Capacidad Carga axial
	Voltaje de placa (V)				Potencia (HP)
Bombeo mecanico					
Motor de superficie	Capacidad (HP)			Unidad	Capacidad de carga
	Voltaje de placa (V)				Maximo recorrido (Pulg)
	Diámetro de la polea (pulg)				
Caja Reductora	Maximo Torque (Lbf.pulg)				
Bombeo Hidraulico					
Bomba hidraulica	Capacidad (HP)			Separador	Maxima presion
	Caudal (BFPD)				
Bombeo Natural					
Compresor	Presion disponible (psi)				
	Gas disponible (KPCD)				

RELACION DE INFLUJO DEL YACIMIENTO					
Presión estática	789	psi	Indice de Productividad	2.67	BFPD/PSI
Presión de pozo fluente	320	psi	Caudal de prueba @ Pwf	1252	BFPD
Temperatura de Yacimiento	148	°F	Modelo IPR	IP	

CONDICIONES REQUERIDAS DE DISEÑO					
Caudal de Diseño	1300		Rango de caudal	1200	1800
Presión de cabeza (psi)	100		Profundidad de asentamiento MD (pies)	2700	
Presión de anular (psi)	14.7		Temperatura de Fluido en Cabeza (°F)	120	
Cable capilar (Solo BES, SI/NO)	NO				
Valvula Cheque (SI/NO)	SI				
Sensor	SI				

CONDICIONES REQUERIDAS DE DISEÑO	
Sensibilidades requeridas: - Mínimo: al IP mínimo de 2.5 STB/Psi y al caudal mínimo de 1200 BFPD. - Optimo: al IP óptimo de 2.67 STB/Psi y al caudal óptimo de 1250 BFPD. - Máximo: al IP máximo de 3.5 y al caudal máximo de 1800 BFPD. El equipo debe estar diseñado para operar por debajo de 300 RPM. Solo se admite como sensibilidad de 310 RPM maximo a la condición de 1800 BFPD, ver condiciones completamiento ESPCP No se admiten cajas reductoras de velocidad. La oferta debe incluir motores PMM. No se aceptan propuestas de sistemas con cajas reductoras de velocidad. Se debe entregar oferta opcional para el variador en caso de que este no pueda ser suministrado con los variadores disponibles en campo.	

Con la información descrita anteriormente, y considerando las premisas de diseño del numeral 3, se tiene la siguiente información, producto del sondeo de mercado, por cada una de las compañías de servicio:

- **Borets Services Ltd Sucursal Colombia.**

Se recibe oferta técnico – económica. La oferta técnica cumple con los requerimientos solicitados para el sondeo respecto a los parámetros de diseño y sensibilidades a realizar.

La oferta de Borets incluye motor del tipo de Magnetos Permanentes (PMM), el cual permite operar el sistema de levantamiento artificial PMM-PCP de 136HP el cual está en condiciones de operar a menos de 500 RPM. También incluye una bomba de cavidades progresivas NTZ 400*120ST120 la cual tiene una capacidad de desplazamiento de 7.548 BFPD/RPM. La garantía ofertada para el equipo es de 1000 días.

- **Schlumberger Artificial Lift.**

Se recibe oferta técnico – económica, la cual cumple parcialmente con los requerimientos solicitados. En la oferta técnica que puede observar que se logra la tasa mínima de 11240 BFPD a 300 RPM, sin embargo la tasa máxima de 1800 BFPD la logra llevando el sistema a 480 RPB, lo cual es una condición operativa indeseable si se quiere asegurar el alto Run Life del sistema PCP.

Considerando que se trata de un caso de negocio para un estudio se revisa técnico-económicamente esta oferta. La bomba propuesta corresponde a la referencia 76K1500 la cual tiene un desplazamiento de 4.78 BFPD/RPM. El motor ofertado es de tecnología PMM serie 456 con capacidad de torque de 1020N*M con 107KW.

5. 1 OFERTAS SONDEO DE MERCADO Y ESCENARIO BASE.

La evaluación económica para el caso de negocio consiste en realizar la comparación del costo de la energía de los sistemas extracción y las inversiones. Teniendo en cuenta que el sistema de levantamiento a evaluar incluye tecnología de control vectorial para la operación del motor de magnetos permanentes, se incluye en la evaluación el costo del variador.

Para las evaluaciones, teniendo en cuenta que se requieren los mismos servicios para la instalación de ambos sistemas, ESP y ESPCP, no se tiene en cuenta los costos de instalación ni el servicio del spooler.

5.1.1 Escenario base ESP:

El escenario base es un completamiento con sistema ESP convencional acorde a las tarifas de costos vigentes, y se toma para el cálculo de los flujos de caja de los costos el consumo de energía acorde a los predictivos de consumo de energía. Se toma como referencia el costo de un variador de 300 KVA según los costos de los equipos comprados para la campaña de perforación facilitados por el área de proyectos.

Los costos de inversión del sistema ESP convencional se toman de la lista de precios del contrato del campo sin incluir descuentos (sin incluir el cable), con la capacidad de manejar el requerimiento de tasa puesto en la tabla 1. Adicionalmente, se toma en cuenta como referencia los costos de la compañía de servicios menos favorable, en este caso Borets. Los costos que se tuvieron en cuenta son:

Tabla 8. Costo promedio de un sistema ESP de 2000 BFPD.

DESCRIPCIÓN	Cantidad	ACUERDO LISTA DE PRECIOS	P X Q LISTA PRECIOS USD
Pump, ESP B 400-1750 CW 6M HSG 114 STG FP CT HSS TA MT	1	\$13,100	\$13,100
Bolt on intake, ESP B 400 CW HSS MTC	1	\$1,210	\$1,210
Motor Seal, ESP B 400 PB102 BPBSL HL HT MT	1	\$4,710	\$4,710
Motor Seal, ESP B 400 PB102 BPBSL HL HT MT	1	\$4,710	\$4,710
Motor, ESP B 456 IL200P 60HP 1053V 35A 6R UT MT HT	1	\$9,030	\$9,030
Sensor, ESP B SPTX 95 5800 CS HT / W SURFACE	1	\$20,730	\$20,730
MLE, ESP flat B 562/728 UB-21 ELB PA 30M SS 5kV	1	\$1,380	\$1,380
TOTAL SIN IVA			\$54,870

El costo sin IVA de un variador de 300 KVA según la información entregada por el área de proyectos es de \$59,821 USD (210.000.000 COP con IVA).

5.2 ESCENARIO PILOTO ESPCP BORETS:

Para el escenario de piloto de optimización se tiene en cuenta el completamiento con sistema ESPCP, acorde a la propuesta comercial del sondeo de mercado, realizado con las empresas que tiene contrato para la operadora. Para el cálculo de los costos de consumo de energía se toma en cuenta la información suministrada por el proveedor del sistema ESPCP, para este caso Borets.

Los costos de inversión del sistema ESPCP con motor PMM, incluyendo el variador, con descuento según la oferta, son:

Tabla 9. Costo sondeo de mercado sistema ESPCP Borets.

DESCRIPTION	Q	PRICE LIST	PRICE LIST X Q	FIELD DISCOUNT	Additional Discounts	SUBTOTAL
PCP NTZ400*120ST120-H * NBR 286	1	\$39,326.46	\$39,326.46	35%		\$25,562.20
Flex Shaft	1	\$8,923.08	\$8,923.08	35%		\$5,800.00
Motor Seal, ESP B 538 PB136 BPBSL HL HSS HT MT	1	\$9,070.00	\$9,070.00	30%		\$6,349.00
Motor Seal, ESP B 538 PB136 BPBSL HL HSS HT MT	1	\$9,070.00	\$9,070.00	30%		\$6,349.00
Motor, PCP B 562 PL200PA 136HP 2267V 36A 18R S MT HT	1	\$95,714.29	\$95,714.29	30%	10.00%	\$60,300.00
Sensor, ESP GRC ESP-1500 456 FL CS 5K 125C 6Ch No Discharge Pressure / V	1	\$20,512.82	\$20,512.82	35%		\$13,333.33
MLE, ESP flat B 562/728 UB-21 ELB PA 30M SS 5kV	1	\$1,380.00	\$1,380.00	30%		\$966.00
Cable, ESP flat SL-450 #4 solid ELB G .020 5kV / Ft	2700	\$9.67	\$26,109.00	35%		\$16,970.85
VSD, ESP 370A 307kVA 480V N3R 6-P PWM AXIOM II AHMI 55C	1	\$119,000.00	\$119,000.00	35%	27.00%	\$56,465.50
Harmonic Passive Filter 240 A MATRIX AP	1	\$13,034.00	\$13,034.00	35%		\$8,472.10
CENTRALIZER FOR SENSOR AND DISCHARGE	2	\$4,135.38	\$8,270.76	35%		\$5,375.99
CABLE PROTECTOR	2	\$1,589.74	\$3,179.48	35%		\$2,066.66
PMM PCP CROSSOVER	1	\$544.62	\$544.62	35%		\$354.00
TOTAL			\$354,134.51			\$208,364.64

El costo del equipo ofertado por Borets es de \$191,393.8 USD sin IVA, el cual incluye el variador de velocidad para el motor PMM, y no incluye el costo de cable ni servicios de instalación.

5.3 ESCENARIO PILOTO ESPCP SCHLUMBERGER:

Para el escenario de piloto de optimización con la compañía Schlumberger se tiene en cuenta el completamiento con sistema ESPCP, acorde a la propuesta comercial del sondeo de mercado. Igual que en el caso anterior, para el cálculo de los costos de consumo de energía se toma en cuenta la información suministrada por el proveedor del sistema ESPCP.

Los costos de inversión del sistema ESPCP con motor PMM acorde a la oferta del sondeo de mercado, son:

Tabla 10. Costo sondeo de mercado sistema ESPCP Schlumberger.

DESCRIPCIÓN	CANT	VALOR LISTA DE PRECIOS USD	P X Q LISTA DE PRECIOS USD
NIPPLE, TUBING, 3 1/2" EUE x 6"	1	\$55.2	\$55.2
TUBING, PUP JOINT, 3 1/2"EUE x 4', J55	1	\$283.3	\$283.3
COLLAR, TUBING, 3 1/2"EUE	1	\$30.5	\$30.5
ROTOR. 56 K 1500. 50C. CH	1	\$6,624.3	\$6,624.3
ST056K1500 REG HNH 108 089EB 0	1	\$7,289.5	\$7,289.5
KIT, FSU, 0.87 X 1 API, 30.15 05H16N4D2B-T14, 3.603-18UNF X 3 1/2 EUE BOX	1	\$4,376.7	\$4,376.7
SUPPORT UNIT: LSBSB-S/LT, 400/456, 5RTB, .87	1	\$11,237.5	\$11,237.5
MOTOR: 456, 17, PMM, 1020N*M, 107KW, 2652V, 30.8A	1	\$75,522.6	\$75,522.6
MLE: 456 MAXLOK-400, 25M, KEPSBPT G, 4KV, 6/1, P/I	1	\$1,935.4	\$1,935.4
DHD,VFD,UNICO,110-1000-060-C-Y- K11	1	\$53,836.9	\$53,836.9
TOTAL SIN IVA			\$161,191.9

El costo del equipo ofertado por Schlumberger es de \$161,191.2 USD sin IVA, el cual incluye el variador de velocidad para el motor PMM, y no incluye el costo de cable ni servicios de instalación.

5.4 ANÁLISIS ECONÓMICO.

Los criterios macroeconómicos y de disciplina de capital con los cuales se realiza la evaluación económica corresponden a los entregados por la operadora y el costo de la energía acorde a la información suministrada por la coordinación de energía, que son:

- TRM equivale a \$ 2,950 en COP/USD
- TIO anual de la operadora del 10% e.a.
- Las evaluaciones se realizan sin incluir el IVA.
- Costo de la energía promedio año, en COP/KWh según tabla 11.
- Periodo de evaluación de 5 años.
- Consumo caso base: 60.6 KWH según predictivos.

Tabla 11. Proyección de tarifas de energía por vigencia.

Vigencia	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
COP/KWh	\$ 312	\$ 293	\$ 285	\$ 280	\$ 291	\$ 296	\$ 284	\$ 269	\$ 241	\$ 238

Para todos los casos se realizan los flujos de caja y la evaluación financiera, considerando solo hasta el margen EBITDA, para lo cual se tienen los siguientes resultados por cada compañía:

5.5 EVALUACIÓN CASO ESPCP BORETS

Los resultados de la evaluación económica muestran que se puede tener un ahorro de energía del orden del 29.6%, al producir los 1800 BFPD con 42.7KWH, que representan un VPN de ahorros de \$60 KUSD. Sin embargo, el costo de los equipos es significativamente superior al costo de un equipo ESP convencional. A continuación se presenta un resumen de la evaluación económica.

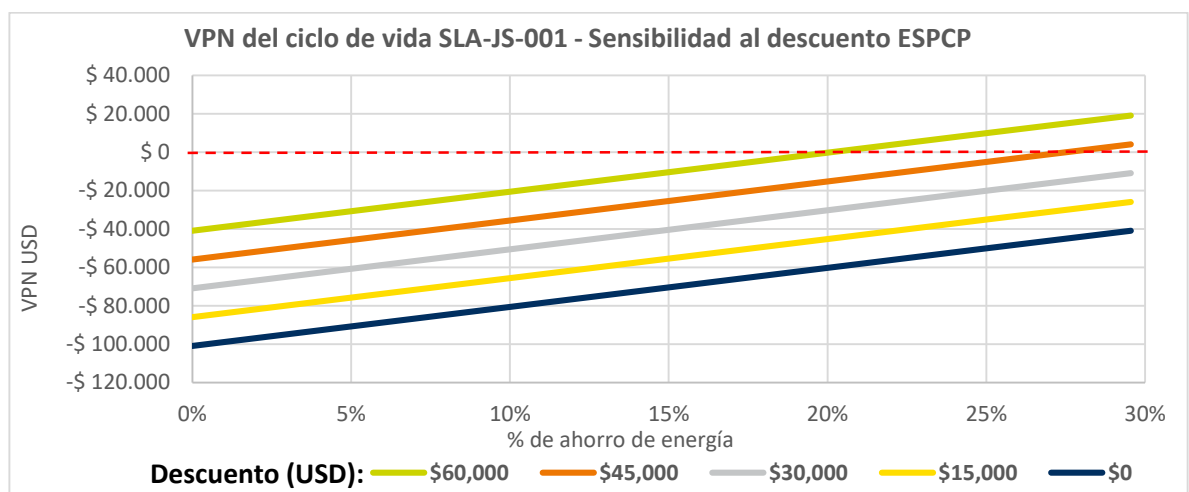
Tabla 12. Resultados de la evaluación económica ESPCP Borets

VPN ahorro de energía	\$ 60,023
VPN inversiones y costos (Ciclo de vida)	\$ 100,954
VPN de la optimización	-\$ 40,931
Relación Beneficio/costo	-0.41

Los resultados de la evaluación económica muestran que el caso de negocio no es favorable, el alto costo de los equipos no compensa el ahorro de energía. Entre los componentes se destaca el alto costo del motor PMM, según la oferta tiene un costo de \$51 KUSD por encima de un motor de inducción convencional, el cual es mayor que todo el valor presente del ahorro de energía de la tecnología.

Con el fin de evaluar si se puede implementar el sistema ESPCP al obtener eficiencias de inversión (descuentos por cantidad, desarrollo de la tecnología, etc) se realiza las sensibilidades en donde se incluye la evaluación considerando que el costo de la tecnología pueda bajar hasta \$60 KUSD. El grafico de sensibilidad se presenta a continuación:

Figura 15. Sensibilidad del VPN según energía y descuentos potenciales Borets.



En este caso de negocio se puede observar que la tecnología sería viable si se garantiza el ahorro de energía mayor al 25%, y se logran un descuento mínimo de \$45 KUSD. Todas las demás sensibilidades presentan un VPN negativo. La propuesta de Borets plantea teóricamente obtener un ahorro de energía de 29.6%, y con la propuesta Económica del sondeo de mercado el VPN es negativo.

5.6 EVALUACIÓN CASO ESPCP SCHLUMBERGER

Para el caso de esta compañía, la oferta técnica muestra un potencial de ahorro del 13.3% de energía para el caso de producción de 1800 BFPD, para lo cual requeriría 70.47 HP (52.5 KW), estos ahorros equivalen a un VPN de 27 KUSD. El costo de los equipos es significativamente superior al costo de un equipo ESP convencional. A continuación se presenta un resumen de la evaluación económica.

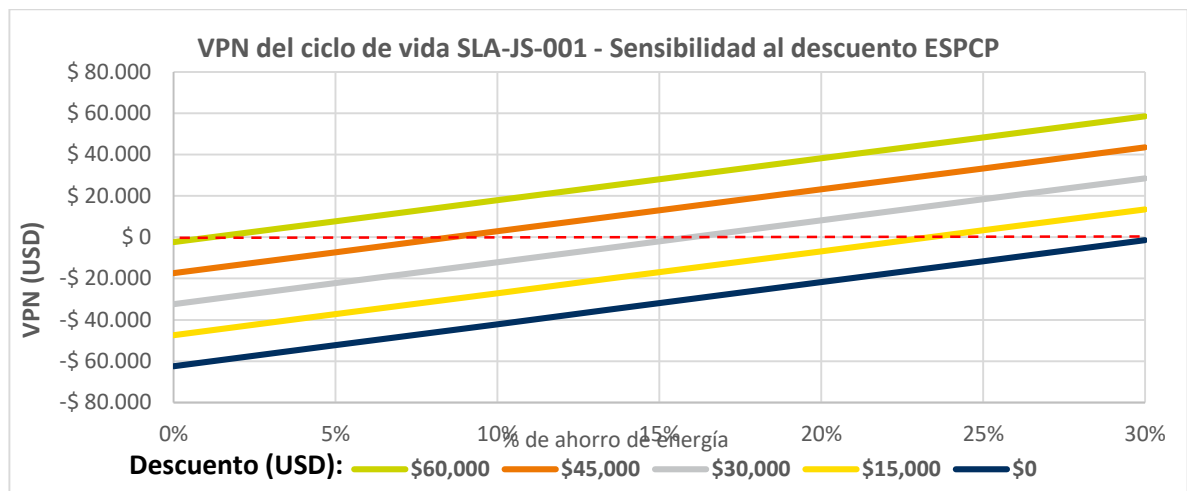
Tabla 13. Resultados de la evaluación económica ESPCP Schlumberger

VPN ahorro de energía	\$ 27,023
VPN inversiones y costos (Ciclo de vida)	\$ 62,405
VPN de la optimización	-\$ 35,382
Relación Beneficio/costo	-0.57

Acorde a la evaluación económica el caso de negocio no es favorable, el alto costo de los equipos no compensa el ahorro de energía. Como en el caso anterior, se destaca el alto costo del motor PMM, según la oferta tiene un costo de \$66 KUSD por encima de un motor de inducción convencional, el cual es mayor que todo el valor presente del ahorro de energía de la tecnología.

Con el fin de evaluar mejoras en la inversión (descuentos por cantidad, desarrollo de la tecnología, etc) se realiza las sensibilidades en donde se incluye la evaluación considerando que el costo de la tecnología pueda bajar hasta \$60 KUSD. En la figura 16 se presenta a continuación:

Figura 16. Sensibilidad del VPN según energía y descuentos potenciales Schlumberger.



En este caso de negocio se puede observar que la tecnología sería viable si se garantiza el ahorro de energía mayor al 15%, y se logran un descuento mínimo de \$30 KUSD. Todas las demás sensibilidades presentan un VPN negativo.

La propuesta de Schlumberger plantea teóricamente obtener un ahorro de energía de 13.3%, y con la propuesta Económica del sondeo de mercado el VPN es negativo. Adicionalmente, la propuesta plantea operar la ESPCP por encima de 320 RPM, lo que pone en riesgo obtener los tiempos de operación de 1100 días al no cumplir las prácticas operacionales para el campo.

6. CONCLUSIONES

- Para ambas compañías (SLB – Borets) se puede observar que el avance tecnológico ha permitido lograr soluciones técnicamente viables, que ofrecen ahorros de energía en comparación con el sistema BES convencional que varía entre en 13% y 29%.
- El diseño realizado para la bomba fue del 77%, relativamente eficiente, garantizando el caudal requerido, teniendo en cuenta los componentes del equipo y los parámetros operativos de campo.
- El costo del equipo de fondo actual supera el 90% de los costos requeridos para un sistema ESP convencional, lo que no compensa los ahorros de energía, por lo que el caso estudio es inviable económicamente para los dos casos evaluados.
- Para que los casos negocio sean viables con las compañías evaluadas se requiere obtener descuentos en la oferta comercial por encima de 30 KUSD para poder implementar la metodología, garantizando ahorros de energía de al menos 15%.

BIBLIOGRAFÍA

ARAYA, Andrés. Análisis técnico económico para el cambio de levantamiento artificial en cuatro pozos del campo Shushufindi. Escuela Politécnica Nacional. Quito 2009.

DUNN, L. MATTHEWS, C. y ZAHACY, T. Progressing Cavity Pumping System Applications in Heavy Oil Production SPE 30271. Calgary, Canadá: (C-FER), 1998.

FLORES, Pablo. Análisis Técnico Económico para un pozo X con levantamiento artificial con Bombas de Cavidad Progresiva en el Campo Sacha. Quito, Ecuador: Octubre de 2009.

GOMEZ, D. C. H., & JÁCOME, S. J. O. Nuevas tendencias en levantamiento artificial: sistemas de levantamiento artificial combinados. Revista Fuentes, 1(1). 2001

MENDOZA, Erick. Evaluación técnico económica del desempeño del Bombeo Electrosumergible como nuevo sistema de levantamiento artificial para el Campo Cantagallo. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2005

ORTEGON CARMONA, Y. P., & AVILA RAMIREZ, E. D. . Evaluación técnico-económica del sistema de levantamiento PCP y ESP para el pozo vertical quifa 5 de campo quifa [recurso electrónico] [recurso electrónico] / Yazmin Paola Ortegón Carmona ; director Efrain Avila Ramirez. Bucaramanga: UIS, 2015.

PEÑA, Fredy. Trabajo de Grado Bombeo Electrosumergible - Descripción, diseño y monitoreo. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2005.

RAMÍREZ, Laura. Evaluación del Sistema de Levantamiento por Cavidades Progresivas para Crudos Pesados en los Campos Teca y Nare. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2006.

ROMERO ZANABRIA, J. D. Implementación del sistema de levantamiento artificial electro PCP en el Lote X. 2015