

**DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA UN
CAMPO COLOMBIANO UBICADO EN LA CUENCA DE LOS LLANOS
ORIENTALES MEDIANTE LA HERRAMIENTA DESIGNPRO 9.0.2**

JOSE DANIEL OREJARENA ALARCÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA UN
CAMPO COLOMBIANO UBICADO EN LA CUENCA DE LOS LLANOS
ORIENTALES MEDIANTE LA HERRAMIENTA DESIGNPRO 9.0.2**

JOSE DANIEL OREJARENA ALARCÓN

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos

Tutor UIS

Erik Giovany Montes Paez

Ingeniero de petróleo – Docente Planta UIS

Tutor Schlumberger:

Jorge Luis Villalobos León

Ingeniero electricista – ALS Domain Champion

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA.

Primeramente, a mi familia: A mi papá, mi mamá y mi hermana, gracias por siempre creer en mí, por apoyarme en todo. Todos mis logros son para ustedes.

A Dayana, mi mejor amiga, mi amor y mi compañera de vida, gracias por hacerme ver la vida desde otro modo e impulsarme a ser una mejor persona, que se vengan muchos más logros a tu lado. te amo.

A los amigos que la vida me regaló, Camilo, David, Jhoan, Juan Andres, Omar, Luis Carlos, gracias por tanto años muchachos, cada uno de ustedes ha dejado enseñanzas en mí que serán para toda la vida. Por siempre y para siempre,
Bosque D.

Los infaltables, Jhonatan, Leonardo, con ustedes aprendí que no existen momentos inadecuados, sólo falta de referencias :v.

A todo el team SLB, aplicaciones, ART Center, practicantes, materiales, fue un honor trabajar hombro a hombro en el duro mundo azul junto a ustedes, Gracias.

A todas aquellas personas que de una forma u otra aportaron a mi formación como persona y como profesional, a esos amigos que hoy me deja la vida, siempre cuenten conmigo.

JOSE

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y la escuela de ingeniería de petróleos, especialmente a todos los docentes que con su empeño y dedicación contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional.

A la compañía Schlumberger por brindarme la gran oportunidad de vivir una experiencia laboral real durante todo un año.

Al ingeniero Erik Montes por su colaboración, ayuda y consejos durante el desarrollo de todo el proyecto. Profe, usted es un bacán

Al ingeniero Jorge Villalobos, por la confianza depositada durante la práctica y en la realización del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pag. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| 1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES EN UN SISTEMA ESP..... | 17 |
| 1.1. EQUIPOS DE SUPERFICIE..... | 17 |
| 1.1.1. Fuente de alimentación. | 17 |
| 1.1.2. Variador de frecuencia. | 18 |
| 1.1.3. Leyes de afinidad. | 19 |
| 1.1.4. Controlador. | 19 |
| 1.1.5. Transformador. | 20 |
| 1.1.6. Caja de venteo. | 22 |
| 1.2. EQUIPOS DE SUBSUELO..... | 23 |
| 1.2.1. Cabeza de descarga. | 24 |
| 1.2.2. Bomba. | 25 |
| 1.2.3. Intake. | 26 |
| 1.2.4. Protectores. | 28 |
| 1.2.5. Motor de fondo. | 33 |
| 1.2.6. Cable de potencia. | 38 |
| 1.2.7. Sensor. | 41 |
| 2. DISEÑO DE LOS EQUIPOS ESP..... | 44 |
| 2.1. Pozo J-1 | 44 |
| 2.1.1. Datos básicos para el diseño del equipo ESP. | 45 |
| 2.2. Diseño en el software DesignPro 9.0.2..... | 55 |
| 2.2.1. Propiedades de los fluidos. | 56 |
| 2.2.2. Esquema del pozo. (Estado mecánico). | 57 |
| 2.2.3. Inflow. | 59 |
| 2.2.4. Criterios de diseño. | 60 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.2.5. | Bomba centrífuga..... | 61 |
| 2.2.6. | Motor de fondo. | 63 |
| 2.2.7. | Protector. | 63 |
| 2.2.8. | Comprobación de arranque. | 64 |
| 2.2.9. | Limitaciones Físicas. | 66 |
| 2.3. | Resumen equipos a instalar por pozos..... | 68 |
| 2.3.1. | Pozo J-2. | 68 |
| 2.3.2. | Pozo J-3. | 69 |
| 2.3.3. | Pozo J-4. | 71 |
| 2.3.4. | Pozo J-5. | 73 |
| 3. | EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO..... | 76 |
| 3.1. | Match Pozo J-1..... | 77 |
| 3.2. | Análisis de costos pozo J-1 | 78 |
| 3.3. | Match Pozo J-2..... | 79 |
| 3.4. | Análisis de costos pozo J-2 | 81 |
| 3.5. | Match Pozo J-3..... | 82 |
| 3.6. | Análisis de costos pozo J-3 | 84 |
| 3.7. | Match Pozo J-4..... | 85 |
| 3.8. | Análisis de costos pozo J-4 | 87 |
| 3.9. | Match Pozo J-5..... | 88 |
| 3.10. | Análisis de costos pozo J-5 | 90 |
| 4. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 92 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 93 |

LISTA DE FIGURAS.

| | Pag. |
|---|-------------|
| Figura 1. Variador de frecuencia..... | 18 |
| Figura 2. Controlador..... | 19 |
| Figura 3. Transformador | 21 |
| Figura 4. Caja de venteo..... | 22 |
| Figura 5. Configuración típica de una sarta de bombeo electrosumergible | 23 |
| Figura 6. Cabeza de descarga..... | 24 |
| Figura 7. Intake..... | 26 |
| Figura 8. Esquema de un protector tipo laberinto. | 31 |
| Figura 9. Esquema cámara tipo bolsa. | 32 |
| Figura 10. Protectores de eje..... | 33 |
| Figura 11. Esquema de un cable de potencia..... | 39 |
| Figura 12. Estado mecánico con sensor tipo 0 | 42 |
| Figura 13. Estado mecánico con sensor tipo 1. | 43 |
| Figura 14. Curva catálogo para una etapa de bomba S8000N..... | 50 |
| Figura 15. Curva catálogo para una etapa de bomba S8000N..... | 51 |
| Figura 16. Pérdidas de voltaje a través del cable de potencia..... | 53 |
| Figura 17. Pestaña para introducir las propiedades de los fluidos..... | 57 |
| Figura 18. Pestaña esquema del pozo (Well Data) | 58 |
| Figura 19. Pestaña esquema del pozo (Survey)..... | 58 |
| Figura 20. Pestaña Inflow | 59 |
| Figura 21. Pestaña criterios de diseño..... | 60 |
| Figura 22. Selección de la bomba centrífuga..... | 61 |
| Figura 23. Curva de desempeño para una bomba S8000N de 63 etapas a 60Hz. 62 | 62 |
| Figura 24. Configuración de la pareja de protectores. | 64 |
| Figura 25. Comprobación de arranque del equipo ESP. | 65 |
| Figura 26. Análisis de clearance | 67 |
| Figura 27. Esquema del equipo a instalar en el pozo J-2 | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 28. Esquema del equipo a instalar en el pozo J-3 | 71 |
| Figura 29. Esquema del equipo a instalar en el pozo J-4 | 73 |
| Figura 30. Esquema del equipo a instalar en el pozo J-5 | 75 |

LISTA DE TABLAS.

| | Pag. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Tipos de cámaras en un protector. | 30 |
| Tabla 2. Tipos de aceites utilizados en el motor de fondo. | 36 |
| Tabla 3. Tabla de datos Pozo J-1 | 45 |
| Tabla 4. Placa de un motor F085..... | 52 |
| Tabla 5. Resumen de componentes a instalar en el pozo J-1. | 55 |
| Tabla 6. Prueba de producción reportada por el cliente. | 60 |
| Tabla 7. Rango de caudales para una bomba modelo S8000N. | 61 |
| Tabla 8. Placa para un motor F085 | 63 |
| Tabla 9. Concepto DesigPro respecto al equipo ESP. | 66 |
| Tabla 10. Hoja de datos pozo J-2. | 68 |
| Tabla 11. Hoja de datos pozo J-3 | 70 |
| Tabla 12. Hoja de datos pozo J-4 | 72 |
| Tabla 13. Hoja de datos pozo J-5 | 74 |
| Tabla 14. Prueba de producción pozo J-1 | 77 |
| Tabla 15. Predictivos para el pozo J-1..... | 77 |
| Tabla 16. Resultados Match pozo J-1 | 77 |
| Tabla 17. Costo de los componentes pozo J-1 | 78 |
| Tabla 18. Prueba de producción pozo J-2 | 79 |
| Tabla 19. Predictivos pozo J-2..... | 79 |
| Tabla 20. Resultados match Julio pozo J-2 | 80 |
| Tabla 21. Resultados Match Agosto pozo J-2 | 80 |
| Tabla 22. Costo de los componentes pozo J-2..... | 81 |
| Tabla 23. Prueba de producción pozo J-3 | 82 |
| Tabla 24. Predictivos pozo J-3..... | 83 |
| Tabla 25. Resultados match pozo J-3 | 83 |
| Tabla 26. Costo componentes del pozo J-3..... | 84 |
| Tabla 27. Prueba de producción pozo J-4 | 85 |

| | |
|---|----|
| Tabla 28. Predictivos Pozo J-4 | 85 |
| Tabla 29. Resultados match Julio pozo J-4 | 86 |
| Tabla 30. Resultados match agosto pozo J-4..... | 86 |
| Tabla 31. Costo de los componentes del pozo J-4 | 87 |
| Tabla 32. Prueba de producción pozo J-5 | 88 |
| Tabla 33. Predictivos pozo J-5..... | 88 |
| Tabla 34. Resultados match Julio pozo J-5 | 89 |
| Tabla 35. Resultados match Agosto pozo J-5 | 89 |
| Tabla 36. Costo de los componentes del pozo J-5 | 90 |

LISTA DE ANEXOS.

Pag.

| | |
|-----------------------|------------------------------|
| Anexo 1. Pozo J1..... | Remítase a carpeta de anexos |
| Anexo 2. Pozo J2..... | Remítase a carpeta de anexos |
| Anexo 3. Pozo J3..... | Remítase a carpeta de anexos |
| Anexo 4. Pozo J4..... | Remítase a carpeta de anexos |
| Anexo 5. Pozo J5..... | Remítase a carpeta de anexos |

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA UN CAMPO COLOMBIANO UBICADO EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES MEDIANTE LA HERRAMIENTA DESIGNPRO 9.0.2*

AUTOR: JOSE DANIEL OREJARENA ALARCÓN**

PALABRAS CLAVE: Bombeo electrosumergible, Schlumberger, DesignPro, Diseño.

DESCRIPCIÓN: Existen algunos procesos antes de la comercialización de un equipo electrosumergible por parte del segmento artificial Lift de Schlumberger, en su respectivo orden son, diseño del equipo teniendo en cuenta los parámetros suministrados por el cliente, confirmación del equipo, propuesta de equipo al cliente y su posterior aprobación, ensamble del equipo, pruebas y despacho a campo para su instalación.

El paso de diseño es el que más cobra importancia en este proceso global, pues como se aprecia es la base de la cadena de comercialización, si algo falla en este paso todo el proceso será desastroso. Por esto, se deben elegir los componentes adecuados para que el equipo y el pozo sean capaces de lograr los objetivos trazados desde un principio. La finalidad del trabajo a desarrollar será realizar paso a paso la etapa de diseño del equipo, ofreciendo los mejores equipos que se tengan en inventario, los que mejor se adapten al pozo en el que serán instalados al mejor precio para el cliente, para así cumplir con los pilares fundamentales de la compañía, valor agregado al cliente, excelencia en la entrega de los servicios prestados y el más importante, soluciones ajustadas a las necesidades del cliente.

Asimismo, con estas propuestas de diseño del equipo, se obtendrá un beneficio económico a la compañía Schlumberger por la comercialización de sus servicios. También, se verá beneficiada la compañía operadora ya que con estos diseños tendrá la capacidad de lograr los objetivos de producción que tiene para sus pozos.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director M.Sc. Erik Giovany Montes Paez. Co- director Ing. Jorge Luis Villalobos León

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF THE ELECTRICAL SUMERSIBLE EQUIPMENT FOR A COLOMBIAN FIELD LOCATED IN THE BASIN OF THE EASTERN PLAINS THROUGHT THE TOOL DESIGNPRO 9.0.2 *

AUTHOR: JOSE DANIEL OREJARENA ALARCÓN **

KEYWORDS: Electrical Sumersible Pumps, Schlumberger, DesignPro, Design.

DESCRIPTION:

There are some processes before the commercialization of an ESP equipment by the Schlumberger artificial lift segment, in their respective order they are, design of the equipment taking into account the parameters supplied by the customer, confirmation of the equipment, proposal of equipment to the client and its Subsequent approval, equipment assembly, testing and field dispatch for installation.

The design step is the most important in this global process, as it is seen as the basis of the marketing chain, if something goes wrong in this step the whole process will be disastrous. Therefore, the appropriate components must be chosen so that the equipment and the well are able to achieve the objectives set from the beginning. The purpose of the work to be developed will be to carry out step by step the design stage of the equipment, offering the best equipment that is in inventory, the ones that best adapt to the well in which they will be installed at the best price for the client, in order to fulfill with the fundamental pillars of the company, added value to the client, excellence in the delivery of the services provided and the most important, solutions adjusted to the needs of the client.

Likewise, with these proposals for the design of the equipment, an economic benefit will be obtained from the Schlumberger company for the commercialization of its services. Also, the operating company will benefit since with these designs it will have the capacity to achieve the production objectives that it has for its wells.

* Graduation Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Engineering of Petroleos. Director M.Sc. Erik Giovany Montes Paez. Co-director Ing. Jorge Luis Villalobos León.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de cualquier empresa operadora en la industria petrolera es el de producir hidrocarburo al menor costo posible y optimizar el volumen de producción obtenido. Para esto, estas compañías utilizan diferentes técnicas de producción ya sea por agotamiento del reservorio con el mecanismo de producción primaria que este posea (capa de gas, gas en solución, expansión roca fluido, acuífero, segregación gravitacional), o por la inversión de algún capital para producir mediante mecanismos de producción secundaria o terciaria.

Para poder realizar esta inversión y elegir el mejor mecanismo de producción se debe conocer a detalle el yacimiento a ser explotado. Dentro de estos mecanismos de producción, se podría mencionar los más conocidos los cuales son, bombeo mecánico, bombeo electrosumergible y bombeo por cavidades progresivas, por parte de mecanismos de producción secundaria. Por el lado del recobro terciario, la inyección de químicos, inyección de vapor e inyección de agua.

La compañía Schlumberger, pionera en tecnología y líder mundial en la prestación de servicios a la industria petrolera, ofrece un gran portafolio de servicios a las compañías operadoras entre los cuales se destacan la venta de equipos de levantamiento artificial. Dentro de estos sistemas se encuentra el sistema electrosumergible, uno de los más utilizados a nivel mundial por su eficiencia, la capacidad para manejar altos caudales de fluido, la resistencia a las altas temperaturas presentes en un pozo, el fácil acceso del equipo a zonas con desviaciones anormales y la facilidad de ser asentado en un rango muy amplio de profundidades.

1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES EN UN SISTEMA ESP.

1.1. EQUIPOS DE SUPERFICIE.

Los componentes del equipo de superficie cumplen funciones específicas para que el equipo de subsuelo tenga operatividad, son una pieza fundamental dentro del sistema pues el especialista de campo y los encargados de la operación manejan las condiciones del equipo de fondo desde aquí.

Los equipos de superficie que hacen parte del sistema de bombeo electrosumergible usualmente están ubicados a pocos metros del cabezal de pozo. Estos se instalan bajo techo para protección de las condiciones climáticas y/o animales que hagan presencia en la zona. Además, el lugar es sellado bajo llave con lo cual la compañía operadora busca resguardar sus intereses, pues de esta manera los equipos no serán manipulados por personal ajeno a la operación.

1.1.1. Fuente de alimentación. La fuente de alimentación es una pieza clave en todo el funcionamiento del sistema BES, tanto para el equipo de subsuelo como para el equipo de superficie. Esta alimenta todos los equipos de superficie y estos a su vez ponen en marcha el equipo que se encuentra en el fondo del pozo.

La conexión a estas fuentes de energía se puede realizar de forma local, suscribiendo el servicio con la red eléctrica nacional, o la empresa operadora del campo en ocasiones decide implementar una forma de generación de energía la cual no dependa de la primera, pues esta es susceptible a cortes en el suministro de manera imprevista lo que conlleva al deterioro de los equipos.

1.1.2. Variador de frecuencia. La energía brindada por la fuente de alimentación va directamente al variador de frecuencia, equipo encargado principalmente de manejar la velocidad de operación del equipo de fondo. Usualmente opera en corriente alterna, esta corriente es convertida en corriente directa dentro del equipo. Luego de que la energía pasa por este equipo el voltaje se estabiliza y se entrega al transformador, nuevamente en corriente alterna en un valor de 480V.

Figura 1. Variador de frecuencia



Dentro de las funciones que tiene este equipo de superficie se encuentran las siguientes:

- Maximizar la producción del pozo.
- Manejar el voltaje y el amperaje entregado al motor dependiendo de la frecuencia fijada.
- Cambiar la velocidad de operación del equipo.

Esta última función mencionada es la más importante y para la cual está concebido este equipo.

1.1.3. Leyes de afinidad. Cuando la frecuencia de operación del equipo cambia, también lo hace el desempeño de la bomba, parámetros como el caudal, la cabeza y la potencia varían en relación a cambios de frecuencia. Cuando se conoce el comportamiento a una frecuencia determinada, las leyes de afinidad, a través de estos datos previos, describen lo que ocurre con los valores de caudal, cabeza y potencia según las siguientes ecuaciones:

$$\text{Caudal} = Q(Hz2) = Q(hz1) * \left(\frac{Hz2}{Hz1}\right) \quad (1)$$

$$\text{Cabeza} = H(Hz2) = H(hz1) * \left(\frac{Hz2}{Hz1}\right)^2 \quad (2)$$

$$\text{Potencia} = P(Hz2) = H(hz1) * \left(\frac{Hz2}{Hz1}\right)^3 \quad (3)$$

1.1.4. Controlador. La parte más importante dentro del variador de frecuencia es el controlador, es la interfaz que tiene el especialista con los equipos de fondo. Su función principal es darle la capacidad al variador de manejar la frecuencia según sean los requerimientos de producción.

Figura 2. Controlador



Fuente. Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, p. 231.

Las aplicaciones que se logran con un controlador son mencionadas a continuación:

- Controlar la frecuencia de operación del sistema.
- Cuenta con una memoria para almacenamiento de data.
- En su interior hay una tarjeta de comunicación la cual adquiere los datos tomados por el sensor de fondo.
- Detecta el giro inverso del motor y evita que el equipo trabaje en esta condición.
- Permite configurar el variador de frecuencia para la operación determinada.
- Tiene conexión USB que permite conectar el controlador directamente a un computador portátil y graficar en tiempo real los valores arrojados por el sensor de fondo.
- A través de él se pueden monitorear las variables presión de intake, presión de descarga, temperatura de motor, vibraciones, todo esto en tiempo real.

1.1.5. Transformador. En la mayoría de los casos, la disponibilidad de voltaje que se tiene en superficie es muy bajo para suplir las necesidades de operación del motor. Un voltaje de 480V que se tiene a la salida del variador es insuficiente para los voltajes que se manejan en operaciones ESP (250V – 4000V)¹, por esto se hace necesario un dispositivo que se encargue de entregar el voltaje requerido al motor de fondo.

El transformador es el equipo de superficie que se encarga de entregar el voltaje adecuado al motor, este puede ser de dos tipos, elevador si el trabajo que realiza es aumentar el voltaje que sale del variador de frecuencia, o reductor si por el contrario se tiene una demanda menor de voltaje. Para la elección del transformador se deben conocer las demandas eléctricas del motor.

¹ TAKACS, Gabor. Electrical Submersible Pumps Manual. Design, Operations, and Maintenance. USA: Elsevier, 2009. p. 117.

Figura 3. Transformador



El voltaje entregado por el transformador al motor de fondo está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Voltaje superficie} = \text{Voltaje requerido motor} + \text{Perdidas voltaje en cable} \quad (4)$$

Al momento de hacer referencia a los transformadores, se suelen utilizar las unidades KVA (Kilo-Voltios-Amperios), con esta unidad se calcula la capacidad de convertir el voltaje para el transformador.

$$KVA = \frac{1732 * (\text{Voltaje en superficie}) * (\text{Amperaje motor})}{1000} \quad (5)$$

1.1.6. Caja de venteo. La caja de conexiones o caja de venteo es un pequeño accesorio ubicado en superficie a una distancia prudente del cabezal de pozo, usualmente 15 pies, como mínimo. La razón principal para tener esta distancia es mantener alejado el lugar de conexiones del equipo BES en el momento que una operación de trabajo a pozo se lleve a cabo.

Figura 4. Caja de venteo.



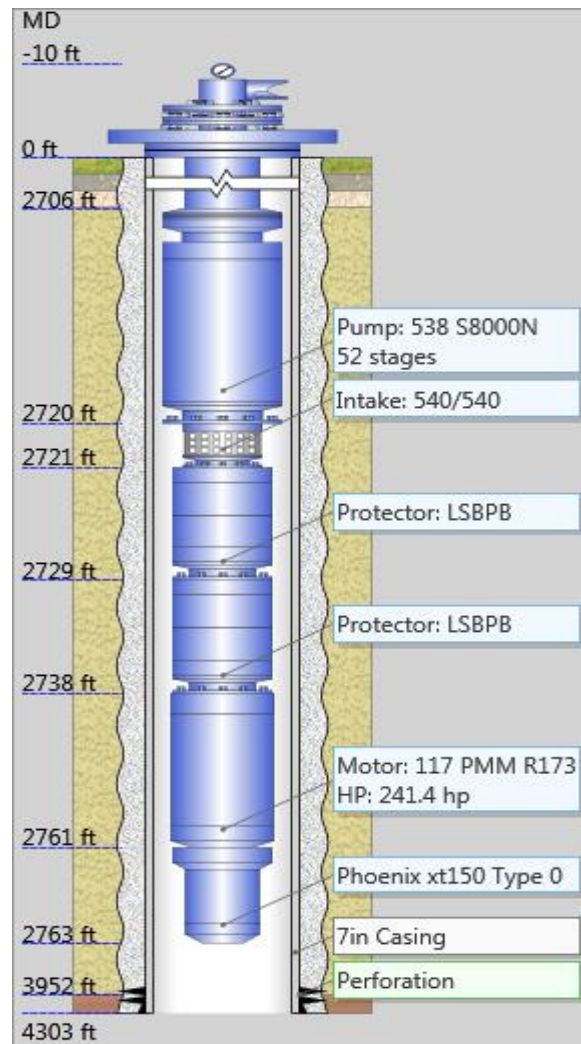
La caja de venteo cumple tres funciones principales:

- En ella se da la conexión entre el cable de fondo y el cable de superficie.
- Se encarga de liberar el gas que viene por el cable de fondo a la atmósfera. Es importante liberar estos gases para no crear una atmósfera explosiva.
- Es un punto focal para determinar las condiciones del equipo de fondo.

1.2. EQUIPOS DE SUBSUELO

Lo más importante al momento de diseñar un equipo BES es la elección de los mejores componentes para lograr los objetivos de producción, alcanzar un run life muy alto y recuperar la inversión en el menor tiempo posible. Para poder lograr esto la elección de cada componente debe ser precisa y adecuada para cada pozo.

Figura 5. Configuración típica de una sarta de bombeo electrosumergible



Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. Todos los derechos reservados.

La sarta BES está compuesta de los siguientes equipos, bomba, intake, pareja de protectores, motor, sensor; todos estos equipos sumergidos en la columna de fluido. En la figura 5 se ilustra el estado mecánico típico de un pozo con equipo electrosumergible.

1.2.1. Cabeza de descarga. El cabezal de descarga es el primer equipo que se encuentra luego de la tubería de producción, se encuentra a menor profundidad por estar en el tope de la sarta. Este pequeño accesorio tiene dos funciones principales, la primera es servir de conexión entre la tubería de producción y la sarta electrosumergible para que se pueda transportar el fluido producido a superficie. La segunda es recibir la conexión de la “transfer line” para monitorear y transmitir los datos de presión de descarga arrojados por el sensor de fondo.

Figura 6. Cabeza de descarga.



1.2.2. Bomba. Dentro de los sistemas de levantamiento artificial existen dos tipos de configuraciones, sistemas con bombas y sistemas que aligeran la carga. El bombeo electrosumergible hace parte del primer grupo, siendo un sistema compuesto por una bomba roto dinámica, que básicamente funciona bajo la transferencia de energía al fluido para que este pueda ser llevado a superficie.

1.2.2.1. Funcionamiento. Las bombas utilizadas en el sistema ESP son centrifugas multi-etapa con operación en posición vertical. La bomba centrífuga crea presión a través de cada etapa, las cuales están conformadas por un difusor, un impulsor y parte del eje. El impulsor realiza un movimiento rotacional dentro del difusor creando un vacío parcial dentro de la etapa y transfiriendo al fluido energía cinética. El difusor por su parte realiza una conversión de energía, convierte la energía cinética que trae consigo el fluido en energía potencial (presión) para que el fluido pase a la siguiente etapa.

1.2.2.2. Partes de la bomba

Impulsor. El impulsor se encuentra dentro del difusor realizando un movimiento rotacional. Al realizar este movimiento, dentro de la etapa se crea un vacío parcial por la succión que este ejerce. Su función es transferir mediante una serie de paletas toda la energía cinética al fluido que está pasando a través de la etapa.

Difusor. El difusor es el encargado de soportar el movimiento rotacional del impulsor, en esta sección se convierte la energía cinética del fluido adquirida previamente en energía potencial, aumentando la presión del fluido.

Etapa. La bomba está constituida por etapas, cada etapa está conformada por un impulsor, un difusor y por medio de estas pasa el eje de la bomba. La cantidad está determinada por la cabeza total requerida en la operación y la cabeza que pueda aportar cada etapa.

$$\#Etapas = \frac{Cabeza\ total\ requerida}{Cabeza\ por\ etapa} \quad (6)$$

1.2.3. Intake. El “intake” o entrada de fluido se ubica debajo de la bomba y sobre el protector. Es un equipo pequeño en comparación con los demás componentes que conforman el equipo electrosumergible. La función principal de este accesorio es recibir el fluido para que este sea llevado a superficie. Existen diferentes tipos de intakes, dentro de este trabajo solo se mencionará el tipo estándar por ser el más utilizado dentro de la industria.

El intake tipo estándar está diseñado para minimizar las pérdidas en los picos máximos de caudal que la bomba pueda entregar². En su diseño exterior cuenta con una rejilla metálica que actúa como protector de los orificios de entrada del fluido, esta protección se implementa para minimizar los problemas con sólidos.

Figura 7. Intake



² Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, p. 106

1.2.3.1. Manejadores y separadores de gas. Cuando se conoce de antemano la presencia de gas en la locación en donde se llevará a cabo la instalación de un equipo BES se toman las medidas necesarias para que el gas no afecte la operación de ninguna manera, pues este fluido es potencial de atmósferas explosivas, desgaste del equipo de fondo y desgaste del equipo de superficie. La diferencia entre un manejador y un separador de gas radica en que el primero está incorporado al intake mientras que el segundo es un componente complemente distinto. En esta sección se tratarán únicamente los manejadores de gas.

1.2.3.2. Manejadores de gas. Existen dos tipos de manejadores de gas, el AGH por sus siglas en inglés “Advanced Gas Handler” y el Poseidon.

El AGH es implementado cuando se tiene una cantidad de gas del 20% al 40% en volumen, pero este valor puede ser llevado a cantidades máximas de gas del 45%. Este manejador de gas modifica las condiciones del gas libre convirtiéndolo en un fluido homogéneo que es más fácil de manejar por las etapas de la bomba. ³ Las ventajas de este manejador de gas son:

- Homogenizar la mezcla y reducir la probabilidad de que se presente un bloqueo por gas.
- Hacer que el gas libre se convierta en gas en solución

Por otro lado, se encuentra el manejador Poseidon que se diferencia del AGH principalmente por la cantidad de gas que puede tratar, mientras que el AGH maneja 45% de volumen de gas como valor máximo, el Poseidon maneja volúmenes de hasta 75% de gas libre. ⁴

³ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, p. 109

⁴ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, p. 110

1.2.4. Protectores. Continuando con la descripción de la sarta del equipo electrosumergible, el componente a encontrar luego de la bomba y el intake, es el protector o sello, en el caso de la compañía Schlumberger se utilizan dos parejas de protectores por instalación, un protector “upper” que estará acoplado en su tope al intake y un protector “lower” que se conectará bajo el protector “upper” y en la base con el motor de fondo.

1.2.4.1. Funcionamiento. Dentro de la operación de producción con un sistema de levantamiento artificial tipo electrosumergible todo el equipo tiene que estar sumergido dentro del fluido del pozo, esto para generar aporte a superficie y refrigerar el equipo de fondo. Esto conlleva a que equipos con funcionamiento eléctrico como el motor se encuentren bajo una falla inminente por contaminación de este fluido. Por esta razón principalmente está concebido el protector.

Las parejas de protectores actúan como un sello entre el motor y el pozo, si no se instalan los protectores el motor se contaminará y la operación del equipo se verá forzada a la detención por contaminación de este componente. Algunas de las actividades que realiza este equipo se mencionan a continuación:

- Al dar energía al fluido, las etapas de la bomba generan un empuje descendente que se transmite por el eje hasta el motor. El motor no está en la capacidad de soportar estos esfuerzos que llegan desde la bomba, por esto en el protector se instala un cojinete de empuje que soportará todas las fuerzas producidas por el empuje de la bomba.⁵

⁵ TAKACS, Gabor. Electrical Submersible Pumps Manual. Design, Operations, and Maintenance. USA: Elsevier, 2009. p. 85

- Es el encargado de impedir la entrada de fluido de pozo al motor, con esto se evitan las fallas prematuras del mismo.⁶
- El motor se encuentra lleno de aceite, con la temperatura del pozo este aceite se calienta y sufre expansión, esta operación se lleva a cabo en el protector, al igual que la contracción que se presenta en las paradas del equipo.⁷
- Se encarga de igualar la presión en el motor con la presión en el fondo del pozo. ⁸
- El eje del protector transmite el torque generado en el motor hacia la bomba y así la bomba puede realizar su trabajo.⁹

1.2.4.2. Partes de un protector.

Cojinete de empuje. En total son dos cojinetes de empuje los que se instalan en un protector, un cojinete instalado en el tope del protector, encargado de absorber todas las fuerzas generadas cuando la operación se da en “Up-thrust”, generalmente cuando el caudal producido es superior al caudal de diseño del equipo.

⁶ Ibid., p. 86

⁷ Ibid., p. 86

⁸ Ibid., p. 86

⁹ Ibid., p. 86

El otro cojinete se instala en la base del protector y está diseñado en un material de mayor resistencia que el cojinete que se encuentra en el tope, este soporta las fuerzas generadas por las etapas de la bomba cuando la operación se da en “Down-thrust”, cuando el caudal producido es inferior al caudal de diseño del equipo. Este cojinete también soporta las fuerzas descendentes que se dan en la operación normal del equipo.

Cámaras. Cada protector en su configuración está dividido en tres cámaras, allí se da la contracción y expansión del fluido. En la siguiente tabla se muestran los tipos de bolsas, sus ventajas y limitaciones:

Tabla 1. Tipos de cámaras en un protector.

| Configuración | Ventajas | Limitaciones |
|------------------------|---|---|
| Laberinto (L) | No son muy costosos. Fácilmente recuperables. Excelente separación en pozos verticales. | En pozos desviados nos son utilizados. Gravedad específica del fluido afecta funcionamiento. |
| Bolsas (B) | Utilizadas en pozos desviados y no hay inconvenientes con la densidad del fluido | Problemas con H ₂ S, altas temperaturas y potencias de operación elevadas. |
| Bolsas paralelas (BPB) | Igual a bolsas sencillas pero proveen mayor capacidad. | Problemas con H ₂ S, temperatura. |
| Fuelle (M) | Buen sello, altas temperaturas, no tiene problemas químicos. | Costos muy elevados. |
| Fuelle paralelos (MPM) | Igual a fuelle sencillo pero proveen mayor capacidad. | Costos muy elevados. |

Fuente. Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, p. 154.
Modificado por el autor.

Laberinto. Es la cámara del protector que tiene contacto directo con el fluido del pozo. Al mantener esta conexión con el pozo, el hidrocarburo ingresa por esta cámara al protector, por esto la operación de un laberinto se da bajo la diferencia de densidades, gracias a esto el fluido de pozo no pasa a las siguientes cámaras ni desciende hasta el motor de fondo. Dentro de las ventajas que se tiene al trabajar con este tipo de cámaras son la facilidad de recuperación una vez se desmantele el equipo, el bajo costo y la resistencia a condiciones extremas en el pozo.

La desventaja principal con esta cámara tiene que ver con el tipo de fluido a ser producido; si el aceite es liviano, con una gravedad específica menor que 0.85, no es recomendable utilizar este tipo de cámara pues el fluido al ser tan liviano descenderá y muy probablemente llegará al motor. Otra de las limitaciones que tiene el laberinto es una desviación muy alta en el pozo, pues si el equipo se instala en este lugar, el principio de operación no funcionará.

Figura 8. Esquema de un protector tipo laberinto.

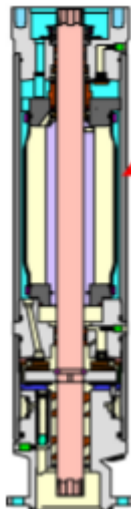


Fuente. TAKACS, Gabor. Electrical Submersible Pumps Manual. Design, Operations, and Maintenance. USA: Elsevier, 2009. p. 92.

Comúnmente un protector viene en disposición LSBPB (Laberinto – Sello – Bolsa – Paralelo – Bolsa), el laberinto y las bolsas son las 3 cámaras utilizadas dentro del protector. Por otro lado, están los sellos y paralelo que se pueden describir como la comunicación que se tiene entre las cámaras instaladas en el protector. Luego de un laberinto se tiene sello, este previene la comunicación entre el fluido de pozo y el aceite del motor.

Bolsa. La cámara tipo bolsa cuenta con un elastómero resistente a la temperatura, al H₂S y con funcionalidad en pozos con desviación considerable. Esta bolsa contiene dentro de su interior el aceite del motor y fuera de esta se encuentra el fluido del pozo. La función de la bolsa en esta cámara es expandirse cuando por alta temperatura el aceite de motor comienza a expandirse también hasta la estabilización del mismo. Asimismo, cuando el motor se apaga o deja de funcionar, el trabajo de la bolsa es contraerse durante este periodo de no operación. El mejor desempeño de este tipo de cámaras es en pozos desviados.

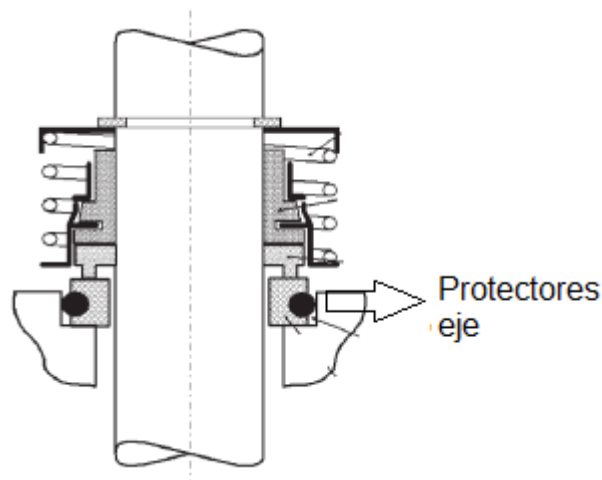
Figura 9. Esquema cámara tipo bolsa.



Fuente. Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, p. 152

Protectores de eje. El eje del protector un potencial riesgo de contaminación, pues por esta parte del protector es muy común que pase el fluido del pozo y llegue al motor de fondo. Para evitar esta situación existen los protectores de eje, que básicamente son sellos ubicados en el tope de los protectores, con capacidad de rotar a la par con el eje y cuya función es prevenir la comunicación de fluidos de pozo con el motor a través del eje.

Figura 10. Protectores de eje.



Fuente. TAKACS, Gabor. Electrical Submersible Pumps Manual. Design, Operations, and Maintenance. USA: Elsevier, 2009. p. 96

1.2.5. Motor de fondo. El equipo encargado de asegurar la operación en fondo de pozo es el motor. Este recibe energía por medio del cable de potencia que a su vez es alimentado de los equipos de superficie. El motor transforma la energía en energía mecánica y la entrega a la bomba por medio de los ejes ubicados en cada uno de los equipos. Existen algunas diferencias entre un motor común y un motor BES:

- Los motores ESP solo pueden aumentar su potencia incrementando el número de rotores, por ende, incrementando la longitud de la unidad.
- Los motores comunes son usualmente refrigerados con el aire circundante, mientras que un motor BES es refrigerado con el fluido de pozo.
- Motores en aplicaciones electro sumergibles están conectados a la fuente de alimentación por medio de cables de potencia, en estos se dan pérdidas de voltaje.
- Al momento de iniciar operación, el motor BES alcanza su velocidad máxima en 0.2 segundos, esto debido a su baja inercia.

1.2.5.1. Funcionamiento. El motor funciona bajo dos leyes principales, la ley de Faraday y la ley de Lorentz.

La ley de Faraday enuncia lo siguiente:

“El voltaje inducido en un circuito cerrado resulta directamente proporcional a la velocidad con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie dada”.

$$E = -N\left(\frac{d\Phi}{dt}\right) \quad (7)$$

La ecuación describe la ley de Faraday, donde N hace referencia al número de vueltas que tiene el bobinado del estator, mientras que $\frac{d\Phi}{dt}$ se refiere al cambio del flujo magnético en el tiempo.

La ley de Lorentz por su parte enuncia:

“Una partícula cargada q que circula a una velocidad v por un punto donde existe una intensidad de campo magnético B , sufrirá la acción de una fuerza F ”

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (8)$$

El diseño del motor es tipo jaula de ardilla, lo que indica que un estator con campo electromagnético recibe la rotación de un conjunto rotórico, esta rotación induce corriente eléctrica, como se describe en la ley de Faraday. Luego, esta corriente adquiere un movimiento que reacciona con el campo magnético y producen una fuerza tangente encargada de dar el torque necesario para el movimiento del eje.

1.2.5.2. Partes del motor.

Estator. El estator es la pieza fija dentro del motor, consta de láminas de acero magnético apiladas en el interior de la coraza del equipo y un bobinado. Por este pasan las corrientes eléctricas que se encargarán de inducir un posterior campo magnético y una fuerza torsional con la rotación del conjunto rotórico.

Rotor. Los rotores son la parte fija del motor, están incrustados en el eje del equipo y junto con él realizan el movimiento rotacional dentro del estator, esto sin producir contacto. Como se observa en la ecuación (9), al tener una velocidad de rotación y un campo magnético, se tendrá una fuerza que se transmitirá por todo el eje del motor y del protector hasta el eje de la bomba, este pondrá en funcionamiento los estatores.

Eje. El eje del motor es similar al eje de los otros equipos, tiene como función dentro de este componente la transmisión de energía generada hacia el eje del protector para su posterior transmisión al eje de la bomba.

Conexión eléctrica. La conexión al motor se encuentra en la parte superior del cuerpo del equipo, aquí entran las tres fases del cable de potencia para poder asegurar la alimentación del equipo. El tipo de conexión es hembra y cuando se conecta con la extensión de cable del motor o MLE se hace un sello para no afectar el funcionamiento eléctrico del mismo.

Aceite.

Tabla 2. Tipos de aceites utilizados en el motor de fondo.

| Temperatura motor | Tipo aceite | Características | Descripción |
|--------------------------|--------------------|---|--------------------|
| <270°F | Reda #3 | Usar en bajas temperaturas | Sintético |
| <290°F | Reda #2 | Usar en bajas temperaturas, calentar si T ambiente es menor de 32°F | Aceite mineral |
| <360°F | Reda #5 | Recomendado para aplicaciones en general | Sintético |
| <400°F | Reda #6 | Disminuye eficiencia del motor | Sintético |
| >400°F | Reda #7 | Extiende la vida del protector. Altas temperaturas. | Sintético |

FUENTE. Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, p. 125.

1.2.5.3. Limitaciones del motor.

Límites en el aislamiento. El aislamiento del motor normalmente está diseñado para recibir 5kV como valor máximo, por esta razón el voltaje en la operación se limita a 4160V. Sin embargo, al realizar aumentos de frecuencia el voltaje se incrementa linealmente con estas variaciones. Al momento de realizar el diseño y de realizar aumentos en la velocidad de operación, se deben tener en cuenta estas limitaciones, además, si el sistema se encuentra expuesto a armónicos se deben tomar mayores precauciones.

Límites térmicos. La temperatura de motor es una de las variables críticas durante la operación de un equipo de bombeo electro sumergible, si este valor sobrepasa los límites el equipo se quemará. El valor máximo que puede alcanzar la temperatura dentro de un motor Schlumberger es de 400°F, por esto el sensor de fondo, el cual se encarga de medir las variables de operación, está configurado para emitir una alarma en 350°F y así los encargados de la operación tomen las medidas correspondientes, si la temperatura continua con su incremento, el equipo se apagará como medida preventiva.

Los cambios térmicos del motor se ven afectados por la corriente que atraviesa el bobinado, los armónicos que llegan al variador de frecuencia, la fricción en los cojinetes de empuje, los cambios de frecuencia. Por lo anterior, el motor se refrigera con el fluido proveniente del yacimiento. Para una correcta refrigeración, la velocidad de este debe ser alrededor de 1 ft/s. También, el aceite que se encuentra al interior del motor posee propiedades refrigerantes.

Operación en pozos desviados con alto DLS (Dog Leg Severity). Esta limitante viene dada por condiciones propias del pozo, para contrarrestarlas el equipo BES tiene características especiales como OD más pequeños y longitudes de equipos más cortos con las mismas características. El DLS a tener presente en la instalación de un equipo BES es $1^{\circ}/100\text{ft}$ como valor máximo para el lugar de la instalación y un DLS de $6^{\circ}/100\text{ft}$ como valor máximo en el resto del pozo donde no se realice la instalación. Si se superan dichos valores, no es recomendable bajar un equipo BES.

1.2.6. Cable de potencia. El motor de fondo necesita alimentación eléctrica para poder funcionar, de lo contrario la operación sería inexistente, esta energía llega al motor por medio del cable de potencia. El cable comienza desde el transformador en superficie y llega hasta la caja de conexiones, este tramo es conocido como el cable de superficie. En la caja de conexiones se da un empalme entre el cable de superficie que usualmente tiene una longitud de 100 ft y el cable de fondo, la longitud del último va a depender de la profundidad de asentamiento del motor de fondo.

El cable de fondo baja paralelo a la tubería de producción, usualmente sujetado con bandas, y/o protectores de cable sobre tubería (over-coupling – mid-joints). Las bandas o superbandas son utilizadas para fijar el cable a la tubería de producción y que así este no tenga movimiento dentro del hoyo y sufra machucones. Los over-coupling son otro tipo de accesorio similar a las bandas, cumplen la misma función, pero la diferencia radica en que estos se ubican en las uniones entre tubería o uniones de equipo. Por último, se tienen los mid-joints, accesorios que funciona igual a los dos anteriores con la diferencia en su ubicación, estos se instalan en la mitad de cada junta de tubería.

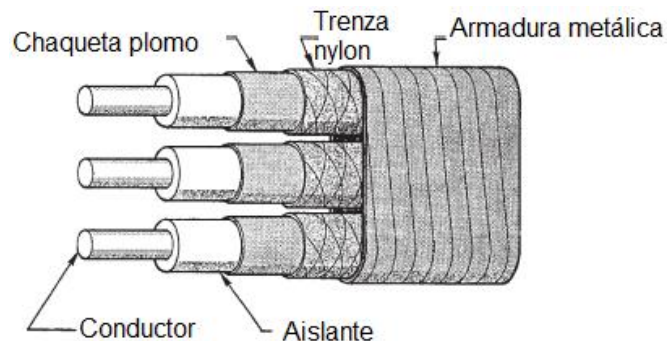
El cable de fondo termina aproximadamente 60ft por encima de la conexión del motor, aquí se realiza un empalme con el MLE (Motor Lead Extention) o extensión de cable del motor. El MLE es la parte más delicada del cable de potencia pues es la conexión directa con el motor; entre el MLE y la conexión del motor existe un sello, como se mencionó anteriormente en la sección del motor, que impide la entrada del fluido de pozo al motor.

Las características que un cable de potencia debe poseer son:

- Deben ser de diámetro pequeño de tal forma que ajusten en el diámetro restante entre el equipo y el anular.
- A pesar de las condiciones extremas como las altas temperaturas, presencia de gases e hidrocarburos, deben mantener sus propiedades dieléctricas
- Deben tener protección durante la instalación y la extracción de un equipo.

1.2.6.1. Partes de un cable.

Figura 11. Esquema de un cable de potencia.



Fuente. TAKACS, Gabor. Electrical Submersible Pumps Manual. Design, Operations, and Maintenance. USA: Elsevier, 2009. p. 105

Conductor. El conductor es la parte que cobra más importancia en el cable, por dicha razón tiene 4 recubrimientos sobre él. El cable es trifásico, lo que quiere decir que cuenta con tres conductores, el material predilecto para los conductores es el cobre o el aluminio. El aluminio es el material más económico, pero solo brinda 61% de conductividad que la conductividad lograda por un cable de cobre, además cobra mayor dificultad la forma de realizar el empalme cuando se trabaja con este material.¹⁰

Lo recomendado para un conductor es el cobre, ya que el empalme se realiza con mayor facilidad, previene la migración de gases a través de él hacia superficie, pero cuenta con la desventaja de ser mayormente afectado por ambientes corrosivos.

Aislante. Cada fase del cable es aislada individualmente con materiales dieléctricos que resisten las condiciones extremas como lo son las altas temperaturas en el pozo, deben ser resistentes al aceite y prevenir la migración de gas a través del cable. El mayor problema al que se enfrenta el aislante es la sobre temperatura, ya que esta disminuye la vida de un cable. Como regla del dedo pulgar se tiene que la vida de un material aislante es reducida en un 50% por cada 18°F (10°C) de incremento en la temperatura de operación.¹¹

Los materiales utilizados como aislantes son el EPDM y el polipropileno. El primero es utilizado en operaciones con temperaturas hasta de 400°F y tiene buena resistencia química, mientras que el segundo se usa en operaciones con temperaturas de hasta 200°F, pero tiene la desventaja de padecer en presencia de CO₂ y gases hidrocarburos.

¹⁰ **Fuente.** TAKACS, Gabor. Electrical Submersible Pumps Manual. Design, Operations, and Maintenance. USA: Elsevier, 2009. p. 102

¹¹ Ibid., p. 103

Chaqueta de plomo. La chaqueta es el siguiente componente de las fases de un cable de potencia, su única función es la de dar protección al aislante durante la instalación, operación y extracción de un equipo electrosumergible.

Trenza de Nylon. Sobre la chaqueta de plomo se esparce una trenza de material nylon, da la impresión que no cumple función dentro de la estructura, pero cumple con no permitir la unión de las chaquetas en presencia de altas temperaturas mediante su fundición.

Armadura metálica. Es la parte exterior del cable de potencia, puede ser de diferentes geometrías como lo son plano, redondo y cuadrado, estas dependerán de la tolerancia entre el equipo de fondo y la tubería de revestimiento. La tarea que cumple esta parte del cable es la de aislar todo el interior mencionado previamente para que la operación tenga lugar en buenas condiciones, asimismo, prevenir la expansión de lo que esta armadura resguarda. La construcción de la armadura se da en monel, acero inoxidable o acero galvanizado.

1.2.7. Sensor. Descendiendo por toda la sarta del equipo de bombeo electrosumergible, al final de esta encontramos el sensor de fondo, un pequeño dispositivo encargado de monitorear y emitir comunicación a superficie. La función principal de este pequeño accesorio es monitorear en tiempo real cada una de las variables de fondo como son la temperatura de motor, la presión de intake (PIP), la presión de descarga (PD), temperatura de intake, vibraciones de la bomba y corrientes de fuga.

Las lecturas de dichas variables se mostrarán en el controlador del variador y, si es el caso, en un centro de monitoreo en tiempo real.

1.2.7.1. Tipos de sensores.

Tipo 0. Esta clase de sensor se encargará de medir PIP, temperatura de motor, vibraciones y corrientes de fuga. Todo esto se medirá desde un dispositivo instalado en el propio sensor.

Figura 12. Estado mecánico con sensor tipo 0



Fuente: Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, p. 135

Tipo 1. Por su parte, el sensor tipo 1 se encargará de medir adicional a las variables tomadas por el sensor tipo 0, la presión de descarga. La diferencia radica en la implementación de una línea de conexión llamada transfer line, la cual está conectada desde el sensor hasta la cabeza de descarga.

Figura 13. Estado mecánico con sensor tipo 1.



Fuente: Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, p. 136.

2. DISEÑO DE LOS EQUIPOS ESP.

Posterior a la descripción del equipo de bombeo electrosumergible en el capítulo anterior, se procederá con la realización de los diseños de 5 sartas ESP para cumplir con las necesidades de un cliente de la compañía Schlumberger. Por motivos de confidencialidad, no serán revelados los nombres de los pozos, así como el nombre del cliente en cuestión. Para referenciar los pozos, se utilizará la letra J, así como un número del 1 al 5 para diferenciarlos el uno del otro.

En cuanto a la parte del diseño, se realizará un paso a paso detallado para el primer pozo (J-1), en el que se mostrará toda la etapa de diseño y su posterior comprobación con el software de la compañía Schlumberger, DesignPro 9.0.2. Para los pozos restantes (J-2, J-3, J-4, J-5) no se mostrará a detalle todo este procedimiento, pero se mostrará el equipo a instalar en los mismos.

2.1. Pozo J-1

Para el diseño del equipo se tendrán en cuenta los siguientes pasos a seguir:

- Datos básicos para el diseño del equipo ESP.
- Capacidad de producción del pozo.
- Cálculos de gas.
- Cabeza dinámica total. (TDH).
- Selección del tipo de bomba.
- Selección del motor.
- Selección del cable de potencia.
- Determinar condiciones de operación del equipo de superficie.

2.1.1. Datos básicos para el diseño del equipo ESP. A continuación, se muestra la hoja de datos suministrada por el cliente para el diseño del equipo ESP. Esta tabla ha sido modificada por el autor por motivos de seguridad de la información del cliente.

Tabla 3. Tabla de datos Pozo J-1

| ESP DESIGN DATA SHEET | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------------|------------------------|----------------|-----------------------|------------|
| | | | | | | | 21/06/2017 |
| OPERADORA | Confidencial | | POZO | | J-1 | | |
| PAIS | Colombia | | FORMACIONES | | Carbonera | | |
| CAMPO | Jose | | | | | | |
| WELBORE | | | | | | | |
| | ID(in) | OD(in) | Weight (lb/ft) | From (ft) | To (ft) | PERFORADOS TVD | |
| Casing | | 9-5/8" | 36 | 0 | 309.5 | 5604 | 5612 |
| Casing | | 7" | 23 | 0 | 5801 | 5560 | 5563 |
| Tubing | 2.992 | 3-1/2" | 9.3 | 0 | 4626 | 5512 | 5539 |
| INFORMACIÓN DE SUPERFICIE | | | | | | | |
| THP | 150 | psi | | Voltaje | 480 | V | |
| WHT | 177 | F | | Frecuencia | 60 | Hz | |
| CHP | 0 | psi | | | | | |
| PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS | | | | | | | |
| API | 21.2 | | | Presion burbuja | 360 | psi | |
| Gravedad Gas | 0.7 | | | Salinidad | 60-100 | ppm | |
| Gravedad Agua | 1 | | | | | | |
| CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO | | | | | | | |
| PRUEBA DE PRESIÓN | | | | PRUEBA DE PRODUCCIÓN | | | |
| | | MD | TVD | | | | |
| Datum | | 5560 | 5560 | Caudal aceite | 62 | bopd | |
| Presión estática | | 2070 | psi | Caudal agua | 6394 | bwpd | |
| Temperatura | | 200 | F | Caudal fluido | 6456 | bfpd | |
| IP | | 10stb/psi | 15stb/psi | BSW | 99.04 | % | |
| K | | 2000mD | 3000mD | GOR | 6 | scf/bbl | |
| PARÁMETROS DE DISEÑO | | | | | | | |
| | | MD | TVD | UNIDADES | | | |
| PROFUNDIDAD DE SENTAMIENTO | | 4700 | 4092 | ft | | | |
| CAUDAL DE DISEÑO | | 8200 | | bpd | | | |

Fuente. Cliente de la compañía Schlumberger. Modificado por el autor.

2.1.1.1. Capacidad de producción del pozo. En la hoja de datos suministrada por el cliente se logra apreciar el índice de productividad para el caudal de diseño, por esto se omiten los cálculos relacionados con hallar el IP.

2.1.1.2. Cálculos de gas. Nuevamente, como se aprecia en la hoja de datos suministrada por el cliente, el GOR que se manejará en el pozo es ínfimo (6scf/stb), por lo cual no es necesario realizar este paso. Si, por el contrario, el pozo tuviese un GOR demasiado alto, este paso cobra vital importancia para la selección de un manejador o separador de gas.

También, se tiene la experiencia con algunos otros pozos vecinos a J-1, en los cuales sus valores de GOR han sido muy similares y no se han presentado problemas con gas libre en el quipo ESP.

2.1.1.3. Cabeza dinámica total. Este es uno de los pasos que cobra mayor relevancia dentro del diseño del equipo ESP, ya que si se determina mal la TDH posiblemente el equipo no sea capaz de llevar el fluido a superficie para su posterior comercialización, lo que significa una gran pérdida económica.

La TDH consta de tres partes principales:

$$TDH = H_{THP} + H_{Fricción} + H_{Nivel} \quad (9)$$

Donde,

H_{THP} = Distancia en ft necesaria para llevar el fluido al cabezal del pozo.

$H_{Fricción}$ = Pérdidas por fricción en cada 1000 ft de tubería.

H_{Nivel} = Distancia vertical entre el asentamiento de la bomba y la superficie.

Antes de calcular estas tres variables, es necesario calcular la gravedad específica de la mezcla, así como el gradiente promedio del fluido.

Gravedad específica del aceite de API=21.2

$$SG_{oil} = \frac{141.5}{131.5 + API} \quad (10)$$

$$SG_{oil} = \frac{141.5}{131.5 + 21.2} = \mathbf{0.9266}$$

Gravedad específica de la mezcla,

$$SG_{Mix} = GE_{Water} * BS\&W + GE_{Oil} * (1 - BS\&W) \quad (11)$$

$$SG_{Mix} = 1 * 0.9904 + 0.9266 * (1 - 0.9904) = \mathbf{0.9992}$$

Gradiente promedio del fluido,

$$G_{Fluido} = SG_{Mix} * \frac{0.433ft}{psi} \quad (12)$$

$$G_{Fluido} = 0.992 * \frac{0.433ft}{psi} = \frac{\mathbf{0.4326ft}}{psi}$$

Teniendo los valores de gravedad específica de la mezcla y el gradiente promedio del fluido, se procede a calcular cada una de las variables, para así calcular el TDH. La primera es el H_{THP} .

$$H_{THP} = THP / G_{Fluido} \quad (13)$$

$$H_{THP} = \frac{150psi}{\frac{0.4326psi}{ft}} = 346.74 ft$$

La segunda variable a calcular es $H_{Fricción}$,

$$H_{Friccion} = Asentamiento bomba (MD) * f \quad (14)$$

Donde f , según el método de Hazen-Williams está dado por,

$$f = 2.083 * \left(\frac{100Q}{34.3C}\right)^{1.85} * (ID)^{-4.8655} \quad (15)$$

Donde,

C= 120, aplicaciones con tubería de acero.

C= 90-110, aplicaciones con tubería corroída.

Q= caudal de fluido (BPD).

ID= diámetro interno tubería de producción (in).

$$f = 2.083 * \left(\frac{100 * 8200}{34.3 * 120}\right)^{1.85} * (2.992)^{-4.8655} = \frac{180.5819ft}{1000ft tubería}$$

$$H_{Friccion} = 4700ft * \frac{180.5819ft}{1000ft tubería} = 848.7349ft$$

Se procede a calcular la 3 variable de TDH, H_{Nivel}

$$H_{Nivel} = TVD_{perforados} - \frac{P_{wf}}{G_{Fluido}} \quad (16)$$

$$P_{wf} = P_y - \frac{Q}{IP} \quad (17)$$

Se utilizan los valores de la prueba de producción reportada para calcular P_{wf} ,

$$P_{wf} = 2070\text{psi} - \frac{6456\text{BFD}}{\frac{15\text{BFP}}{\text{psi}}} = 1639.6\text{psi}$$

$$H_{\text{Nivel}} = 5562\text{ft} - \frac{1639.2\text{psi}}{\frac{0.4326\text{ft}}{\text{psi}}} = \mathbf{1772.82\text{ft}}$$

Por último, se calcula el TDH utilizando la ecuación (9)

$$TDH = H_{\text{THP}} + H_{\text{Fricción}} + H_{\text{Nivel}} \quad (18)$$

$$TDH = 346.74\text{ft} + 848.73\text{ft} + 1772.82\text{ft}$$

$$\mathbf{TDH = 2968.29}$$

2.1.1.4. Selección del tipo de bomba. De acuerdo al caudal reportado para el diseño, 8200 BFPD, la referencia de bomba marca Schlumberger que maneja este caudal en su mejor punto de operación es la S8000N. Ahora se continúa con la selección del número de etapas necesarias para levantar el TDH calculado en el numeral anterior.

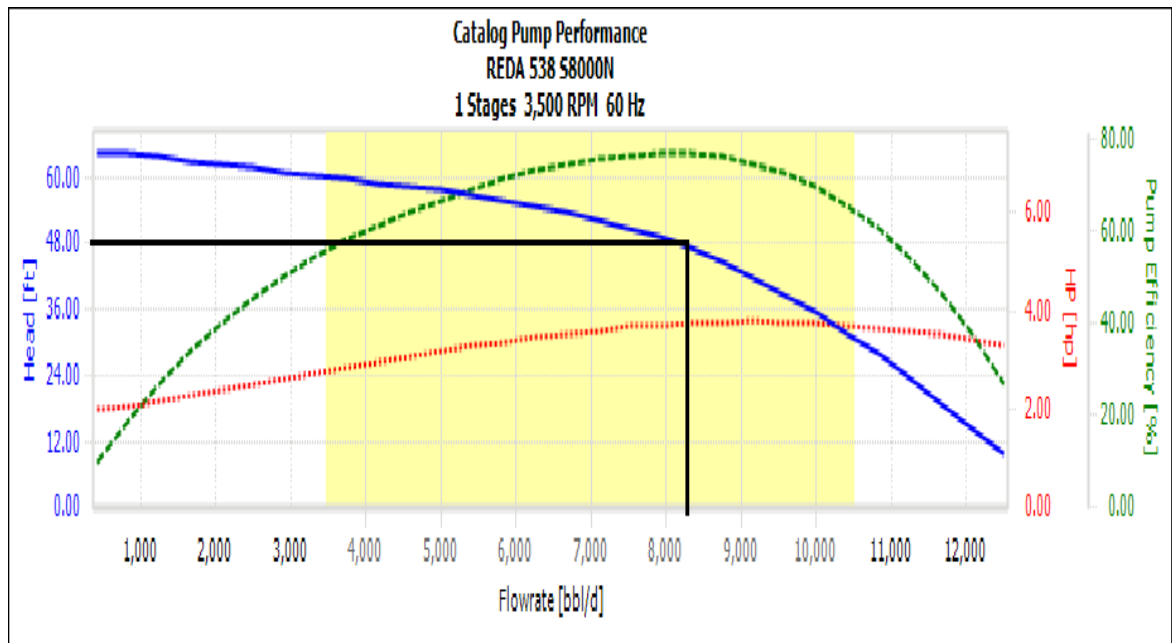
Según la gráfica de catálogo para una etapa de una bomba S8000N, la cabeza en ft es de 48ft/etapa. Así entonces el número de etapas estará determinado por

$$\#etapas = \frac{TDH}{ft/etapa} \quad (19)$$

$$\#etapas = \frac{2968.29}{48} = 61.8394 etapas$$

Según esto, el número de etapas requerido para esta bomba SN8000 es de 62 etapas, adicional a esto, se agrega una etapa para generar un poco más de TDH, teniendo así un total de 63 etapas para esta bomba.

Figura 14. Curva catálogo para una etapa de bomba S8000N.

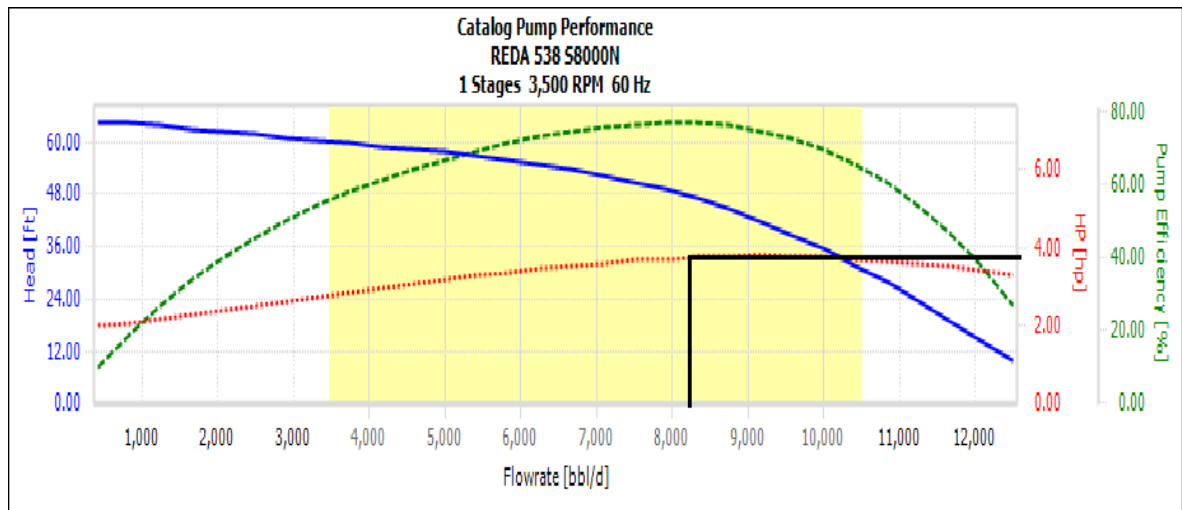


Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

:

2.1.1.5. Selección del motor. El procedimiento para seleccionar el motor es similar al de selección del número de etapas de la bomba, se debe remitir al catálogo de la bomba para obtener el dato de potencia requerido para el funcionamiento de una etapa y calcular para el número de etapas requerido por la bomba.

Figura 15. Curva catálogo para una etapa de bomba S8000N.



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

Según la gráfica de catálogo, la potencia requerida por cada etapa es de 3.7Hp para que la bomba esté en la capacidad de producir el TDH necesario y por ende producir el caudal requerido en superficie.

$$Potencia\ del\ motor = \frac{Potencia}{etapa} * \#etapas * \frac{MaxHz}{60Hz} * SG_{Fluido} \quad (20)$$

$$Potencia\ del\ motor = \frac{3.7hp}{etapa} * 63 * \frac{60Hz}{60Hz} * 0.992 = \mathbf{231.2352\ Hp}$$

Se requiere una potencia en el motor de fondo de 231.2352Hp, esto suponiendo que el equipo sea llevado a una frecuencia de operación de 60Hz. Comúnmente, la frecuencia máxima de operación es 60Hz para un equipo ESP, pero algunos clientes llevan sus equipos a valores de frecuencia por encima de este valor para lograr una mayor producción.

Dentro de los motores que se manejan en Schlumberger para suplir con esta condición de potencia, se elige el siguiente motor y sus respectivas características:

Tabla 4. Placa de un motor F085.

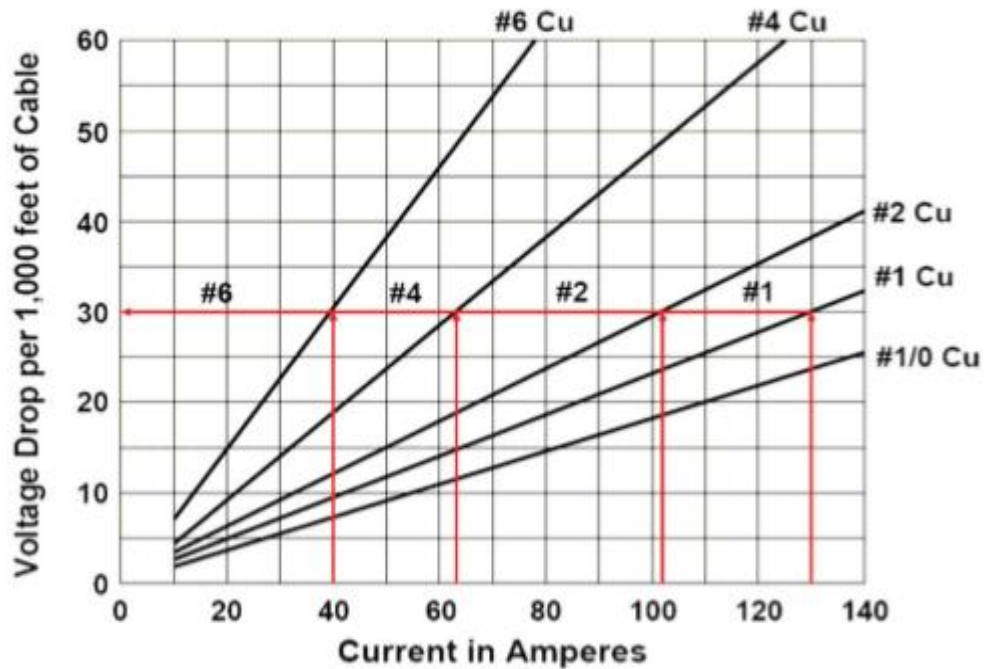
| Serie | Winding Code | Potencia (Hp) | Voltaje (V) | Corriente (amp) |
|-------|--------------|---------------|-------------|-----------------|
| 5.62" | F085 | 300 | 1763.3 | 103.7 |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

2.1.1.6. Selección del cable de potencia. Para seleccionar el cable de potencia a instalar en la sarta ESP y el cual servirá como conexión entre los equipos superficie y la sarta de fondo es necesario conocer la corriente de placa del motor, la cual es 104amp. Con esta corriente se ingresa en la figura 17.

Para esta gráfica es importante recalcar que un cable no debería perder más de 30V por cada 1000ft de cable. En este caso se pierden 32V por cada 1000ft de cable, un valor no muy lejano a 30V/1000ftcable. El número del cable determina su tamaño en diámetro, teniendo una relación inversa, a mayor número menor diámetro en el cable de potencia. Así, con una corriente de placa de motor de 107amp y una máxima pérdida de voltaje de 30V/ft, la mejor opción para instalar en el pozo J-1 es el cable #2.

Figura 16. Pérdidas de voltaje a través del cable de potencia.



Fuente. Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, P. 177

Ahora, en cuanto a la longitud del mismo, la bomba estará ubicada a una profundidad de 4700ft MD, más 300 ft de cable que son requeridos para conexiones en superficie, la longitud total del cable serán 5000ft.

2.1.1.7. Determinar condiciones de operación del equipo de superficie. Para determinar las condiciones de operación es necesario conocer las pérdidas de voltaje generadas en el cable de potencia, el voltaje de placa del motor

$$Caida\ de\ voltaje = \frac{Volt\ perdidos}{1000\ ft\ de\ cable} * L_{cable} \quad (21)$$

$$Caida\ de\ voltaje = \frac{32\ Volt}{1000ft\ de\ cable} * 5000ft = 160Volt$$

Ahora, se procede a calcular el TAP al cual debe ser configurado el transformador en superficie,

$$TAP \text{ Transformador} = Volt. \text{ Placa} * \left(\frac{MaxHz}{60Hz} \right) + \text{Caida de voltaje} \quad (22)$$

$$TAP \text{ Transformador} = 1763V * \left(\frac{60Hz}{60Hz} \right) + 160 = \mathbf{1923 \text{ Volt}}$$

El transformador de superficie será configurado para que la energía que reciba del variador de frecuencia salga hacia el motor con un voltaje de 1923V, esto para una condición de frecuencia máxima a 60Hz.

2.1.1.8. Resumen de componentes a instalar. Para el pozo J-1 se instalará una bomba S8000N de 63 etapas, para esta clase de bomba el diámetro es de 5.62" lo cual no interfiere con el diámetro del pozo. El motor para suplir las necesidades de la bomba será un F085, cuya placa presenta los siguientes valores: 300Hp, 1763V, 104amp.

En cuanto al cable de potencia, se manejarán 5000ft de cable #2 y la configuración del transformador en superficie estará dada para entregar 1923V al motor de fondo. También se manejarán algunos equipos los cuales no necesitan diseño alguno, estos son el sensor de fondo, será un tipo 1 a petición del cliente, para ello se necesita una cabeza de descarga adicional en el tope de la sarta ESP para la medición de la presión de descarga.

Una pareja de protectores, los cuales serán LSBPB debido a ser los más eficientes dentro de los protectores disponibles. Un intake para recibir los fluidos y

transportarlos hacia la bomba y por último una cabeza de descarga que se encargará de comunicar la sarta ESP con el tubing de producción.

Tabla 5. Resumen de componentes a instalar en el pozo J-1.

| Equipo ESP J-1 | |
|-----------------------|------------------|
| Bomba | S8000N (63) |
| Motor | F085 |
| Protectores | LSBPB-LSBPB |
| Cable | #2, 5KVA, 5000ft |
| Sensor | XT 150 Tipo 1 |

Fuente. Autor.

2.2. Diseño en el software DesignPro 9.0.2

El software DesignPro propio de la compañía Schlumberger es ideal para dimensionar y analizar un sistema completo ESP, es amigable con el usuario y cuenta con los modelos más avanzados para predecir de forma precisa el desempeño de cada componente en el sistema ESP. DesignPro utiliza información de los fluidos, del pozo e información del yacimiento para determinar el comportamiento en inflow y outflow de la sarta ESP. Algunas de las ventajas con las que cuenta este software son:

- Propiedades para black oil, con la posibilidad de modificar e introducir un PVT, calibración de viscosidad y efecto de emulsiones.
- Predicción del desempeño del yacimiento por métodos de inflow, con opciones para considerar el corte de agua.
- Análisis completo para separación o manejo de gas.
- Información completa de transferencia de calor desde el yacimiento hasta superficie.

- Facilidad para generar reportes en PDF y Microsoft Word
- Efectos de aumento de calor del motor y la bomba en el rendimiento del equipo.

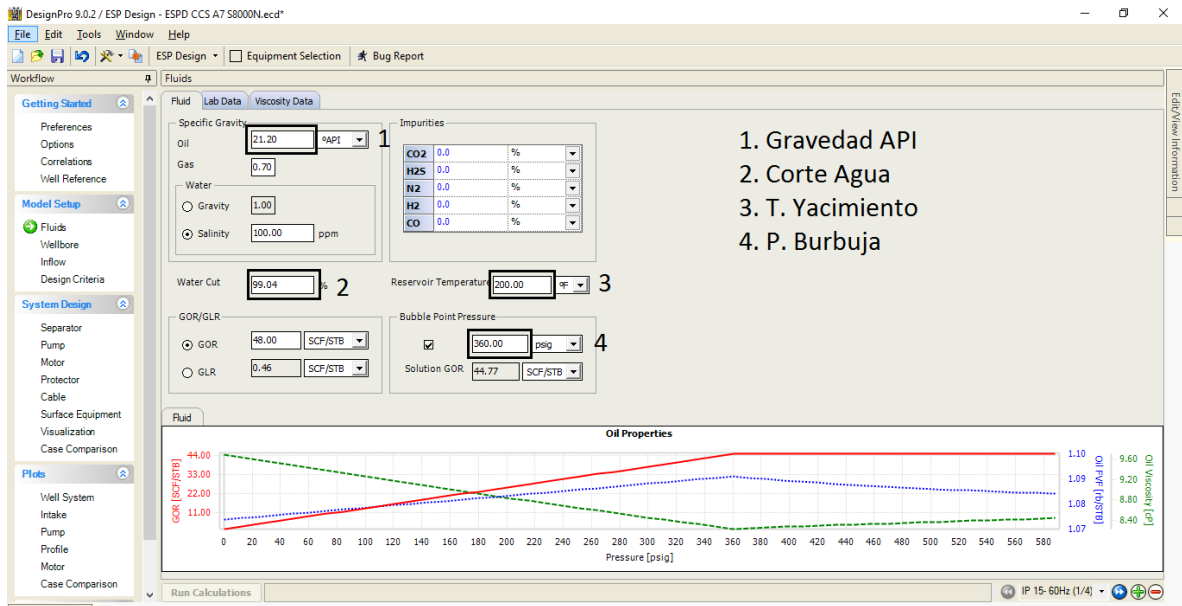
Ahora, se mostrará el detalle paso a paso de cómo realizar el diseño del equipo de bombeo electrosumergible para el pozo J-1 en el software DesignPro 9.0.2 de la compañía Schlumberger. Para esto se utilizará el caso de mayor exigencia para el equipo ESP, es cual considera el IP más alto requerido por el cliente (15STBd/psi), el caudal a este IP (8200Bfpd), y la frecuencia máxima de operación recomendada (60Hz).

2.2.1. Propiedades de los fluidos. Esta es la primera pestaña del conjunto de datos que integran el yacimiento, aquí se ingresan valores como el API del fluido, el corte de agua esperado durante la vida productiva del pozo, el GOR presente, el punto de burbuja del aceite y la temperatura del yacimiento. También, en caso de que el cliente suministre una prueba de viscosidad se ingresan los valores para un mejor ajuste de las propiedades del fluido en el diseño del equipo.

Los datos descritos se pueden encontrar en la hoja de datos presentada por el cliente, así que la pestaña ingresando los siguientes valores:

- Gravedad API
- Corte de agua
- Temperatura de yacimiento
- Presión de burbuja

Figura 17. Pestaña para introducir las propiedades de los fluidos.

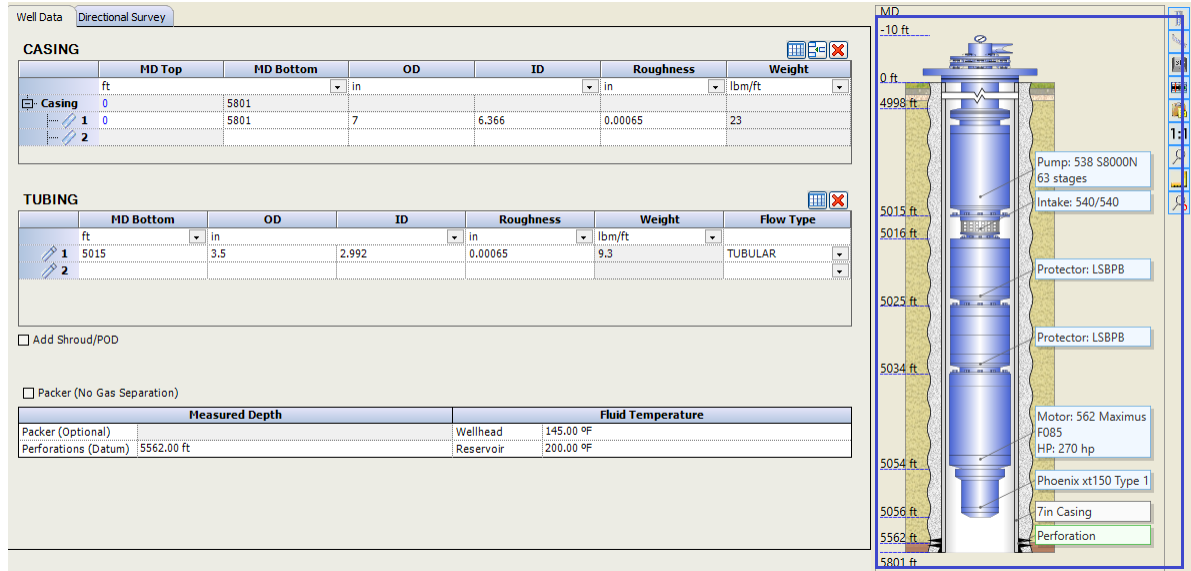


Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

2.2.2. Esquema del pozo. (Estado mecánico). En la segunda pestaña se introducen datos que tienen que ver con la tubería de producción, el casing de revestimiento instalado, las profundidades de asiento de los mismos, la temperatura del yacimiento nuevamente, la temperatura del fluido, el punto medio de perforados y el survey del pozo. Todos los valores de profundidades deben ser ingresados en datos de profundidades medias MD y no profundidades verdaderas TVD.

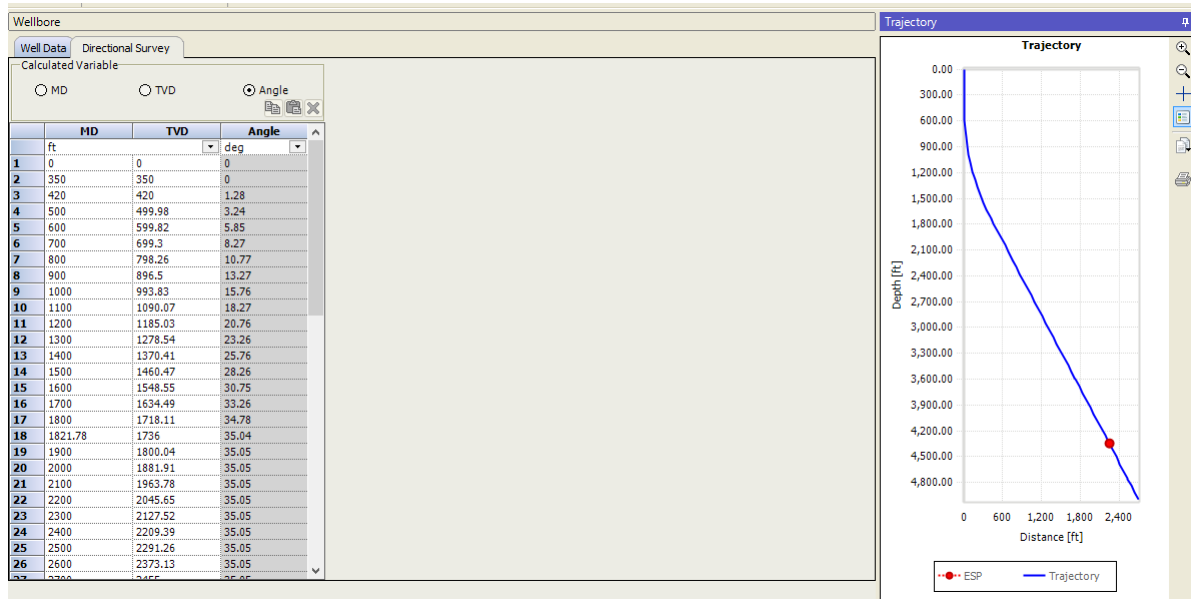
En esta pestaña (Well Data) se logra observar un esquema luego de seleccionar el equipo ESP y cómo será su configuración en fondo (Cuadro en color azul). En la segunda pestaña de esquema del pozo (Directional Survey) ingresan los valores del survey y se obtiene la trayectoria que tendrá el pozo.

Figura 18. Pestaña esquema del pozo (Well Data)



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

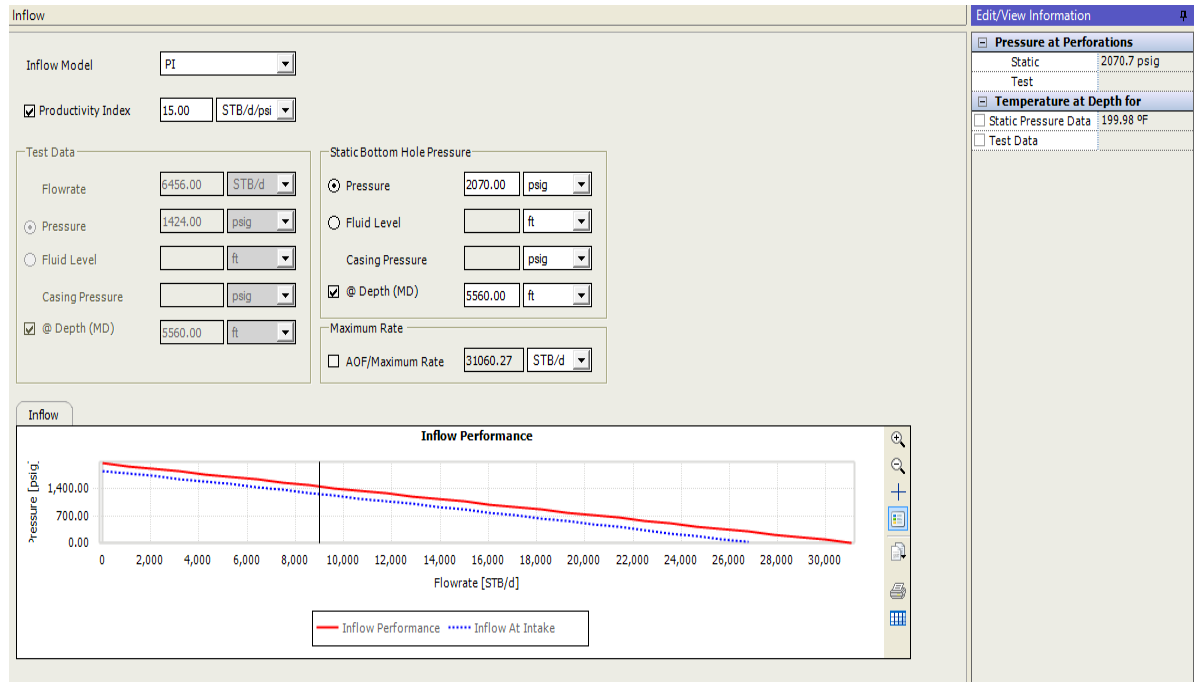
Figura 19. Pestaña esquema del pozo (Survey)



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved.

2.2.3. Inflow. La siguiente pestaña llamada “inflow” tiene que ver con la curva productividad del pozo, aquí pueden manejarse 3 tipos de opciones para generar la curva de inflow, se tiene la opción presión inicial, Vogel y el método combinado.

Figura 20. Pestaña Inflow



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved.

El método de presión inicial suele ser usado en pozos donde el caudal de agua supera el caudal de aceite y el GOR es bajo. El caso del pozo J-1 es favorable para este tipo de método por lo cual se procederá a utilizarlo. Directamente de los datos suministrados por el cliente se ingresa el valor de IP, así como los valores de caudal, presión registrados en la última prueba de producción.

Los valores a ingresar serán los siguientes:

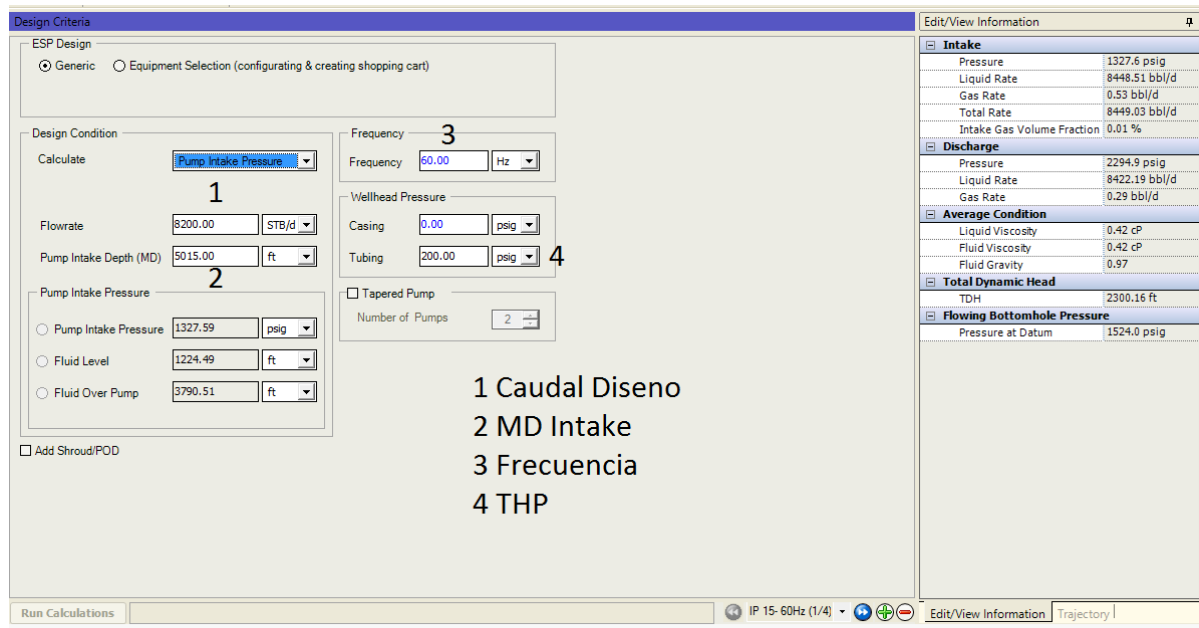
Tabla 6. Prueba de producción reportada por el cliente.

| | | |
|-------------------|------|----------|
| IP | 15 | STBd/psi |
| Q | 6456 | STBd |
| PIP | 1424 | Psi |
| Depth (MD) | 5560 | ft |

Fuente. Hoja de datos suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

2.2.4. Criterios de diseño. En la pestaña anterior se incluyó el IP de diseño, ahora se debe ingresar el caudal de diseño para el equipo ESP (8200bfd). También, en esta misma pestaña se agregan datos importantes como la frecuencia de diseño (60Hz), la presión en la cabeza del pozo (200psi) y la profundidad en la cual se presume estará asentado el intake (5015ft MD). Con estos datos el software DesignPro 9.0.2 se encargará de calcular el caudal que puede llegar a producir la bomba bajo estas condiciones.

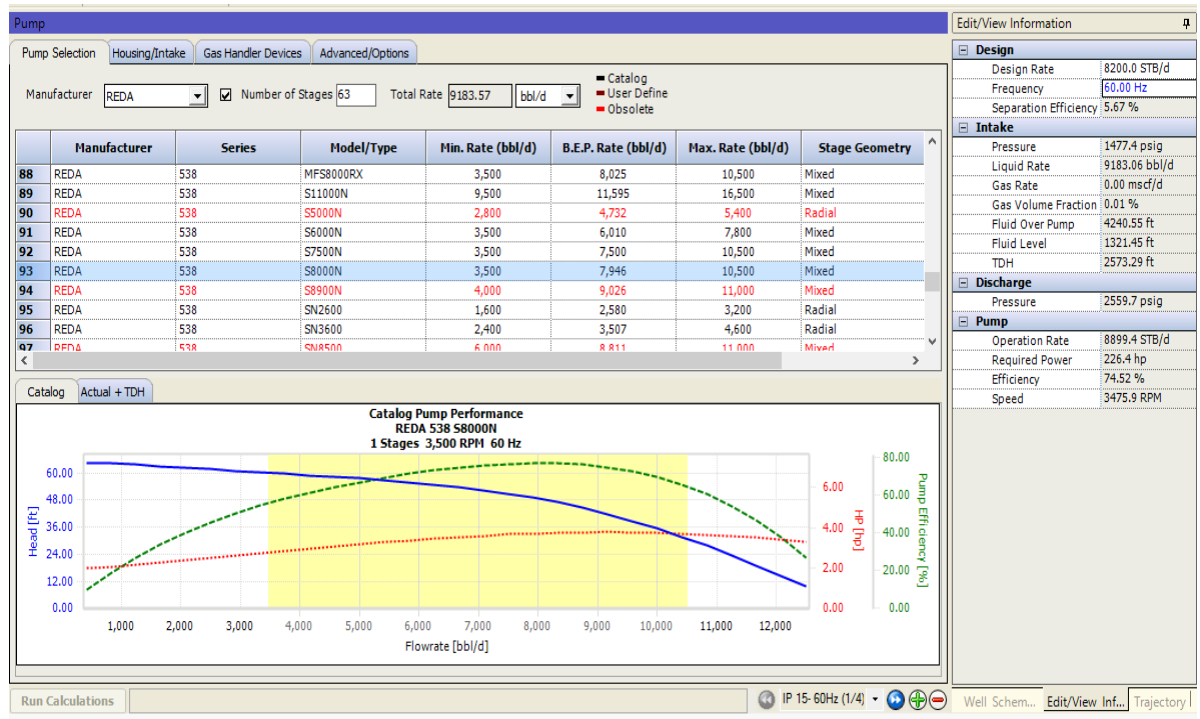
Figura 21. Pestaña criterios de diseño.



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

2.2.5. Bomba centrífuga. En la pestaña de bomba se debe seleccionar la bomba en función del caudal requerido por el cliente, para este caso, un caudal de 8200bfd se elige una bomba S8000N, con 63 etapas para levantar el fluido a superficie. En la siguiente tabla se presenta el rango para una de caudal para una bomba S8000N de 63 etapas a una frecuencia de 60Hz.

Figura 22. Selección de la bomba centrífuga



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved.

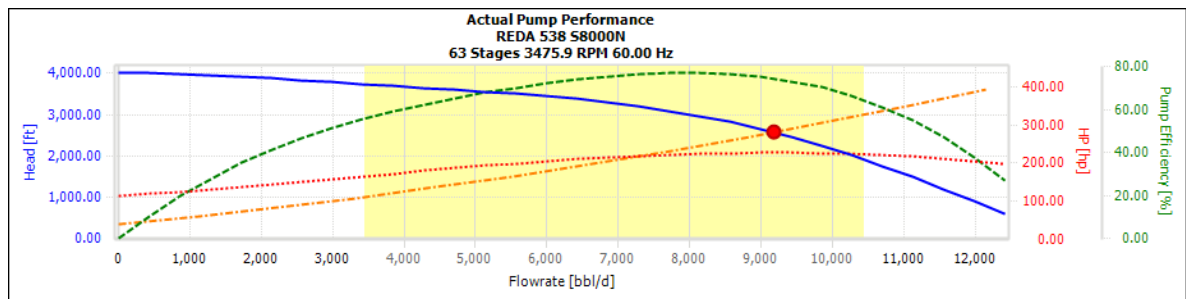
Tabla 7. Rango de caudales para una bomba modelo S8000N.

| Modelo | Min.Rate | BEP.Rate | Max.Rate. |
|--------|----------|----------|-----------|
| S8000N | 3500 | 7946 | 10500 |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificado por el autor.

Se logra apreciar que el BEP o mejor punto de eficiencia de la bomba estará cerca de los 8000 barriles, por lo cual la elección de la bomba es favorable. Ahora, al elegir 63 etapas para esta bomba, se tiene una eficiencia de bomba de 74.52% y la curva de desempeño es la siguiente:

Figura 23. Curva de desempeño para una bomba S8000N de 63 etapas a 60Hz.



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved.

El espacio sombreado en color amarillo es equivalente a la zona de operación recomendada. La parte izquierda de la zona amarilla es la zona de Down-thrust o zona de empuje descendente, la bomba trabajará en este rango cuando el caudal de operación sea insuficiente para el diseño. Por otro lado, a la derecha de la zona amarilla se encuentra la zona de empuje ascendente o zona de Up-thrust, la operación se da en esta zona cuando el caudal de operación es significativamente mayor al caudal de diseño.

Así, la bomba S8000N de 63 etapas a 60Hz trabajará dentro de la zona de operación recomendada para los 8200bpd de diseño y se evitará el empuje descendente y/o ascendente en las etapas, lo cual reduciría el tiempo de vida de las mismas.

2.2.6. Motor de fondo. Como se calculó anteriormente, se necesitan de 231.23 hp como mínimo para llevar a cabo la operación con una bomba S8000N de 63 etapas, por lo cual se selecciona un motor F085 con las siguientes características de placa:

Tabla 8. Placa para un motor F085

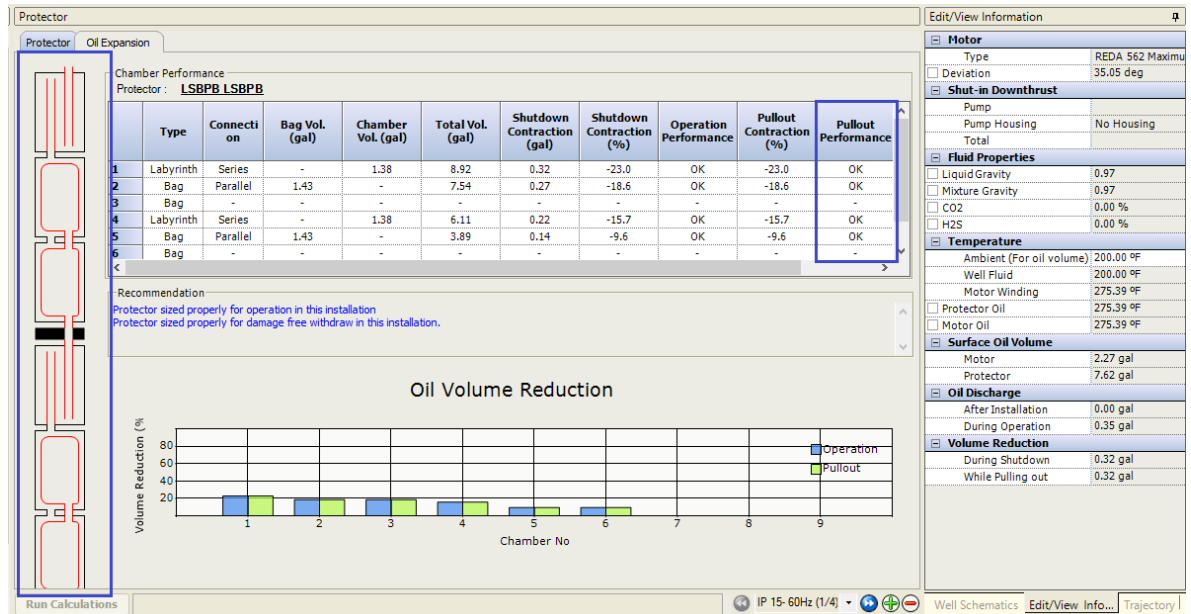
| Serie | Winding Code | Potencia (Hp) | Voltaje (V) | Corriente (amp) |
|-------|--------------|---------------|-------------|-----------------|
| 5.62" | F085 | 300 | 1763.3 | 103.7 |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

Si las condiciones de operación o las condiciones del pozo cambian radicalmente, la potencia requerida para desarrollar el trabajo puede aumentar o disminuir, por esto es importante no seleccionar un motor que supla solo las necesidades de potencia calculadas inicialmente. Se debe tener un respaldo en potencia, en este caso cerca de 70Hp.

2.2.7. Protector. Se seleccionan una pareja de protectores, tipo LSBPB, laberinto-Sello-Bolsa-Paralelo-Bolsa, con el fin de proteger el motor de fluido de pozo y cumplir con todas las condiciones que fueron especificadas anteriormente en el capítulo 1. Es importante colocar un Laberinto en la conexión más próxima a la bomba centrífuga debido a que este retarda un poco más la contaminación por fluido de pozo que las bolsas. De esta manera la configuración de la pareja de protectores será la siguiente.

Figura 24. Configuración de la pareja de protectores.



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved.

En el cuadro azul de la parte izquierda, se observa en la parte superior, el protector conectado a la bomba, cumpliendo así con tener una cámara tipo laberinto, posterior sus dos bolsas. Esta es la misma configuración para el protector inferior. En el cuadro azul de la derecha se observa los OK respectivos, los cuales indican que los protectores funcionarán de la manera correcta.

2.2.8. Comprobación de arranque. Una vez es diseñado todo el equipo ESP en el software DesignPro es importante corroborar su arranque, de lo contrario es posible instalar un equipo no adecuado para la operación y una vez instalado este no arrancará. Para lo anterior se selecciona la pestaña análisis de desviación, esta toma en cuenta la desviación del pozo, la ubicación del equipo en cada parte del pozo, el motor seleccionado con el respectivo cable, el funcionamiento de la bomba y los protectores.

Figura 25. Comprobación de arranque del equipo ESP.

The screenshot shows the 'Deviation Analysis' window in DesignPro. The 'ESP String Data' section includes configuration options for 'NewDevAna0'. The 'Analysis Type' is set to 'Operation'. The 'Wellbore' and 'Motor' parameters are listed below. A table of components is shown with columns for Component, Series, Model/Type, Housing, OD, ID, Length, and Weight. The 'Recommendation' section states: 'This ESP application is acceptable and meets the criteria.' The right-hand pane provides detailed metrics for various components, including Sommerfeld Numbers, Bending Moments, and Deflection.

| Wellbore | Motor |
|--------------------------------------|------------------------|
| Casing ID: 6.366 in | Speed: 1732.7 RPM |
| Max. Dogleg Severity: 0.82 deg/100ft | Oil Type: REDA OIL #5 |
| | Temperature: 235.56 °F |

| Component | Series | Model/Type | Housing | OD | ID | Length | Weight |
|---------------|---------|--------------------|-----------------|-------|-------|--------|--------|
| 1 Tubing | | 3.5 in, 9.3 lbm/ft | | 3.500 | 2.992 | 8.00 | 74.40 |
| 2 Pump | 538 | S8000N | # 120 CR-CT ARZ | 5.380 | 4.820 | 17.10 | 798.00 |
| 3 Pump Neck | 538 | | | 3.530 | 2.625 | 0.18 | |
| 4 Intake | 540/540 | 540/540 | | 3.500 | 1.620 | 1.20 | 50.00 |
| 5 Intake Neck | 540/540 | | | 3.526 | 2.560 | 0.16 | |

| Geometry | Value |
|---------------------|------------|
| ESP Total Length | 66.36 ft |
| Radius of Curvature | 6987.29 ft |

| Motor Bearing | Value |
|-------------------------------|------------|
| Max Bearing Sommerfeld Number | 0.17279 |
| Recommended above | 0.02900 |
| Unacceptable below | 0.01200 |
| Recommendation | Acceptable |

| Motor Bushing | Value |
|-------------------------------|------------|
| Max Bushing Sommerfeld Number | 0.20411 |
| Recommended above | 0.02900 |
| Unacceptable below | 0.01200 |
| Recommendation | Acceptable |

| Motor Shaft Fatigue | Value |
|-----------------------------------|----------------|
| Max Bending Moment | 1123.15 in.lbf |
| Alternating Bending Moment 4130 | 3259.00 in.lbf |
| Alternating Bending Moment 4130HS | 4754.00 in.lbf |
| Recommendation | Acceptable |

| Pump Failure | Value |
|----------------|------------|
| Max Deflection | 0.00147 in |
| Gap Reduction | 28.30 % |
| Recommendation | Acceptable |

Recommendation

This ESP application is acceptable and meets the criteria.

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved.

Según DesignPro, el equipo se encuentra listo para ser ensamblado y despachado para su instalación.

En la tabla 9 se puede apreciar el detalle de cada componente y la recomendación que entrega el software DesignPro

Tabla 9. Concepto DesigPro respecto al equipo ESP.

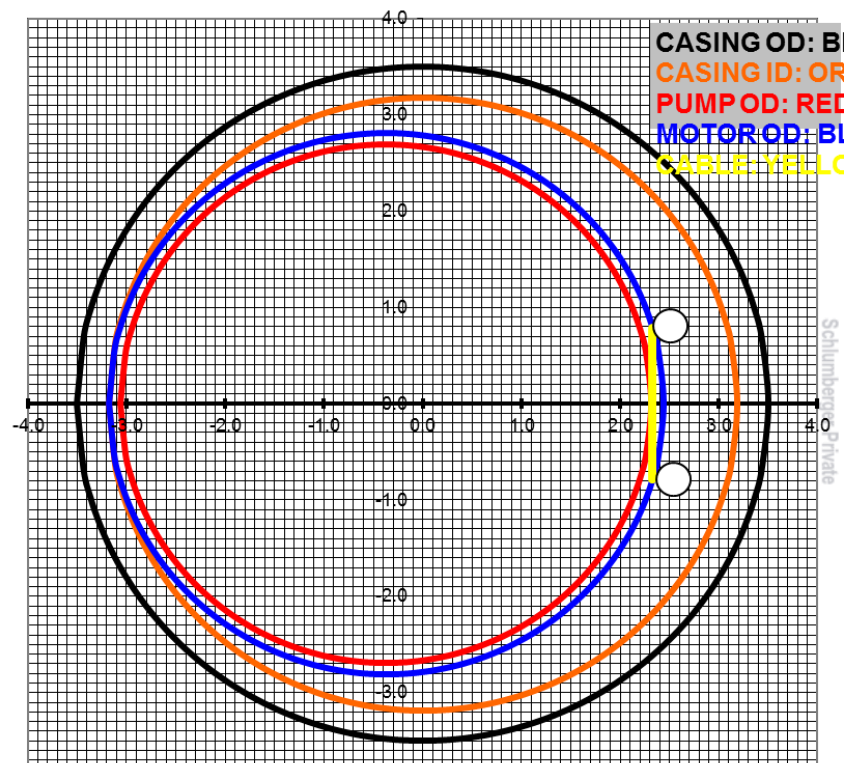
| Geometry | | |
|-----------------------------------|------------|--------|
| ESP Total Length | 62.97 | ft |
| Radius of Curvature | 6987.29 | ft |
| Motor Bearing | | |
| Max bearing Sommerfeld Number | 0.25118 | |
| Recommended above | 0.029 | |
| Unacceptable below | 0.012 | |
| Recommendation | Acceptable | |
| Motor bushing | | |
| Max Bushing Sommerfeld Number | 0.2967 | |
| Recommended above | 0.029 | |
| Unacceptable below | 0.012 | |
| Recommendation | Acceptable | |
| Motor Shaft Fatigue | | |
| Max Bending Moment | 1123.15 | in.lbf |
| Alternating Bending Moment 4130 | 3259 | in.lbf |
| Alternating Bending Moment 4130HS | 4754 | in.lbf |
| Recommendation | Acceptable | |
| Pump Failure | | |
| Max Deflection | 0.00125 | in.lbf |
| Gap Reduction | 25.1 | % |
| Recommendation | Acceptable | |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificado por el autor.

2.2.9. Limitaciones Físicas. En el diseño del equipo ESP se debe tener presente la limitación por tamaño del hoyo, y además un correcto asentamiento de la sarta. Por esto, el asentamiento debe realizarse a una profundidad donde el DLS sea menor a 1, de lo contrario se vería afectada de manera considerable la operación normal del equipo.

Adicional a esto, se realiza un análisis de clearance en el hoyo, teniendo en cuenta las dimensiones del casing, la bomba, el motor y el tamaño del cable. Con un Casing OD: 7", un Casign ID: 6.36", Pump OD: 5.38", Motor OD: 5.62", Espesor cable: 0.02", Anchura de cable: 1.60080", se tiene la siguiente representación para el equipo a ser instalado, mostrando que no existe limitación alguna para este caso.

Figura 26. Análisis de clearance



Graphical Representation of Pump/Motor Clearance on

Fuente. Autor.

Otro de los parámetros importantes es la temperatura de operación del motor, esta no debe sobrepasar los 350F para evitar fallar por sobre temperatura en el estator del motor.

2.3. Resumen equipos a instalar por pozos.

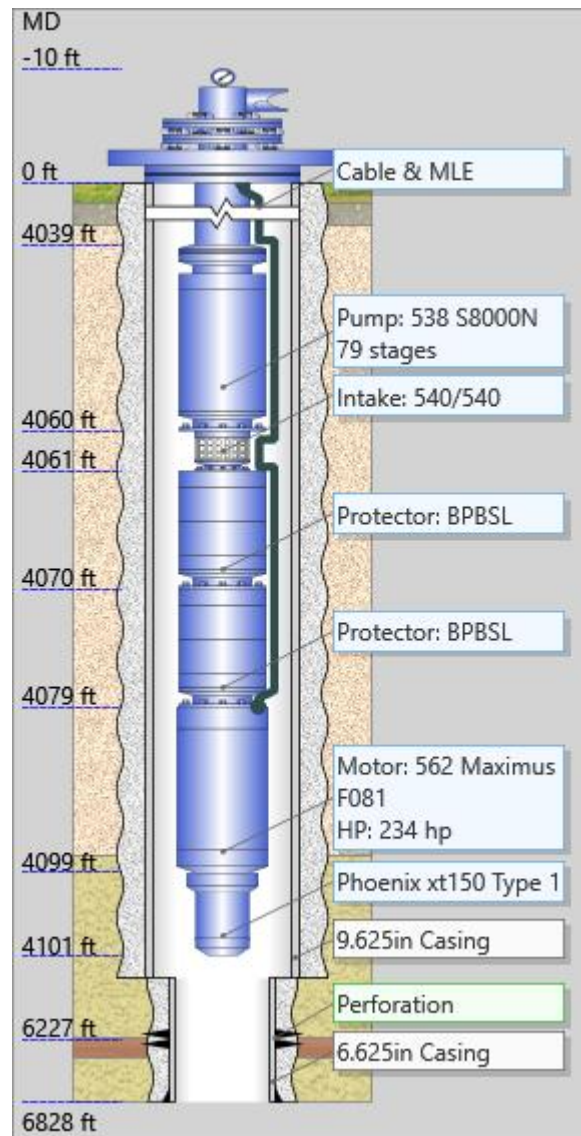
2.3.1. **Pozo J-2.** Para el pozo J-2 se presenta la hoja de datos suministrada por el cliente y el equipo resultante a ser instalado.

Tabla 10. Hoja de datos pozo J-2.

| ESP DESIGN DATA SHEET | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------------|----------------|----------------------|------------|
| | | | | | | | 16/03/2017 |
| OPERADORA | Confidencial | | POZO | | J-2 | | |
| PAIS | Colombia | | FORMACIONES | | Carbonera | | |
| CAMPO | Jose | | | | | | |
| WELLBORE | | | | | | | |
| | ID(in) | OD(in) | Weight (lb/ft) | From (ft) | To (ft) | PERFORADOS MD | |
| Casing | | 13-3/8" | 54.5 | 0 | 330 | 5682 | 5762 |
| Casing | 8.755 | 9-5/8" | 43.5 | 0 | 5019 | 6180 | 6260 |
| Tubing | 2.992 | 3-1/2" | 9.3 | 0 | 3957 | 6492 | 6535 |
| | | | | | | 6692 | 6772 |
| INFORMACIÓN DE SUPERFICIE | | | | | | | |
| THP | 250 | psi | | Voltaje | 480 | V | |
| WHT | 120 | F | | Frecuencia | 60 | Hz | |
| CHP | 60 | psi | | | | | |
| PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS | | | | | | | |
| API | 22.5 | | | Presion burbuja | 61 | psi | |
| Gravedad Gas | 0.65 | | | Salinidad | 100-200 | ppm | |
| Gravedad Agua | 1.02 | | | | | | |
| CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO | | | | | | | |
| PRUEBA DE PRESIÓN | | | | PRUEBA DE PRODUCCIÓN | | | |
| | | MD | TVD | | | | |
| Datum | | 6200 | | Caudal aceite | 545 | bopd | |
| Presión estática | | 2006 | psi | Caudal agua | 3801 | bwpd | |
| Temperatura | | 200 | F | Caudal fluido | 4346 | bfpd | |
| IP | | 3,7stb/psi | 6stb/psi | BSW | 88 | % | |
| K | | 3000mD | 4000mD | GOR | 60 | scf/bbl | |
| PARÁMETROS DE DISEÑO | | | | | | | |
| | | MD | TVD | UNIDADES | | | |
| PROFUNDIDAD DE SENTAMIENTO | | 4050 | 3955 | ft | | | |
| CAUDAL DE DISEÑO | | 7000 | | bpd | | | |

Fuente. Hoja de datos suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Figura 27. Esquema del equipo a instalar en el pozo J-2



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved.

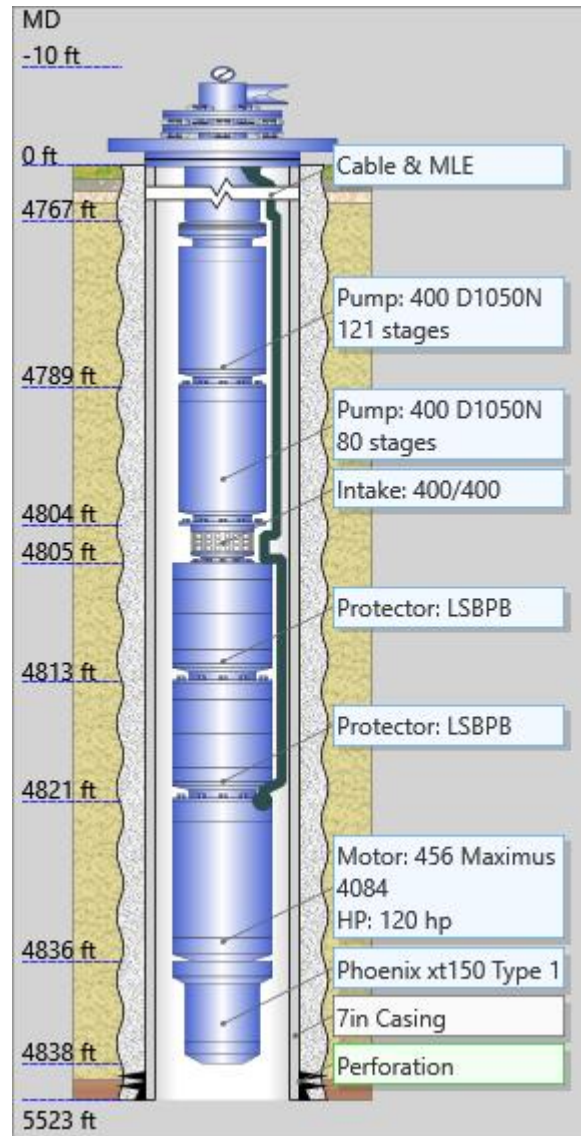
2.3.2. Pozo J-3. Para el pozo J-3 se presenta la hoja de datos suministrada por el cliente y el equipo resultante a ser instalado.

Tabla 11. Hoja de datos pozo J-3

| ESP DESIGN DATA SHEET | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------------|----------------|----------------------|------------|
| | | | | | | | 28/09/2016 |
| OPERADORA | Confidencial | | POZO | | J-3 | | |
| PAIS | Colombia | | FORMACIONES | | Carbonera | | |
| CAMPO | Jose | | | | | | |
| WELBORE | | | | | | | |
| | ID(in) | OD(in) | Weight (lb/ft) | From (ft) | To (ft) | PERFORADOS MD | |
| Casing | 8.535 | 9-5/8" | 53.5 | 0 | 342 | 5056 | 5062 |
| Casing | | 7 | 32 - 26 | 0 | 5523 | 5154 | 5194 |
| Tubing | 2.992 | 3.5 | 9.3 | 0 | 4724 | 5255 | 5258 |
| | | | | | | 5303 | 5307 |
| INFORMACIÓN DE SUPERFICIE | | | | | | | |
| THP | 100 | psi | | Voltaje | 480 | V | |
| WHT | 160 | F | | Frecuencia | 60 | Hz | |
| CHP | 0 | psi | | | | | |
| PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS | | | | | | | |
| API | 21.7 | | | Presion burbuja | 60 | psi | |
| Gravedad Gas | 0.7 | | | Salinidad | 500 | ppm | |
| Gravedad Agua | 1 | | | | | | |
| CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO | | | | | | | |
| PRUEBA DE PRESIÓN | | | | PRUEBA DE PRODUCCIÓN | | | |
| | | MD | TVD | | | | |
| Datum | 5060 | | | Caudal aceite | 207 | bopd | |
| Presión estática | 1478 | | psi | Caudal agua | 117 | bwpd | |
| Temperatura | | | F | Caudal fluido | 324 | bfpd | |
| IP | 0.3stb/psi | 1.2stb/psi | | BSW | 36 | % | |
| K | 3000mD | 4000mD | | GOR | 8 | scf/bbl | |
| PARÁMETROS DE DISEÑO | | | | | | | |
| | | | | MD | TVD | UNIDADES | |
| PROFUNDIDAD DE SENTAMIENTO | | | | 4800 | | ft | |
| CAUDAL DE DISEÑO | | | | 320 | | bpd | |

Fuente. Hoja de datos suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Figura 28. Esquema del equipo a instalar en el pozo J-3



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved.

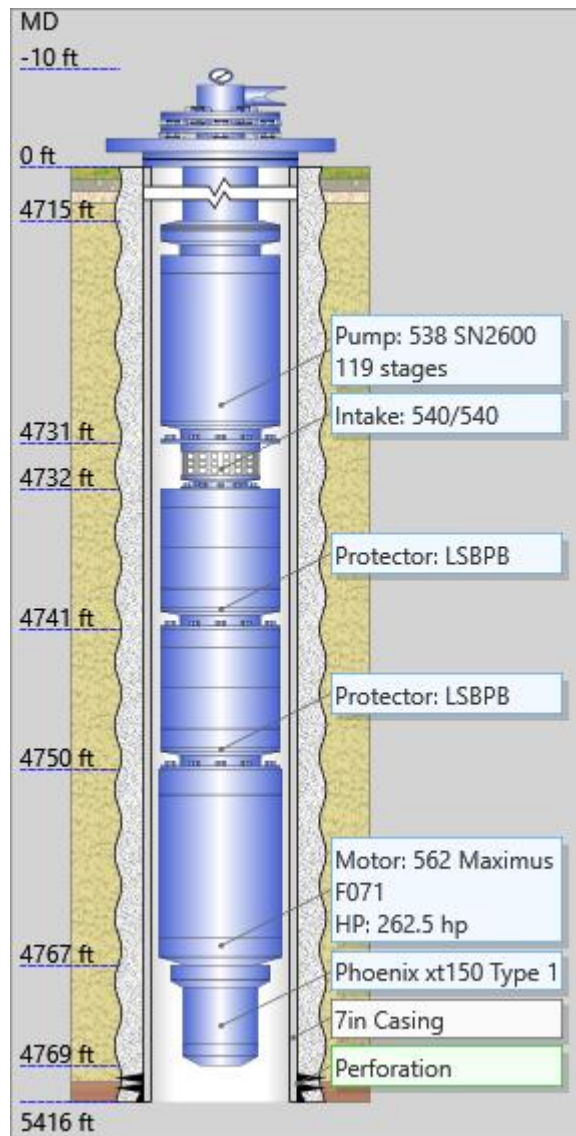
2.3.3. Pozo J-4. Para el pozo J-4 se presenta la hoja de datos suministrada por el cliente y el equipo resultante a ser instalado.

Tabla 12. Hoja de datos pozo J-4

| ESP DESIGN DATA SHEET | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------------|----------------|----------------------|------------|
| | | | | | | | 20/06/2017 |
| OPERADORA | Confidencial | | POZO | | J-4 | | |
| PAIS | Colombia | | FORMACIONES | | Carbonera | | |
| CAMPO | Jose | | | | | | |
| WELLBORE | | | | | | | |
| | ID(in) | OD(in) | Weight (lb/ft) | From (ft) | To (ft) | PERFORADOS MD | |
| Casing | 8.535 | 9-5/8" | 36 | 0 | 350.6 | 4995 | 4998 |
| Casing | | 7" | 23 | 0 | 5416 | 5101 | 5105 |
| Tubing | 2.992 | 3-1/2" | 9.3 | 0 | 4610 | 5124 | 5129 |
| INFORMACIÓN DE SUPERFICIE | | | | | | | |
| THP | 150 | psi | | Voltaje | 480 | V | |
| WHT | 140 | F | | Frecuencia | 60 | Hz | |
| CHP | 0 | psi | | | | | |
| PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS | | | | | | | |
| API | 21.6 | | | Presion burbuja | 60 | psi | |
| Gravedad Gas | 0.7 | | | Salinidad | 500 | ppm | |
| Gravedad Agua | 1 | | | | | | |
| CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO | | | | | | | |
| PRUEBA DE PRESIÓN | | | | PRUEBA DE PRODUCCIÓN | | | |
| | | MD | TVD | | | | |
| Datum | | 4990 | | Caudal aceite | 78.19 | bopd | |
| Presión estática | | 1910 | psi | Caudal agua | 361.81 | bwpd | |
| Temperatura | | | F | Caudal fluido | 440 | bfpd | |
| IP | | 1.2stb/psi | 1.8stb/psi | BSW | 82.23 | % | |
| K | | 3000mD | 4000mD | GOR | | scf/bbl | |
| PARÁMETROS DE DISEÑO | | | | | | | |
| | | MD | TVD | UNIDADES | | | |
| PROFUNDIDAD DE SENTAMIENTO | | 4750 | 4750 | ft | | | |
| CAUDAL DE DISEÑO | | 2800 | | bpd | | | |

Fuente. Hoja de datos suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Figura 29. Esquema del equipo a instalar en el pozo J-4



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved.

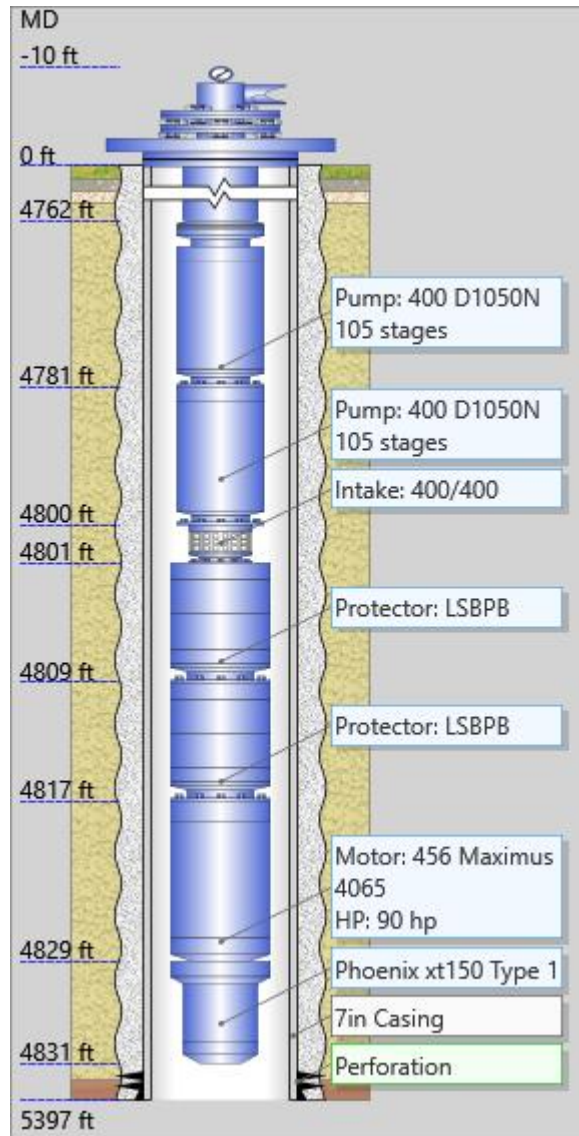
2.3.4. Pozo J-5. Para el pozo J-5 se presenta la hoja de datos suministrada por el cliente y el equipo resultante a ser instalado.

Tabla 13. Hoja de datos pozo J-5

| ESP DESIGN DATA SHEET | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------------|------------------------|----------------|-----------------------|----------|
| | | | | | | | 2/6/2017 |
| OPERADORA | Confidencial | | POZO | | J-5 | | |
| PAIS | Colombia | | FORMACIONES | | Carbonera | | |
| CAMPO | Jose | | | | | | |
| WELLBORE | | | | | | | |
| | ID(in) | OD(in) | Weight (lb/ft) | From (ft) | To (ft) | PERFORADOS TVD | |
| Casing | 8.535 | 9-5/8" | 53.5 | 0 | 505 | 5044 | 5053 |
| Casing | | 7" | 23 | 0 | 5,397 | 5134 | 5149 |
| Tubing | 2.992 | 3-1/2" | 9.3 | 0 | 4,685 | 5234 | 5242 |
| INFORMACIÓN DE SUPERFICIE | | | | | | | |
| THP | 150 | psi | | Voltaje | 480 | V | |
| WHT | 140 | F | | Frecuencia | 60 | Hz | |
| CHP | 0 | psi | | | | | |
| PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS | | | | | | | |
| API | 21.6 | | | Presion burbuja | 60 | psi | |
| Gravedad Gas | 0.7 | | | Salinidad | 500 | ppm | |
| Gravedad Agua | 1 | | | | | | |
| CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO | | | | | | | |
| PRUEBA DE PRESIÓN | | | | PRUEBA DE PRODUCCIÓN | | | |
| | | MD | TVD | | | | |
| Datum | | 4850 | | Caudal aceite | 76 | bopd | |
| Presión estática | | 1420 | psi | Caudal agua | 304 | bwpd | |
| Temperatura | | | F | Caudal fluido | 380 | bfpd | |
| IP | | 0.35stb/psi | 0.65stb/psi | BSW | 80 | % | |
| K | | 3000mD | 4000mD | GOR | | scf/bbl | |
| PARÁMETROS DE DISEÑO | | | | | | | |
| | | MD | TVD | UNIDADES | | | |
| PROFUNDIDAD DE SENTAMIENTO | | 4800 | 4800 | ft | | | |
| CAUDAL DE DISEÑO | | 740 | | bpd | | | |

Fuente. Hoja de datos suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Figura 30. Esquema del equipo a instalar en el pozo J-5



Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved.

3. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO.

Una vez instalados los equipos ESP en los pozos, mensualmente se realiza el análisis de desempeño en cada pozo, para así evaluar si el diseño y las condiciones de operación del pozo concuerdan con los parámetros estimados en un inicio. El cliente, a final de cada mes suministra los parámetros de operación del equipo, así como las medidas eléctricas o predictivos de superficie y con estos se realiza el “match” o evaluación de desempeño. Los parámetros necesarios para llevar a cabo un buen match son los siguientes:

- Corte de agua
- GOR
- API del crudo
- Barriles de fluido producido
- Presión de intake
- Presión en cabeza
- Presión de casing
- Temperatura de superficie
- Medidas eléctricas (voltaje entregado al variador)

En el presente no se describirá el procedimiento del match, debido a que corresponde a un procedimiento muy similar al que se mostró anteriormente con los diseños, en el presente capítulo se mostrarán las pruebas de producción reportadas para cada pozo, así como las medidas eléctricas desde su arranque y se mostrarán los resultados obtenidos en el match, así como el análisis realizado.

3.1. Match Pozo J-1

A continuación, la prueba de producción y las medidas eléctricas del pozo en cuestión:

Tabla 14. Prueba de producción pozo J-1

| Pozo | Fecha Prueba | FREQ HZ | WHP PSI | WHT °F | PD PSI | PIP PSI | BSW % | ARENA PPM | GROSS BLS | API 60 °F |
|------|--------------|---------|---------|--------|--------|---------|-------|-----------|-----------|-----------|
| J-1 | 10-Jul | 35.0 | 50.0 | 133.0 | 1897.2 | 1294.0 | 97.27 | 0.15 | 661.0 | 21.3 |
| J-1 | 11-Jul | 38.0 | 58.0 | 141.0 | 1107.5 | 1109.8 | 93.72 | 1371.31 | 770.0 | 21.3 |

Fuente. Suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Tabla 15. Predictivos para el pozo J-1

| Fre. | Frec. Base | Volt Out VSD | Voltaje Motor (Sup) | Amp Oper. Motor | KVA Predictivo | VSD LOAD KVA | SUT LOAD Amp | TAP |
|------|------------|--------------|---------------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|--------|
| Hz | Hz | Volt | Volt | Amp | KVA | % | % | Volt |
| 46.0 | 60.0 | 464.7 | 2087.3 | 49.0 | 176.2 | 47.5 | 47.9 | 2206.0 |

Fuente. Suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Con los datos de producción y medidas eléctricas, el match arroja los siguientes resultados:

Tabla 16. Resultados Match pozo J-1

| Resultados Match | | | | | |
|-----------------------|------|-----------|-----------------|------------|------|
| IP | 0.97 | STB/d/psi | Potencia Placa | 300 | hp |
| Pwf | 1280 | psi | Voltaje Placa | 1763 | Volt |
| Eficiencia bomba | 35 | % | Corriene placa | 103.7 | amo |
| Eficiencia separación | 44 | % | Amp motor | 40.1 | amp |
| Modificador cabeza | 125 | % | Voltaje Motor | 116.8 | Volt |
| Modificador Flojo | 125 | % | Total HP | 33.3 | Hp |
| Modificador Potencia | 100 | % | Temp Motor | 236.7 | F |
| Hp Producigo | 52.6 | Hp | Carga sello | 14.6 | lbf |
| Carga motor | 17.5 | % | Consumo teorico | 83.4 | KVA |
| Rating Factor | NO | | Operación | Downthrust | |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

El pozo J-1 fue instalado el día 10 de Julio del 2017, su arranque se dio el día 11 de Julio del mismo mes. Al día siguiente, 12 de Julio del 2017, se reportó en la prueba de producción un valor de arena de 1371ppm por lo cual fue necesario apagar el pozo. Para realizar el match se tomó como referencia la prueba de producción del 12 de Julio y no la del último día del mes como se acostumbra, con este valor de arena, los modificadores de la bomba debieron ser llevados a valores muy altos para ajustar la simulación y las medidas eléctricas reportadas son mucho mayores a los arrojados por el software debido a la misma condición.

Una vez apagado, se realizaron intentos de arranque que no fueron exitosos, motivo que determinó la falla del equipo con tan solo 2 días de operación.

3.2. Análisis de costos pozo J-1

Los costos asociados al equipo del pozo J-1 se presentan a continuación:

Tabla 17. Costo de los componentes pozo J-1

| Item | Precio USD |
|--------------------|------------------|
| Cabeza de descarga | 107.44 |
| Bomba | 9,684.96 |
| Intake | 911.16 |
| Protector | 5,308.48 |
| Protector | 5,308.48 |
| Motor | 11,315.27 |
| Sensor | 5,310.00 |
| Servicio Pull&Run | 10,000.00 |
| Total | 47,945.79 |

Fuente. Artificial Lift catalogue OneCat. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

Con un precio de crudo de \$51,64/Barril, se necesitarían aproximadamente 928,62 barriles de aceite producido para costear el costo de la sarta ESP junto con el

servicio de instalación. Ahora, como el pozo falló a los dos días de operación, se tienen 1431 barriles de fluido producido, con un corte de agua de aproximadamente de 99,04%, es decir 13,73 barriles de aceite producidos, lo que representa el 1,42% del pago total de la sarta ESP. Según esto, la instalación no fue favorable para el cliente.

3.3. Match Pozo J-2

A continuación, la prueba de producción y las medidas eléctricas del pozo en cuestión:

Tabla 18. Prueba de producción pozo J-2

| Pozo | Fecha Prueba | FREQ HZ | WHP PSI | WHT °F | PD PSI | PIP PSI | BSW % | ARENA PPM | GROSS BLS | API 60 °F |
|------|--------------|---------|---------|--------|--------|---------|-------|-----------|-----------|-----------|
| J-2 | 31-Jul | 40.0 | 150.0 | 156.0 | 1883.8 | 1169.40 | 89.60 | 0.33 | 92.2 | 22.5 |
| J-2 | 31-Aug | 50.5 | 190.0 | 163.0 | 2001.4 | 911.30 | 89.63 | 0.22 | 90.8 | 22.5 |

Fuente. Suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Tabla 19. Predictivos pozo J-2

| Fre. | Frec. Base | Volt Out VSD | Voltaje Motor (Sup) | Amp Oper. Motor | KVA Predictivo | VSD LOAD KVA | SUT LOAD Amp | TAP |
|------|------------|--------------|---------------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|--------|
| Hz | Hz | Volt | Volt | Amp | KVA | % | % | Volt |
| 61.0 | 62.0 | 445.0 | 3388.0 | 48.7 | 284.3 | 48.5 | 52.4 | 3533.0 |
| 50.5 | 62.0 | 385.7 | 1288.0 | 89.3 | 198.3 | 35.4 | 44.2 | 3533.0 |

Fuente. Suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Con los datos de producción y medidas eléctricas, el match arroja los siguientes resultados:

Tabla 20. Resultados match Julio pozo J-2

| Resultados Match | | | | | |
|-----------------------|--------|-----------|-----------------|----------|------|
| IP | 8.04 | STB/d/psi | Potencia Placa | 300 | hp |
| Pwf | 1432 | psi | Voltaje Placa | 1461 | Volt |
| Eficiencia bomba | 74 | % | Corriene placa | 124 | amp |
| Eficiencia separación | 28 | % | Amp motor | 68.8 | amp |
| Modificador cabeza | 98.8 | % | Voltaje Motor | 973.9 | Volt |
| Modificador Flojo | 98.7 | % | Total HP | 79.4 | Hp |
| Modificador Potencia | 100 | % | Temp Motor | 230.9 | F |
| Hp Producigo | 119.08 | Hp | Carga sello | 19 | lbf |
| Carga motor | 39.7 | % | Consumo teorico | 127.1 | KVA |
| Rating Factor | NO | | Operación | En Rango | |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

Tabla 21. Resultados Match Agosto pozo J-2

| Resultados Match | | | | | |
|-----------------------|--------|-----------|-----------------|----------|------|
| IP | 7.09 | STB/d/psi | Potencia Placa | 234 | hp |
| Pwf | 1174 | psi | Voltaje Placa | 1376 | Volt |
| Eficiencia bomba | 70 | % | Corriene placa | 101 | amp |
| Eficiencia separación | 23 | % | Amp motor | 89.6 | amp |
| Modificador cabeza | 93.6 | % | Voltaje Motor | 1158 | Volt |
| Modificador Flojo | 93.6 | % | Total HP | 160.1 | Hp |
| Modificador Potencia | 96 | % | Temp Motor | 257.6 | F |
| Hp Producigo | 190.25 | Hp | Carga sello | 23.9 | lbf |
| Carga motor | 81.3 | % | Consumo teorico | 199.1 | KVA |
| Rating Factor | 78 | | Operación | En Rango | |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

El pozo J-2 fue instalado el día 22 de Julio del presente año, a final de Julio se realiza el match, presentando un IP favorable, mayor al de diseño (8,04STB/d/psi), con una excelente eficiencia de la bomba (74,47%). La única condición que es desfavorable en este match es el consumo eléctrico, en comparación, la parte teórica arroja valores muy por debajo de los reportados en la práctica.

Para el match realizado en el mes de agosto, la operación continúa desarrollándose dentro del rango operacional, con una excelente eficiencia de la bomba (70%), aunque el IP disminuye un poco, sigue siendo mayor al IP requerido en el diseño (7,09STB/s/psi). Para este mes, los valores eléctricos se ajustan perfectamente a los valores teóricos, caso contrario a lo que se daba en el match de Julio. La recomendación es continuar con los aumentos progresivos en la frecuencia de operación hasta alcanzar el punto de mejor desempeño del equipo.

3.4. Análisis de costos pozo J-2

Los costos asociados al equipo del pozo J-2 se presentan a continuación:

Tabla 22. Costo de los componentes pozo J-2.

| Item | Precio USD |
|--------------------|------------------|
| Cabeza de descarga | 107.44 |
| Bomba | 15,151.67 |
| Intake | 911.16 |
| Protector | 5,442.90 |
| Protector | 5,442.90 |
| Motor | 11,094.25 |
| Sensor | 5,310.00 |
| Servicio Pull&Run | 10,000.00 |
| Total | 53,460.32 |

Fuente. Artificial Lift catalogue OneCat. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

Con un precio de crudo de \$51,64/Barril, se necesitarían aproximadamente 1035,25 barriles de aceite para costear el precio de la sarta ESP y su instalación. Hasta el momento, tomando el lapso del 22 de Julio hasta el 31 de Julio y el mes de agosto, se han producido la siguiente cantidad de barriles de crudo:

- 9 días de Julio, con un Bsw del 89,60%

$$Bbl_{aceite} = (92.2 * 9 * 10.4\%) = 86,2992Bbl \text{ Aceite}$$

- Para el mes de agosto, con un Bsw del 89,63%

$$Bbl_{aceite} = (90.8 * 31 * 10.37\%) = 291,89Bbl \text{ Aceite}$$

$$Bbl \text{ Total} = 86.2992 + 291.89 = 379,1892Bbl \text{ Aceite}$$

Con estos 379,1892Bbl de aceite producidos hasta el 31 de agosto de 2017, se han pagado \$19581 del total, es decir, el 36,62% del costo total del equipo ESP junto con su instalación. Aun no se está produciendo beneficios para la compañía operadora.

3.5. Match Pozo J-3

A continuación, la prueba de producción y las medidas eléctricas del pozo en cuestión:

Tabla 23. Prueba de producción pozo J-3

| Pozo | Fecha Prueba | FREQ HZ | WHP PSI | WHT °F | PD PSI | PIP PSI | BSW % | ARENA PPM | GROSS BLS | API 60 °F |
|------|--------------|---------|---------|--------|--------|---------|-------|-----------|-----------|-----------|
| J-3 | 31-Aug | 48.1 | 70.0 | 110.0 | 2089.0 | 501.00 | 60 | 0.18 | 253.0 | 21.9 |

Fuente. Suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Tabla 24. Predictivos pozo J-3

| Fre. | Frec. Base | Volt Out VSD | Voltaje Motor (Sup) | Amp Oper. Motor | KVA Predictivo | VSD LOAD KVA | SUT LOAD Amp | TAP |
|------|------------|--------------|---------------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|------|
| Hz | Hz | Volt | Volt | Amp | KVA | % | % | Volt |
| 47 | 60 | 358 | 2003.66667 | 15.333333 | 52.935538 | #DIV/0! | 24.099723 | 0 |

Fuente. Suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Con los datos de producción y medidas eléctricas, el match arroja los siguientes resultados:

Tabla 25. Resultados match pozo J-3

| Resultados Match | | | | | |
|-----------------------|-------|-----------|-----------------|----------|------|
| IP | 0.29 | STB/d/psi | Potencia Placa | 120 | hp |
| Pwf | 646.6 | psi | Voltaje Placa | 2533 | Volt |
| Eficiencia bomba | 36.3 | % | Corriene placa | 30.9 | amp |
| Eficiencia separación | 26 | % | Amp motor | 19.7 | amp |
| Modificador cabeza | 95 | % | Voltaje Motor | 2030 | Volt |
| Modificador Flojo | 95 | % | Total HP | 18.7 | Hp |
| Modificador Potencia | 100 | % | Temp Motor | 245.93 | F |
| Hp Producigo | 23.34 | Hp | Carga sello | 50.4 | lbf |
| Carga motor | 19.5 | % | Consumo teorico | 70.1 | KVA |
| Rating Factor | NO | | Operación | En Rango | |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

El equipo fue instalado el 31 de Julio del presente año, por lo cual no se tiene valores de pruebas de producción para este mes, solo para el mes de agosto. En el primer match, realizado en el mes de agosto, se tiene operación en rango operacional, sin embargo, no se alcanzan los valores de diseño para el IP, ya que actualmente este está en 0,29STB/d/psi. Se recomienda realizar aumentos progresivos en la frecuencia de operación hasta encontrar el caudal que haga trabajar el equipo en su mejor punto de eficiencia. En cuanto a la parte eléctrica, el

equipo maneja valores comprendidos dentro de los arrojados por el software lo cual es bueno.

3.6. Análisis de costos pozo J-3

Los costos asociados al equipo del pozo J-3 se presentan a continuación:

Tabla 26. Costo componentes del pozo J-3

| Item | Precio USD |
|--------------------|------------------|
| Cabeza de descarga | 107.44 |
| Bomba | 5,712.02 |
| Bomba | 7,996.84 |
| Intake | 874.44 |
| Protector | 3,779.27 |
| Protector | 3,730.76 |
| Motor | 8,426.92 |
| Sensor | 5,310.00 |
| Servicio Pull&Run | 10,000.00 |
| Total | 45,937.69 |

Fuente. Artificial Lift catalogue OneCat. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

Con un precio de crudo de \$51,64/Barril, se necesitarían aproximadamente 889,57 barriles de aceite para costear el precio de la sarta ESP y su instalación. Hasta el momento, tomando el mes de agosto, se han producido la siguiente cantidad de barriles de aceite:

$$Bbl_{aceite} = (253 * 31 * 40\%) = 3137,2Bbl \text{ Aceite}$$

Se han producido 3137,2 barriles de aceite en el primer mes de operación del pozo J-3, esto quiere decir que el equipo ESP y su instalación ya fueron pagados con la producción de aceite. De estos 3137 barriles, quedan 2247 barriles que

ingresan para cubrir los costos operacionales y de ganancia para la compañía operadora, lo que significan \$161994 de ganancia, algo que se da buenos resultados para el primer mes de operación del equipo.

3.7. Match Pozo J-4

A continuación, la prueba de producción y las medidas eléctricas del pozo en cuestión:

Tabla 27. Prueba de producción pozo J-4

| Pozo | Fecha Prueba | FREQ HZ | WHP PSI | WHT °F | PD PSI | PIP PSI | BSW % | ARENA PPM | GROSS BLS | API 60 °F |
|------|--------------|---------|---------|--------|--------|---------|-------|-----------|-----------|-----------|
| J-4 | 31-Jul | 43.0 | 76.0 | 151.0 | 2065.0 | 515.00 | 81.9 | | 420.0 | 21.3 |
| J-4 | 31-Aug | 47.0 | 79.0 | 157.0 | 2081.0 | 259.00 | 84 | | 529.0 | 21.3 |

Fuente. Suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Tabla 28. Predictivos Pozo J-4

| Fre. | Frec. Base | Volt Out VSD | Voltaje Motor (Sup) | Amp Oper. Motor | KVA Predictivo | VSD LOAD KVA | SUT LOAD Amp | TAP |
|------|------------|--------------|---------------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|------|
| Hz | Hz | Volt | Volt | Amp | KVA | % | % | Volt |
| 43 | 60 | 399.67 | 2075.33 | 31.00 | 110.85 | 29.88 | 53.78 | 2699 |
| 45 | 60 | 418.33 | 2169.33 | 32.33 | 120.85 | 31.71 | 54.53 | 2699 |

Fuente. Suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Con los datos de producción y medidas eléctricas, el match arroja los siguientes resultados:

Tabla 29. Resultados match Julio pozo J-4

| Resultados Match | | | | | |
|-----------------------|-------|-----------|-----------------|------------|------|
| IP | 0.32 | STB/d/psi | Potencia Placa | 262.5 | hp |
| Pwf | 641.3 | psi | Voltaje Placa | 2601.3 | Volt |
| Eficiencia bomba | 32 | % | Corriene placa | 61.1 | amp |
| Eficiencia separación | 21 | % | Amp motor | 24.4 | amp |
| Modificador cabeza | 101 | % | Voltaje Motor | 1864.2 | Volt |
| Modificador Flojo | 101 | % | Total HP | 35.6 | Hp |
| Modificador Potencia | 100 | % | Temp Motor | 243.3 | F |
| Hp Producigo | 49.67 | Hp | Carga sello | 37.6 | lbf |
| Carga motor | 18.9 | % | Consumo teorico | 81.1 | KVA |
| Rating Factor | NO | | Operación | Downthrust | |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

Tabla 30. Resultados match agosto pozo J-4

| Resultados Match | | | | | |
|-----------------------|-------|-----------|-----------------|------------|------|
| IP | 0.34 | STB/d/psi | Potencia Placa | 262.5 | hp |
| Pwf | 385.6 | psi | Voltaje Placa | 2601 | Volt |
| Eficiencia bomba | 36 | % | Corriene placa | 61.1 | amp |
| Eficiencia separación | 20 | % | Amp motor | 25.7 | amp |
| Modificador cabeza | 101 | % | Voltaje Motor | 2037.7 | Volt |
| Modificador Flojo | 101 | % | Total HP | 47.9 | Hp |
| Modificador Potencia | 100 | % | Temp Motor | 243 | F |
| Hp Producigo | 61.16 | Hp | Carga sello | 41.1 | lbf |
| Carga motor | 23 | % | Consumo teorico | 93.3 | KVA |
| Rating Factor | NO | | Operación | Downthrust | |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

El equipo fue instalado el 1 de Julio, para el primer match del equipo se tienen condiciones favorables en cuanto a los modificadores de la bomba, estos ajustan sin alterarse demasiado, también, la parte eléctrica suministrada en los predictivos coincide perfectamente con los valores teóricos arrojados por el software. La condición desfavorable se da en la operación del equipo, ya que este opera en

empuje descendente lo que produce que las etapas de la bomba disminuyan su vida útil.

Para el segundo mes de operación del equipo, este trabajó con un poco más de frecuencia, 47Hz, y se consumieron más KVA en el desarrollo de la operación, se pasa de 81,1Kva a 93,3Kva. La recomendación para este mes es revisar la prueba de sólidos debido a que la corriente que se registran en los predictivos es mayor a la corriente presentada por DesignPro. También, continuar con el aumento progresivo de frecuencia ya que el equipo trabaja en empuje ascendente.

3.8. Análisis de costos pozo J-4

Los costos asociados al equipo del pozo J-4 se presentan a continuación:

Tabla 31. Costo de los componentes del pozo J-4

| Item | Precio USD |
|--------------------|------------------|
| Cabeza de descarga | 107.44 |
| Bomba | 7,195.24 |
| Intake | 911.16 |
| Protector | 5,308.48 |
| Protector | 5,308.48 |
| Motor | 10,244.32 |
| Sensor | 5,310.00 |
| Servicio Pull&Run | 10,000.00 |
| Total | 44,385.12 |

Fuente. Artificial Lift catalogue OneCat. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

Con un precio de crudo de \$51,64/Barril, se necesitarían aproximadamente 859,51 barriles de aceite para costear el precio de la sarta ESP y su instalación. Hasta el momento, tomando los meses de Julio y agosto, se ha producido la siguiente cantidad de barriles de aceite:

- Julio, 81,9% de corte de agua

$$Bbl_{aceite} = (420 * 31 * 0.181) = 2356,62 Bbl \text{ Aceite}$$

- Agosto, 84% de corte de agua

$$Bbl_{aceite} = (529 * 31 * 0.16) = 2623,84 Bbl \text{ Aceite}$$

Hasta el 31 de agosto de 2017, se han producido 4980,46 Bbl de aceite, lo cual indica que la sarta ESP ya se pagó en su totalidad y además se han producido 4120,95Bbl adicionales, los cuales son para cubrir costos de operación y también sirven como ganancia para la compañía operadora. Si se vende esta cantidad de barriles se obtendría \$212805.

3.9. Match Pozo J-5

A continuación, la prueba de producción y las medidas eléctricas del pozo en cuestión:

Tabla 32. Prueba de producción pozo J-5

| Pozo | Fecha Prueba | FREQ HZ | WHP PSI | WHT °F | PD PSI | PIP PSI | BSW % | ARENA PPM | GROSS BLS | API 60 °F |
|------|--------------|---------|---------|--------|--------|---------|-------|-----------|-----------|-----------|
| J-5 | 31-Jul | 47.0 | 28.0 | 130.0 | 2067.0 | 330 | 84.84 | 6.87 | 420.0 | 21.4 |
| J-5 | 31-Aug | 48.5 | 55.0 | 142.0 | 2100.0 | 251 | 75 | 0.19 | 474.0 | 21.4 |

Fuente. Suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Tabla 33. Predictivos pozo J-5

| Fre. | Frec. Base | Volt Out VSD | Voltaje Motor (Sup) | Amp Oper. Motor | KVA Predictivo | VSD LOAD KVA | SUT LOAD Amp | TAP |
|------|------------|--------------|---------------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|---------|
| Hz | Hz | Volt | Volt | Amp | KVA | % | % | Volt |
| 47 | 60 | 335.33 | 2248.67 | 13.00 | 50.37 | 18.69 | 23.18 | 2341.00 |
| 48.5 | 60 | 351.00 | 2308.67 | 13.33 | 53.04 | 22.13 | 26.22 | 2341.00 |

Fuente. Suministrada por el cliente. Modificada por el autor.

Con los datos de producción y medidas eléctricas, el match arroja los siguientes resultados:

Tabla 34. Resultados match Julio pozo J-5

| Resultados Match | | | | | |
|------------------------------|-------|-----------|------------------------|----------|------|
| IP | 0.54 | STB/d/psi | Potencia Placa | 90 | hp |
| Pwf | 455.3 | psi | Voltaje Placa | 2156 | Volt |
| Eficiencia bomba | 60.3 | % | Corriene placa | 27 | amp |
| Eficiencia separación | 25.3 | % | Amp motor | 15.5 | amp |
| Modificador cabeza | 107 | % | Voltaje Motor | 1688.7 | Volt |
| Modificador Flojo | 107 | % | Total HP | 21.1 | Hp |
| Modificador Potencia | 100 | % | Temp Motor | 221.6 | F |
| Hp Producigo | 26.89 | Hp | Carga sello | 51.5 | lbf |
| Carga motor | 29.9 | % | Consumo teorico | 45.8 | KVA |
| Rating Factor | NO | | Operación | En rango | |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

Tabla 35. Resultados match Agosto pozo J-5

| Resultados Match | | | | | |
|------------------------------|-------|-----------|------------------------|----------|------|
| IP | 0.56 | STB/d/psi | Potencia Placa | 90 | hp |
| Pwf | 375 | psi | Voltaje Placa | 2156 | Volt |
| Eficiencia bomba | 63 | % | Corriene placa | 27 | amp |
| Eficiencia separación | 25 | % | Amp motor | 15.5 | amp |
| Modificador cabeza | 107 | % | Voltaje Motor | 1724.6 | Volt |
| Modificador Flojo | 107 | % | Total HP | 23.5 | Hp |
| Modificador Potencia | 100 | % | Temp Motor | 228.1 | F |
| Hp Producigo | 29.03 | Hp | Carga sello | 53.1 | lbf |
| Carga motor | 32.3 | % | Consumo teorico | 47.3 | KVA |
| Rating Factor | NO | | Operación | En Rango | |

Fuente. Artificial Lift design and analysis software DesignPro 9.0.2. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

El equipo fue instalado el 22 de junio del 2017 pero no se registra arranque hasta el 1 de Julio del 2017. Para este primer match en el mes de Julio, el IP se encuentra en 0,54STB/d/psi. La recomendación que se hace en este mes es la de revisar la prueba de producción y predictivos ya que el voltaje suministrado al motor se encuentra un poco elevado con relación al voltaje requerido a 47Hz (1712,8V) y recibe 2248,7V, esto puede generar eventos de sobre-corriente y problemas por saturación.

Para el mes de agosto, se pasa de un IP de 0,54 a 0,56STB/d/psi, las condiciones eléctricas del equipo no vuelven a ser buenas, ya que se presenta el mismo problema del mes de Julio, se recibe más voltaje (2308V), que el requerido a 48,5Hz (1768,8V). En cuanto al consumo, este registra un aumento de 45.8Kva a 47,3Kva. La eficiencia de la bomba aumenta en un 3%, actualmente en 63%.

3.10. Análisis de costos pozo J-5

Los costos asociados al equipo del pozo J-5 se presentan a continuación:

Tabla 36. Costo de los componentes del pozo J-5

| Item | Precio USD |
|--------------------|-----------------|
| Cabeza de descarga | 107.44 |
| Bomba | 7,037.93 |
| Bomba | 7,037.93 |
| Intake | 765.95 |
| Protector | 4,285.01 |
| Protector | 4,285.01 |
| Motor | 7,458.66 |
| Sensor | 5,310.00 |
| Servicio Pull&Run | 10,000.00 |
| Total | 46287.93 |

Fuente. Artificial Lift catalogue OneCat. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por el autor.

Con un precio de crudo de \$51,64/Barril, se necesitarían aproximadamente 896,35 barriles de aceite para costear el precio de la sarta ESP y su instalación. Hasta el momento, tomando los meses de Julio y agosto, se ha producido la siguiente cantidad de barriles de aceite:

- Julio, 84.84 de corte de agua:

$$Bbl_{aceite} = (420 * 31 * 0.1616) = 2104,032 Bbl \text{ de aceite}$$

- Agosto, 75% de corte de agua:

$$Bbl_{aceite} = (474 * 31 * 0.25) = 3673,5 Bbl \text{ de aceite}$$

Hasta el 31 de agosto de 2017, se han producido 5777,532 Bbl de aceite, lo cual indica que la sarta ESP ya se pagó en su totalidad y además se han producido 4881,182Bbl adicionales, los cuales son para cubrir costos de operación y también sirven como ganancia para la compañía operadora. Si se vende esta cantidad de barriles se obtendría \$252064

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El diseño para los pozos J2, J3 y J5 es el adecuado, ya que las condiciones de diseño suministradas por la compañía operadora fueron acertadas y hacen que el equipo ESP trabaje bajo condiciones favorables.
- Teniendo en cuenta la alta producción de sólidos y las fallas asociadas en anteriores intervenciones, se puede pensar en evaluar la posibilidad de implementar otro sistema de levantamiento artificial en el pozo J-1 diferente del ESP.
- En el caso del pozo J4, las condiciones de diseño entregadas por la compañía operadora difieren mucho de las condiciones de operación por lo cual el equipo ESP no llega a suplir las necesidades de producción y se encuentra sobredimensionado para dichas condiciones.
- Se hace primordial continuar con la evaluación de desempeño mensual para cada pozo de la compañía operadora para así seleccionar el mejor camino a seguir y explotar al máximo las condiciones de cada pozo con el equipo ESP instalado.
- Es necesario realizar un estudio económico completo para saber con certeza en que momento de la vida productiva del pozo se llega al punto de equilibrio en la operación.

BIBLIOGRAFÍA

AL, Engineering. Artificial Lift Engineering Operations Reference Manual – Downhole. Intouch Support: AL-ESP Field Services & Bypass Sy. 2016. 3255850.

AL, Engineering. Artificial Lift Field Operations Reference Manual – Surface. Intouch Support: AL-Surface Electrical., 2016. 1658713429.

ALVAREZ TORRADO, German Orlando. Optimización de producción, consumo de energía y nivel de armónicos para equipos de bombeo electrosumergible en un campo petrolero del magdalena medio. Universidad Industrial de Santander: Tesis de pregrado., Bucaramanga:2011.

ARTIFICIAL LIFT AE ESP TRAINING. Outflow and System. Schlumberger: Curso ESP 1.

ARTIFICIAL LIFT AE ESP 1 TRAINING. Pumps and TDH. Schlumberger: Curso ESP 1.

BANAGA, Mohamed. Electrical Submersible Pump Manual for Clients. Intouch Support: Artificial Lift Engineering. 2009.

LEON BAEZ, Carlos Humberto. Optimización de la producción y disminución de consumo de energía en pozos con niveles de armónicos altos en un campo petrolero ubicado en los llanos orientales con bombeo electro sumergible como sistema de levantamiento artificial. Universidad Industrial de Santander: Tesis de pregrado. Bucaramanga: 2012

SCHLUMBERGER. Bombeo Electro Sumergible (BES) Lista de Verificación de Instalación. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2016. 6338508.
SCHLUMBERGER. ESP Motor Nomenclature – Updated. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2008.

TAKACS, Gabor. Electrical Submersible Pumps Manual. Design, Operations, and Maintenance. USA: Elsevier, 2009