

**PROPUESTA TÉCNICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
BOMBEO MECÁNICO POR SISTEMA HÍBRIDO ESP-PCP QUE OPTIMICE
VARIABLES OPERATIVAS Y ENERGÉTICAS EN POZOS PRODUCTORES DE
CRUDO PESADO**

**ALEJANDRO GUTIERREZ HERRERA
DIEGO ALEJANDRO RUIZ TIBADUIZA**

**Proyecto integral de Grado para optar al título de
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

**Orientador
EDINSON JIMÉNEZ BRACHO
Ingeniero de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre del Director.

Firma del Director.

Nombre del Presidente.

Firma del Presidente de jurado.

Nombre del Jurado.

Firma del jurado.

Bogotá, Junio de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana de la Facultad de Ingenierías.

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director Programa de Ingeniería de Petróleos.

Dr. Juan Carlos Rodríguez Esparza.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA.

Este logro se lo dedico a todos mis familiares que me han apoyado a lo largo de todo este proceso de aprendizaje, a mi padre Isabib y a mi madre Liliana, por su dedicación y apoyo para llegar hasta este punto de mi vida.

Alejandro Gutierrez Herrera.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este logro principalmente a Dios, por todas las bendiciones que me ha otorgado. A mi mamá Astrid Tibaduiza quien siempre me apoyó y me ayudó en todo momento, brindándome el más sincero consejo y el más fuerte abrazo para superar caídas y seguir en la lucha. A mi papá William Ruiz por siempre apoyarme y respaldarme sin importar la situación. A mi hermana Laura Ruiz por ser mi ejemplo a seguir, por apoyarme y estar siempre conmigo. A mis abuelos quienes siempre me han apoyado a lo largo de mi vida y me ha formado en la persona que soy hoy en día. A mis amigos quienes hicieron parte de este proceso escuchándome, aconsejándome y animándome en momentos difíciles. Sin ninguno de ellos esto no habría sido posible, gracias porque cada uno aportó un grano para materializar este gran logro.

Diego Alejandro Ruiz Tibaduiza.

AGRADECIMIENTOS.

Queremos agradecer a nuestro director Edinson Jiménez Bracho, por sus consejos, directrices y recomendaciones para lograr el presente trabajo, así como el tiempo que dedicó para poder llegar al objetivo.

A nuestro compañero Santiago Álvarez Padilla, quien nos permitió trabajar en su computador sin importar el día y la hora, siempre con la mejor actitud.

A todos nuestros familiares y amigos que siempre nos acompañaron en el proceso dándonos la mejor energía y deseos.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1. Descripción sistemas de levantamiento artificial	16
1.2. Sistema híbrido ESP-PCP	16
1.2.1. <i>Funcionamiento</i>	17
1.2.2. <i>Ventajas y desventajas</i>	20
1.2.3. <i>Identificación de fallas</i>	20
2. CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS PCP	21
2.1.1. <i>Según su Instalación</i>	21
2.1.2. <i>Según su geometría</i>	22
2.2. Características operativas de la bomba pcp	24
2.2.1. <i>Desplazamiento volumétrico o caudal</i>	24
2.2.2. <i>Altura de descarga (head)</i>	25
2.3. Selección de la bomba	26
2.3.1. <i>Diámetro de la bomba</i>	26
2.3.2. <i>Caudal</i>	26
2.3.3. <i>Diferencial de presión</i>	27
2.3.4. <i>Selección del elastómero</i>	27
2.4. Selección del motor	27
2.4.1. <i>Serie y modelo</i>	28
2.4.2. <i>Potencia</i>	28
2.5. Selección del sello	28
2.6. Selección de eje flexible	28
2.7. Selección del cable de potencia	28
2.7.1. <i>Temperatura de operación</i>	28
2.7.2. <i>Caída de voltaje</i>	29
2.9. Bombeo mecánico	29
2.10. Funcionamiento	29
2.11. Ventajas y Desventajas	32
2.12. Principales fallas	32

3.	METODOLOGÍA Y DATOS	36
3.1.	Descripción del pozo seleccionado	39
3.1.1.	<i>Pozo Castilla Norte 3</i>	39
3.1.3.	Propiedades del yacimiento y de los fluidos	41
3.2.	Simulación	43
3.2.1.	<i>Simulación Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico</i>	44
3.2.2.	<i>Simulación de la bomba ESP-PCP</i>	53
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	57
5.	CONCLUSIONES	58
	BIBLIOGRAFIA	60
	ANEXOS	63

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Componentes del Sistema ESP-PCP.	17
Figura 2. Diagrama Sistema ESP-PCP completo.	19
Figura 3. Clasificación de las fallas y los equipos relacionados.	20
Figura 4. Bomba multilobular.	22
Figura 5. Diámetros según los modelos de bombas PCP.	26
Figura 6. Esquema general del bombeo mecánico.	30
Figura 7. Funcionamiento del sistema.	31
Figura 8. Fallas por Diseño y Operación.	32
Figura 9. Fallas mecánicas de la sarta de varillas.	33
Figura 10. Fallas por Corrosión.	34
Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología.	36
Figura 12. Estado mecánico del pozo Castilla Norte 3.	39
Figura 13. Generalidades del pozo Castila Norte 3.	40
Figura 14. Ubicación del casing del pozo.	42
Figura 15. Datos del casing del pozo.	43
Figura 16. Datos de survey del pozo.	44
Figura 17. Selección del bombeo mecánico y datos del mismo.	45
Figura 18. Datos de completamiento.	46
Figura 19. Estado mecánico del pozo con bombeo mecánico.	47
Figura 20. Datos de Superficie.	48
Figura 21. Datos del fluido.	48
Figura 22. Análisis nodal.	49
Figura 23. Curvas de oferta y demanda con bombeo mecánico.	50
Figura 24. Estado mecánico con bomba ESP-CP.	52
Figura 25. Características de la bomba ESP y diagrama de rendimiento.	53
Figura 26. Características de la bomba PCP y diagrama de rendimiento.	53
Figura 27. Curvas de oferta y demanda con ESP-PCP.	54

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Ventajas y Desventajas del Sistema Híbrido ESP-PCP.	19
Tabla 2. Nomenclatura de las bombas PCP según fabricantes.	23
Tabla 3. Tipos de elastómero.	27
Tabla 4. Ventajas y Desventajas del Bombeo Mecánico.	31
Tabla 5. Propiedades de yacimiento.	41
Tabla 6. Propiedades del fluido.	41

RESUMEN

Actualmente el bombeo mecánico es uno de los sistemas de levantamiento artificial más utilizados en el área de producción de la industria de los hidrocarburos, sin embargo, este sistema presenta múltiples limitaciones y fallas, lo que lo convierte en un mecanismo costoso por su mantenimiento e intervenciones workover que puede llegar a necesitar.

[5]

La tecnología en sistemas de producción ha ido avanzando tanto que hoy en día ciertos inconvenientes pueden ser evitados trayendo grandes beneficios económicos para cualquier compañía.

Este trabajo tiene como fin exaltar los beneficios que pueden llegar a aportar los avances tecnológicos en cuanto a la producción de hidrocarburos, como lo es una bomba híbrida ESP-PCP como Sistema de Levantamiento Artificial.

Con el apoyo del Software PIPESIM y aplicando este sistema a un pozo de crudo pesado, y que ha sido sometido al tradicional Bombeo Mecánico. Con los resultados obtenidos se busca comparar la eficiencia tanto operativa como energética que cada uno proporciona, y así, determinar si el sistema híbrido puede ser un reemplazo al tan conocido y utilizado Bombeo Mecánico.

PALABRAS CLAVE:

- Sistema de Levantamiento Artificial.
- Bombeo Mecánico.
- Bomba Híbrida ESP-PCP.
- Producción de Hidrocarburos.
- Análisis nodal.

INTRODUCCIÓN

Un Sistema de Levantamiento Artificial es una tecnología que interviene al momento en el que un yacimiento no es capaz de producir a través de su propia energía, por lo tanto, este sistema, a través de múltiples mecanismos aplicados al pozo tales como bombas o reduciendo el peso de la columna hidrostática gracias a inyecciones de gas, ayuda al levantamiento del hidrocarburo, incluso aumentando su producción. [2]

Existen múltiples Sistemas de Levantamiento Artificial, sin embargo, no todos son aptos a cualquier pozo, ya que intervienen factores tales como, características de producción y configuración mecánica del pozo, que pueden disminuir su eficiencia, incluso llega a dañar el sistema, esto es necesario a tener en cuenta para la selección y diseño de algún Sistema de Levantamiento Artificial. [3]

En Colombia, el uso del bombeo mecánico como Sistema de Levantamiento Artificial es muy común en campos donde se producen crudos pesados, ya que, el bombeo mecánico es un sistema que más conviene para pozos como estos generando una gran eficiencia y optimización de la producción. Sin embargo, presenta múltiples fallas por desgaste de la sarta de varillas, taponamientos debido a elementos propios del fluido producido, crudos muy pesados y demás factores que lo convierten en un sistema muy vulnerable. Existen también condiciones mecánicas del pozo que provoca una disminución en su eficiencia, como por ejemplo una gran profundidad o en pozos donde su inclinación supera los 30°. Todo esto, y con los avances tecnológicos que se han presentado con el transcurso del tiempo, han llevado a que el Bombeo Mecánico sea cosa del pasado. [3]

Dentro de los mencionados avances tecnológicos se encuentra la Bomba Híbrida ESP-PCP, la cual consiste en la aplicación de una bomba Electrosumergible junto con una bomba de Cavidades Progresivas, esta trae grandes beneficios a la producción, ya que, cuenta con múltiples ventajas, tales como: es capaz de levantar crudos pesados, se reducen pérdidas de energía de superficie a fondo debido a que se elimina el uso de una sarta de varillas, soporta producción de arenas y de gas debido a que existe una tecnología de PCP reguladas hidráulicamente, en la cual se hace uso de válvulas en el

rotor que evitan las sobrepresiones provocadas por el gas libre producido, también supera condiciones mecánicas del pozo como la desviación de este y una alta profundidad. Esto indica que la bomba híbrida ESP-PCP puede ser una buena alternativa como sustituto del Bombo Mecánico, optimizando y prolongando la producción del pozo, logrando gran aprovechamiento del hidrocarburo presente en el yacimiento. [1]

El presente trabajo de grado tiene como fin estudiar, analizar y simular una bomba híbrida aplicada a un pozo con unas condiciones que permita observar su eficiencia y las ventajas que trae a la producción.

Este trabajo permitirá observar una propuesta técnica, con la cual se expondrá tanto teórica como prácticamente la comparación de una bomba híbrida ESP-PCP y el Bombeo Mecánico, como Sistemas de Levantamiento Artificial en pozos productores de crudo pesado, con el fin de determinar si la una bomba híbrida es capaz de generar un ahorro en consumo energético a una determinada tasa de producción, trayendo consigo importantes beneficios económicos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar técnicamente la implementación de un sistema de bombeo mecánico por sistema híbrido ESP-PCP que optimice variables operativas y energéticas en pozos productores de crudo pesado.

Objetivos específicos

- Identificar los escenarios actuales (deficiencias) de producción del pozo estudiado bajo sistema de bombeo mecánico.
- Describir los componentes del equipo ESP-PCP más idóneos a ser aplicados en función de los escenarios a estudiar.
- Simular la aplicación de una bomba híbrida ESP-PCP en los pozos de estudio.
- Comparar los beneficios operacionales observados en la simulación realizada entre la bomba híbrida ESP-PCP y el bombeo mecánico como sistema de levantamiento artificial.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Descripción sistemas de levantamiento artificial

Un sistema de levantamiento artificial favorece a la producción de fluidos de un yacimiento maduro o depletado, es decir, su energía natural no le permite llevar a superficie estos fluidos. Estos sistemas no afectan en absoluto al yacimiento, sino que son una modificación realizada al pozo, con el fin de crear una diferencia de presiones, en donde la menor presión se encontrará en el fondo del pozo y la mayor presión en el yacimiento; por acción natural el fluido saldrá al pozo fácilmente y el sistema proporcionará la energía necesaria para levantar la producción a superficie. [8]

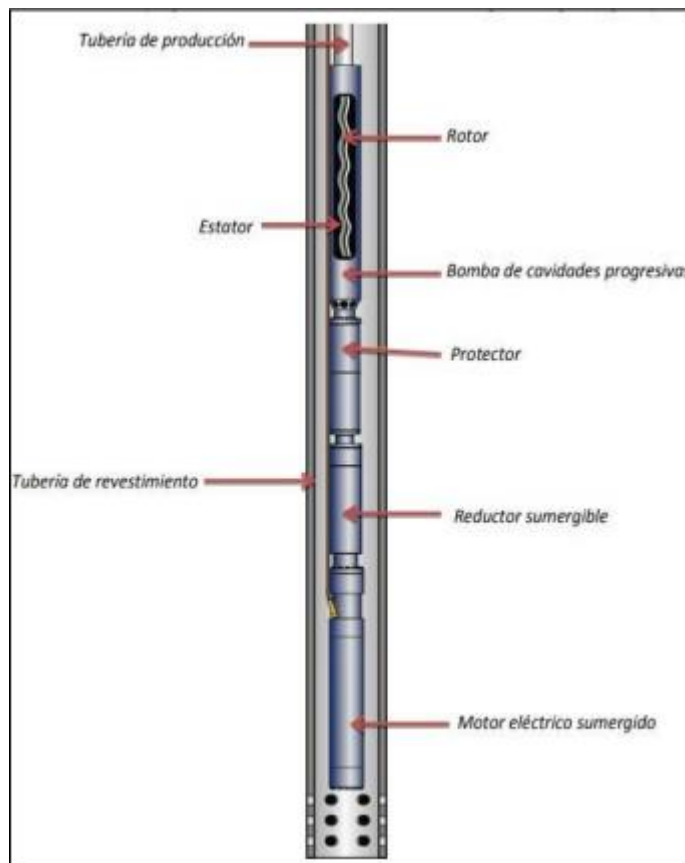
1.2. Sistema híbrido ESP-PCP

El sistema ESPCP es la combinación de la bomba de cavidades progresivas (PCP) y la bomba electro sumergible (ESP), como un método de levantamiento artificial híbrido el cual incorpora las ventajas de ambos sistemas anteriormente mencionados, haciendo que este equipo sea conveniente para reducir los problemas operacionales como lo es el manejo de crudos pesados con baja gravedad API. Este sistema híbrido incluye un motor de fondo de un BES y su sistema de generación eléctrica en superficie con la bomba de cavidades progresivas [1].

Este equipo está conformado por una bomba de cavidad progresiva, por su simplicidad en el diseño este produce menor emulsificación del crudo, principalmente es utilizado en la producción de fluidos viscosos y con alto contenido de gas o arenas [1].

Figura 1.

Componentes del Sistema ESP-PCP.



Nota. Componentes que conforman una bomba ESP-PCP en el subsuelo. Tomado de: G. Barrera, *Aplicaciones del sistema artificial híbrido ESPC: bomba de cavidades progresivas asistidas por un motor electrosumergido*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D.F, 2012.

1.2.1. Funcionamiento

La energía que es suministrada a todo el sistema va desde la superficie hasta el fondo del pozo, esta energía es recibida por una línea de alimentación eléctrica y recorre todos los equipos de superficie que son los que tienen como tarea modificar el voltaje y la frecuencia para la velocidad de rotación del motor según sea necesaria [6].

De la misma forma que en el sistema ESP la energía que se provee al sistema viaja por el cable de potencial, este cable está conectado con el cable de superficie a través de la

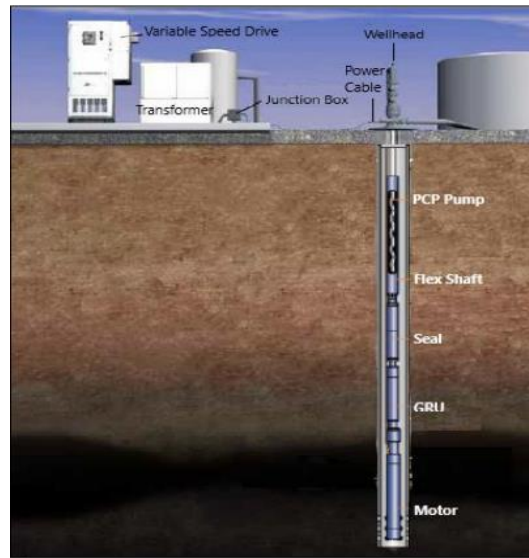
caja de venteo que sirve para liberar volúmenes de gas que pueden llegar a la superficie a través de los cables de corriente. La energía que llega a fondo mediante el cable de potencia encenderá un eje que generará el movimiento o torque necesario por la bomba de cavidades progresivas que se encuentra en la parte superior del motor. [1]

<<La bomba de cavidades progresivas (PCP) es de desplazamiento positivo y se compone de un rotor en continuo movimiento y del estator fijo, entre la bomba y el motor se encuentra la caja reductora encargada de ajustar la velocidad del motor ESP a una más adecuada para la bomba PCP ya que a 60 hz el motor de la ESP llega a 3600 rpm y la bomba PCP trabaja en un rango de 150 a 300 rpm>> [8]

Los fluidos que viajan a través de la bomba por unas cavidades que se forman entre el rotor en movimiento y el estator fijo, estas cavidades levantan el fluido acumulado en ellas hasta la superficie gracias a la expansión del fluido generada por la zona de mayor a menor presión creadas por el movimiento del rotor como se puede ver en la **Figura 2.** [1]

Figura 2.

Diagrama Sistema ESP-PCP completo.



Nota. Sistema completo que conforma la bomba ESP-PCP, tanto en subsuelo como en superficie. Tomado de: P. Casallas, J. Cuy, *Evaluación técnico-financiera del sistema de levantamiento artificial ESPCP en un campo en el valle medio del Magdalena a partir de un análisis de fallas*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia, 2019.

1.2.1 Ventajas y desventajas

Tabla 1.

Ventajas y Desventajas del Sistema Híbrido ESP-PCP.

VENTAJAS.	DESVENTAJAS.
No presenta bloqueos por gas.	No apto para temperaturas superiores a 700°F.
No presenta desgaste por fricción de varillas en pozos desviados.	Limitado para pozos con profundidades mayores a 7000 ft.
Condiciones de operación seguras en superficie.	Limitado por tamaño de revestimiento.
Alta tolerancia a fluidos con producción de sólidos.	Para fluidos con porcentajes menores de 8% de H ₂ S.
Menores costos de operación comparados con los sistemas ESP y PCP.	Incompatibilidad del elastómero con los fluidos de producción.
Corrige taponamientos de la bomba por drenaje inverso.	Altos costos de algunos equipos de subsuelo.
Recomendable para extracción de crudos pesados y viscosos.	
Aplicable a pozos estrechos y completamientos múltiples.	

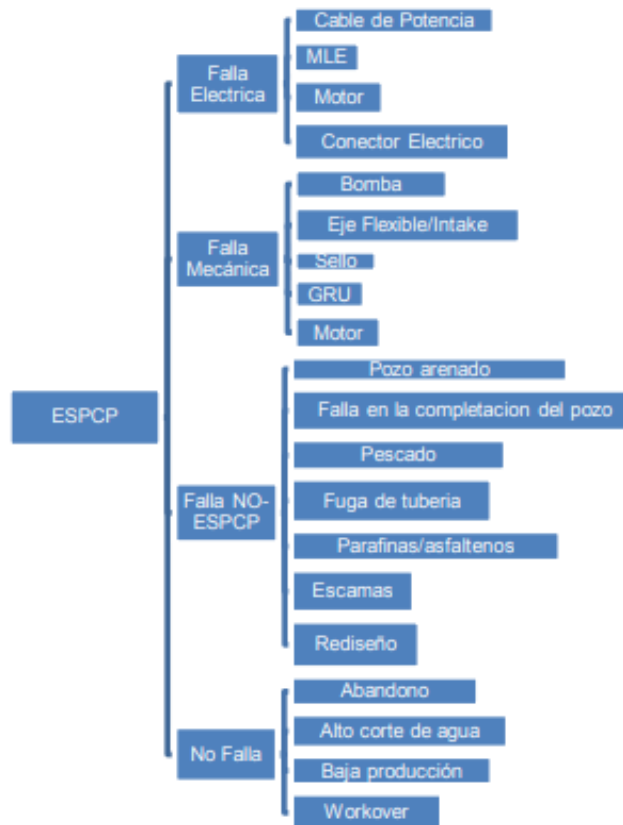
Nota. Cuadro de comparaciones entre las ventajas y desventajas que ofrece la bomba ESP-PCP. Tomado de: C. Coronado, *Evaluación técnico financiera del sistema de levantamiento artificial aplicable según las características y condiciones actuales de producción, en los pozos lcn-a, lcn-b y lcn-c del campo la cañada norte*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia 2015.

1.2.2. Identificación de fallas

Existen varios múltiples factores tanto de superficie como de subsuelo que pueden generar fallas, en donde el sistema simplemente deja de producir lo requerido o en su totalidad, así mismo, existen diferentes equipos que pueden generar las mencionadas fallas en la producción debido a un factor determinado.

1.2.3. Clasificación de las fallas

Figura 3.
Clasificación de las fallas y los equipos relacionados



Nota. Cuadro de las distintas fallas de la bomba ESP-PCP, clasificadas según el tipo. Tomado de: P. Casallas, J. Cuy, *Evaluación técnico-financiera del sistema de levantamiento artificial ESPCP en un campo en el valle medio del magdalena a partir de un análisis de fallas*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2019

1.2.4 Clasificación de las bombas PCP

1.2.4. a Según su Instalación.

1.2.4.a.i Bombas tubulares.

<<En este tipo de bombas el rotor es independiente del estator. El rotor se conecta a la sarta de cabillas para luego bajarlo al pozo. El estator se conecta a la tubería de producción para posteriormente ser bajado a pozo. Estos tipos de bombas permiten manejar altos caudales, sin embargo, al momento en el que se requiera cambiar el estator se debe extraer todo su completamiento de producción.>> [11]

1.2.4.a.ii Bombas tipo insertable.

<<En este tipo de bombas, aunque el estator y el rotor sean independientes, se deben conectar como un conjunto único para así ser bajados a pozo mediante la sarta de cabillas hasta que se conecten al zapato de asentamiento previamente instalado en la tubería de producción. Ésta bomba maneja bajas tasas de producción, pero ofrece la ventaja de no tener que extraer toda la tubería de producción al momento de cambiar el estator o el motor, lo que conviene tanto en tiempo como en dinero.>> [11]

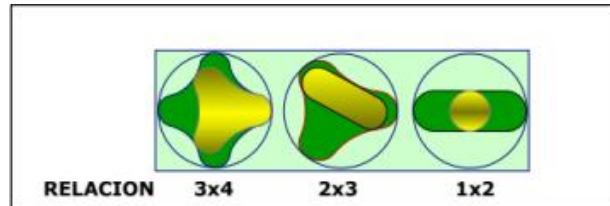
1.2.4.b Según su geometría.

1.2.4.b.i Bombas de geometría simple. Este tipo de bombas tiene una relación 1x2, lo que quiere decir que el rotor tiene un solo lóbulo, mientras que el estator tiene dos. [11]

1.2.4.b.ii Bombas multilobulares. “Esta bomba maneja tasas de producción más elevadas con respecto a las de geometría simple, gracias a la cantidad de lóbulos que tiene. Si se considera un mismo diámetro, estas bombas permiten obtener una bomba insertable de mayor tasa.” [11]

Figura 4.

Bomba multilobular.



Nota. Esquemas de las distintas bombas multilobulares según la cantidad de lóbulos que posee. Tomado de: D. Pérez, A. Saavedra. *Diseño de un modelo a escala de laboratorio de un sistema de levantamiento artificial con bomba PCP*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2019.

1.2.4.b.iii Bombas de alto caudal. “Estas bombas depende estrictamente del fabricante, ya que cada uno ofrece bombas según su diámetro y geometría de las cavidades, lo que puede llevar a bombas de alto flujo y altas velocidades.” [11]

1.2.4.b.iv Bombas de gran altura. “Estas bombas cuentan con rotores con un mayor número de etapas por unidad de longitud, lo que les permite tener una mayor altura de descarga.” [11]

Entre estas bombas existe una nomenclatura particular, la cual es determinada por el fabricante, en el siguiente cuadro se describe cada nomenclatura con su correspondiente significado.

Tabla 2.
Nomenclatura de las bombas PCP según fabricantes.

FABRICANTE.	TIPO DE BOMBA.	NOMENCLATURA.	SIGNIFICADO.
Estados Unidos.	Geometría simple.	60N095.	El número 095 se refiere a la tasa en BPD a 100 rpm y 0 head. El número 60, corresponde a un valor de $60 \cdot 10^2$, es el head máximo en pies de agua.

Francia.	Geometría simple.	60TP1300.	El número 1300 hace referencia al head máximo en metros de agua. TP, significa Tubing Pump (bomba tubular). Y el número 60 hace referencia a una tasa de 60m ³ /d a 500 rpm y 0 head.
-	Multilobulares.	840ML1500.	Es el mismo significado al anterior, solo que el ML significa Multilobular.
Canadá.	Geometría simple.	40-200.	El número 200 hace referencia a la tasa en BPD en 100rpm y 0 head. El número 40 corresponde a un valor de 40*10 ² , el cual son los head máximo en pies de agua.
Brasil.	Tubulares.	18.35-1500.	El número 1500 hace referencia a la tasa en BPD a 500rpm y 0 head. El número 35 es el diámetro del rotor en milímetros. El número 18 corresponde a una bomba de 18 etapas.
-	Insertables.	18.35-400IM.	La nomenclatura es la misma del anterior, varía en que es una bomba IM, es decir, una bomba de tipo insertable con zapato de anclaje modificado.

Nota. Cuadro con las distintas nomenclaturas de las bombas PCP según el país del fabricante. Tomado de: D. Pérez, A. Saavedra. *Diseño de un modelo a escala de laboratorio de un sistema de levantamiento artificial con bomba PCP*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2019. D. Pérez, A. Saavedra. *Diseño de un modelo a escala de laboratorio de un sistema de levantamiento artificial con bomba PCP*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2019.

1.3. Características operativas de la bomba pcp

1.3.3. Desplazamiento volumétrico o caudal.

Se define como la capacidad que tiene la bomba para desplazar cierto volumen de fluido en determinado tiempo. Usualmente se expresa en unidades de barriles por día (BPD) o metro cúbico por día (m³/d) a determinados rpm o head. Por una vuelta del rotor el fluido avanza una distancia igual a la longitud de una cavidad, esto varía según el fabricante.

[10]

1.3.4. Altura de descarga (head):

Esto corresponde a la capacidad que tiene una bomba PCP para vencer la presión hidrostática y así llevar los fluidos a superficie, este valor se expresa en lpc, bares o demás unidades de presión, de igual manera puede expresarse como unidades de altura, en metros, pies o pulgadas. El valor de la altura de descarga está en función del número de etapas con las que cuenta la bomba, esto se entiende como la longitud mínima que debe tener la bomba para poder levantar el fluido, la longitud de una etapa es igual a la longitud de una cavidad. [10]

“Cada etapa genera una presión diferencial en sus extremos, entre una cavidad y la siguiente, de modo que el diferencial se aumenta de una etapa a la siguiente dentro de la bomba, por esta razón, la presión (altura) de descarga es proporcional al número de etapas.” [10]

“El desplazamiento y la capacidad para transportar el fluido a superficie, están directamente asociados con la interferencia, la cual, Pérez y Saavedra (2019) la definen como la diferencia entre el diámetro del rotor y el diámetro menor de la cavidad del estator, esta garantiza que exista el sello entre las cavidades que permite la acción de bombeo.” [10]

Las bombas PCP pueden presentar un efecto llamado escurrimiento o resbamiento, esto se da cuando la bomba es sometida a un diferencial de presión entre su succión y su descarga, a partir de ahí el fluido comienza a romper el sello presente en cada cavidad con el fin de regresar a las cavidades anteriores. Este fenómeno está relacionado con la viscosidad, el diferencial de presión presente en la bomba y la interferencia de la bomba cuando esta se encuentra en operación. [10]

Teniendo en cuenta lo anterior, una baja interferencia originaría un escurrimiento considerable, por el contrario, una interferencia de operación excesiva provocaría un torque de fricción muy alto, lo que finalmente llevaría a una destrucción del estator (elastómero).

1.4. Selección de la bomba

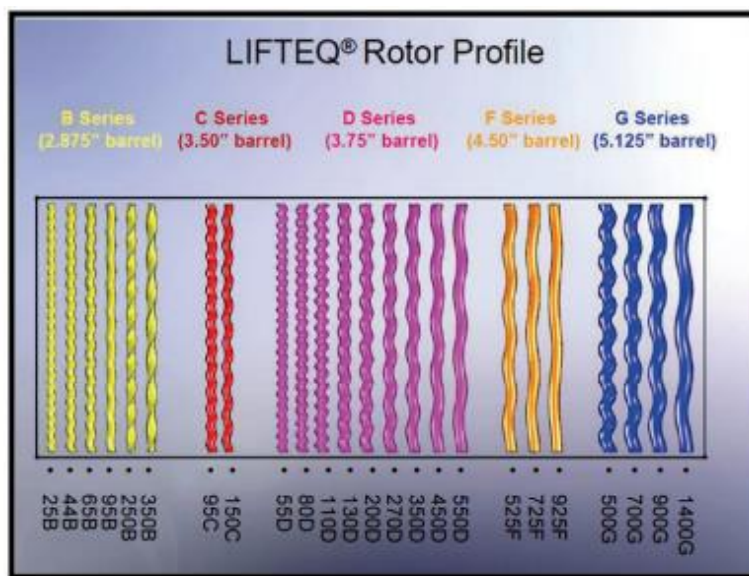
Existen parámetros a tener en cuenta para una correcta selección de bomba, éstos deben ser observados detalladamente ya que deben seguir con el escenario correspondiente de producción. Esto es clave para un eficiente sistema y por ende, producción. [11]

1.4.1. Diámetro de la bomba:

Este parámetro varía según los modelos o series de las bombas, éste se selecciona partiendo de las características de producción y del fluido producido, así como del completamiento del pozo. [11]

Figura 5.

Diámetros según los modelos de bombas PCP.



Nota. Diámetros de las bombas PCP según modelo correspondiente. Tomado de: M. Pinta, *Optimización de la producción aplicando la tecnología PCP en los campos del activo Cuyabeno*, tesis pre. Facultad de Ingenierías en Geología y Petróleos, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2017.

1.4.2. Caudal

Éste parámetro se considera según especificaciones de cada bomba, tomando como referencia un caudal a 100rpm, en el anexo 1 se exponen las especificaciones para cada bomba. En un escenario típico, un motor opera a 3500 rpm a 60 Hz, sin embargo, la

bomba PCP funcionaría es de 100 a 500 rpm, esto se obtiene gracias a un mecanismo reductor, el cual varía dependiendo de la serie y modelo, como se expone en el anexo 2. [11]

1.4.3. Diferencial de presión

Éste parámetro es de suma importancia para un correcto funcionamiento de la bomba, esto depende del diferencial de presión entre la presión de entrada y descarga producida donde se considera un 20% como rango de seguridad. [11]

1.4.4. Selección del elastómero

El elastómero es un material galvánico, el cual reviste internamente el estator. La selección de este material se basa en las condiciones del pozo, para que de esta manera resista las características de los fluidos producidos, y de igual manera debe resistir los esfuerzos y la abrasión. [11]

Tabla 3.

Tipos de elastómero.

Elastómero	°API	TEMPERATURA	%GAS LIBRE.	%H₂S	%CO₂
LT2000	Hasta 25°	Hasta 180°F	40%	Hasta 0.03%	Hasta 15%
LT2500	Hasta 40°	Hasta 180°F	40%	Hasta 0.03%	Hasta 15%
LT4000	Hasta 40°	Hasta 300°F	40%	Hasta 1%	Hasta 15%

Nota. Cuadro con tipos de elastómeros y su resistencia a distintos factores. Tomado de: M. Pinta, *Optimización de la producción aplicando la tecnología PCP en los campos del activo Cuyabeno*, tesis pre. Facultad de Ingenierías en Geología y Petróleos, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2017.

1.5. Selección del motor

Tradicionalmente es un motor trifásico que opera a 3500 rpm a 60 Hz con un rango de voltaje de operación de 230 a 4000 V y requiere de un amperaje de 22 a 120 A. Para determinar correctamente el motor a utilizar en el sistema híbrido se debe tener en cuenta ciertos parámetros, los cuales son [11]:

1.5.1. Serie y modelo

Para determinar la serie y modelo a seleccionar se debe tener en cuenta el tamaño y peso de la tubería de revestimiento, ya que el motor debe adaptarse a estas condiciones. [11]

1.5.2. Potencia

Es importante seleccionar correctamente la potencia, ya que ésta aporta la energía requerida para un óptimo funcionamiento. [11]

1.6. Selección del sello

Este elemento es de suma importancia ya que este se encarga de mantener aislado a la caja reductora y al motor de los fluidos producidos, hay que tener en cuenta que el sello debe operar a valores superiores de 150 rpm debido a que puede presentar desgastes prematuros. En el anexo 2 se exponen los tipos de sellos y sus especificaciones. [11]

1.7. Selección de eje flexible

Está diseñado para altos torques, altas cargas radiales y axiales. En el anexo 2 se presentan las diferentes series de ejes flexibles y su descripción. [11]

1.8. Selección del cable de potencia

El cable de potencia seleccionado debe ser capaz de resistir a los efectos producidos por la descompresión, así como a los efectos mecánicos como la corrosión, debido a que este efecto puede presentarse durante el transporte, instalación y producción, debido a los distintos ambientes que se ve expuesto. Para una correcta selección se debe tener en cuenta lo siguiente: [11]

1.8.1. Temperatura de operación

Para determinar este parámetro se hace uso de las figuras que se muestran en el anexo 4, ingresando con el valor correspondiente a la corriente del motor en Amperios y la temperatura del fondo del pozo en °F. [11]

1.8.2. Caída de voltaje

El cable que ha sido seleccionado basado en todo lo anterior debe ser capaz de tolerar una caída de voltaje menor a 30 V cada 1000 ft. [11]

1.9. Selección del variador de frecuencia

Este equipo maneja un rango operativo que se ubica entre los 30 a 90 Hz, es importante tener bien dimensionado el variador de frecuencia ya que permite variar la velocidad operativa en rangos amplios y en tiempos cortos. En el nexo 5 se expone las especificaciones técnicas de cada tipo de variador de frecuencia. [11]

1.10. Bombeo mecánico

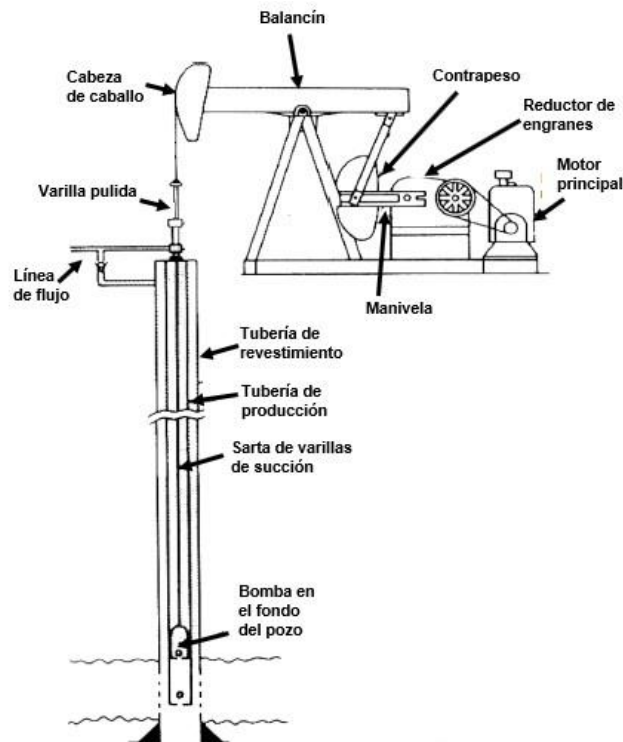
Por muchos años, el Bombeo Mecánico ha sido uno de los Sistemas de Levantamiento Artificial más utilizados en Colombia, ya que, es el que más se conoce en cuanto su funcionalidad, eficiencia y sus limitantes, así mismo, es económico al momento de llevar a cabo su mantenimiento siempre y cuando se haya diseñado correctamente. Este sistema de levantamiento artificial permite la producción de crudos pesados, que en su momento fue clave para la estabilización en la producción de campos en múltiples empresas; sin embargo, con el transcurso del tiempo y debido a grandes retos presentados al momento de aumentar la producción en un pozo, ya sea por su estado mecánico, propiedades de los fluidos o por su desviación, es que se han desarrollado nuevos avances en las tecnologías de producción, las cuales han permitido a la industria hacer un total provecho de cada proyecto que se ha llevado a cabo, generando grandes beneficios económicos a todo aquel que esté involucrado en esta. En este capítulo se identifica y se reconoce el principio de funcionamiento del Bombeo Mecánico, así como los equipos que lo conforman, sus ventajas y desventajas.

1.11. Funcionamiento

Este Sistema de Levantamiento Artificial funciona gracias a una bomba de desplazamiento positivo, y junto a una unidad de desplazamiento ubicada en la superficie, permiten el levantamiento del fluido desde el fondo del pozo hacia la

superficie. Esta unidad de superficie se encarga de convertir el movimiento giratorio de la bomba ubicada en el fondo del pozo en un movimiento oscilante, gracias a la conexión que tienen a través de las varillas, ya que, éstas se encargan de transmitir dicha energía. Este Sistema de Levantamiento Artificial, generalmente es usado cuando se tiene una baja tasa de producción, baja producción de arenas, se requiere de una presión en fondo, suficiente para que los fluidos estén estáticos en éste y que no exista presencia de parafinas. [9]

Figura 6.
Esquema general del bombeo mecánico.



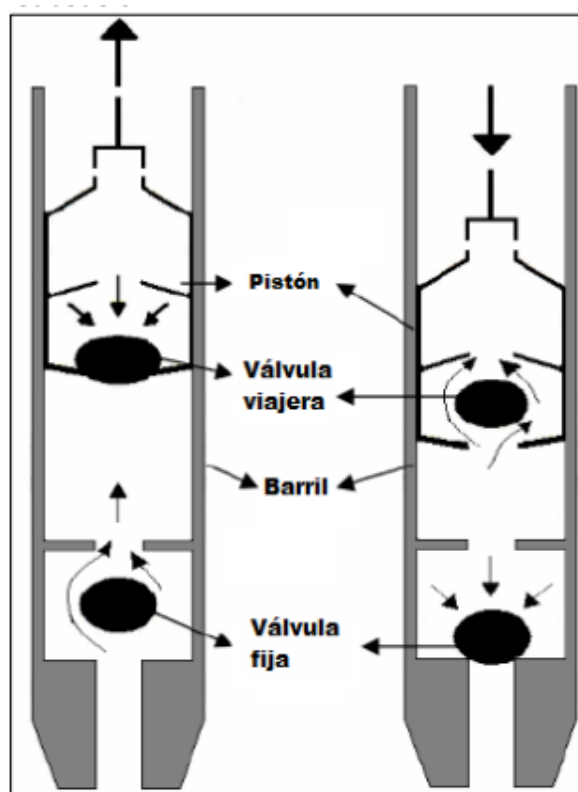
Nota. Esquema completo del sistema de levantamiento artificial bombeo mecánico con sus respectivos componentes de superficie y subsuelo. Tomado de: EPMEX, ¿Qué es el bombeo mecánico? 2020. [En Línea]. Disponible: <https://epmex.org/news/2020/05/06/que-es-el-bombeo-mecanico/>

El fluido viaja desde el subsuelo, aguas arriba, gracias al Drowdown presente, promoviendo el flujo natural que anteriormente se tenía. Éste fluido ingresa a la unidad de producción, comienza a ascender a la tubería de producción gracias a la intervención de las válvulas viajera y fija, en la sarta de varillas el fluido entra por medio de la válvula

fija que se encuentra abierta llegando a la cámara de compresión que hay entre las dos válvulas. Conforme el pistón comienza a descender la válvula fija se va cerrando y el fluido en la cámara se comprime, cuando la presión en la cámara es mayor que la presión del fluido que se encuentra encima de la válvula viajera, ésta se abre y el fluido comprimido comienza a fluir a través de ella a medida que el pistón va descendiendo. Cuando el pistón comienza a ascender, la válvula viajera se cierra y el fluido corre aguas arriba hasta la superficie. [2]

Figura 7.

Funcionamiento del sistema.



Nota. Principio de funcionamiento del bombeo mecánico. Tomado de: A. Fonseca, A. Romero, *Evaluación Técnico Financiera del diseño de un sistema de levantamiento artificial para el incremento de la producción de un pozo, ubicado en el campo Tibu*, Tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2019.

1.12. Ventajas y Desventajas

Tabla 4.

Ventajas y Desventajas del Bombeo Mecánico.

VENTAJAS.	DESVENTAJAS.
<ul style="list-style-type: none">• Fácil operación.	<ul style="list-style-type: none">• Permite bombear caudales relativamente bajos.
<ul style="list-style-type: none">• Buen manejo de fluidos viscosos.	<ul style="list-style-type: none">• Requieren de gran espacio en superficie.
<ul style="list-style-type: none">• Instalación sencilla a bajo costo.	<ul style="list-style-type: none">• Limitado a pozos desviados.
<ul style="list-style-type: none">• Facilidad para ajustar a la tasa.	<ul style="list-style-type: none">• Baja tolerancia a pozos tortuosos.
<ul style="list-style-type: none">• Varias alternativas para la fuente de poder (eléctrico o diésel).	<ul style="list-style-type: none">• Baja eficiencia para pozos con alta producción de gas.
<ul style="list-style-type: none">• Tolera altas temperaturas.	<ul style="list-style-type: none">• Limitado por la profundidad.
<ul style="list-style-type: none">• Facilidad para el intercambio de unidades entre pozos.	<ul style="list-style-type: none">• Susceptible a la formación de parafinas.
<ul style="list-style-type: none">• Aplicable a pozos estrechos y completamientos múltiples.	<ul style="list-style-type: none">• Poca resistencia a la presencia de H₂S.

Nota. Cuadro que permite comparar las ventajas y desventajas del bombeo mecánico como sistema de levantamiento artificial. Tomado de: A. Fonseca, A. Romero, *Evaluación Técnico Financiera del diseño de un sistema de levantamiento artificial para el incremento de la producción de un pozo, ubicado en el campo Tibu*, Tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2019.

1.13. Principales fallas

A pesar de sus múltiples ventajas operacionales, este sistema cuenta con fallas en su mecanismo que lo limitan en su eficiencia generando altos costos por mantenimiento o cambios de mecanismos. Principalmente las fallas se ven asociadas a la sarta de varillas, bomba de subsuelo o de tuberías.

1.13.1. Sarta de Varillas

Para este equipo se pueden presentar distintas fallas debido a distintos factores, entre ellos se encuentra:

1.13.1.a Fallas de Diseño y Operación. Para evitar cualquier falla en este equipo se debe aplicar un diseño apropiado aprovechando herramientas modernas de la actualidad. Desde el primer momento debe monitorearse la sumergencia, ya que, puede ser motivo de golpe de fluido, lo cual es dañino para la sarta de varillas. Mediante la toma de dinamómetros se pueden analizar factores que afectan el diseño de estas varillas como

lo son los cambios de velocidad. [5]

Figura 8.

Fallas por Diseño y Operación.



Nota. Consecuencias y afectaciones debido a fallas por diseño y operación. Tomado de: I. Martínez, *Diagnóstico de fallas y optimización del bombeo mecánico*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Instituto Politécnico Nacional, México D.F, 2013.

1.13.1.b Fallas Mecánicas. Este tipo de fallas son muy frecuentes y se presentan generalmente debido a un mal diseño, mal manejo en la localización, torque fuera de rango, prácticas obsoletas o cualquier combinación de todas las anteriormente mencionadas.[5]

Figura 9.

Fallas mecánicas de la sarta de varillas.



Nota. Consecuencias y afectaciones debido a fallas mecánicas de la sarta de varillas. Tomado de: I. Martínez, *Diagnóstico de fallas y optimización del bombeo mecánico*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Instituto Politécnico Nacional, México D.F, 2013.

1.13.1.c Fallas por Daños en Superficie. Usualmente, las varillas presentan algún tipo de daño en su estructura debido a un mal manejo de estas por parte del personal encargado, generando abolladuras o incluso grietas en su superficie. Nunca se debe bajar al pozo una varilla con algún tipo de daño ya que esto puede generar graves problemas a futuro, por ende, debe siempre revisarse la integridad de cada una de éstas antes de ser bajada a pozo. [5]

1.13.1.d Fallas por Conexiones. El torque aplicado ayuda a mantener la conexión apretada entre estas varillas, pero si el torque no es suficiente las cargas cíclicas pueden provocar que la conexión se afloje gradualmente hasta que ocurra la desconexión. [5]

1.13.1.e Fallas por Corrosión. Este tipo de fallas pueden ser controladas por el ingeniero encargado del diseño. Las fallas por corrosión pueden ser graves debido al gran daño que esta reacción proporciona a la integridad de la varilla. [5]

Figura 10.
Fallas por Corrosión.



Nota. Consecuencias y afectaciones por fallas por corrosión. Tomado de: I. Martínez, *Diagnóstico de fallas y optimización del bombeo mecánico*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Instituto Politécnico Nacional, México D.F, 2013.

1.13.1.f Varilla Pulida. Es importante inspeccionar este equipo ya que puede presentar corrosión o un dobléz en alguna parte de su estructura, también debe inspeccionarse que tenga el cuello en el tope. [5]

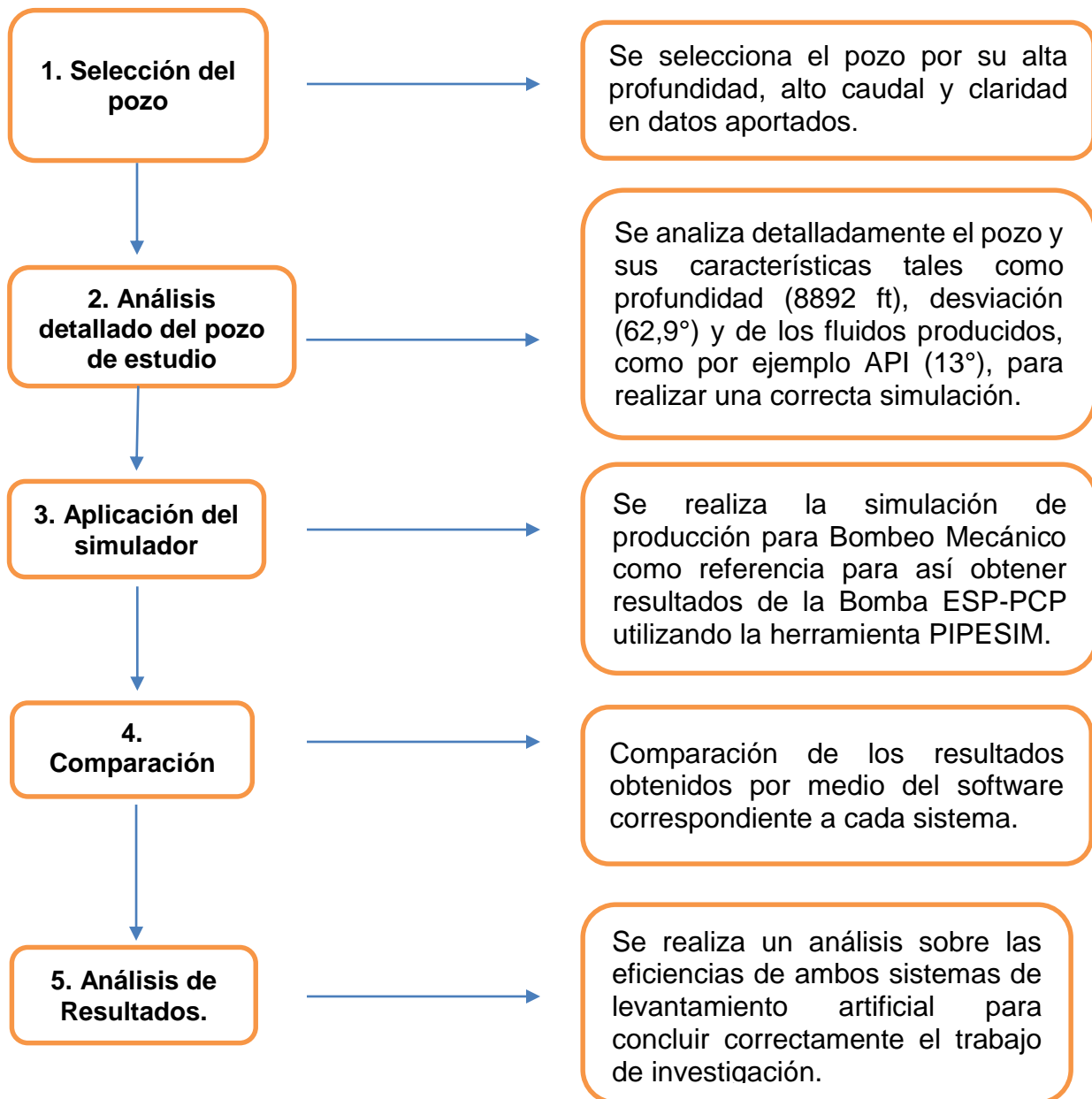
1.13.1.g Unidad de Bombeo. En este caso se debe tener cuidado con una sobrecarga, ya que, puede que la unidad se caiga generando un riesgo alto para el personal. El operador debe estar atento con los valores de carga que se registren. [5]

2. METODOLOGÍA Y DATOS

A lo largo del presente capítulo se describe bajo un enfoque cuantitativo el estudio de una bomba ESP-PCP como sistema de levantamiento artificial en comparación con el Bombeo Mecánico, con su respectivo análisis de resultados y teniendo detallada cada etapa de la metodología para un buen desarrollo de los objetivos propuestos, a continuación, se presenta el cuadro donde se describe paso a paso la metodología desarrollada para concluir el presente trabajo de grado:

Figura 11.

Diagrama de flujo de la metodología.



Nota. Diagrama de flujo utilizado para llevar a cabo el presente trabajo de grado.

Para dar cumplimiento a cada objetivo específico fue necesario indagar en medio de todos los trabajos de grado ofrecidos por la Fundación Universidad de América en Ingeniería de Petróleos, así mismo, los aportados por la Universidad Industrial de Santander (UIS) en su repositorio, en donde se analizaron los distintos pozos y su

método de producción segmentando para delimitar los producidos por Bombeo Mecánico y que a su vez cumplan con características específicas tales como alta profundidad (mayor a 5000 ft), producción de crudo pesado ($API < 20^\circ$) y así determinar la tasa de producción que ofrecen y el consumo energético que el sistema requiere. Siguiendo con lo anterior, se seleccionó el Campo Castilla como objeto de estudio, específicamente el pozo Castilla Norte 3, ya que éste cumple con los requisitos necesarios para llevar a cabo la presente propuesta, ya que tiene una profundidad de 8892 ft y una desviación de $62,9^\circ$, produciendo crudo muerto con un API de 13° y poco contenido de gas. Debido a su gran profundidad puede ser un inconveniente para el Bombeo Mecánico, lo que llevaría a un alto consumo energético, así mismo, el grado de desviación con el que este pozo cuenta causaría inconvenientes en las varillas debido a la fricción provocando un desgaste y posible rompimiento, caso contrario ocurriría en una bomba ESP-PCP donde podrá aumentar levemente la producción con un bajo consumo energético, ya que lo anteriormente mencionado no son limitantes para mencionada bomba. Para desarrollar el segundo objetivo se hizo una rigurosa investigación en donde se analizó detalladamente cada documento seleccionado con el fin de resaltar la información que permita definir específicamente cada sistema de levantamiento artificial tanto su funcionamiento como los equipos que lo conforman. Toda esta información fue extraída de trabajos de grado, artículos y manuales.

Para el desarrollo del tercer objetivo se usó un software llamado PIPESIM de Schlumberger, este software es especializado en la predicción del comportamiento de producción de pozos tanto de flujo natural como con sistemas de levantamiento artificial, por ende, ingresando todas las características del pozo, yacimiento y fluidos se simuló una producción con los sistemas Bombeo Mecánico y Bomba ESP-PCP, permitiendo observar eficiencias de cada uno.

Finalmente, para el desarrollo del cuarto objetivo, se analizó el comportamiento de cada sistema sometido al software en donde se tuvo en cuenta la tasa de producción y el consumo energético en kW, y así, concluir y determinar si la bomba ESP-PCP es un sustituto para el sistema de levantamiento artificial Bombeo Mecánico.

Para garantizar los resultados del presente trabajo de grado se requiere que el valor de la producción arrojado por el software PIPESIM aplicado al Bombeo Mecánico tenga un

grado de desviación estándar por debajo del 5% con respecto a la producción máxima del pozo, el cual corresponde a 5757 BPD.

2.1. Descripción del pozo seleccionado

En el presente capítulo se expone el pozo seleccionado como objeto de estudio, al cual se le realiza una simulación con el Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico como método de producción, con el fin de obtener datos de producción y de consumo energético de referencia para proceder a realizar una simulación con el Sistema de Levantamiento Artificial ESPCP, de este modo, observar y comparar tanto eficiencias como consumo energético de cada uno, para todo esto, se aprovechan los datos del pozo tanto mecánicos como de yacimiento, así mismo, se tiene en cuenta las propiedades de los fluidos producidos; dentro de los mencionados datos mecánicos del pozo se encuentran la profundidad, el cual cuenta con 8892 ft, una desviación de 61.9°, el cual produce un crudo muerto de 13° API. Para lograr el objetivo del presente proyecto de investigación se emplea el software PIPESIM de Schlumberger como herramienta principal que facilita el desarrollo del proyecto. La información mecánica del pozo fue extraída del trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de Petróleos titulado “Evaluación de las variables que afectan el fracturamiento hidráulico en la zona norte del campo castilla mediante un análisis pozo a pozo, para la selección de futuros candidatos” realizado por Carolina Cordero y Andrés Medina, en el año 2019.

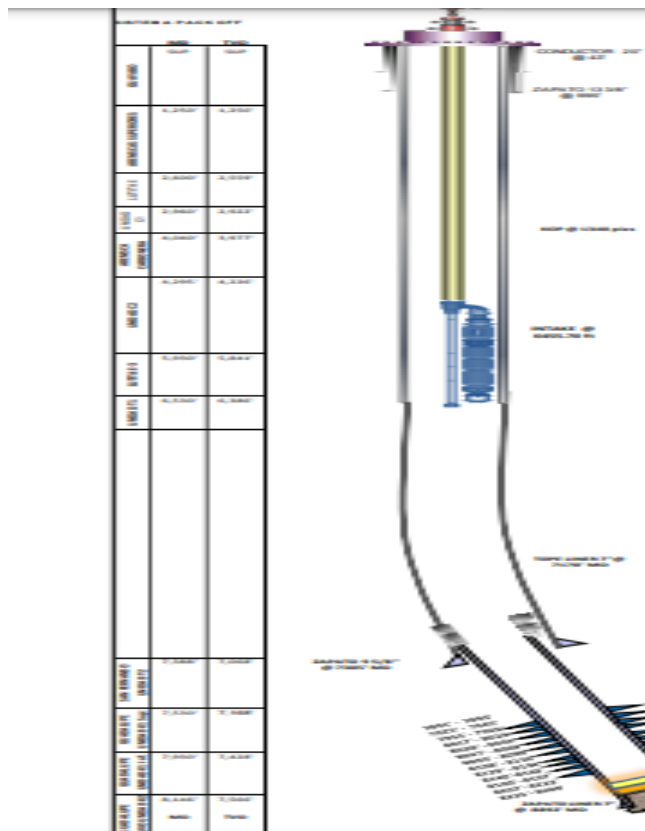
2.1.1. Pozo Castilla Norte 3

Este pozo es seleccionado como objeto de estudio debido a que sus características brindan la posibilidad de observar el comportamiento para ambos Sistemas de Levantamiento Artificial propuestos en el presente trabajo, y así, lograr una comparación concreta y efectiva para la conclusión del mismo. [15]

2.1.2 Características y generalidades del pozo Castilla Norte 3

Se da inicio a su perforación el 31 de diciembre de 2003, culminando el 14 de enero de 2004, alcanzando una profundidad final de 7500 ft. A continuación, se presenta el estado mecánico del pozo. [15]

Figura 12.
Estado mecánico del pozo Castilla Norte 3.



Nota. Estado mecánico del pozo en estudio para llevar a cabo el presente trabajo de grado. Tomado de: C. Cordero, A. Medina, *Evaluación de las variables que afectan el fracturamiento hidráulico en la zona norte del campo castilla mediante un análisis pozo a pozo, para la selección de futuros candidatos*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2019.

En el estado mecánico de la **Figura 18**, se puede apreciar que el pozo cuenta con cuatro secciones perforadas que corresponden a: Casing conductor con 20 pulg de diámetro y zapato a 43 ft, casing de superficie con 13 3/8 pulg de diámetro y zapato a 995 ft, casing intermedio de 9 5/8 pulg y zapato a 7385 ft y la última sección de 7 pulg, el cual corresponde a un liner que va desde 7178 ft a 8892 ft. [16]

El pozo cuenta inicialmente con una bomba electrosomergible como SLA, esto será despreciado ya que únicamente se hará uso de la información para la simulación de un bombeo mecánico y un bombeo híbrido ESPCP. A continuación, se observa

específicamente las características y generalidades mecánicas del pozo Castilla Norte:

Figura 13.
Generalidades del pozo Castilla Norte 3.

INFORMACIÓN GENERAL							
Pozo:				Elevación del Terreno	1,245.00' MD	MR = 31.0'	
Fecha Perforación	22-jun-11	10-jul-11	Elevación Mesa Rotaria	1,276.00' MD			
Fecha Completamiento	10-jul-11	15-jul-11	Profundidad Perforada	8,900' MD	7,966' TVD		
Coordenadas Gauss	E: 1.051.411,81 m	N: 920.041,39 m	Profundidad Actual	8,805' MD	LANDING COLLAR		
REVESTIMIENTOS							
Casing	Diámetro	Peso (lb/ft)	Grado	Tope (ft)	Zapato (ft)	Capacidad (Bbls/pie)	Drift (in)
Conductor	20"	94	K - 55	0'	43'	0.3553	18.935
Superficie	13 3/8"	68	K - 55	0'	995'	0.1497	12.259
Intermedio	9 5/8"	47	P-110	0'	7,385'	0.0732	8.525
Liner	7"	29	P-110	7,178'	8,892'	0.0371	6.059
INTERVALOS CAÑONEADOS							
Fecha	Formación	Tiro por pie	Tope (ft)	Base (ft)	Tipo Carga	Condición	Intervalos (ft)
12-ago-12	K1 inf.	5	7891	7893	PURE Gun System 4505 PJO	Recañoneado	2'
12-ago-12	K1 inf.	5	7925	7945	PURE Gun System 4505 PJO	Recañoneado	20'
12-ago-12	K1 inf.	5	7955	7965	PURE Gun System 4505 PJO	Recañoneado	10'
13-ago-12	K1 inf.	5	8017	8022	PURE Gun System 4505 PJO	Recañoneado	5'
13-ago-12	K1 inf.	5	8038	8041	PURE Gun System 4505 PJO	Recañoneado	3'
13-ago-12	K1 inf.	5	8047	8063	PURE Gun System 4505 PJO	Recañoneado	16'
13-ago-12	K1 inf.	5	8093	8099	PURE Gun System 4505 PJO	Recañoneado	6'
13-ago-12	K1 inf.	5	8108	8110	PURE Gun System 4505 PJO	Recañoneado	2'
13-ago-12	K1 inf.	5	8129	8134	PURE Gun System 4505 PJO	Recañoneado	5'
21-ene-15	K2	6	8140	8163	Big Hole, TC26RBH	Cañoneo para Fractura	23'
21-ene-15	K2	6	8190	8197	Big Hole, TC26RBH	Cañoneo para Fractura	7'
21-ene-15	K2	6	8207	8223	Big Hole, TC26RBH	Cañoneo para Fractura	16'
21-ene-15	K2	6	8235	8400	Big Hole, TC26RBH	Cañoneo para Fractura	165'

Nota. Información general del pozo de estudio. Tomado de: C. Cordero, A. Medina, *Evaluación de las variables que afectan el fracturamiento hidráulico en la zona norte del campo castilla mediante un análisis pozo a pozo, para la selección de futuros candidatos*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2019.

2.1.3 Propiedades del yacimiento y de los fluidos

El trabajo de grado tomado como base brinda las propiedades petrofísicas como la porosidad, permeabilidad, espesor de la formación, temperatura de formación, gravedad específica, factor volumétrico gravedad API, radio de drenaje, radio de pozo, presión estática de yacimiento, presión de burbuja y el daño de formación. A continuación, se expresan los datos anteriormente mencionados en la tabla: [15]

Tabla 5
Propiedades de yacimiento.

Propiedades de Yacimiento	
PMP, ft	7078
Profundidad de los perforados, ft	6936-7220
Pws @ PMP, psi	2720

Pwh, psi	85
Q, BPD	5757
Pwf, psi	1731
BHT, °F	196
BSW, %	1
Pb, psi	150
API, °	13,8

Nota. Propiedades del yacimiento en el cuál se encuentra produciendo el pozo de estudio. Tomado de: C. Cordero, A. Medina, *Evaluación de las variables que afectan el fracturamiento hidráulico en la zona norte del campo castilla mediante un análisis pozo a pozo, para la selección de futuros candidatos*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2019.

Para el caso de las propiedades de los fluidos, el autor determina el valor de cada uno gracias al uso de correlaciones numéricas que le permitieron obtener los siguientes resultados.

Tabla 6.*Propiedades de los fluidos.*

Propiedades de los Fluidos.	
Fo	0,99
μ_w , cp	0,2813
μ_m , cp	65,7084
γ_o	0,9402
γ_m	0,9423
Gm, psi/ft	0,4080343
ρ_o , lb/ft ³	58,671287
Rs, PCN/BN	8,3340659
β_o , bl/BN	1,0364391
Z	1,0089348
ρ_w , lb/ft ³	61,844775
β_g , bl/PCN	0,0081503
β_w , bl/BN	1,0141505
μ_o , cp	66,369376
ρ_m , lb/ft ³	58,703022

Nota. Propiedades de los fluidos producidos por el pozo de estudio. Tomado de: C. Cordero, A. Medina, *Evaluación de las variables que afectan el fracturamiento hidráulico en la zona norte del campo castilla mediante un análisis pozo a pozo, para la selección de futuros candidatos*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2019.

2.2. Simulación

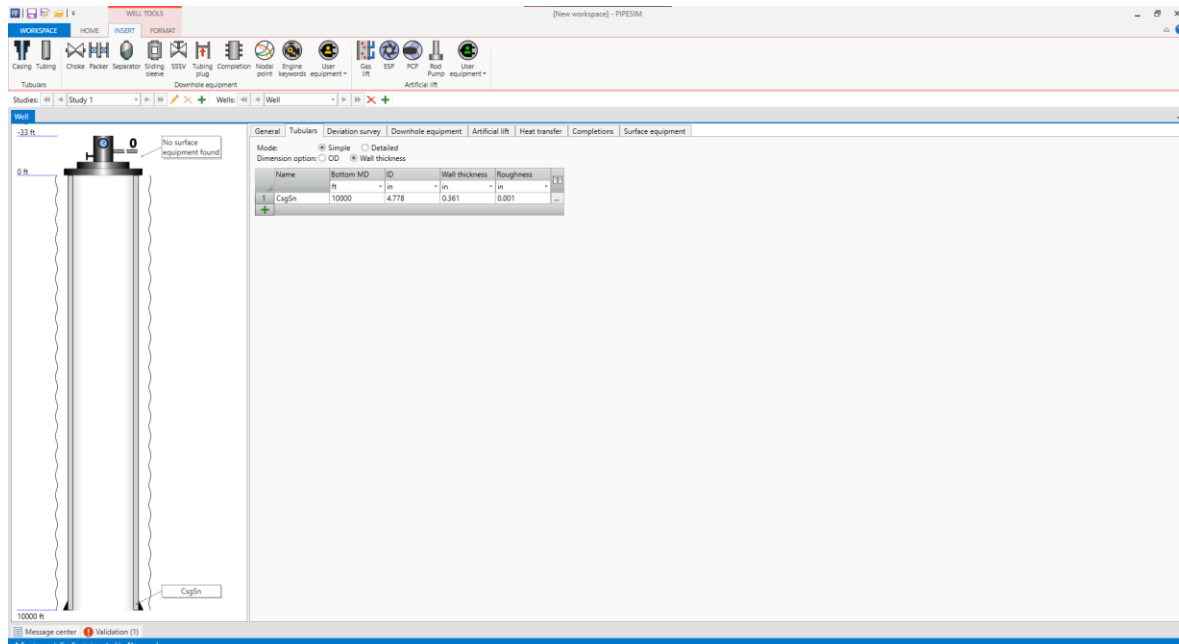
A continuación, se presenta paso a paso, la realización de la simulación de cada Sistema de Levantamiento Artificial con el fin de culminar el presente trabajo de investigación. Para esto, se hace uso del Software PIPESIM, el cual permite predecir la eficiencia tanto energética como de producción para cada uno de los casos presentados, a través de un análisis de los resultados arrojados por este, gracias al análisis nodal que se le aplicará al pozo seleccionado. Esto permitirá concluir si efectivamente el sistema híbrido puede ser un reemplazo en pozos de crudo pesado que se encuentren produciendo bajo el sistema de levantamiento artificial Bombeo Mecánico.

2.2.1 Simulación Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico

- a. Para dar inicio a la simulación en el software PIPESIM, se selecciona la opción “Casing” para así ubicar el mismo debajo del cabezal del pozo.

Figura 14.

Ubicación del Casing del pozo.



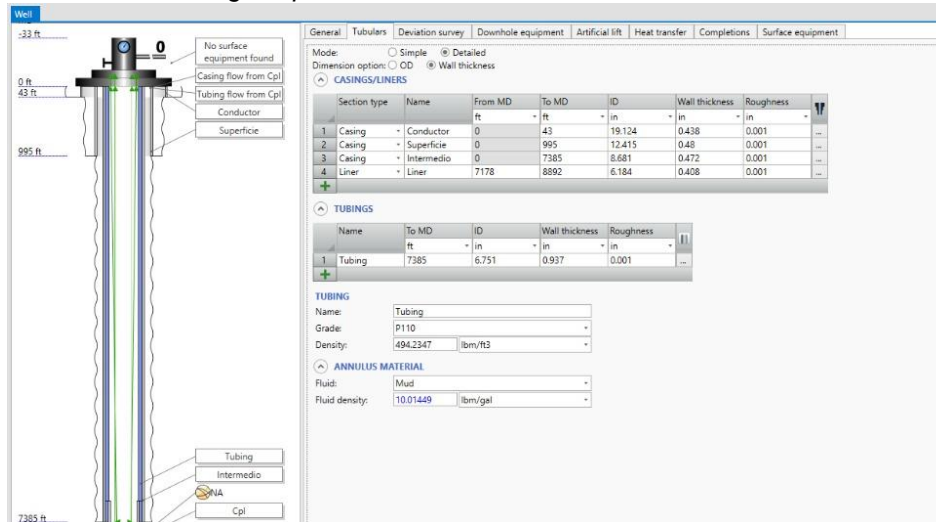
Nota. Ubicación del casing en el cabezal del pozo en el software PIPESIM.

- b. Una vez ubicado el casing en el cabezal es necesario que se especifiquen los distintos casing que fueron perforados en el pozo, tales como conductor, superficie, intermedio, tubing y para este caso en específico, tiene un liner, así mismo, indicar las profundidades a las que se encuentran y características. El simulador permite seleccionar por catálogo el tipo de casing a utilizar teniendo en cuenta el diámetro, peso y grado. Para este caso en particular, el trabajo de grado seleccionado como objeto de estudio indica un casing conductor de 20 pulgadas de diámetro, un peso de 94 lb/ft, grado K-55 y llega a una profundidad de 43 ft, Superficie de 13 3/8 pulgadas, con un peso de 68 lb/ft, grado K-55 y llega a una profundidad de 995 ft, para el intermedio un diámetro de 9 5/8 pulgadas, un peso de 47 lb/ft, grado P-110 y llega a una profundidad de 7385 ft, Liner de 7 pulgadas, peso de 29 lb/ft, grado P-110 y va

desde los 7178 ft hasta 8892 ft. Así mismo, se ingresan los datos del tubing de producción. Esto permite que el simulador tenga más exactitud en los elementos a usar para la construcción de pozo.

Figura 15.

Datos de los Casing del pozo.

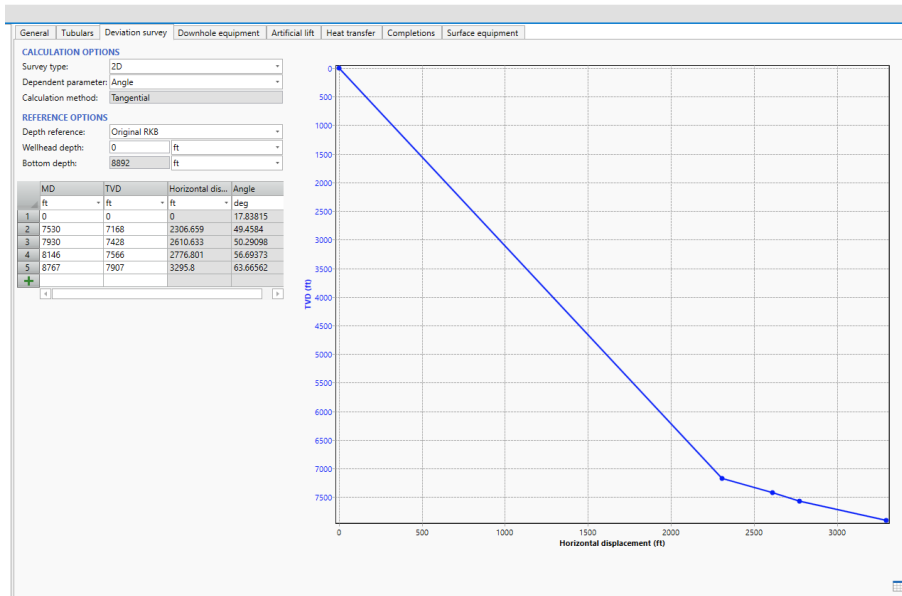


Nota. Selección y ubicación de cada casing por catálogo según cada fase perforada en el software PIPESIM.

- c. A continuación se ingresan datos de Survey, para así determinar la desviación del pozo, para este caso, el pozo presenta una desviación a una profundidad específica, como se presenta en la siguiente figura, se observa una desviación de 49° a 7530 ft en MD y a 7168 ft en TVD, seguido de un ángulo de 50° en 7930 ft en MD y 7428 ft en TVD, seguido de una desviación de 56° a una profundidad de 8146 ft en MD y 7566 ft en TVD y finalmente una desviación de 63° a una profundidad de 8767 ft en MD y 7907 ft en TVD.

Figura 16.

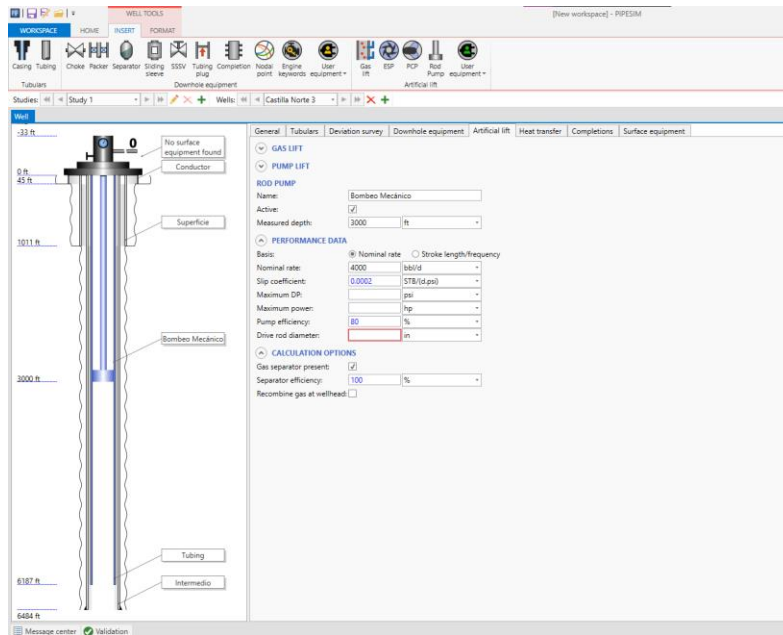
Datos de survey del pozo.



Nota. Se ingresan datos que determinan la desviación del pozo.

- d. En este paso se selecciona el Sistema de Levantamiento Artificial que se desea evaluar, inicialmente se analizará el comportamiento en la producción usando un Bombeo Mecánico, por ende, en la opción de “Insertar” ubicado en el barra de herramientas se selecciona “Rod Pump” y se arrastra hasta el estado mecánico del pozo, de esta manera se ubica el bombeo mecánico y se procede a llenar los distintos datos requeridos como lo son profundidad de asentamiento, diámetro de las varillas, caudal máximo a producir, y basado en esta información el simulador generará de forma automática el consumo energético de la bomba.

Figura 17.
Selección de Bombeo Mecánico y datos del mismo.

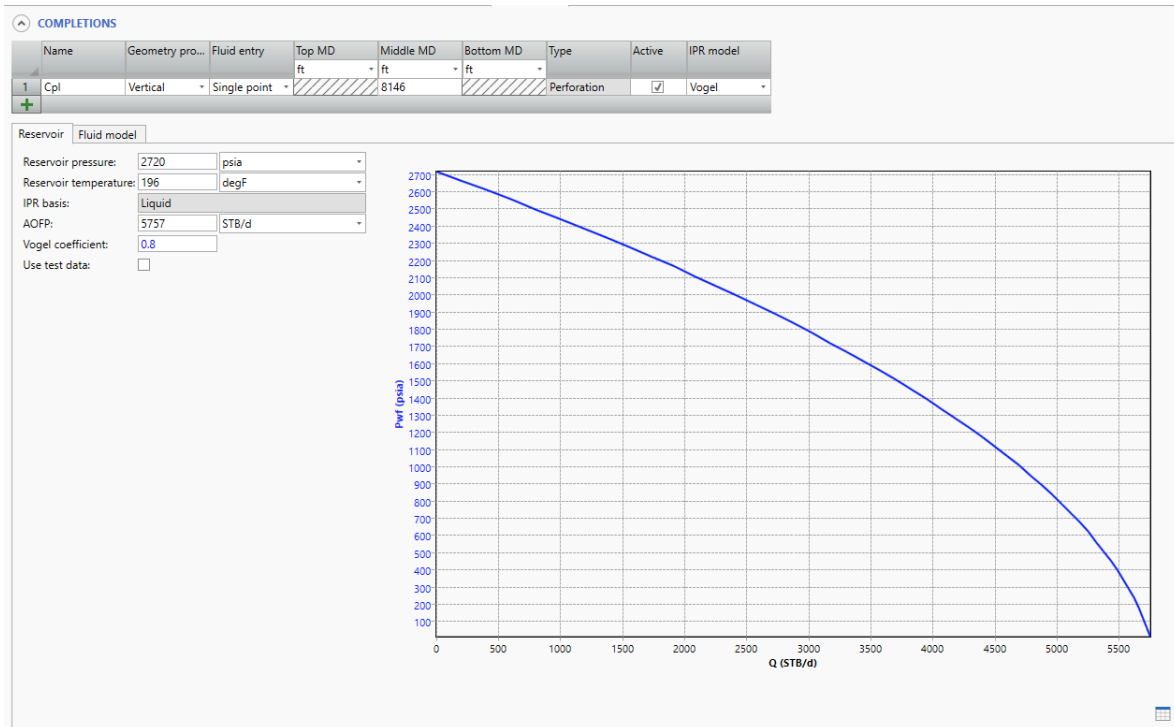


Nota. Ubicación del Bombeo mecánico en el pozo de estudio con datos requeridos en el Software PIPESIM.

En la pestaña de “Transferencia de calor” se deja de forma predeterminada como presenta el programa y continúa con los datos de entrada correspondientes a la siguiente pestaña.

- e. En este paso, se selecciona la pestaña de “Completions”, en esta sección se ingresan datos muy importantes como lo son la profundidad media de los perforados, el modelo en el cual se quiere calcular y graficar la curva IPR, presión y temperatura del yacimiento y el caudal máximo a producir. Para este pozo se ingresan datos de 8146 ft, se usa el modelo de Vogel, 2720 psi y 196°F respectivamente.

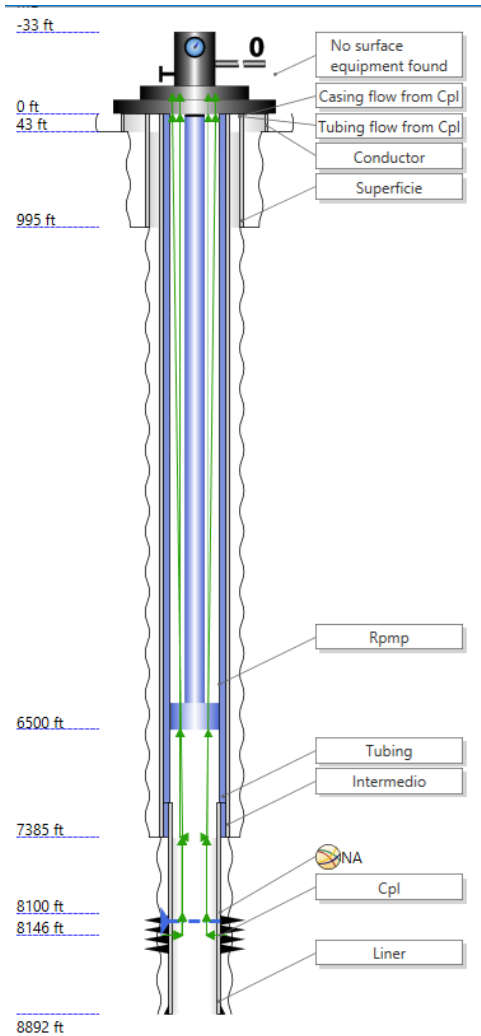
Figura 18.
Datos de completamiento.



Nota. Ingreso de datos de completamiento requeridos por el software PIPESIM.

Como se observa en la **Figura 24**. Se puede ir detallando la forma en que se comporta la curva IPR. Una vez ingresados todos los datos requeridos, se puede observar el siguiente estado mecánico con el respectivo bombeo mecánico como sistema de levantamiento artificial:

Figura 19.
Estado mecánico del pozo con Bombeo Mecánico.

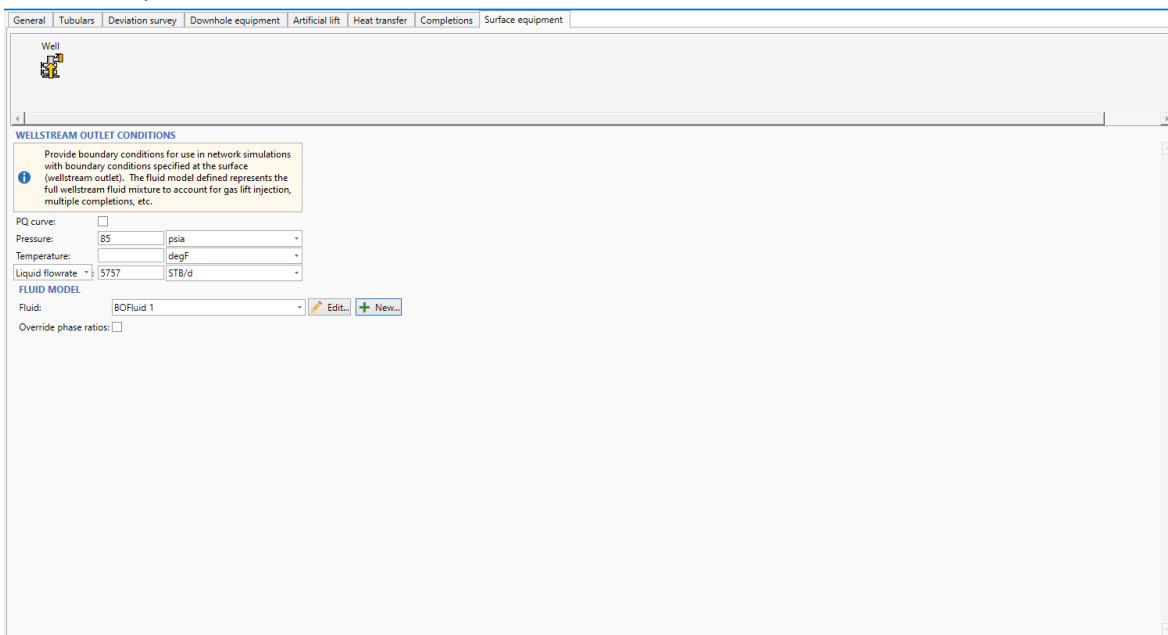


Nota. Estado mecánico final aplicando bombeo mecánico al pozo de estudio en el software PIPESIM.

- f. Como paso final en cuanto al ingreso de datos, se ingresan datos de superficie indicando la presión del cabeza, la tasa de producción máxima y se ingresan datos del fluido tales como viscosidad, corte de agua, relación gas petróleo y gravedad API. Para este pozo se ingresan los siguientes datos: 85 psi, 5757 BPD, 1%, 10 SCF/STB y 13°, respectivamente.

Figura 20.

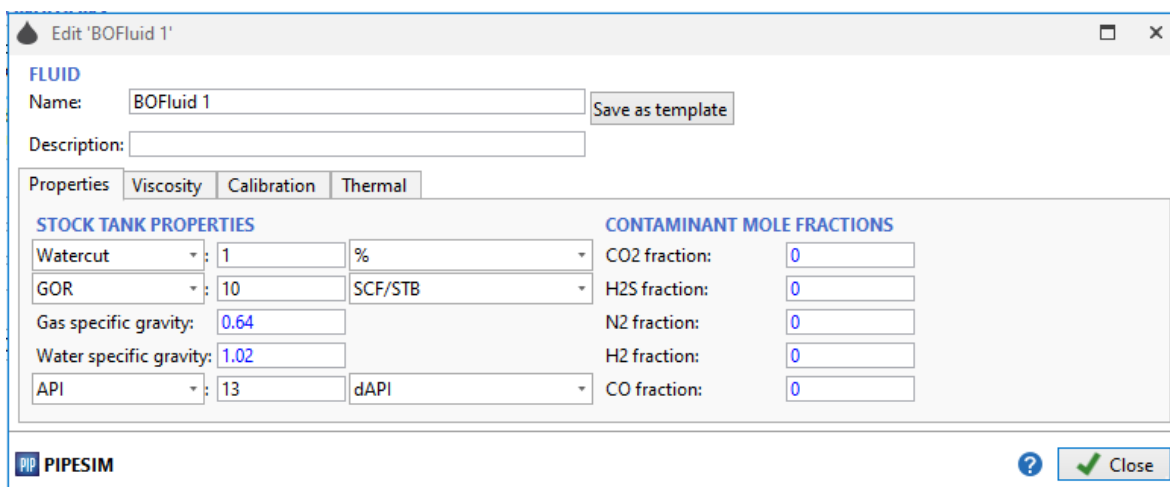
Datos de superficie.



Nota. Datos de Superficie requeridos por el software PIPESIM.

Figura 21.

Datos de los fluidos.

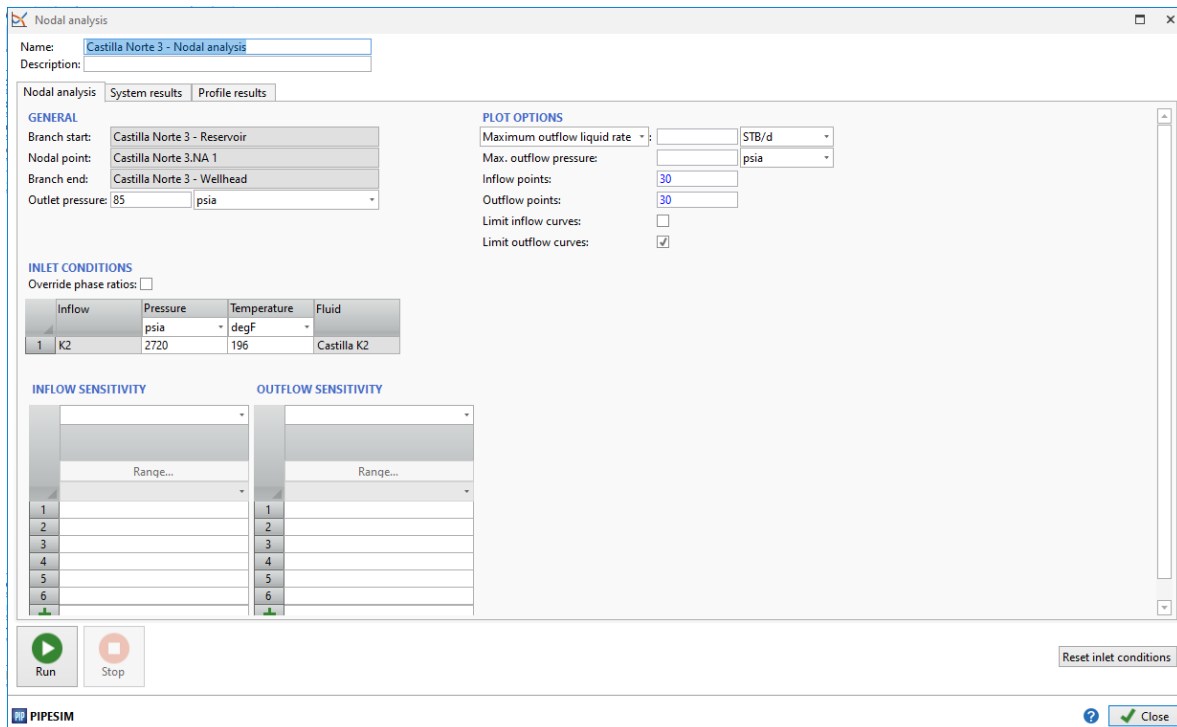


Nota. Ingreso de datos de los fluidos producidos por el pozo de estudio en el software PIPESIM.

- g. Una vez ingresados todos los datos de entrada requeridos, se verifica que el simulador tenga todo validado correctamente y así proceder a correr el análisis nodal. Al seleccionar la opción de análisis nodal, se requiere ingresar datos de cabezal, presión y temperatura de yacimiento. Para todo esto se verifica que en la parte inferior izquierda del programa donde indica “Verification” esté de color verde y en la pestaña de “Home” ubicada en la barra de herramientas se selecciona “Nodal Analysis”. Para este caso de estudio se ingresan datos de 85 psi, 2720 psi y 196°F respectivamente.

Figura 22.

Análisis Nodal.

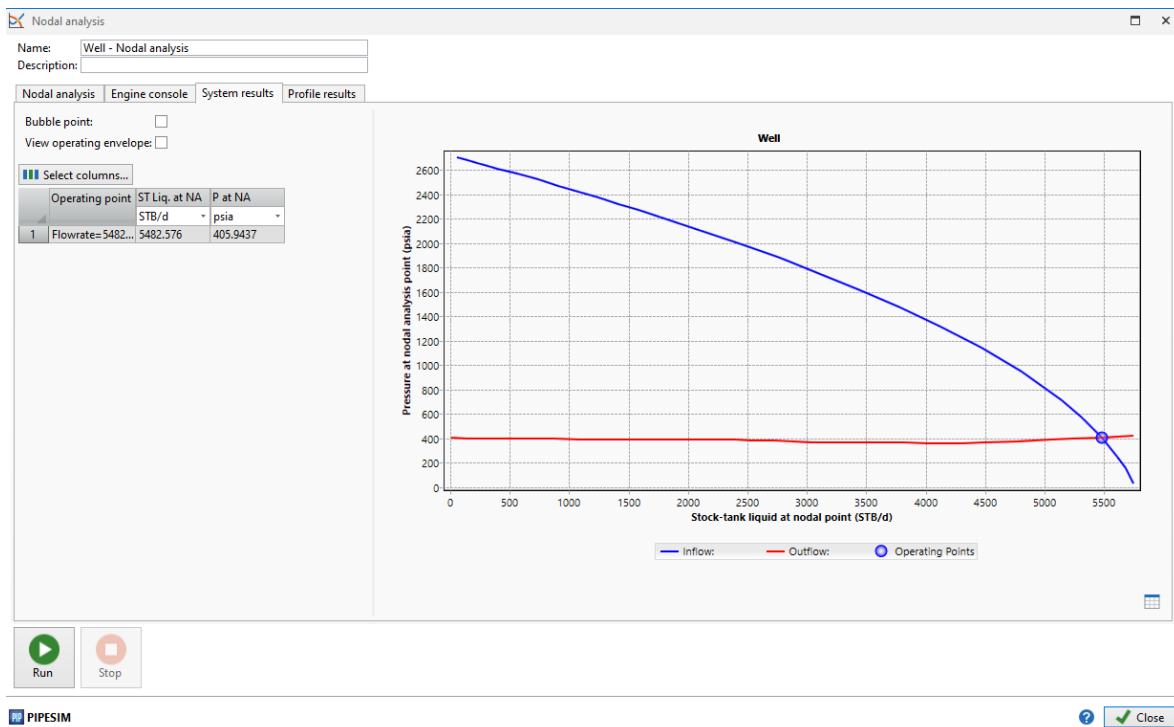


Nota. Ventana de análisis nodal con datos requeridos por el software PIPESIM.

- h. Finalmente se selecciona el botón de “Run” para dar inicio al análisis nodal. Debido a todos los datos ingresados, basados en el pozo de estudio se obtuvo los siguientes resultados:

Figura 23.

Curvas de oferta y demanda con Bombeo Mecánico.



Nota. Resultados del análisis nodal realizado al pozo de interés con bombeo mecánico arrojados por el software PIPESIM.

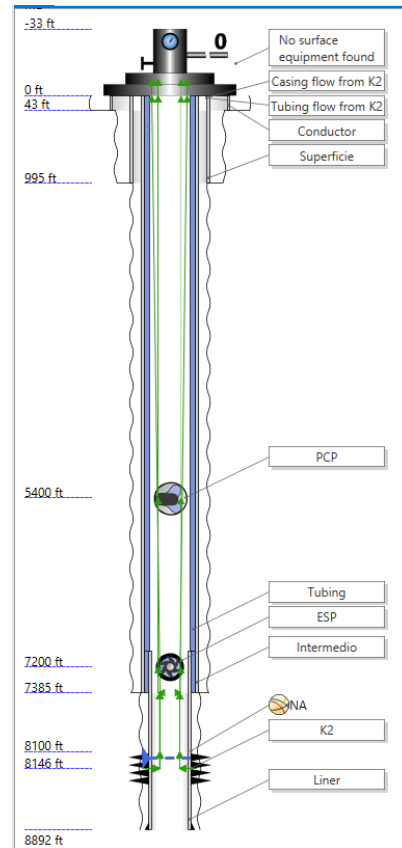
Como se puede observar el programa arroja un caudal de producción de 5482 BPD implementando el Bombeo Mecánico como sistema de levantamiento artificial y generando un consumo de alrededor de 1840 kW/d, dato que fue arrojado automáticamente por el software basado en las características mecánicas del sistema de levantamiento artificial y a la vez, en características del fluido producido. Relacionando el resultado anterior con la tasa máxima de producción con la que cuenta el pozo, se determina un grado de desviación estándar del 4.77%.

2.2.1. Simulación de la bomba ESP-PCP

En esta parte de la simulación se cambia el bombeo mecánico por dos bombas, una ESP y otra PCP, donde se ubican a distintas profundidades para así simular correctamente la presencia de una bomba híbrida, de esta forma la bomba ESP levanta el fluido hasta cierta altura en donde la bomba PCP se encargará de recibir y de llevar dicho fluido a superficie. La bomba ESP es ubicada más al fondo para así aprovechar la alta temperatura que se experimenta en el fondo del pozo lo que produce una disminución en la viscosidad del fluido logrando así una alta eficiencia de levantamiento a un bajo consumo energético. Por otro lado, la bomba PCP se ubica más arriba debido a que se sabe que ésta bomba trabaja mejor con fluidos viscosos, situación que se presenta por las bajas temperaturas que se experimenta a este punto del pozo. Una vez ubicadas las bombas se procede a realizar un tanteo equipo por equipo con el fin de identificar aquellos que cumplan con el levantamiento de la columna de líquido (Head) requerido para compensar el diferencial de presión permitiendo un aumento en el caudal de producción a un bajo consumo energético, esto se logra gracias a la suma de los head entre ambas bombas. Siguiendo con lo anterior y con las características del pozo ya ingresadas se obtuvo el siguiente estado mecánico:

Figura 24.

Estado mecánico con bomba ESP-CP.

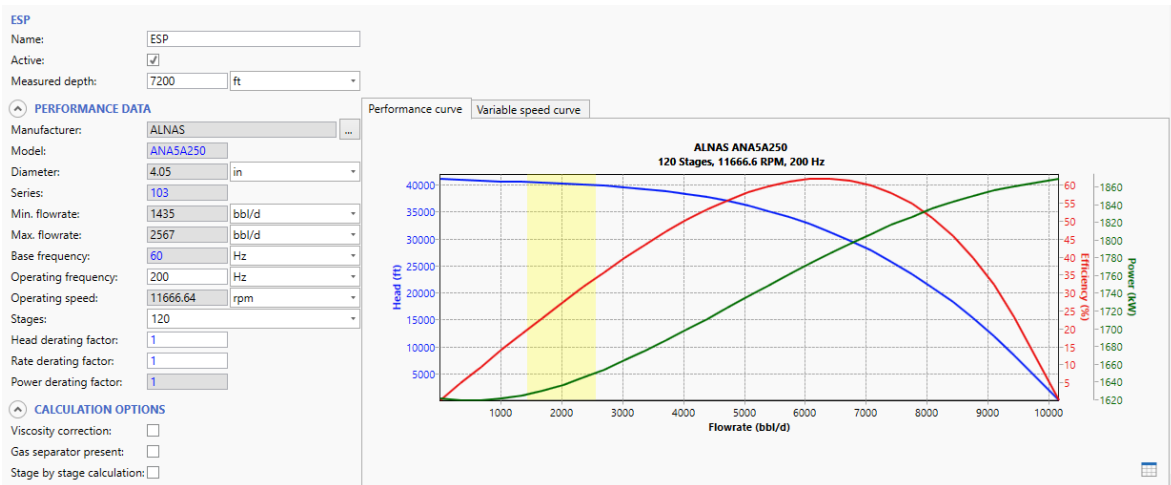


Nota: Estado mecánico del pozo en estudio sometido al bombeo híbrido ESP-PCP.

Así mismo se seleccionó una bomba ESP de referencia ALNAS, modelo ANA5A250 de 120 etapas la cual brinda grandes ventajas a la producción a un bajo costo con un consumo de 1640 kW/d. Esta bomba es seleccionada debido a que cumple con los head requeridos para levantar el fluido hasta la ubicación de la bomba PCP la cual recibirá mencionado caudal. La bomba ESP aporta un importante porcentaje al caudal de producción que está entre los 1500 BPD y los 2500 BPD, caudal que será complementado por la bomba PCP.

Figura 25.

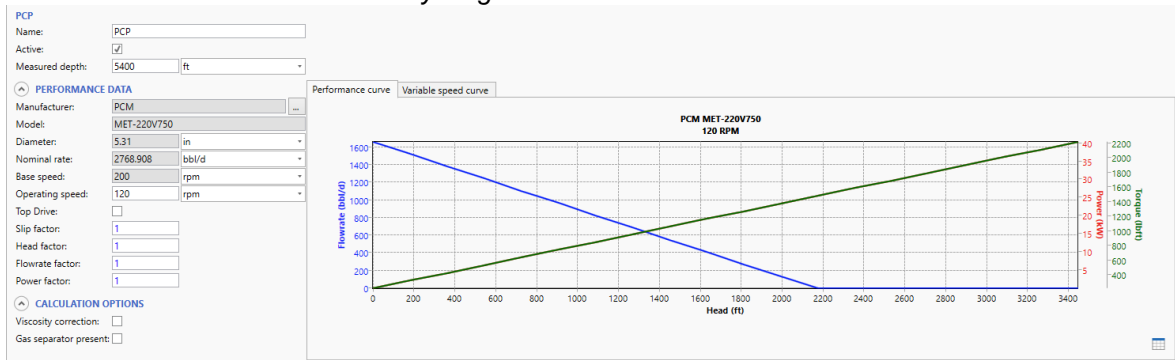
Características de la bomba ESP y diagrama de rendimiento.



Nota. Bomba ESP seleccionada para ser aplicada y estudiada en el pozo de estudio con sus respectivas características.

Se seleccionó una bomba PCP de referencia KUDU modelo 100 k 1000, la cual trabaja a 120 rpm, con un diámetro de 4,5 pulgadas, ya que esta cumple con las características mecánicas del pozo por su tamaño y a su vez ésta cuenta con el head requerido para levantar el fluido hasta superficie y se acopla perfectamente a las condiciones de este, aportando grandes beneficios a la producción diaria, con un consumo energético de 40 kW/d. Esta bomba complementa a la perfección la producción aportada por la bomba ESP ubicada más al fondo permitiendo cumplir con el propósito del presente trabajo de grado.

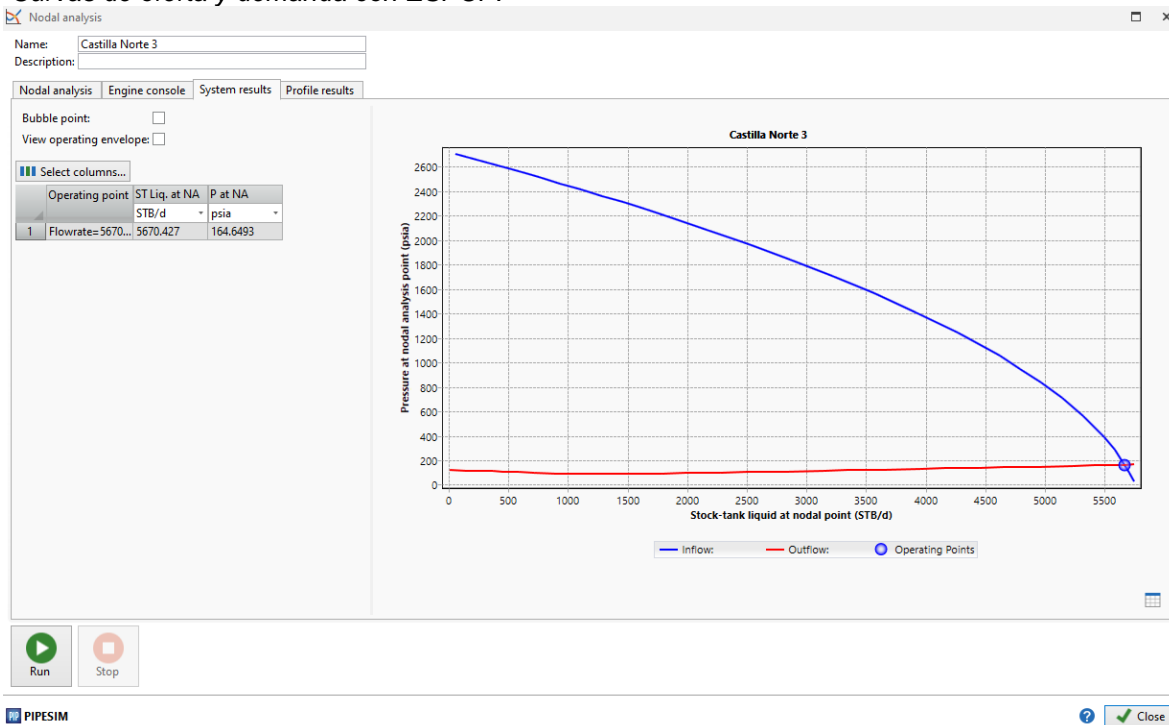
Figura 26.
Características de la bomba PCP y diagrama de rendimiento.



Nota. Bomba PCP seleccionada para ser aplicada y estudiada en el pozo de estudio con sus respectivas características.

Finalmente, al aplicar las bombas anteriormente mencionadas se procedió a realizar el análisis nodal y se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 27.
Curvas de oferta y demanda con ESPCP.



Nota. Resultados del análisis nodal realizado al pozo de interés con bombeo híbrido ESP-PCP arrojados por el software PIPESIM.

Como se observa en la **Figura 31**, se obtiene un caudal de producción de 5670 BPD haciendo uso de dos bombas, ESP y PCP, lo que representaría una bomba híbrida ESP-PCP.

3. ANALISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos por el simulador PIPESIM, en donde se toma como base un pozo de crudo pesado, el cual se somete a una simulación acerca del funcionamiento del Bombeo Mecánico como sistema de levantamiento artificial y así, determinar la tasa de producción que puede aportar. De igual manera simular un bombeo híbrido con las mismas características del pozo, para posteriormente realizar una comparación tanto operativa como energética y determinar el mejor y más eficiente sistema, analizando un balance producción/consumo.

Para el caso en donde el pozo se ve sometido a un Bombeo Mecánico, se obtiene una tasa de producción de 5482 BPD, según lo que se puede analizar de las curvas de oferta y demanda, representadas en la **Figura 28**. Se presenta una producción cercana a la tasa máxima expresada en la tesis seleccionada como objeto de estudio, que al realizar el cálculo arroja un porcentaje de desviación estándar de 4.77%, lo que garantizaría la fiabilidad en el cumplimiento del presente trabajo. A simple vista se puede apreciar un escenario bastante llamativo, en donde, se estaría aprovechando en gran cantidad el yacimiento explotado, sin embargo, si se analizan los resultados arrojados se puede apreciar que el software arroja un consumo energético de 1840 kW/d, esto representa que el sistema está llegando a su límite operativo generando gran consumo energético, esto debido a características específicas del pozo que producen que el sistema tenga que ser sometido a grandes cargas operativas como lo son una alta profundidad, por lo que el pozo cuenta con 8892 ft, un fluido de producción con gravedad API correspondiente a crudos pesados, que para este caso es de 13°, lo que conlleva a fluidos viscosos. Por ende, este escenario ya no es del todo eficiente.

La presencia del sistema híbrido ESP-PCP, arroja resultados más favorables, en donde según las curvas de oferta y demanda determinadas por el software, se tiene una producción de 5670 BPD, aún más cerca de la tasa máxima, lo que quiere decir que se está aprovechando casi en su totalidad el hidrocarburo contenido en el yacimiento. Al momento de observar el consumo que estas bombas generan se determina un mejor balance eficiencia/consumo, debido a que si se suma el consumo de las bombas ESP y PCP arrojan un resultado de 1680 kW/d, como consumo energético total.

4. CONCLUSIONES

Al analizar el trabajo de grado tomado como base para el desarrollo del presente trabajo, se reconoce que las características mecánicas con las que cumple el pozo en estudio, efectivamente son limitantes del Bombeo Mecánico como sistema de levantamiento artificial, lo que genera un inicio satisfactorio en la metodología seleccionada.

La culminación del presente trabajo arrojó una tasa de producción de 5482 BPD correspondiente al bombeo mecánico como sistema de levantamiento artificial y a su vez 5670 BPD correspondiente al sistema híbrido ESP-PCP; al ser comparados los resultados anteriormente mencionados se demostró que el bombeo mecánico se ve restringido debido a las características del pozo, aumentando su consumo energético sin aprovechar al máximo el hidrocarburo contenido en el yacimiento, llegando a consumir hasta 1840 kW/d.

Se reconocieron satisfactoriamente los equipos ESP-PCP más convenientes según las características del pozo seleccionado, aportando un aumento considerable a la producción, el cual brinda un satisfactorio balance si se tiene en cuenta el consumo que éste genera. Una vez identificado lo anterior se confirma el cumpliendo con el propósito del presente trabajo.

El sistema híbrido ESP-PCP sometido al software PIPESIM demostró un aumento del 3% en la producción. En cuanto al consumo, el sistema híbrido aporta un consumo de 1640 kW/d, generando un ahorro de 160 kW/d en comparación con el sistema Bombeo Mecánico. Todo lo anterior representa una ganancia de alrededor de 18.800 dólares diarios, gracias al aporte en el aumento de la producción, esto en base a un precio promedio de 100 dólares por barril Brent.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado se puede determinar que la presente propuesta técnica para la implementación de un sistema de bombeo mecánico por sistema híbrido ESP-PCP que optimice variables operativas y energéticas en pozos productores de crudo pesado ha sido demostrada satisfactoriamente, gracias a los grandes beneficios aportados por el sistema híbrido ESP-PCP, donde se resalta el alto desempeño de la bomba PCP en crudos pesados, el aprovechamiento de la temperatura de fondo por parte de la ESP y a su vez, por su manejo de altos caudales de producción.

BIBLIOGRAFIA.

- [1].PCM, Artificial Lift Solutions. (s.f.) Bomba Electrosumergible ESPCP. <https://www.pcmals.com/es/equipo-de-levantamiento-artificial/soluciones-innovadoras-de-levantamiento-artificial/bomba-electro-sumergible-espccp>
- [2] A. Fonseca, A. Romero, *Evaluación Técnico Financiera del diseño de un sistema de levantamiento artificial para el incremento de la producción de un pozo, ubicado en el campo Tibu*, Tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2019.
- [3] L. Patiño, D. Trujillo, *Evaluación técnica de la instalación de unidades de superficie de bombeo mecánico para la reducción de costos de inversión y costos de operación de los pozos nuevos en el campo la cira infantas*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia.
- [4] J. Peña, *Evaluación técnico financiera para la selección del sistema de levantamiento artificial para el campo corrales bloque Buenavista*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2016.
- [5] I. Martínez, *Diagnóstico de fallas y optimización del bombeo mecánico*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Instituto Politécnico Nacional, México D.F, 2013.
- [6] G. Barrera, *Aplicaciones del sistema artificial híbrido ESPC: bomba de cavidades progresivas asistidas por un motor electrosumergido*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D.F, 2012.
- [7] P. Casallas, J. Cuy, *Evaluación técnico-financiera del sistema de levantamiento artificial ESPCP en un campo en el valle medio del Magdalena a partir de un análisis de fallas*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América,

Bogotá, Colombia, 2019.

- [8] C. Coronado, *Evaluación técnico financiera del sistema de levantamiento artificial aplicable según las características y condiciones actuales de producción, en los pozos lcn-a, lcn-b y lcn-c del campo la cañada norte*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia 2015.
- [9] C. Bohorquez, *Optimización del sistema de bombeo mecánico para máxima eficiencia de levantamiento, en tres pozos que presentan interferencia por gas en el campo palagua*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2020.
- [10] D. Pérez, A. Saavedra. *Diseño de un modelo a escala de laboratorio de un sistema de levantamiento artificial con bomba PCP*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2019.
- [11] M. Pinta, *Optimización de la producción aplicando la tecnología PCP en los campos del activo Cuyabeno*, tesis pre. Facultad de Ingenierías en Geología y Petróleos, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2017.
- [12] Centrilift Submersible Pump Handbook, 9ª ed, Baker Hughes, Oklahoma: Baker Hughes Centrilift, 2009. [En línea] Disponible en:
- [13] A procedure for ESPCP System Selection, 9ª ed, Baker Hughes, 2009. [En Línea]
- [14] M, Monsalve, *Estudio de factibilidad técnico financiera del levantamiento artificial de un pozo del campo castilla mediante el análisis nodal a partir del uso de un programa especializado*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2017.

- [15] C. Cordero, A. Medina, *Evaluación de las variables que afectan el fracturamiento hidráulico en la zona norte del campo castilla mediante un análisis pozo a pozo, para la selección de futuros candidatos*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2019.
- [16] Manual de bombeo de cavidades progresivas, Oil Production, 2008. [En línea] Disponible: <http://oilproduction.net/produccion/artificial-lift-systems/pcp-bombas-de-cavidades-progresivas2/item/1714-manual-de-bombeo-de-cavidades-progresivas-pcp>

ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS BOMBAS PCP

Pump Specification Guide

Baker Hughes progressing cavity pumps

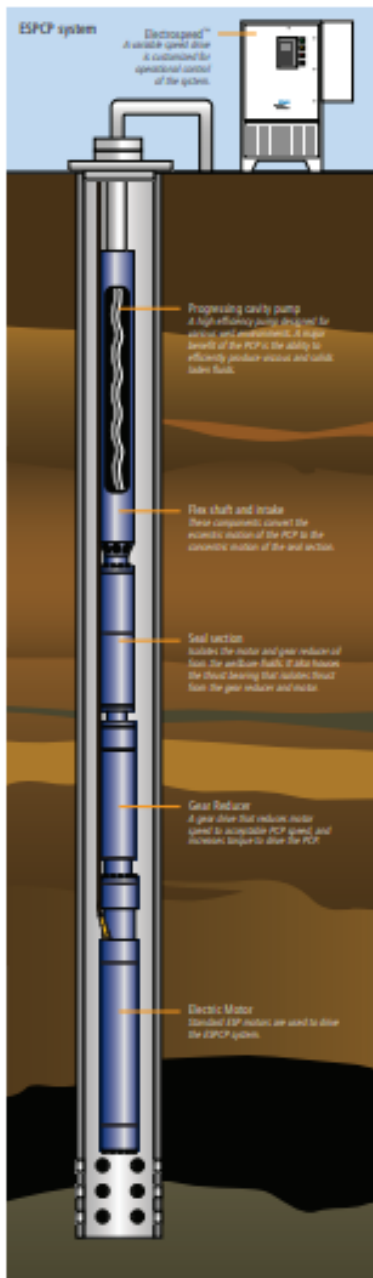
Pump model		Rate		Pressure		Rotor		Min. Tubing to Surface	Stator				
Imperial	ISO	bfpd rpm	m ³ /d rpm	psi	mts of water	Length (in.)	Pin size (in.)	In.	Stator length (in.)	Stator connection (API)	Stator O.D. (in.)	Stator Asm length (in.)	Stator Asm connection (API)
25-B-0900	4-0600			900	800	54.50			43.00			59.00	
25-B-1300	4-0900			1300	900	77.00			65.50			82.00	
25-B-1800	4-1200			1800	1200	98.75			87.25			104.13	
25-B-2300	4-1600	0.25	0.04	2300	1600	128.50	0.875 API	2.375	117.00	2.875 in. - 10 NUE PIN	2.875	133.00	2.875 in. - 8 EUE
25-B-2600	4-1800			2600	1800	137.50			126.00			142.00	
25-B-3600	4-2500			3600	2500	190.00			178.50			195.00	
44-B-0900	7-0600			900	800	62.50			51.00			67.00	
44-B-1300	7-0900			1300	900	96.00			84.50			101.00	
44-B-1800	7-1200			1800	1200	124.75			113.25			130.13	
44-B-2300	7-1600	0.44	0.07	2300	1600	153.00	0.875 API	2.375	141.50	2.875 in. - 10 NUE PIN	2.875	158.00	2.875 in. - 8 EUE
44-B-2600	7-1800			2600	1800	161.00			169.50			186.00	
44-B-3600	7-2500			3600	2500	232.00			220.50			237.00	
65-B-0900	10-0600			900	800	78.00			64.50			81.00	
65-B-1300	10-0900			1300	900	112.00			100.50			117.00	
65-B-1800	10-1200	0.65	0.1	1800	1200	147.00	0.875 API	2.375	135.50	2.875 in. - 10 NUE PIN	2.875	152.00	2.875 in. - 8 EUE
65-B-2300	10-1600			2300	1600	181.00			169.50			186.00	
65-B-2600	10-1800			2600	1800	210.50			199.00			215.00	
65-B-3600	10-2500			3600	2500	282.50			271.00			287.00	
95-B-0900	15-0600			900	800	104.00			92.50			108.00	
95-B-1300	15-0900			1300	900	155.25			143.75			160.63	
95-B-1800	15-1200	0.95	0.15	1800	1200	206.00	0.875 API	2.375	194.50	2.875 in. - 10 NUE PIN	2.875	211.00	2.875 in. - 8 EUE
95-B-2300	15-1600			2300	1600	266.50			255.00			271.00	
95-B-2600	15-1800			2600	1800	298.50			287.00			303.00	
95-B-3600	15-2500			3600	2500	400.00			388.50			405.00	
250-B-0900	40-0600			900	800	143.50			132.00			148.00	
250-B-1300	40-0900			1300	900	209.00			197.50			214.00	
250-B-1800	40-1200	2.5	0.4	1800	1200	274.00	0.875 API	2.375	262.50	2.875 in. - 10 NUE PIN	2.875	279.00	2.875 in. - 8 EUE
250-B-2300	40-1600			2300	1600	340.50			329.00			345.00	
250-B-3600	40-2500			3600	1800	436.50			395.00			411.00	
350-B-0900	56-0600			900	800	201.50			190.00			206.00	
350-B-1300	56-0900			1300	900	298.00			286.50			303.00	
350-B-1800	56-1200	3.5	0.56	1800	1200	392.75	0.875 API	2.375	381.25	2.875 in. - 10 NUE PIN	2.875	398.13	2.875 in. - 8 EUE
350-B-2300	56-1600			2300	1600	488.50			477.00			493.00	
350-B-3600	56-1800			3600	1800	533.00			521.50			538.00	
80-D-1800	12-1200			1300	1200	110.00			95.00			118.25	
80-D-2300	12-1600	0.8	0.12	1800	1600	134.50	1.000 API	2.875	119.50	3.500 in. - 8 EUE PIN	3.75	142.75	3.500 in. - 8 EUE
80-D-2600	12-1800			2300	1800	158.50			143.50			168.75	
110-D-0900	18-0600			900	800	75.00			60.00			81.25	
110-D-1300	18-0900			1300	900	96.00			81.00			104.25	
110-D-1800	18-1200	1.1	0.18	1800	1200	119.00	1.000 API	2.875	104.00	3.500 in. - 8 EUE PIN	3.75	127.25	3.500 in. - 8 EUE
110-D-2300	18-1600			2300	1600	145.00			130.00			153.25	
110-D-3600	18-1800			3600	1800	164.50			149.50			172.75	
130-D-0900	21-0600			900	800	87.00			72.00			95.25	
130-D-1300	21-0900			1300	900	122.00			107.00			130.25	
130-D-1800	21-1200	1.3	0.21	1800	1200	160.00	1.000 API	2.875	145.00	3.500 in. - 8 EUE PIN	3.75	168.25	3.500 in. - 8 EUE
130-D-2300	21-1600			2300	1600	194.50			179.50			202.75	
130-D-3600	21-1800			3600	1800	227.00			212.00			235.25	
130-D-3600	21-2500			3600	2500	302.00			287.00			310.25	
200-D-0900	32-0600			900	800	103.50			88.50			111.75	
200-D-1300	32-0900			1300	900	147.50			132.50			155.75	
200-D-1800	32-1200	2	0.32	1800	1200	193.00	1.000 API	2.875	178.00	3.500 in. - 8 EUE PIN	3.75	201.25	3.500 in. - 8 EUE
200-D-2300	32-1600			2300	1600	238.00			223.00			246.25	
200-D-3600	32-1800			3600	1800	275.00			260.00			283.25	
200-D-3600	32-2500			3600	2500	370.50			355.50			378.75	
270-D-0900	43-0600			900	800	129.00			114.00			137.25	
270-D-1300	43-0900			1300	900	177.50			162.50			185.75	
270-D-1800	43-1200	2.7	0.43	1800	1200	246.50	1.000 API	2.875	231.50	3.500 in. - 8 EUE PIN	3.75	254.75	3.500 in. - 8 EUE
270-D-2300	43-1600			2300	1600	316.50			301.50			324.75	
270-D-3600	43-1800			3600	1800	362.00			347.00			370.25	
270-D-3600	43-2500			3600	2500	477.50			462.50			485.75	

Nota. Guía con especificaciones técnicas de las bombas PCP. Tomado de: Pump Specification Guide “Electrical Submersible Progressing Cavity Pumping System”, Baker Hughes, 2014. [Online]

Pump model		Rate		Pressure		Rotor		Min. Tubing to Surface	Stator				
Imperial	ISO	bfpd rpm	m ³ /d rpm	psi	mts of water	Length (in.)	Pin size (in.)	In.	Stator length (in.)	Stator connection (API)	Stator O.D. (in.)	Stator Asm length (in.)	Stator Asm connection (API)
350-D-0900	56-0600			900	600	161.00			146.00			169.25	
350-D-1300	56-0900			1300	900	235.50			220.50			243.75	
350-D-1800	56-1200	3.5	0.56	1800	1200	314.50	1.800 API	2.875	299.50	3.500 in. - B IUE PIN	3.75	322.75	3.500 in. - B IUE
350-D-2300	56-1600			2300	1600	389.00			374.00			397.25	
350-D-2600	56-1800			2600	1800	458.00			444.00			467.25	
450-D-0900	72-0600			900	600	216.00			201.00			224.25	
450-D-1300	72-0900			1300	900	298.50			284.50			307.75	
450-D-1800	72-1200	4.5	0.72	1800	1200	415.00	1.800 API	2.875	400.00	3.500 in. - B IUE PIN	3.75	423.25	3.500 in. - B IUE
450-D-2300	72-1600			2300	1600	516.50			501.50			524.75	
450-D-2600	72-1800			2600	1800	583.00			568.00			591.25	
550-D-0900	87-0600			900	600	246.50			231.50			254.75	
550-D-1300	87-0900			1300	900	361.50	1.800 API	2.875	346.50	3.500 in. - B IUE PIN	3.75	369.75	3.500 in. - B IUE
550-D-1800	87-1200	5.5	0.87	1800	1200	477.50			462.50			485.75	
550-D-2300	87-1600			2300	1600	592.50			577.50			600.75	
525-F-0900	83-0600			900	600	225.50			210.50			226.50	
525-F-1300	83-0900			1300	900	327.50	1.125 API	3.5	312.50	3.500 in. - B IUE BOX	4.5	328.50	3.500 in. - B IUE
525-F-1800	83-1200	5.25	0.83	1800	1200	428.50			413.50			429.50	
525-F-2300	83-1600			2300	1600	530.00			515.00			531.00	
725-F-0900	115-0600			900	600	312.00			297.00			313.00	
725-F-1300	115-0900			1300	900	452.00	1.125 API	3.5	437.00	3.500 in. - B IUE BOX	4.5	453.00	3.500 in. - B IUE
725-F-1800	115-1200	7.25	1.15	1800	1200	608.50			593.50			609.50	
925-F-0650	147-0450			650	450	308.00			293.00			309.00	
925-F-0900	147-0600			900	600	445.00	1.125 API	3.5	430.00	3.500 in. - B IUE BOX	4.5	446.00	3.500 in. - B IUE
925-F-1300	147-0900	9.25	1.47	1300	900	600.00			585.00			601.00	
530-SG-0900	83-0600			900	600	124.50			112.25			130.00	
530-SG-1300	83-0900			1300	900	180.50			168.50			186.25	
530-SG-1800	83-1200	5.2	0.83	1800	1200	236.50	1.125 API	3.5	224.50	4.500 in. - B IUE BOX	5	242.25	4.500 in. - B IUE BOX
530-SG-2300	83-1600			2300	1600	292.00			280.00			297.75	
530-SG-2600	83-1800			2600	1800	316.75			298.75			316.50	
655-SG-0900	104-0600			900	600	145.75			134.75			152.50	
655-SG-1300	104-0900			1300	900	214.75			202.50			220.25	
655-SG-1800	104-1200	6.55	1.04	1800	1200	281.75	1.125 API	3.5	269.75	4.500 in. - B IUE BOX	5	287.50	4.500 in. - B IUE BOX
655-SG-2300	104-1600			2300	1600	348.75			336.75			354.50	
655-SG-2600	104-1800			2600	1800	416.50			404.50			422.25	
790-SG-0900	126-0600			900	600	181.75			169.75			187.50	
790-SG-1300	126-0900			1300	900	236.50			224.50			242.25	
790-SG-1800	126-1200	7.9	1.26	1800	1200	348.25	1.125 API	3.5	336.25	4.500 in. - B IUE BOX	5	354.00	4.500 in. - B IUE BOX
790-SG-2300	126-1600			2300	1600	426.75			408.75			426.50	
790-SG-2600	126-1800			2600	1800	462.50			448.50			466.25	
1055-SG-0900	167-0600			900	600	236.50			224.50			242.25	
1055-SG-1300	167-0900			1300	900	348.25	1.125 API	3.5	336.25	4.500 in. - B IUE BOX	5	354.00	4.500 in. - B IUE BOX
1055-SG-1800	167-1200	10.55	1.67	1800	1200	462.50			448.50			466.25	
1320-SG-0650	210-0450			650	450	214.5			202.50			220.25	
1320-SG-0900	210-0600			900	600	315.25	1.125 API	3.5	303.25	4.500 in. - B IUE BOX	5	321.00	4.500 in. - B IUE BOX
1320-SG-1300	210-0900	13.2	2.1	1300	900	416.50			404.50			422.25	
500-G-0900	80-0600			900	600	121.00			109.00			126.75	
500-G-1300	80-0900			1300	900	168.00			157.00			174.75	
500-G-1800	80-1200	5	0.79	1800	1200	235.50	1.125 API	4.5	223.50	4.500 in. - B IUE BOX	5.125	241.25	4.500 in. - B IUE
500-G-2300	80-1600			2300	1600	302.00			290.00			307.75	
500-G-2600	80-1800			2600	1800	337.50			325.50			343.25	
700-G-0900	111-0600			900	600	158.00			146.00			163.75	
700-G-1300	111-0900			1300	900	237.00			225.00			242.75	
700-G-1800	111-1200	7	1.11	1800	1200	311.00	1.125 API	4.5	299.00	4.500 in. - B IUE BOX	5.125	316.75	4.500 in. - B IUE
700-G-2300	111-1600			2300	1600	412.50			398.50			416.25	
700-G-2600	111-1800			2600	1800	456.50			444.50			462.25	
900-G-0900	143-0600			900	600	210.88			198.88			216.63	
900-G-1300	143-0900			1300	900	298.00			286.00			303.75	
900-G-1800	143-1200	9	1.43	1800	1200	415.38	1.125 API	4.5	403.38	4.500 in. - B IUE BOX	5.125	421.13	4.500 in. - B IUE
900-G-2300	143-1600			2300	1600	517.00			505.00			522.75	
900-G-2600	143-1800			2600	1800	583.50			571.50			589.25	
1400-G-0650	223-0450			650	450	236.50			224.50			242.25	
1400-G-0900	223-0600	14	2.23	900	600	332.00	2.375 PNC	4.5	320.00	4.500 in. - B IUE BOX	5.125	337.75	4.500 in. - B IUE
1400-G-1300	223-0900			1300	900	462.50			448.50			466.25	

Nota. Guía con especificaciones técnicas de las bombas PCP. Tomado de: Pump Specification Guide “Electrical Submersible Progressing Cavity Pumping System”, Baker Hughes, 2014. [Online]

ANEXO 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SELLO, GRU Y CONJUNTO DE EJE FLEXIBLE



ESPCP technical specifications

Flexshaft and intake

Description	400 series	500 series	600 series
Housing outside diameter; in.	4.00	5.13	6.75
Length; ft	8	8	8
Minimum casing size; in. / casing weight; lb	5½ in. - 17 lb.	7 in. - 32 lb.	8¼ in. - 44 lb.
Flexshaft shaft diameter; in.	1.25	1.50	1.56
Radial and axial bearings	Tungsten carbide	Tungsten carbide	Tungsten carbide

Seal section

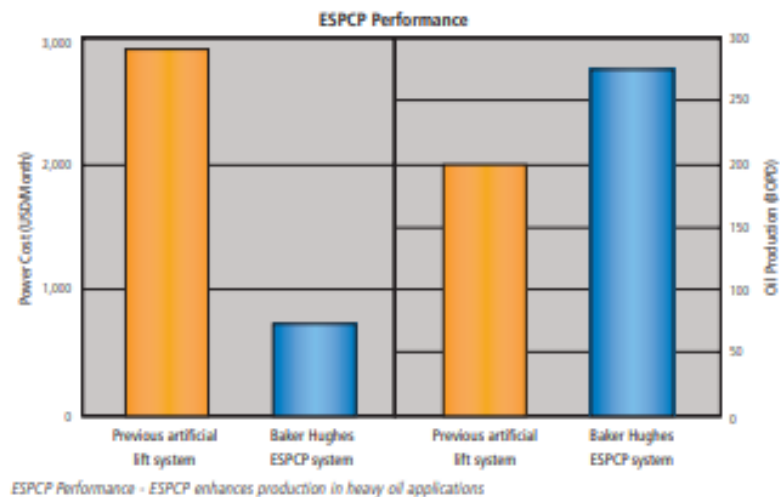
Description	300 series	400 series	500 series	600 series
Outside diameter; in.	3.75	4.00	5.13	6.75
Thrust bearing specification	Intermediate load	Intermediate load	Intermediate load	Intermediate load
Mechanical seal specification	Premium face	Premium face	Premium face	Premium face

Gear reducer

Description	400 series	500 series	600 series	700 series
Outside diameter; in.	4.25	5.38	6.75	7.25
Gear ratio	11.5:1	11.5:1	9:1	11.5:1
Output speed at 60 hz	304	304	389	304

Electric motor

Description	400 series	500 series	600 series	700 series
Outside diameter; in.	4.50	5.62	6.75	7.25



Nota: Guía con especificaciones técnicas los sellos, GRU y conjunto de eje flexible. Tomado de: Specification Guide Electrical Submersible Progressing Cavity Pumping System, Pumb, Baker Hughes, 2014.

ANEXO 3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CABLE DE POTENCIA

CPLF 5kV Flat -40°F (-40°C) to 257°F (125°C)												
Part No.	kV Rating	Cond. Size	Conductor Diameter		Insulation Diameter		Jacket Diameter		Overall Dimension		Weight Per	
			inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	Lb/Ft.	Kg/M
76702	5	6-1	0.162	4.11	0.348	8.84	0.424	10.77	0.534 x 1.352	13.56 x 34.34	1.39	2.07
76643	5	4-1	0.204	5.18	0.390	9.91	0.466	11.84	0.576 x 1.479	14.63 x 37.57	1.65	2.46
76700	5	2-1	0.258	6.55	0.444	11.28	0.520	13.21	0.630 x 1.640	16.00 x 41.66	2.05	3.05
76701	5	1-1	0.289	7.34	0.476	12.09	0.552	14.02	0.662 x 1.736	16.81 x 44.10	2.29	3.40

CELF 5kV Flat -40°F (-40°C) to 450°F (232°C)												
Part No.	kV Rating	Cond. Size	Conductor Diameter		Insulation Diameter		Jacket Diameter		Overall Dimension		Weight Per	
			inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	Lb/Ft.	Kg/M
76680	5	6-1	0.162	4.11	0.318	8.08	0.404	10.26	0.530 x 1.340	13.46 x 34.04	1.43	2.13
76679	5	4-1	0.204	5.18	0.360	9.14	0.446	11.33	0.590 x 1.521	14.99 x 37.06	1.64	2.44
76676	5	2-1	0.258	6.55	0.414	10.52	0.500	12.70	0.656 x 1.658	16.66 x 42.12	2.11	3.14
76675	5	1-1	0.289	7.34	0.446	11.33	0.532	13.51	0.687 x 1.752	17.45 x 44.50	2.36	3.51

CPN Flat -30°F (-34°C) to 205°F (96°C)												
Part No.	kV Rating	Cond. Size	Conductor Diameter		Insulation Diameter		Jacket Diameter		Overall Dimension		Weight Per	
			inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	Lb/Ft.	Kg/M
76127	5	6-1	0.162	4.11	0.348	8.84	0.474	12.04	0.604 x 1.512	15.34 x 38.41	0.89	1.33
76128	5	4-1	0.204	5.18	0.390	9.91	0.516	13.11	0.646 x 1.639	16.41 x 41.63	1.10	1.64
76418	5	2-1	0.258	6.55	0.444	11.28	0.570	14.48	0.700 x 1.800	17.78 x 45.72	1.40	2.08
76417	5	1-1	0.289	7.34	0.476	12.09	0.602	15.29	0.731 x 1.894	18.57 x 48.11	1.59	2.37

CPN Round -30°F (-34°C) to 205°F (96°C)												
Part No.	kV Rating	Cond. Size	Conductor Diameter		Insulation Diameter		Jacket Diameter		Overall Dimension		Weight Per	
			inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	Lb/Ft.	Kg/M
76151	5	6-1	0.162	4.11	0.348	8.84	0.940	23.88	1.090	27.69	0.92	1.37
76120	5	4-1	0.204	5.18	0.390	9.91	1.030	26.16	1.180	29.97	1.15	1.71
76414	5	2-1	0.258	6.55	0.444	11.28	1.147	29.13	1.297	32.94	1.50	2.23
76413	5	1-1	0.289	7.34	0.476	12.09	1.216	30.89	1.366	34.70	1.73	2.57

Nota. Guía con especificaciones técnicas del cable de potencia. Tomado de: Specification Guide Electrical Submersible Progressing Cavity Pumping System, Pumb, Baker Hughes, 2014.