PROYECTO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE PRACTICA EMPRESARIAL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE. DESCRIPCIÓN, DISEÑO Y MONITOREO. SCHLUMBERGER -WCP-Artificial Lift System

FREDY ALONSO PEÑA SUESCÚN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA
2005

PROYECTO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE PRACTICA EMPRESARIAL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE. DESCRIPCIÓN, DISEÑO Y MONITOREO. SCHLUMBERGER -WCP-Artificial Lift System

FREDY ALONSO PEÑA SUESCÚN

Tutor de la Empresa
ANDRES MAURICIO ESPINOSA
Ingeniero

Tutor de la Universidad
OLGA PATRICIA ORTIZ
Docente UIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2005

DEDICATORIA

A mi papá, Rafael, por ser mi ejemplo, mi fuerza, mi fortaleza, mi apoyo y mi gran ayuda.

A mi mamá, Frady Maria, Por ser la inspiración que me impulsa para seguir adelante.

A mi hermana Rafaela, y a mi sobrino Samir, por el amor y la compañía que siempre me han brindado.

A mis hermanas Dennis y Gloria, y mis sobrinos.

A mi tia Rosalba, mis primos Andres, Mery y Esther, Oscar y sus hijos.

A mi novia, Diana Paola, mi media mitad, mi consentida.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Andrés Espinosa Gutiérrez, mi tutor en Schlumberger.

A la Ingeniera Olga Patricia Ortiz, mi tutora en la UIS.

A amigos y amigas.

A Claudia, Arsenio, Yeison y Ayarit, mi familia en Neiva.

A la Familia Martínez.

A mis amigos en Neiva.

CONTENIDO

pág.

1. CONCEPTOS BASICOS 17
1.1 PROPIEDADES DE LAS ROCAS EN LOS YACIMIENTOS 17
1.1.1 Porosidad 17
1.1.2 Permeabilidad. 18
1.1.3 Saturación. 20
2. LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL 22
2.1 BOMBEO MECÁNICO. 24
2.1.1 Componentes 26
2.1.2 Tipos de unidades de bombeo 27
2.1.3 Ventajas 28
2.1.4 Desventajas 28
2.2 BOMBA DE CAVIDADES PROGRESIVAS (PCP) 28
2.2.1 Fabricantes 28
2.2.2 Principio de Operación 29
2.2.3 Bomba 29
2.2.4 Equipo de Superficie 29
2.2.5 Sistema de rotación de superficie 30
2.2.6 La cabeza de rotación 30
2.2.7 Rotor 31
2.2.8 Estator 31
2.2.9 Ventajas 31
2.2.10 Desventajas 31
2.3 GAS LIFT. 32
2.3.1 Método de inyección 33
2.3.2 Circuito de inyección en superficie 35

2.3.3 Tipo de completamiento. 35
2.4 BOMBEO HIDRÁULICO 37
2.4.1 Componentes 37
2.4.2 Tipos de Sistemas de Bombeo Hidráulico 38
2.5 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE 39
3. CONCEPTOS DE ELECTRICIDAD 40
3.1 DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 40
3.2 VOLTAJE (V) 41
3.3 CORRIENTE (I) 41
3.4 RESISTENCIA (R) 41
3.5 LEY DE OHM 42
3.6 ONDA SENOSOIDAL DE CORRIENTE ALTERNA 42
3.7 POTENCIA (P) 43
3.8 FRECUENCIA (HERTZ) 44
3.9 INDUCTANCIA (L) 45
3.10 CAPACITANCIA (C) 46
3.11 IMPEDANCIA (Z) 46
3.12 CONDUCTORES 47
3.13 AISLANTES 47
3.14 FACTOR DE POTENCIA (PF). 47
3.15 TRANSFORMADORES 48
3.16 MOTORES ELÉCTRICOS 51
4. COMPONENTES DEL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE 55
4.1 EQUIPO DE SUPERFICIE 57
4.1.1 Generador de potencia eléctrica 57
4.1.2 Transformador reductor (SDT) 57
4.1.3 Variador o controlador de frecuencia (VSD). 58
4.1.3 Transformador elevador (SUT) 59
4.1.4 Caja de conexiones 59
4.2 EQUIPO DE FONDO 59

4.2.1 Sensor de fondo 60
4.2.2 Motor 62
4.2.3 Cable de Potencia. 65
4.2.4 Extensión plana de cable o cable de conexión al motor 69
4.2.5 Válvula cheque. 70
4.2.6 Válvula de drenaje 70
4.2.7 Protector 70
4.2.8 Sección de Entrada a la bomba o Intake 77
4.2.9 Bomba 82
5. DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO 89
5.1 DATOS REQUERIDOS 89
5.1.1 Tamaño, peso y profundidad de asentamiento del revestimiento 89
5.1.2 Profundidad de los intervalos perforados 89
5.1.3 Tamaño y Rosca de la tubería de producción 89
5.1.4 Corte de agua y relación gas-petróleo (GOR) 90
5.1.5 Gravedad específica de los líquidos y del gas que se van a producir. 90
5.1.6 Temperatura del fondo del pozo (BHT) 90
5.1.7 Índice de productividad (J) o relación de desempeño de flujo (IPR). 90
5.1.8 Presión en cabeza del pozo (THP) 90
5.1.9 Nivel de sumergencia deseado y presión de entrada a la bomba (PIP) deseada 91
5.1.10 Voltajes disponibles en superficie 91
5.2 PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO SUBMERGIBLE 91
5.2.1 Recopilación de Datos 92
5.2.2 Capacidad de producción 93
5.2.3 Cálculos de gas 93
5.2.3 Cálculo de la cabeza dinámica total en pies (TDH). 96
5.2.4 Seleccionar el tipo de bomba 96
5.2.5 Determinar el tamaño óptimo de los componentes 97

5.2.6 Selección del cable 97
5.2.7 Determinación de la capacidad del equipo eléctrico 97
5.2.8 Variador de Frecuencia VSD 98
5.3 DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE 100
5.3.1 Recopilación de Datos 100
5.3.2 Cálculos del diseño 101
6. SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO INTERACT 132
6.1 QUE ES INTERACT? 132
6.2 CUALES SON LAS FUNCIONES DE INTERACT? 133
6.3 CENTRO DE CONTROL Y MONITOREO ESPWATCHER 134
6.4 PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN LA LOCACIÓN Y LA MANERA DE DETECTARLOS EN INTERACT. 135
6.4.1 Comportamiento normal de un pozo 135
6.4.2 Pozo bloqueado por gas 136
6.4.3 Pozo con problema de sólidos 137
6.4.4 Pozos trabajando a baja carga 138
7. CONCLUSIONES 140
BIBLIOGRAFÍA 142

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Representación gráfica de la porosidad. 17
Figura 2. Representación gráfica de la permeabilidad dual. 18
Figura 3. Unidades de la permeabilidad. 19
Figura 4. Efecto del tamaño de grano sobre la permeabilidad. 20
Figura 5. Efecto del cambio de estratificación sobre la permeabilidad. 20
Figura 6. Bombeo mecánico. 24
Figura 7. Funcionamiento de la bomba de fondo. 25
Figura 8. Configuración tipica de una PCP. 29
Figura 9. Sistemas de mocion para PCP. 30
Figura 10. Diagrama sistema gas Lift. 32
Figura 11. Gas lift continuo e intermitente. 34
Figura 12. Circuito cerrado. Gas lift. 35
Figura 13. Pozo que fluye naturalmente bajo el efecto de gas lift. 36
Figura 14. Componentes de un sistema de bombeo hidráulico. 37
Figura 15. Configuraciones del sistema de bombeo hidraulico tipo pistón. 38
Figura 16. Tipos de bombas en el bombeo hidraulico tipo JET. 39
Figura 17. Onda senosoidal de AC. 43
Figura 18. Ondas senosoidales para sistema trifásico AC. 44
Figura 19. Efectos de la inductancia sobre la corriente 45
Figura 20. Transformadores 49
Figura 21. Devanados en conexiones Y y Delta 50
Figura 22. Componentes del sistema Electrosumergible. 55
Figura 23. Generador electrico. 57
Figura 24. Tranformador. 58
Figura 25. Variador de frecuencia. 58

Figura 26. Instalación tipica BES. Equipo de fondo. 60
Figura 27. Sensor 61
Figura 28. Motor 62
Figura 29. Cojinete de empuje. 63
Figura 30. Partes del motor 64
Figura 31. Cable de potencia. 65
Figura 32. Cable redalene. 68
Figura 33. Cable redablack. 69
Figura 34. Cable redalead. 69
Figura 35. Protector 71
Figura 36. Protector de camara laberintica. 72
Figura 37. Protectores tipo bolsa. 73
Figura 38. Cojinetes de carga en los protectores. 74
Figura 39. Configuraciones en los protectores. 75
Figura 40. Intake 78
Figura 41. Flujo inverso dentro de un separador de gas. 79
Figura 42. Separador de gas dinamico. 80
Figura 43. Configuracion del equipo de fondo. 81
Figura 44. Bomba 82
Figura 45. Corte de una etapa. 83
Figura 46. Impulsor y Difusor. 83
Figura 47. Movimiento de flujo dentro de una etapa. 85
Figura 48. Etapa tipo pancake, flujo radial. 85
Figura 49. Tipos de construcciones para las bombas. 87
Figura 50. Curva de capacidad a diferentes frecuencias, Bomba SN3600. 99
Figura 51. Perdidas por fricción en la tuberia. 107
Figura 52. Curva de desempeño a 60 Hz para una etapa. Bomba GN2500 109
Figura 53. Curva de desempeño a 60 Hz para una etapa. Bomba G2700 109
Figura 54.Curva de desempeño a 60 Hz para 1 etapa. Bomba SN 2600 110
Figura 55. Curva de desempeño a 60 Hz para 57 etapas. Bomba SN 2600 111

Figura 56. Housing disponibles para bomba SN 2600 de construcción ARZ 112
Figura 57.Curva de desempeño a 60 Hz para 63 etapas. Bomba SN 2600 113
Figura 58. Curvas de desempeño a frecuencia variable para 63 etapas. Bomba SN 2600 114
Figura 59. El Rango de los Motores MK, serie 540, a 60 Hz y a 50 Hz 117
Figura 60. Curvas de desempeño de los motores MK, serie 540. 118
Figura 61. Ratings de carga para protector Vs Temperatura para aceite REDA 2. 122
Figura 62. Carta de pérdida de voltaje en el cable 122
Figura 63. Selección del variador de frecuencia. 127
Figura 64. Características del variador de frecuencia. 128
Figura 65. *Diagrama de completamiento.* 130
Figura 66. Equipo de superficie seleccionado 131
Figura 67. Comportamiento normal de un pozo 135
Figura 68. Corriente y frecuencia de un pozo bloqueado por gas 136
Figura 69. Presión y temperatura en un pozo bloqueado por gas 137
Figura 70. Pozo afectado por el ingreso de sólidos al sistema 138

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Materiales componentes del cable de potencia. 67
Tabla 2. Algunas bombas con sus respectivos diametros y caudales. 108
Tabla 3. Potencia requerida para diferentes tipos de separadores. 115
Tabla 4. Configuraciones del protector según el tipo de aplicaciones. 120
Tabla 5. Equipo de fondo seleccionado 129

RESUMEN

TITULO: BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE. DESCRIPCIÓN, DISEÑO Y MONITOREO*

AUTOR: FREDY ALONSO PEÑA SUESCÚN**

PALABRAS CLAVES: Bombeo Electrosumergible, levantamiento artificial, Diseño, Descripción, Monitoreo, InterACT.

Casi la totalidad de los pozos de petróleo fluyen naturalmente al inicio de su vida productiva. Durante este tiempo la presión del yacimiento proporciona suficiente energía para levantar el fluido hasta superficie.

Después de algún tiempo, esta presión se agota, y por tanto no habrá en el yacimiento la suficiente energía para levantar el fluido, afectándose de esta manera la producción. En este momento se hace necesario instalar un método de levantamiento artificial.

Un sistema de levantamiento artificial proporciona la energía necesaria para producir el fluido cuando en el yacimiento no existe la suficiente energía para llevarlo a superficie.

Uno de estos sistemas es el Bombeo Electro Sumergible (BES), el cual consiste en el funcionamiento de una bomba centrifuga la cual le imprime al fluido la suficiente energía para que este pueda llegar a superficie.

Este libro contiene una descripción de las características principales de los equipos usados en la operación de un sistema de bombeo electro sumergible. Con el objetivo de ampliar el conocimiento de esta tecnología ampliamente usada en las operaciones de producción, se presenta la identificación de los componentes principales y una corta explicación de su función, además de los parámetros para su diseño y un ejemplo de diseño de un sistema BES.

También se describe el sistema de monitoreo satelital InterACT, sistema utilizado por la multinacional Schlumberger para el control y el monitoreo de los sistemas de bombeo electro sumergible.

---

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Directora de Escuela: Dra. Zuly Imelda Calderón.

SUMMARY

TITLE: ELECTRO SUBMERSIBLE PUMPING. DESCRIPTION, DESIGN AND MONITORING. *
AUTHOR: FREDY ALONSO PEÑA SUESCÚN **
KEY WORDS: Electro Submersible Pumping, Artificial Lift, Design, Description, Monitoring, InterACT.

Almost the whole of the oil wells flow naturally, when they start their period production. During this time the pressure of the reservoir provides sufficient energy to raise fluid until the surface.
After a few times this pressure is not the same, it drops dramatically inside the reservoir, so that the production will be affected by the lack of energy. This is the moment to apply a method that can lift the fluid artificially.

A lifting artificial system offers energy necessary to extract the fluid, when there is not potency to take the oil out of the surface.

One of these methods is the electro submersible pumping, which constitutes operating a centrifugal bomb. That system produces energy to make the fluid began to flow from the well.

That project holds a detail description of the main characteristics of the equipments used for the operation of electro submersible pumping. This work was done with the sole purpose of improving knowledge from this technology, used widely for extraction operations. That piece of work shows the principal component extraction and gives a short explanation of its functions. Also, the paper brings general parameters to design and to illustrate with a pumping electro submersible system. In this case, it is necessary to mention the use of monitoring satellite, INTERACT, used by the multinational corporation Schlumberger, in order to control and to monitor all the electro submersible pumping systems.

---

* Project of Degree
** Faculty of Engineering Physical - Chemistry
School of Petroleum Engineering
Manager of School: Dra. Zuly Imelda Calderón

INTRODUCCIÓN

En un pozo que fluye naturalmente y suficiente energía almacenada en el yacimiento para que el hidrocarburo llegue a superficie sin la intervención de ningún otro mecanismo. La energía encargada de levantar el fluido hasta la superficie es la presión del yacimiento. Cuando esta presión es tan baja que el pozo no puede fluir o cuando la rata de volumen de producción deseado es más grande que la que la energía del yacimiento puede suministrar, se hace necesario utilizar un levantamiento artificial.

Un levantamiento artificial es un mecanismo utilizado para lograr la recuperación de fluidos de un pozo después de que éste no puede producir dichos fluidos con su propia energía.

Un tipo particular de levantamiento artificial es el Bombeo Electrosumergible (BES), que se basa en la utilización de bombas centrífugas que por medio de su rotación le imprimen al fluido la energía necesaria para que este alcance superficie.

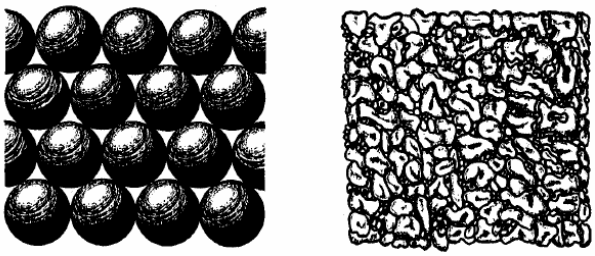
Este libro consigna algunas generalidades acerca de la descripción, funcionamiento, diseño y monitoreo de una unidad de bombeo electrosumergible, obtenidas por el autor en su práctica empresarial realizada con la compañía Schlumberger Surenco, en la línea de levantamiento artificial en la ciudad de Neiva.

1. CONCEPTOS BASICOS

1.1 PROPIEDADES DE LAS ROCAS EN LOS YACIMIENTOS

1.1.1 Porosidad. Porcentaje o fracción de espacios vacios en el volumen total de roca. La porosidad de las rocas en los yacimientos debe ser determinada por medida directa sobre muestras de corazones en el laboratorio o estimada in situ por medio de análisis de registros.

Figura 1. Representación gráfica de la porosidad.



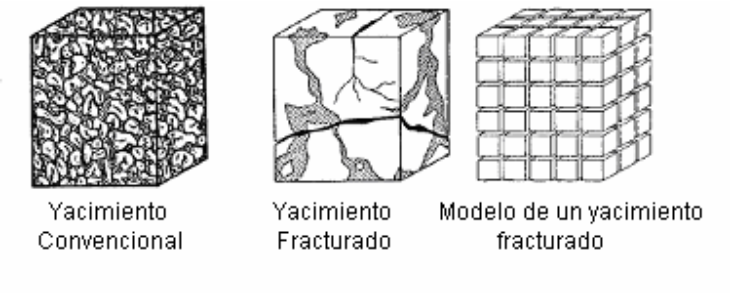
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- *Porosidad Primaria.* Se refiere a los espacios vacíos presentes después de la sedimentación de granos y por lo tanto es la porosidad de la matriz.

- *Porosidad secundaria.* Espacios vacíos debidos a huecos, cavernas, fracturas y otras discontinuidades en el volumen total de la roca.

- *Porosidad dual.* Sistemas que presentan porosidad primaria y secundaria, con sistemas interconectados de porosidad secundaria. Gráficamente se podría ver de la siguiente manera:

Figura 2. Representación gráfica de la permeabilidad dual.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

1.1.2 Permeabilidad. Es una medida que especifica la capacidad de flujo dentro de la roca. Se determina por medio de experimentos de flujo en el laboratorio. También se puede ver la permeabilidad como la continuidad de los espacios porosos en una roca. Henry Darcy por medio de la experimentación desarrolló una ecuación diferencial que mide la permeabilidad con respecto a un flujo dado:

$$Q = \frac{\kappa}{\mu} * \frac{\delta P}{\delta L} \quad \text{.....Ecuación 1.1}$$

Donde:

$\kappa = Permeabilidad$

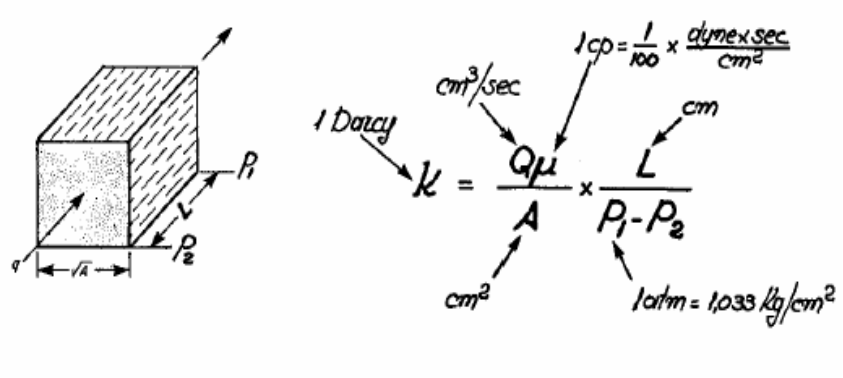
$\mu = Viscosidad$

$\frac{\delta P}{\delta L} = Gradiente\ de\ \mathrm{Pr}esión$

$Q = Caudal$

Las unidades utilizadas en la anterior ecuación deben estar en el mismo sistema de medida.

Figura 3. Unidades de la permeabilidad.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

• *Permeabilidad Absoluta (K.)* Permeabilidad medida cuando un fluido está saturando el 100% del espacio poroso.

• *Permeabilidad Efectiva (Ke).* Permeabilidad medida cuando el espacio poroso está siendo ocupado por más de un fluido. Siempre es menor que la permeabilidad absoluta de la roca.

• *Permeabilidad Relativa (Kr).* Relacion entre la permeabilidad efectiva y la permeabilidad absoluta de una roca. Se define como:

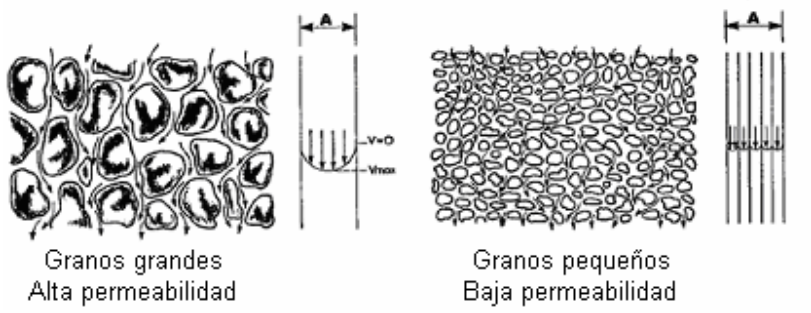
$$\kappa_r = \frac{\kappa_e}{\kappa} \quad \text{.....Ecuación 1.2}$$

-Factores que afectan la permeabilidad.

• *Tamaño de grano.* El tamaño de grano está relacionado directamente con la capacidad de flujo en la roca. Una roca que está conformada por granos que posean un tamaño considerable, puede presentar una mayor permeabilidad, permitiendo un flujo fácil de fluidos. Por el contrario, una roca con granos

pequeños, presentara baja permeabilidad, y por lo tanto los fluidos no se desplazaran fácilmente.

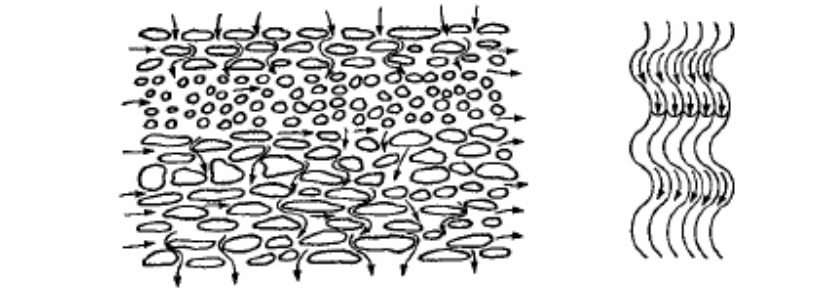
Figura 4. Efecto del tamaño de grano sobre la permeabilidad.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

• *Cambios de estratificacion.* Un cambio de estratificación abrupto actua como una barrarera de flujo:

Figura 5. Efecto del cambio de estratificación sobre la permeabilidad.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

1.1.3 Saturación. Es la medida del espacio poroso que está siendo ocupado por un fluido. Durante la depositación, las rocas del yacimiento están totalmente saturadas de agua, llamada agua connata. Como los hidrocarburos migran y se depositan en estas rocas, una porción de esta agua es desplazada, quedando el espacio poral ocupado por 2 tipos de fluidos, agua y aceite. Si hay presencia de

gas en el yacimiento, el espacio poral estará ocupado por tres fluidos. Se pueden definir en este caso tres tipos de saturaciones:

- *Saturacion de agua (Sw)*. Fracción que representa el volumen de agua contenido en el espacio poroso. Es la relación entre el volumen de agua y el volumen total de espacio poroso.

- *Saturacion de aceite (So)*. Fracción que representa el volumen de aceite contenido en el espacio poroso.

- *Saturacion de gas (Sg)*. Cuando en el yacimiento hay presencia de gas, se puede presentar otro tipo de saturación, la saturación de gas. Esta saturación se define como la fracción que representa el volumen de gas contenido en el espacio poroso.

La suma de las saturaciones de los fluidos presentes en el espacio poral debe ser igual a la unidad, así:

$$Sw + So + Sg = 1 \quad \text{.....Ecuación 1.3}$$

2. LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

El objetivo de cualquier sistema de levantamiento artificial es suministrar energía para la producción de fluidos; para que se pueda llevar a cabo o para que se incremente dicha producción.

Algunos pozos pueden simplemente fluir más eficientemente bajo un levantamiento artificial, otros requieren levantamiento artificial para comenzar la producción y después producir con flujo natural, otros deberán utilizarlos para producir ya que no alcanzarán flujo natural.

Los sistemas de levantamiento artificial tienen su mayor utilización cuando ha transcurrido un tiempo considerable de la vida productiva del pozo, cuando la presión del yacimiento declina y la producción del pozo cae. Si se anticipa que para un pozo se va a necesitar un sistema de levantamiento artificial, será ventajoso instalar el equipo para acelerar la producción a través de la vida del pozo, incrementándose así las ganancias y cubriendo rápidamente los costos de la inversión.

En otros casos puede ser beneficioso instalar múltiples sistemas de levantamiento, o cambiar el sistema de levantamiento durante la vida del pozo cuando se encuentren diferentes condiciones de operación.

El levantamiento de fluidos desde el yacimiento requiere energía. Todos los yacimientos contienen energía en forma de presión en los fluidos mismos y en la roca debido al peso de la columna estratigráfica. La presión puede ser mantenida artificialmente o aumentada por la inyección de gas o agua dentro del yacimiento. Esto es conocido comúnmente como mantenimiento de presión.

Los sistemas de levantamiento artificial se distinguen por que ellos mismos mantienen la presión y adicionan energía a los fluidos producidos en el pozo; esta energía no es suministrada por el yacimiento.

Los siguientes tipos de levantamiento artificiales están comúnmente disponibles hoy:

- ✓ Bombeo mecánico
- ✓ Cavidades progresivas
- ✓ Gas Lift
- ✓ Bombeo hidráulico
- ✓ Bombeo Electrosumergible.

El bombeo mecánico, el electrosumergible y las cavidades progresivas están basados en la acción de bombas, levantando los fluidos a superficie transfiriéndoles energía mecánica.

El bombeo hidráulico entrega energía a los fluidos producidos mezclándolos con un fluido de potencia.

El gas lift adiciona energía al sistema introduciendo en él gas que disminuye el peso de la columna hidrostática, haciendo que el fluido pueda ser levantado.

2.1 BOMBEO MECÁNICO.

Figura 6. Bombeo mecánico.

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

El principio de este sistema es el funcionamiento de una bomba de desplazamiento positivo en fondo que es accionada desde superficie por medio de una sarta de varillas y un sistema reciprocante.

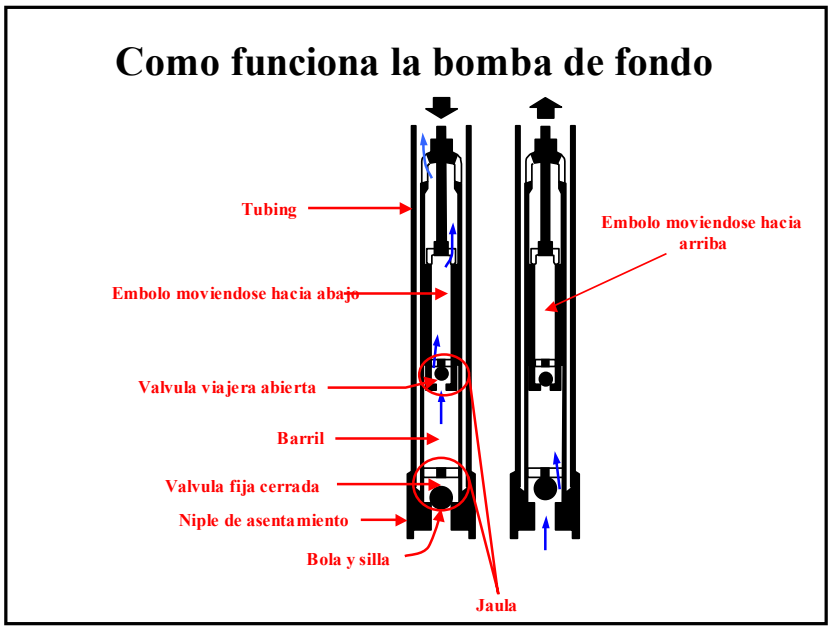
El sistema utiliza una bomba vertical que consiste en un cilindro y un émbolo hueco con una válvula. La bomba va dentro de la sarta de tubería y va conectada como componente final de esta. El sistema se acciona desde superficie mediante un motor que mueve un balancín o un elevador hidráulico.

El ciclo del bombeo puede ser fragmentado de la siguiente manera:

Durante el golpe ascendente del émbolo la válvula viajera esta cerrada. La columna de líquido correspondiente al golpe será levantada a superficie, mientras tanto se alivia el peso del fluido y la presión de la zona productora podrá entonces abrir la válvula fija, permitiendo de esta manera que el barril de la bomba se llene de efluente.

Durante el golpe descendente del émbolo la válvula de émbolo hueco se abre y la válvula fija se cierra, evitando de este modo que el fluido retorne a la zona productora y permitiendo que el émbolo retorne libremente a su punto inicial en la base del barril de la bomba.

Figura 7. Funcionamiento de la bomba de fondo.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

2.1.1 Componentes

- *Motor.* Puede ser eléctrico o de combustión interna, su función es imprimir movimiento a la unidad de bombeo. Su requerimiento de potencia dependerá de la profundidad y de otras características propias del pozo.
- *Estructura.* Comprende la Base de la Unidad, el Poste Maestro y el Balancín.
- *Caja Reductora.* Su función es reducir la alta velocidad y bajo torque del motor a las revoluciones de trabajo y alto torque de la Unidad de Bombeo.
- *Contrapesas.* sirven para balancear o contrarrestar el peso de las varillas más la columna de líquido.
- *Crack.* Recibe el movimiento rotatorio del eje de baja velocidad de la Caja Reductora.
- *Brazos o Bielas.* Transmiten el movimiento del Crank hacia la Barra Escualizadora.
- *Cojinetes.* (Central y Lateral), el primero transmite el movimiento entre entre el Poste Maestro y el Balancín y el segundo transmite el movimiento entre el Balancín y las Bielas a través de la Barra Escualizadora.
- *Cabezal.* Ubicado en uno de los extremos del balancín y mantiene la barra lisa verticalmente por medio de su curvatura que es un segmento de un círculo.
- *Guaya.* Sirve para unir el Cabezal con la Barra Lisa.
- *Aguila.* Es un bloque de hierro que va unido a la guaya y de donde cuelga la barra lisa.
- *Freno.* Sirve para posicionar el balancín en un punto deseado después de quitar el movimiento que le imprime el motor a la Unidad de Bombeo.
- *Barra Lisa.* Se conecta siempre con la parte superior de sarta de varillas y consiste en una barra pulida, la cual hace sello con los empaques de la caja de empaques para que no ocurran escapes de crudo.
- *Caja de Empaques.* Es una conexión que se emboca en la T de Producción y sirve para evitar escapes de crudo por el movimiento ascendente y descendente de la Barra Lisa.

• *T de Producción*. Une la sarta del Tubing, la Caja de Empaques y la Línea de Flujo por donde viaja el crudo hacia la batería de producción.

2.1.2 Tipos de unidades de bombeo. El Instituto Americano del Petróleo (API) identifica, de acuerdo con la geometría y forma de la estructura, tres clases de unidades de bombeo mecánico:

• *Sistema Clase I*. Está conformado por la unidad de bombeo mecánico Convencional. Esta especifica que el punto de soporte del balancín sea central con la conexión de la caja reductora, el contra-balance en un extremo y el cabezal de la sarta de varillas en el otro extremo.

• *Sistema Clase II.* Incluye la unidad Mark II y la Unidad Balanceada por Aire. Esta geometría especifica que el punto de soporte del balancín esté en un extremo y el cabezal en otro extremo. El contrabalance se ubica entre los dos puntos anteriores. El API no especifica equidistancias entre los puntos críticos mencionados. La unidad Mark II fue diseñada para optimizar el comportamiento de la bomba de subsuelo, dando mayor eficiencia al sistema completo. Esta unidad requiere más contrabalanceo debido al grado de desfase en la manivela que varía entre 18 a 28 grados. La unidad Balanceada por Aire, tiene la ventaja, de ser más compacta y menos pesada que las otras geometrías, también se presta para recorridos largos con diseños especiales; la unidad se balancea con cambios de presión del cilindro de aire, se puede proveer mucho contrabalanceo con relativamente pequeños aumentos de presión.

• *La unidad de Bajo Perfil.* Fue diseñada para estar en áreas urbanas o en campos donde el tamaño de una unidad convencional o Mark II es inapropiado y difícil de manejar. Estas unidades surgieron por la necesidad de espacio de las ciudades que crecieron alrededor de los campos petroleros.

2.1.3 Ventajas. Este sistema ofrece la posibilidad de producir el pozo a la máxima capacidad de aporte y no requiere altos valores de presión de entrada a la bomba para tomar fluido. Es un sistema muy conocido por el personal de operadores, usualmente no es costoso. El sistema se acomoda rápidamente a los cambios de volumen y puede operar a altas temperaturas sin problema. Una ventaja importante es que permite realizar un diagnóstico rápido y existe gran variedad de herramientas de lecciones aprendidas

2.1.4 Desventajas. El volumen máximo que puede manejar decrece con la profundidad, este sistema presenta problemas en presencia de gas libre y en ambientes corrosivos, genera reparaciones frecuentes y es difícil su aplicación en pozos desviados.

2.2 BOMBA DE CAVIDADES PROGRESIVAS (PCP)

La PCP es una bomba de desplazamiento positivo y está basada en la invención de Rene Moineau “La Bomba de tornillo Helicoidal”. Este invento se aplica desde 1950 en motores de perforación o taladros. Y se inicia su aplicación en la producción de petróleo como un método de levantamiento artificial a inicios de la década de los 80’s.

2.2.1 Fabricantes. Los principales fabricantes de este tipo de bombas son:

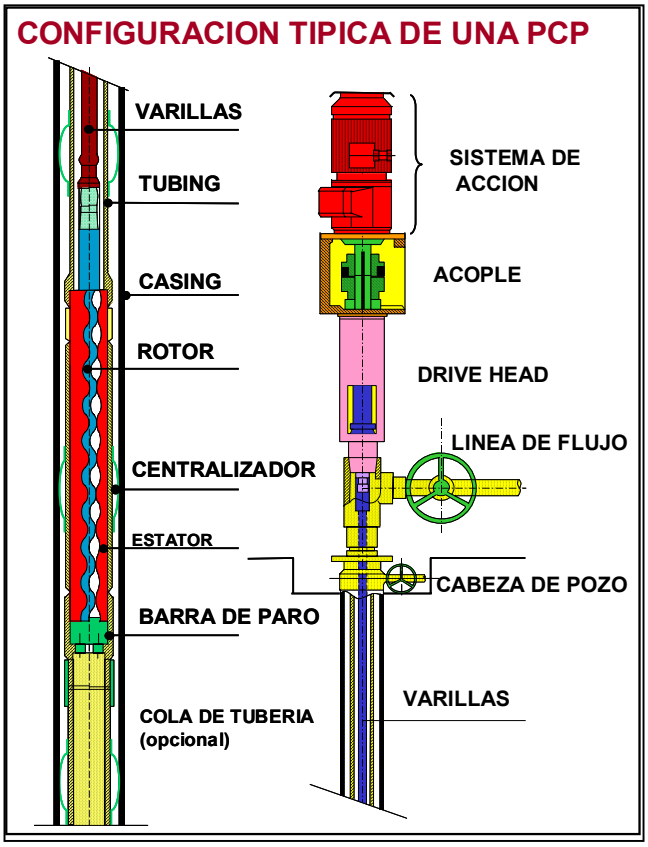
- Weatherford
- Monoflo
- Netzsch (Alemania)
- KUDU/PCM Moineau (Canadá-Francia)
- Robbins & Myers (a Schlumberger Company)
- EMIP – Francia

2.2.2 Principio de Operación. El desplazamiento positivo de la bomba en fondo es aplicado desde superficie a través de una sarta de varillas estándar.

2.2.3 Bomba. La bomba en fondo consiste de dos hélices: el rotor que es una hélice externa sencilla con sección transversal redonda que cuelga y a la vez es accionada por la sarta de varillas. El estator que es una hélice doble que cuelga de la tubería de producción.

2.2.4 Equipo de Superficie. El equipo de superficie consiste del sistema de rotación, del acople y de la cabeza de rotación. Estos componentes están montados directamente sobre el cabezal del pozo.

Figura 8. Configuración tipica de una PCP.

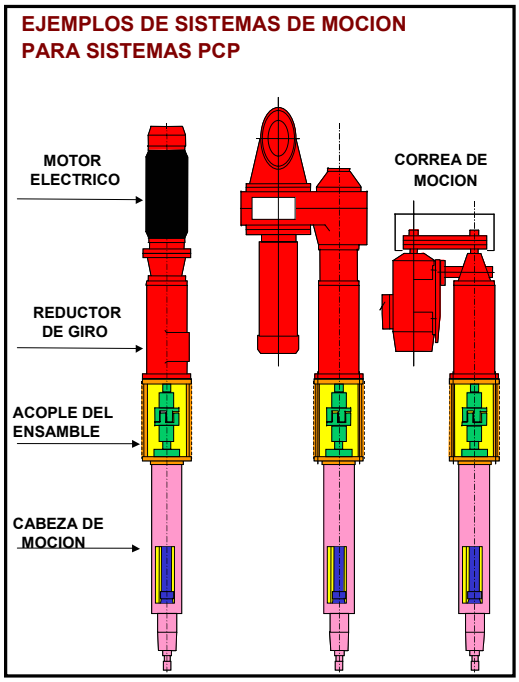


Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

2.2.5 Sistema de rotación de superficie. Este consiste de un motor primario, del reductor de velocidad y de la cabeza de rotación. El motor primario, usualmente un motor eléctrico acciona la sarta de varillas por medio de un reductor de velocidad. Existen varias clases de reductores de velocidad tales como:

- Reductor de giro
- Correa de rotación
- Combinación de correa de rotación y reductor de giro
- Combinación de variador de rotación y reductor de giro

Figura 9. Sistemas de moción para PCP.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

2.2.6 La cabeza de rotación. Está encerrada dentro de una carcaza de acero. La carcaza está integrada con el eje de rotación y con una pareja de cojinetes para soportar las varillas y la cabeza hidráulica, otro juego de cojinetes para asegurar la correcta alineación del eje de rotación y juegos de empaques para

aislar mediante sello la cabeza del pozo de la cabeza de rotación. La sarta que une al eje de rotación con el motor en fondo es una sarta de varillas estándar.

2.2.7 Rotor. Es un tornillo sin fin elaborado en acero inoxidable de características especiales para hacerlo resistente a la abrasión. Su diseño permite el levantamiento del fluido.

2.2.8 Estator. Es un moldeado de precisión de un elastómero el cual está adherido a un tubo de acero "la carcaza de la bomba".

2.2.9 Ventajas. Las principales ventajas de este sistema son:

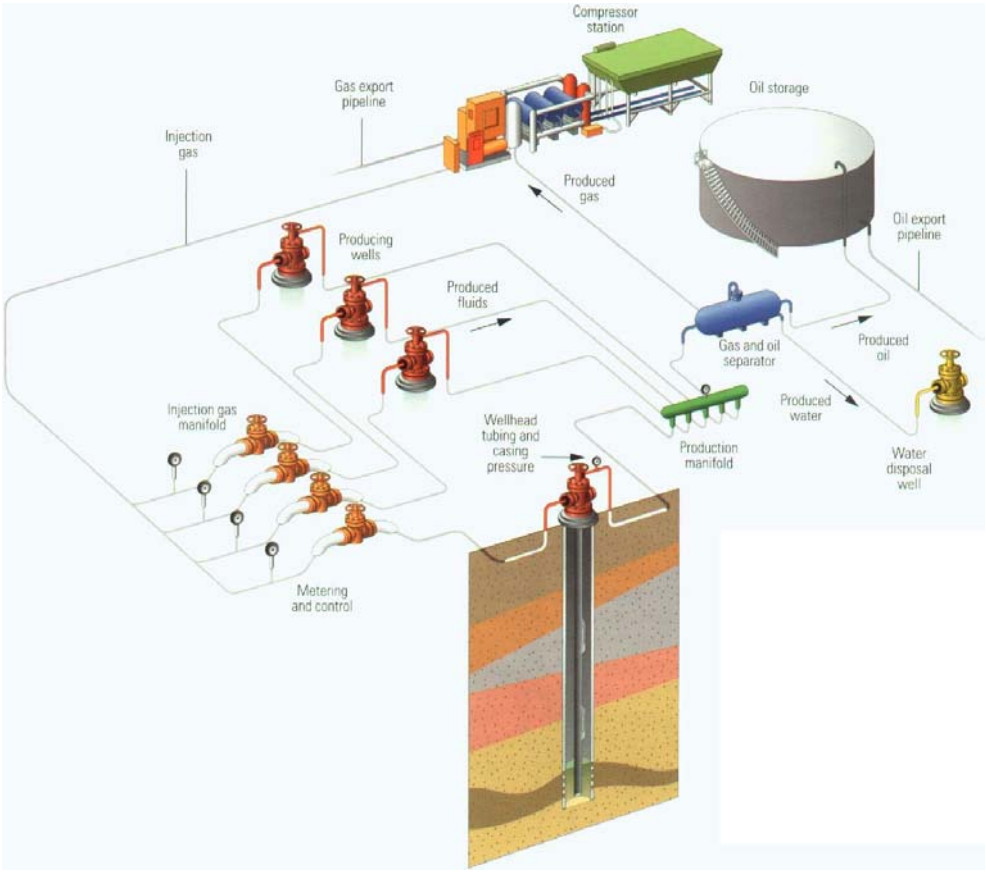
- Puede manejar fluidos de baja y alta viscosidad. Se han producido fluidos de viscosidades hasta de 20,000 cP a 40 °C con este sistema.
- Puede manejar fluidos con arena o sólidos abrasivos.
- Maneja fluidos en dos fases sin presentar bloqueo por gas.
- Fácil reemplazo de la sarta de varillas y económico.
- Más económicos los costos de operación que el bombeo mecánico.
- Bajo perfil en superficie
- Menos vibración menos ruido.
- Con motor en fondo, útil para aplicar en pozos altamente desviados.
- Bajo consumo de potencia eléctrica.

2.2.10 Desventajas. Algunas desventajas de este sistema son:

- Máxima temperatura 250 F.
- Debido al hinchamiento del elastómero no es estable para crudos livianos.
- Sensible a presencia de aromáticos y H_2S.
- Bajos volúmenes de producción.
- Aplicaciones no muy profundas.

2.3 GAS LIFT.

Figura 10. Diagrama sistema gas Lift.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

El sistema Gas Lift es el segundo sistema de levantamiento artificial más comúnmente utilizado en la actualidad. Su uso no es muy común costa afuera debido a las limitaciones de espacio y a los requerimientos de una válvula de seguridad en superficie.

Gas lift es una técnica de producción por levantamiento artificial que se usa para lograr que un pozo que no fluye o que tiene producción insuficiente fluya por medio de la disminución de la contra presión hidrostática entre el fondo y

superficie. Esto se hace inyectando gas en la base de la sarta de producción y su objetivo es aliviar la densidad de la columna de líquido disminuyendo la presión hidrostática. Esta inyección se realiza en etapas desde el tope hasta el fondo por medio de válvulas de gas lift hasta que todo el líquido se remueve y el pozo fluye.

Las ventajas principales del sistema de Gas Lift son que con la presencia de gas en el fluido del yacimiento ayuda a levantar el fluido, sin necesidad de bombas. Este es método de alta producción en cuanto a volumen. El equipo puede centralizarse al máximo. Se puede manejar la presencia de arena o sólidos. La válvula se puede remover por medio de wireline. El sistema posee pocas partes mecánicas en fondo y requiere pocos trabajos de mantenimiento. Además es una excelente aplicación en pozos desviados.

Aun así tiene ciertas desventajas, como que no se puede lograr la máxima productividad del pozo (pumping off). La mínima presión de producción en fondo se hace mayor en función de la profundidad y el volumen que se desee obtener, se debe contar con una fuente de gas, la ubicación y selección del equipo de superficie puede llegar a ser muy complejo y se requiere un compresor; en caso que se cuente con gas corrosivo este debe ser tratado previamente a la inyección para prevenir daños en la tubería.

Se puede hacer una clasificación de este sistema de levantamiento de acuerdo a su método de inyección, su Circuito de inyección en superficie y al tipo de completamiento del pozo al que se aplica.

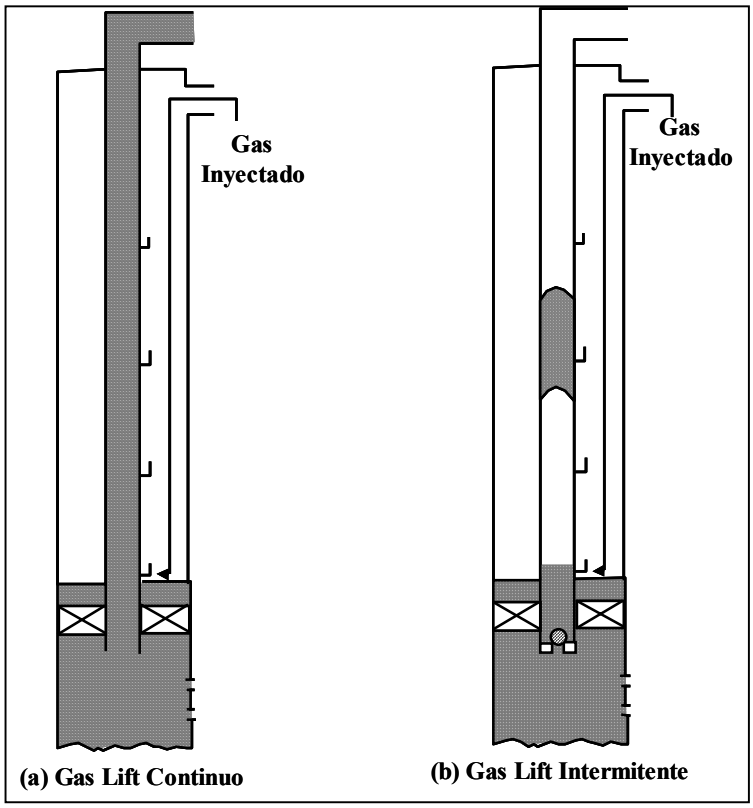
2.3.1 Método de inyección. El gas se puede inyectar de forma continua o intermitente.

• *Gas Lift Continuo.* Se inyecta gas natural a una presión y tasa dada en la base de la sarta de producción. Esto hace que la densidad del fluido en la tubería se

aligere y permita que la mezcla de los dos fluidos alcance la superficie. Logrando así, que el pozo fluya.

• *Gas Lift Intermitente*. Se inyecta un volumen de gas presurizado a una tasa alta en la parte más baja de la sarta de producción. Esto despeja hacia superficie el volumen de líquido que éste contiene. Como resultado, la presión en la zona productora se reduce y se genera el flujo. El líquido acumulado sobre el punto de inyección será vaciado en la misma forma.

Figura 11. Gas lift continuo e intermitente.



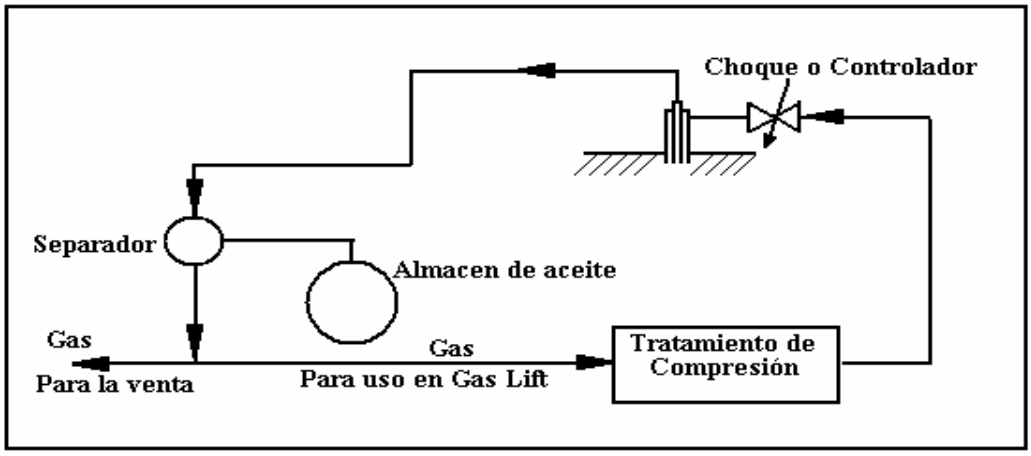
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

2.3.2 Circuito de inyección en superficie. Generalmente el gas utilizado viene del gas producido del yacimiento (GOR) o de pozos de gas que están disponibles y que están cerca. Por tanto se puede contemplar dos circuitos de inyección:

• *Circuito cerrado*. Este significa que el gas que será usado es recobrado del separador. Después de experimentar los procesos pertinentes (Extracción de gasolina, deshidratación, des-endulzamiento, etc), éste es comprimido por una serie de compresores y reinyectado a los pozos.

• *Circuito abierto.* Este tipo de circuito involucra el gas procesado de un yacimiento de gas y se quema o se vende una vez se utilice.
Hay pozos que pueden producir por sí mismos bajo el efecto de Gas Lift. El aceite del yacimiento es levantado a superficie mediante el gas de formación del mismo yacimiento.

Figura 12. Circuito cerrado. Gas lift.

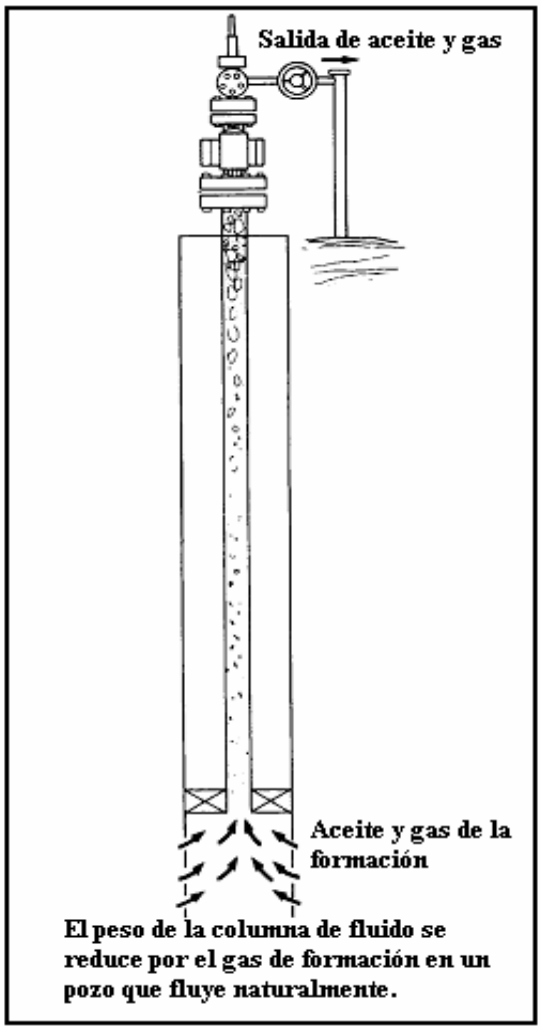


Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

2.3.3 Tipo de completamiento. Gas Lift se puede usar con completamientos sencillos o múltiples y la producción del pozo puede ser:

• *Directa*. Inyección a través del revestimiento, producción a través de la sarta de producción

Figura 13. Pozo que fluye naturalmente bajo el efecto de gas lift.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

• *Inversa.* Inyección por la sarta de producción con producción a través del revestimiento.

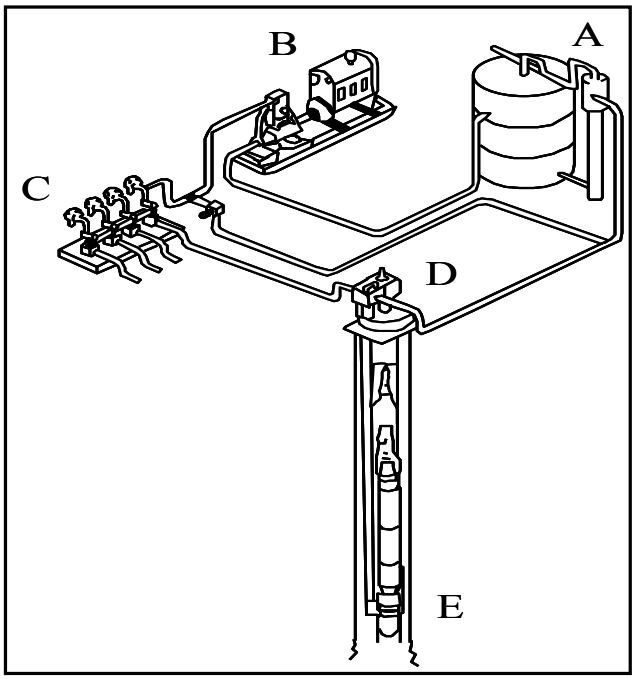
2.4 BOMBEO HIDRÁULICO

Los sistemas de bombeo hidráulico transmiten potencia al fondo del pozo por medio de la presurización de un fluido de potencia en la tubería que va hacia el wellbore.

2.4.1 Componentes. Los componentes principales del sistema de bombeo hidráulico son:

A: Tanque para el fluido de potencia.
B: Unidad Bombeo del fluido de potencia en superficie.
C: Sistema de recolección.
D: Válvula de control en cabeza.
E: Motor y bomba de fondo.

Figura 14. Componentes de un sistema de bombeo hidráulico.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

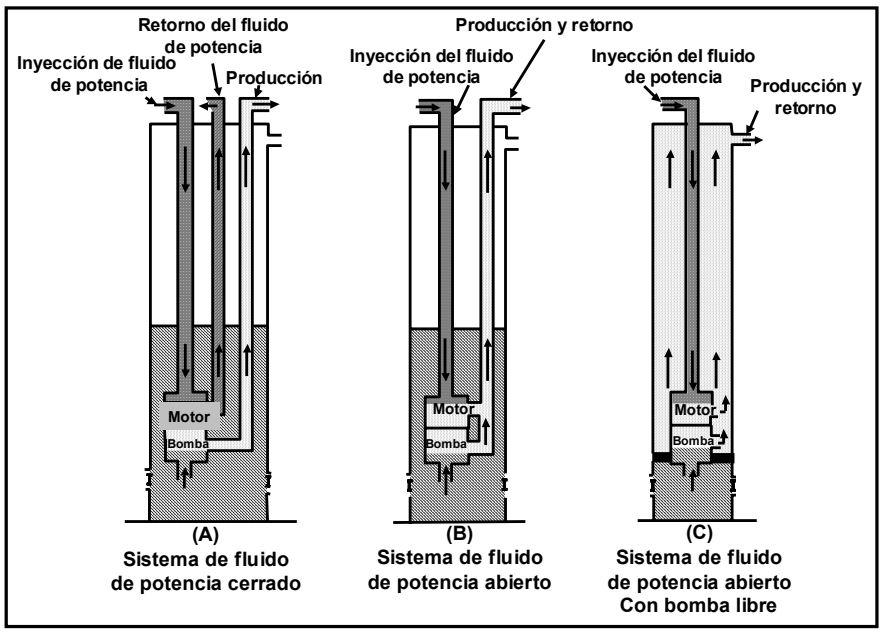
2.4.2 Tipos de Sistemas de Bombeo Hidráulico

• *Bombeo hidráulico tipo pistón.* La bomba de pistón es una bomba de desplazamiento positivo y consiste de dos secciones, el motor y la bomba. El motor es accionado por medio de un fluido de potencia desde superficie.

Existen tres configuraciones del sistema de bombeo hidráulico tipo pistón:

- ✓ Sistema de fluido de potencia cerrado
- ✓ Sistema de fluido de potencia abierto
- ✓ Sistema de fluido de potencia abierto con bomba libre.

Figura 15. Configuraciones del sistema de bombeo hidraulico tipo pistón.



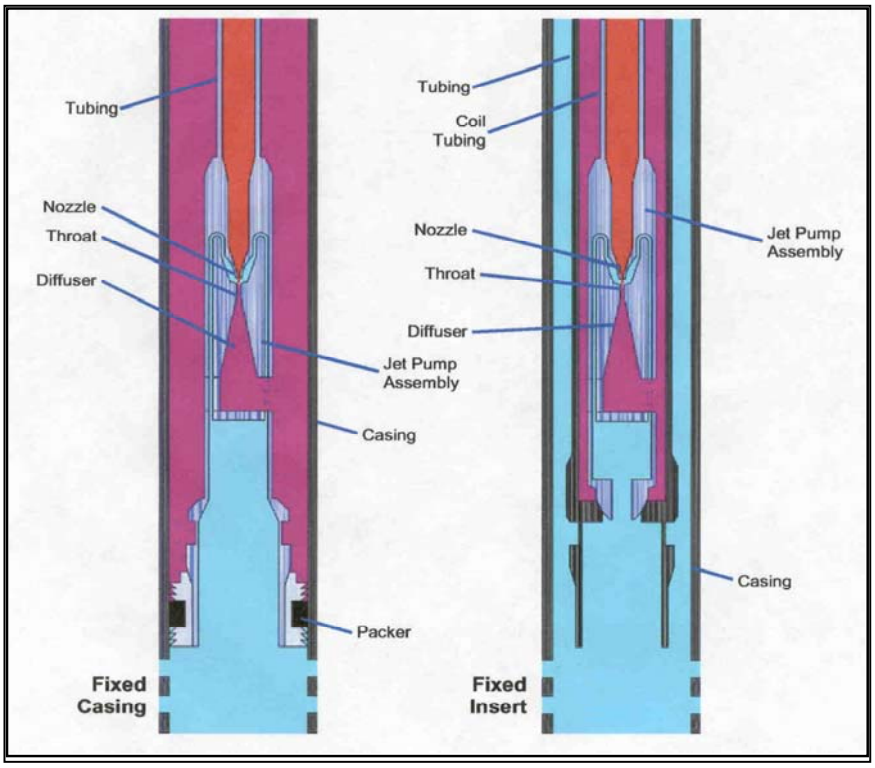
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

• *Bombeo Hidráulico Tipo Jet*. En el bombeo tipo Jet el fluido de potencia entra a alta velocidad para mezclarse con el fluido del pozo y levantarlo hacia la superficie para luego ser separados. Hay dos clases de bomba tipo Jet,

✓ *Fija al revestimiento***.** Este tipo de bomba se fija al revestimiento mediante un empaque.

✓ *Fija a un inserto***.** Este tipo de bomba se fija a un inserto que hace parte del equipo de fondo.

Figura 16. Tipos de bombas en el bombeo hidraulico tipo JET.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

2.5 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

Este es el tipo de levantamiento en el cual se va a centrar este trabajo. A continuación se va a desarrollar el tema de una manera más amplia.

3. CONCEPTOS DE ELECTRICIDAD

3.1 DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

La mayoría de estaciones usan la energía hidráulica de una cabeza de agua, la energía del calor producida por el uranio o la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo, o el gas natural, para producir vapor y así manejar una turbina acoplada a un generador.

El generador AC es el más importante medio para la producción de electricidad. Todos los generadores eléctricos dependen de la acción de una bobina a través de un campo magnético o viceversa para su operación. Si hay movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético, se generará un voltaje. Por consiguiente, el generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica la cual es luego direccionada al consumidor por el sistema de transmisión y distribución. La corriente alterna es más adecuada para transmisión de larga distancia debido a que puede ser fácilmente generada de bajos a moderadamente altos voltajes. Puede entonces elevar el voltaje a valores muy altos adecuados para una transmisión eficiente, y después el voltaje puede ser reducido a un valor adecuado para uso general por medio de equipos conocidos como transformadores. Entre mayor el voltaje o presión, menor el alambre requerido para llevar una cantidad dada de energía eléctrica, de aquí, la ventaja de la transmisión de alto voltaje. Para mejorar el entendimiento de los principios de la generación y el sistema de distribución de la energía eléctrica a continuación se revisaran algunos fundamentos básicos de electricidad.

3.2 VOLTAJE (V)

Debido a que los electrones están normalmente distribuidos equitativamente en una sustancia, se requiere una fuerza o presión llamada fuerza electromotriz para desprenderlos de los átomos y hacerlos fluir en una dirección definida. Esta fuerza es frecuentemente llamada también potencial eléctrico o voltaje. La unidad para la medición de esta fuerza electromotriz es el voltio.

3.3 CORRIENTE (I)

Cuando un potencial o voltaje de suficiente fuerza es aplicado a una sustancia, causa el flujo de electrones. Este flujo de electrones es llamado una corriente eléctrica. La tasa de este flujo de corriente es medida en amperios. Un amperio es la tasa de flujo de corriente eléctrica representado por el movimiento de una cantidad de electrones por segundo.

3.4 RESISTENCIA (R)

La resistencia puede ser comparada con la fricción encontrada por un flujo de agua a través de una tubería. Una tubería recta, lisa por dentro, conduce el agua con poca pérdida de presión. Si la tubería es rugosa dentro y tiene muchas curvas la pérdida de presión será alta y la tasa de flujo será muy reducida. Similarmente, un material que tenga baja resistencia permite a la electricidad fluir con pequeñas pérdidas de voltaje; un material con alta resistencia causa una correspondiente

gran caída en el voltaje. La energía usada para vencer la resistencia es convertida a calor.

3.5 LEY DE OHM

El voltaje requerido para hacer fluir una corriente depende de la resistencia del circuito. Un voltaje de un voltio hará fluir a un amperio a través de una resistencia de un Ohm. Esta relaciones conocida como la ley de Ohm.

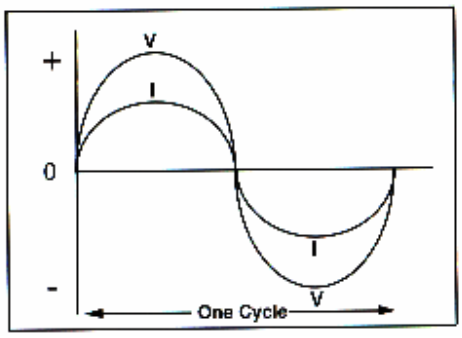
$$I = \frac{V}{R} \quad \text{.....Ecuación 3.1}$$

Donde: I = Corriente en amperios
V = Voltaje en Voltios
R = Resistencia en Ohms

3.6 ONDA SENOSOIDAL DE CORRIENTE ALTERNA

En un sistema AC de una sola fase, el voltaje y la corriente seguirán más o menos una onda senosoidal. Ellos incrementan de cero a un máximo en una dirección, luego disminuyen a cero, incrementan otra vez a un máximo pero en la dirección opuesta y disminuyen nuevamente a cero, completando con esto un ciclo de dos alternaciones y 360°.

Figura 17. Onda senosoidal de AC.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

3.7 POTENCIA (P)

La potencia está definida como la energía necesaria para hacer un trabajo. En términos eléctricos, representa la energía necesaria para mantener un flujo de corriente. La potencia eléctrica se mide en Vatios, 746 equivalen a un caballo de fuerza. Un vatio es una unidad muy pequeña de potencia; por esto cuando se este hablando de la potencia requerida por motores, el termino kilovatio (KW) es usado siendo un KW equivalente a 1000 vatios. Esta potencia verdadera es la cantidad de potencia realmente consumida en un circuito. En un circuito puramente resistivo, cuando el voltaje y la corriente están en fase, la potencia puede ser definida como:

$$P = V * I \quad \text{……Ecuación 3.2}$$

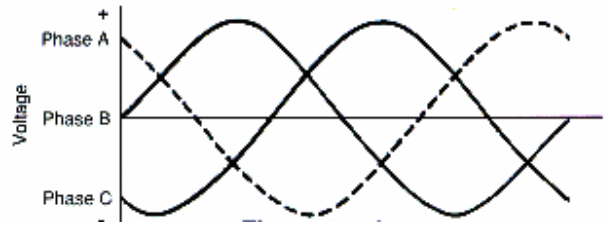
Donde: P = Potencia en vatios

V = Voltaje en voltios

I = Corriente en amperios

Un sistema de distribución de electricidad AC trifásico, como el nombre lo indica, tiene tres sistemas de electricidad AC de una sola fase. Estos sistemas de una sola fase están espaciados de tal forma que el voltaje generado en cualquiera de las fases se ha desplazado 120° de las otras dos (figura 18). La potencia total enviada por un sistema de tres fases balanceado es igual a tres veces la potencia enviada por cada fase.

Figura 18. Ondas senosoidales para sistema trifásico AC.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Para obtener la corriente enviada a un motor de corriente alterna, no se puede simplemente multiplicar los amperios efectivos por los voltios efectivos. Si el circuito contiene inductancia y/o capacitancia y los circuitos del motor siempre la contienen el producto de la corriente efectiva y el voltaje efectivo será mayor que la potencia verdadera. Esta potencia aparente es medida en voltio-amperios o más frecuentemente en una unidad mil veces mayor, los kilovoltio-amperio, usualmente abreviada KVA.

3.8 FRECUENCIA (HERTZ)

Cuando un generador rota 360°, una revolución completa, el voltaje generado completó un ciclo. Si el generador rota a una velocidad de 60 revoluciones por

segundo, el voltaje generado completara 60 ciclos en un segundo. Se puede decir que el voltaje generado tiene una frecuencia de 60 ciclos o 60 Hertz.

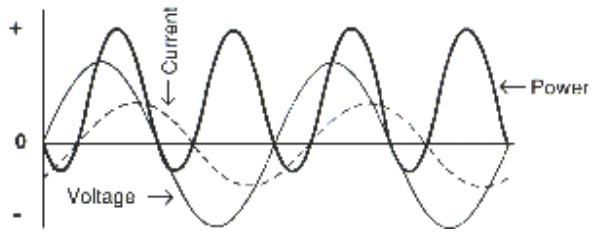
La relación entre frecuencia generada (F) expresada en Hertz (ciclos por segundos) y la velocidad del rotor (N), expresada en rpm, y el numero de polos (P) en el motor, es dado en la siguiente formula:

$$F = \frac{NP}{120} \text{.....Ecuación 3.3}$$

3.9 INDUCTANCIA (L)

Muchos circuitos AC contienen bobinas, transformadores y otros aparatos eléctricos que producen efectos magnéticos. Cuando la corriente aumenta, el circuito almacena energía en el campo magnético. Cuando la corriente disminuye el circuito abandona esta energía del campo magnético. Por consiguiente estos efectos magnéticos reaccionan sobre la corriente. Ellos retardan la corriente y causan que esté detrás de la onda de voltaje; en la figura 19 se puede ver que el voltaje ha alcanzado su máximo y comenzó a caer algún tiempo antes de que la corriente alcance su máximo.

Figura 19. Efectos de la inductancia sobre la corriente



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Alguna corriente estará fluyendo en el circuito en el instante en que el voltaje es igual a cero. Esta reacción magnética es llamada inductancia y es medida en Henrys.

3.10 CAPACITANCIA (C)

Otra clase de influencia sobre la corriente alterna es causada por la presencia en el circuito de platos alternados de material conductivo separados por un aislante. Este aparato es comúnmente conocido como un capacitor. Un capacitor toma energía del circuito para cargar sus platos y luego retorna esa energía al circuito cuando la carga es removida. Esta habilidad para acumular una carga al circuito y para devolverla al mismo es llamada capacitancia. Esta reacción es medida en Faradays. La capacitancia tiende a contrarrestar la inductancia en un circuito y es útil para superar el retardo inductivo en la corriente inherente en la mayoría de motores de corriente alterna.

3.11 IMPEDANCIA (Z)

En un circuito AC la corriente está afectada por la resistencia, la inductancia, y la capacitancia. La combinación de dos o de todos los tres de estos efectos es conocida como impedancia de un circuito. La impedancia de un circuito es la oposición total a un flujo de corriente. La unidad de medida de esta impedancia es el Ohm. La unidad para la medición de muy bajas impedancias es el microOhm y es igual a una millonésima parte de un Ohm. La unidad para impedancias muy altas es el Mega Ohm que es igual a un millón de Ohms.

3.12 CONDUCTORES

Un conductor es una sustancia que permite a los electrones fluir libremente a través de ella. Entre algunos de los materiales en donde los electrones fluyen mas fácilmente están: la plata, el oro, el cobre, el aluminio, el hierro y otros metales. El alambre y los cables son las formas más comunes de conductores.

3.13 AISLANTES

Un aislante es una sustancia a través de la cual los electrones tienen mucha dificultad para viajar. Tales materiales como el vidrio, ciertos plásticos, fibra y papel seco no permiten que casi ningún electrón fluya a través de ellos. Estos materiales son llamados aislantes, no conductores o dieléctricos. Cuando un aislante es contínuo como por ejemplo alrededor de un alambre es comúnmente llamado aislamiento.

3.14 FACTOR DE POTENCIA (PF).

El factor de potencia es la razón entre la potencia verdadera (KW) y la potencia aparente (KVA); el factor de potencia puede ser definido como:

$$PF = \frac{Potencia\ Verdadera}{Potencia\ Aparente} = \frac{Vatios}{Va} = \frac{KW}{KVA}$$ .....Ecuación 3.4

El Kilovatio de entrada a cualquier máquina puede ser encontrado multiplicando los KVA de entrada por el factor de potencia:

$$KW = KVA * PF \quad \text{……Ecuación 3.5}$$

El factor de potencia es igual a uno si el voltaje y la corriente alcanzan sus respectivos valores máximos simultáneamente. Sin embargo, en la mayoría de sistemas de corriente alterna el voltaje alcanza su máximo valor en una dirección dada antes de que la corriente alcance su máximo valor, entonces la corriente estará retardada con respecto al voltaje. Este retardo puede ser medido en grados. Este retardamiento de corriente es causado por aparatos como transformadores, motores de inducción, etc.

3.15 TRANSFORMADORES

Un transformador es un aparato por el cuál el voltaje de un sistema de corriente alterna puede ser cambiado. Este consta de un núcleo de hierro rodeado por bobinas de alambre aislado. Usualmente el núcleo y las bobinas están inmersos en aceite, el cual sirve como un aislante y ayuda a refrescar el transformador. Un transformador simple consta de dos devanados muy tensionados acoplados, usualmente con un núcleo de hierro, pero eléctricamente aislados entre ellos. El devanado en el cual una fuente de voltaje AC es aplicado, es llamado el primario. Este genera un campo magnético el cual corta a través de las vueltas del otro devanado, llamado el secundario y genera el voltaje en él. Los devanados no están físicamente conectados entre sí; sin embargo, ellos están magnéticamente ligados. De esta forma, un transformador transfiere potencia eléctrica de una bobina a otra por medio de un campo magnético alternante. Asumiendo que todas las líneas magnéticas de fuerza del primario cortan a través de todas las vueltas

del secundario, el voltaje inducido en el secundario (Vs) dependerá en la razón del número de vueltas en el secundario (Ns) al número de vueltas en el primario (Np). Esto es matemáticamente expresado como:

$$Vs = \frac{Ns}{Np} * Vp \quad \text{.....Ecuación 3.6}$$

El voltaje cambia en proporción exacta al número de vueltas en cada devanado. Por ejemplo, si el devanado de alto voltaje tiene 1000 vueltas y es conectado a un circuito de 4160 voltios, un devanado de bajo voltaje de 100 vueltas proveerá 416 voltios.

En un autotransformador hay solamente un devanado, parte de el siendo para voltaje bajo y todo estando conectado en el circuito de alto voltaje. En este transformador el circuito de alto voltaje no está aislado del de bajo voltaje.

Figura 20. Transformadores

a) Transformador simple b) Auto Transformador

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Un transformador no genera potencia eléctrica; simplemente transfiere potencia eléctrica de un devanado a otro por inducción magnética. Aunque los transformadores no son 100% eficientes están muy cercanos a esto.

Debido a que la potencia es igual al voltaje por la corriente (VI), si Vp Ip representa la potencia primaria y Vs Is representa la potencia secundaria, entonces la

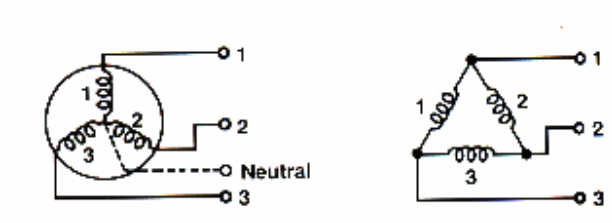
potencia primaria es igual a la potencia secundaria. Expresando estas afirmaciones en forma de ecuación para un transformador 100% eficiente, tenemos:

$$V_p I_p = V_s I_s \quad \text{.....Ecuación 3.7}$$

Los dos métodos más importantes de conectar aparatos AC trifásicos, particularmente generadores y transformadores, son por conexiones Y y Delta. Estas conexiones tomaron sus nombres debido a que ellas se asemejan a la letra común “Y” y la letra griega delta (Δ), respectivamente. La figura 21 ilustra los devanados en conexiones Y y Δ.

La corriente alterna trifásica es producida por generadores que tienen tres devanados. Como se mencionó previamente estos devanados ocupan posiciones tales que el voltaje producido en cada devanado está desplazado 120° eléctricos de los voltajes producidos por los otros dos devanados. Los grados eléctricos difieren de nuestro usual concepto de grados. Un generador de cuatro polos por ejemplo, producirá dos ciclos ó 720 grados eléctricos, para una sola revolución mecánica (360 grados) de su rotor.

Figura 21. Devanados en conexiones Y y Delta



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Para conexiones delta, el voltaje de la línea es igual al voltaje producido en cualquiera de los tres devanados, asumiendo que el sistema está sin cargas ó que la carga está igualmente distribuida entre las tres fases. Para una conexión Y, el voltaje de la línea es mayor que el voltaje producido en un devanado de 1,732 veces. Este factor es derivado vectorialmente adicionando los voltajes producidos en los tres devanados. En un sistema balanceado, la corriente en un sistema Y es igual a la corriente en cada devanado. En el sistema delta, sin embargo, la corriente de la línea es 1.732 veces la corriente en cada devanado de un sistema balanceado.

Un transformador trifásico puede ser conectado en Y o en configuración delta. La conexión Y envía más voltaje y menos corriente. Una conexión delta para transformadores tiene la importante ventaja que la potencia de tres fases puede ser enviada usando solamente dos transformadores, aunque sacrificando considerablemente la capacidad. Los transformadores conectados en lo que es llamado un delta abierto, pueden enviar solamente 57.7% de la potencia de tres transformadores conectados en un delta cerrado.

La conexión Y produce un voltaje mayor que la conexión delta, lo cual es algunas veces una ventaja considerable.

3.16 MOTORES ELÉCTRICOS

Los motores eléctricos usados en operaciones de bombas electrosumergibles son normalmente de dos polos, 3 fases, jaula de ardilla, de tipo inducción. Estos motores trabajan a algo menos de 3600 rpm en sistemas de 60 Hertz. El voltaje de diseño y operación de estos motores puede ser tan bajo como 230 voltios ó tan alto como 5000 voltios. Los requerimientos de amperaje pueden ser de 12 a 200

amperios. Los motores de tres fases tienen tres devanados separados, uno para cada fase, distribuidos uniformemente alrededor de una circunferencia interior de una pila cilíndrica de láminas de acero. Los devanados y las laminaciones apiladas son conocidos como el ESTATOR.

Dentro de la circunferencia interna del estator está localizado lo que es llamado un ROTOR. El rotor es también hecho de una pila cilíndrica de láminas de acero con un espacio libre mecánico entre el diametro externo del rotor y el diametro interno del estator. Este espacio libre es conocido como la brecha de aire. La brecha de aire es requerida para prevenir frotamiento entre los dos miembros; esta brecha está llena de aceite para lubricar los cojinetes y remover el calor que es generado. Esta brecha de aire es optimizada para asegurar un intercambio entre la fricción y la pérdida de fluido en la brecha de aire y la potencia requerida para manejar la potencia magnética a través de la brecha de aire al rotor.

Los devanados del estator están conectados a una fuente de voltaje trifásica alterna la cual causa una corriente de tres fases en el estator produciendo un campo magnético senosoidal en la brecha de aire. El campo magnético rotante en la brecha de aire causa que una corriente fluya en las barras del rotor, lo cual resulta en un torque enviado por el rotor y de este modo realizando una rotación. Para que la corriente esté fluyendo en el rotor, es necesario tener movimiento relativo entre el campo magnético transmitido en la brecha de aire y el rotor. La velocidad transmitida del campo magnético en la brecha de aire está dada por la expresión:

$$N = \frac{120 * f}{P} \quad \text{.....Ecuación 3.8}$$

Donde: N = Número de revoluciones transmitidas por minuto

F = Frecuencia

P = Número de polos en el motor

Los motores de inducción de jaula de ardilla son unos de los más simples en construcción y los más confiables, principalmente debido a que no hay ninguna conexión eléctrica para el rotor. Además de ser uno de los más confiables es también uno de los motores más eficientes. Todos los motores de inducción de jaula de ardilla tienen nombre de placa, el cual, como un mínimo indica sus HP estimados, voltaje estimado y corriente estimada.

El principal factor en la determinación de la clasificación del motor es su temperatura de operación. La temperatura de operación es determinada por las pérdidas del motor y por que tan efectivo es el fluído que pasa alrededor de la superficie externa del motor en remover el calor, como también la temperatura de fondo. Algunas características para tener en cuenta son:

✓ *Voltaje de placa*. Es el voltaje que aparece en los terminales del motor para generar los HP estimados. Debe ser tenida en cuenta una tolerancia para contrarrestar la caída de voltaje del cable y para determinar el voltaje apropiado de superficie. Un motor operando a voltaje de placa para su carga estimada total, estará operando a una corriente mínima para la carga estimada, la cual corresponde a la eficiencia máxima del motor, también como las pérdidas en el cable mínimas. En otras palabras, maximizando la eficiencia del sistema.

✓ *Corriente de placa.* Es la corriente que el motor demandará cuando opera a los HP y al voltaje de placa. Si la corriente es menor que la corriente de placa significa que el motor no está totalmente cargado. De otra forma, si la corriente excede la corriente de placa, el motor está sobrecargado o el voltaje de la terminal es incorrecto, ó ambas. Sin embargo, cuando el sistema es primero energizado no es inusual para el motor llevar corriente que exceda la corriente de placa, como particularmente en casos donde se produce arena. En este caso, es recomendado que el sistema sea dejado energizado de 2 a 3 horas y si las condiciones sobre

corriente todavía persisten, el fabricante deberá ser contactado para determinar si es aconsejable la operación continua.

✓ *Torque estimado del motor.* Es el valor de torque que el motor producirá cuando esté totalmente cargado a su velocidad estimada. La relación de torque con otras variables se presenta a continuación:

$$\tau = \frac{HP * 5.252}{N} \quad \text{……Ecuación 3.9}$$

Donde: τ = Torque del motor (lb*ft)
HP = Caballos de fuerza
N = Velocidad estimada del motor (rpm)

✓ *Eficiencia del motor.* Es la relación de la potencia de salida con la potencia de entrada y es usualmente expresada como un porcentaje. Para calcular la potencia de entrada y de salida en el motor, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$HPsalida = HP = \frac{N * I}{5.252} \quad \text{…….Ecuación 3.10}$$

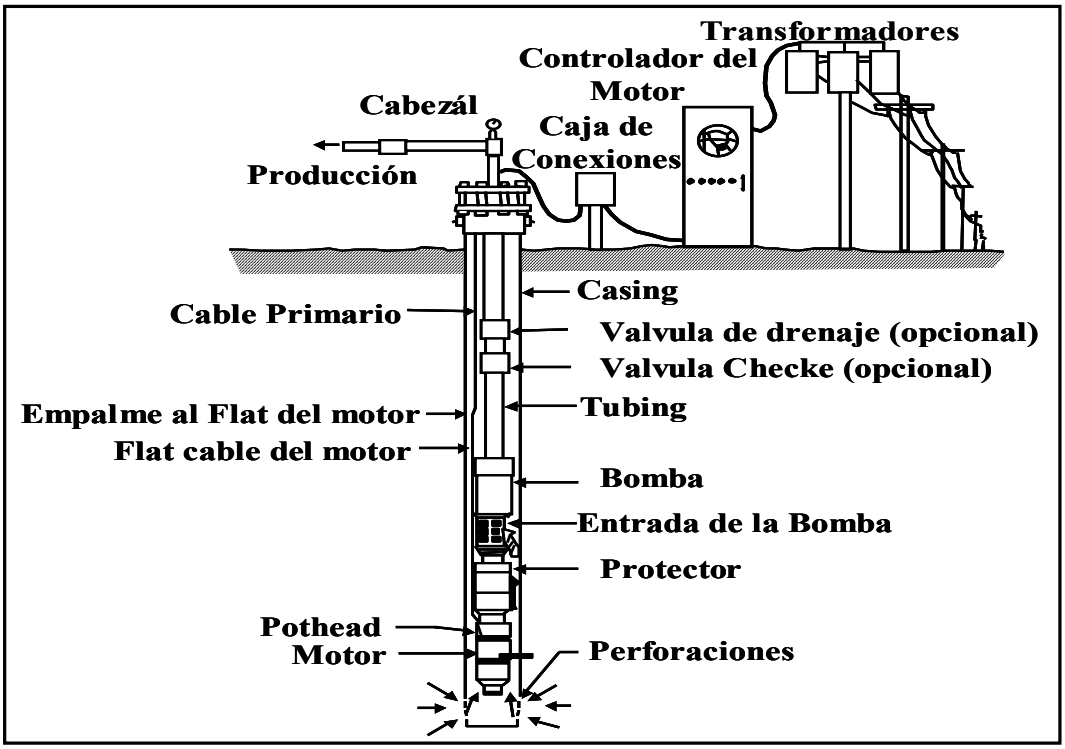
$$HPentrada = \frac{1.732 * V * I * \cos\varphi}{746} \quad \text{……Ecuación 3.11}$$

Donde: V = Voltaje en las terminales del motor
I = Corriente de la línea
Cos φ = Factor de potencia del motor

La eficiencia de los motores electrosumergibles está entre 80 a más de 90% al voltaje y la carga estimada. La eficiencia del motor variará con la carga.

4. COMPONENTES DEL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

Figura 22. Componentes del sistema Electrosumergible.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

En 1930 Armais Arutunoff, el inventor del motor sumergible, fundó Reda, la compañia lider en levantamiento artificial Electrosumergible. Hoy en día, Reda es parte de la familia Schlumberger, quien ha seguido con la tradición y la excelente labor realizada por el principal proveedor mundial de sistemas de bombeo electrosumergible para bombeo de agua, aceite y aplicaciones industriales.

Existen más de 15,000 instalaciones de sistemas de bombeo electrosumergible en más de 100 países. Estos sistemas en total levantan 1 de cada 12 barriles de petróleo producido en el mundo.

Los equipos para bombeo electrosumergible cubren un rango de revestimientos tan pequeños como 4 1/2 pulgadas con tasas de producción de 100 BOD hasta 100.000 BPD, en pozos con revestimiento de 13 3/8 pulgadas. Dependiendo de las condiciones de la aplicación, se cuenta con sistemas de bombeo para temperaturas de fondo (BHT) desde 50 ºF hasta 500 ºF, además de sistemas resistentes a la abrasión.

Las potencias disponibles de los motores en las diferentes series van desde 7.5 Hp hasta 1.170 Hp a 60 Hz.

Los componentes del sistema de bombeo electrosumergible se pueden combinar de diferentes formas para satisfacer las necesidades específicas en ciertas aplicaciones especiales, lo que hace que este tipo de levantamiento sea muy flexible.

El esquema general del equipo electrosumergible puede ser dividido en dos grandes grupos, a saber:

- Equipo de superficie.
- Equipo de fondo.

A continuacion se van a desarrollar cada uno de estos grupos, para conocer teoría básica de los equipos que los conforman.

4.1 EQUIPO DE SUPERFICIE

Lo conforman los equipos que suministran la potencia eléctrica necesaria para operar el equipo de fondo de acuerdo a los parámetros de diseño previamente establecidos. Entre ellos encontramos:

4.1.1 Generador de potencia eléctrica. Equipo que genera la potencia eléctrica necesaria para la operación del equipo de fondo. Generalmente en los primeros años de operación de los campos se utilizan moto-generadores. Posteriormente, se mantiene la mitad de la potencia con generación propia y la otra parte utilizando la producción de energía a nivel Nacional "ISA".

Figura 23. Generador eléctrico.

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

4.1.2 Transformador reductor (SDT). Se encarga de reducir el voltaje de la línea de alta tensión al voltaje requerido en la entrada del variador de velocidad o del switchboard de voltaje constante (480 V.). En el caso que se tenga un generador no es necesario el transformador reductor SDT.

Figura 24. Tranformador.

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

4.1.3 Variador o controlador de frecuencia (VSD).

Figura 25. Variador de frecuencia.

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Es el equipo encargado de controlar la frecuencia de trabajo del motor de la bomba. Su funcionamiento permite operar las bombas a diferentes frecuencias. Recibe corriente alterna de 480 V de forma senosoidal y la convierte a corriente continua (para alimentación del sistema de control y cambio de frecuencias), posteriormente es convertida nuevamente a corrientes alternas de salida rectificadas "sin picos". De esta manera, de acuerdo a las condiciones de operación del pozo y sin necesidad de sacar el equipo de fondo es posible ajustar las mejores condiciones de superficie, (corriente, frecuencia, amperaje) que generen el desempeño óptimo del equipo de subsuelo.

La capacidad del variador ó controlador viene dada en KVA (Relación KiloVoltio-Amperio), indicando la relación máxima que soporta cada equipo.

4.1.3 Transformador elevador (SUT). Se encarga de incrementar el voltaje que sale del controlador de frecuencia (VSD) al voltaje nominal requerido por el motor, para que opere eficientemente.

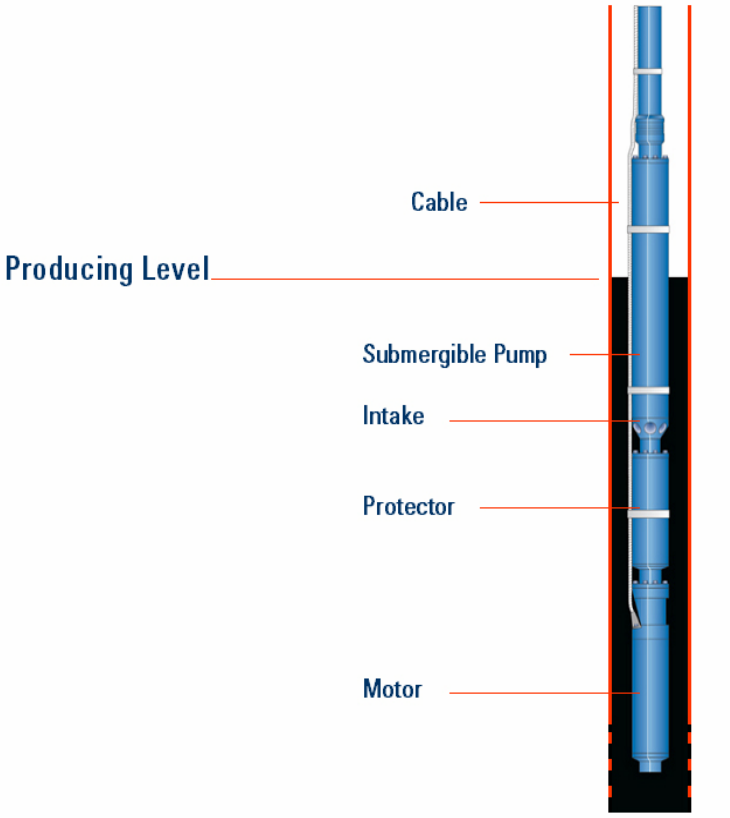
4.1.4 Caja de conexiones. Es una caja que se instala cerca al cabezal del pozo y en la cual se une el cable de potencia que suministra la energía al motor con el equipo de superficie. Su principal función es ventear cualquier migración de gas proveniente del pozo a través de la chaqueta de caucho del cable y asi evitar posibles explosiones.

4.2 EQUIPO DE FONDO

Los componentes básicos de fondo de un Sistema de Bombeo Electro sumergible son: motor, protector, sección de entrada a la bomba, bomba, cable de conexión del motor (flat cable extension) y cable de potencia.

Entre los elementos complementarios del sistema están el separador de gas, manejador avanzado de gas AGH y la unidad que registra la presión y temperatura (Surveyor, Phoenix, Pump Watcher). Algunos de los accesorios comúnmente usados son válvulas cheque y bleeder, centralizadores, protectores de cable, herramienta en "Y", empaquetaduras, conectores eléctricos y sistemas de inyección de químicos.

Figura 26. Instalación tipica BES. Equipo de fondo.



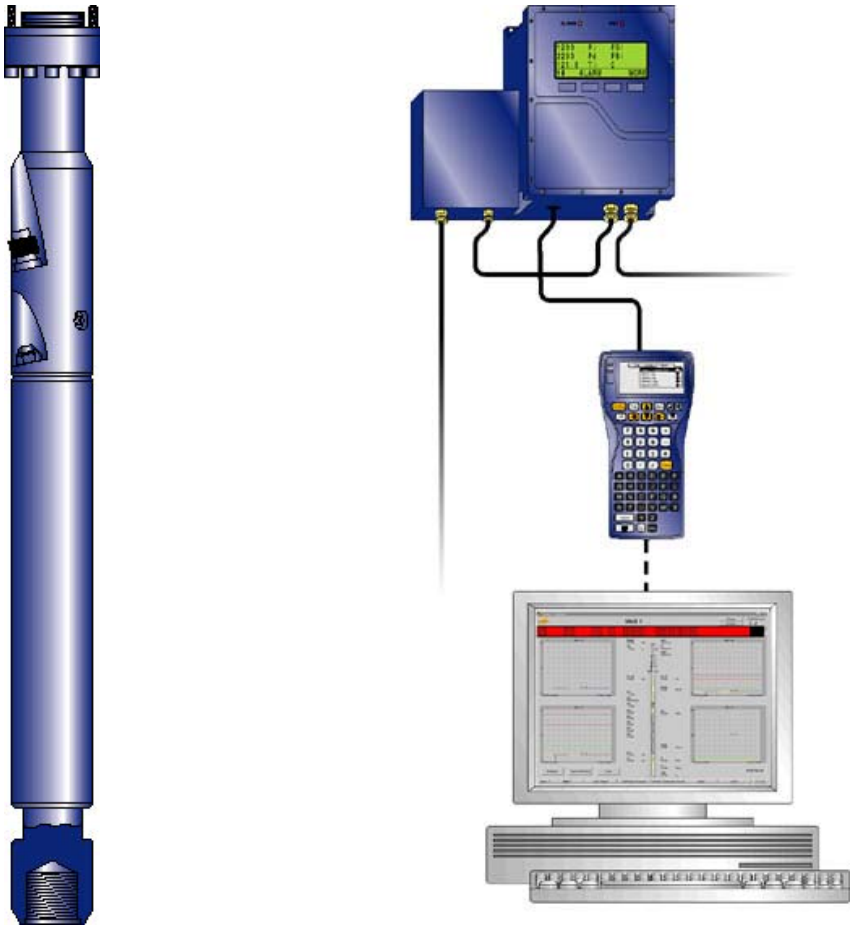
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

4.2.1 Sensor de fondo. Datos importantes del yacimiento y del desempeño de la bomba están disponibles con el uso de sistemas de monitoreo de presión y temperatura. Correlacionando la presión del yacimiento con la rata de flujo, un

operador puede determinar cuando cambiar el diseño de la bomba o considerar un workover en el pozo. Los sistemas típicos tienen la capacidad de

- Continuamente monitorear la presión y temperatura de fondo.
- Proveer la detección de fallas eléctricas.

Figura 27. Sensor

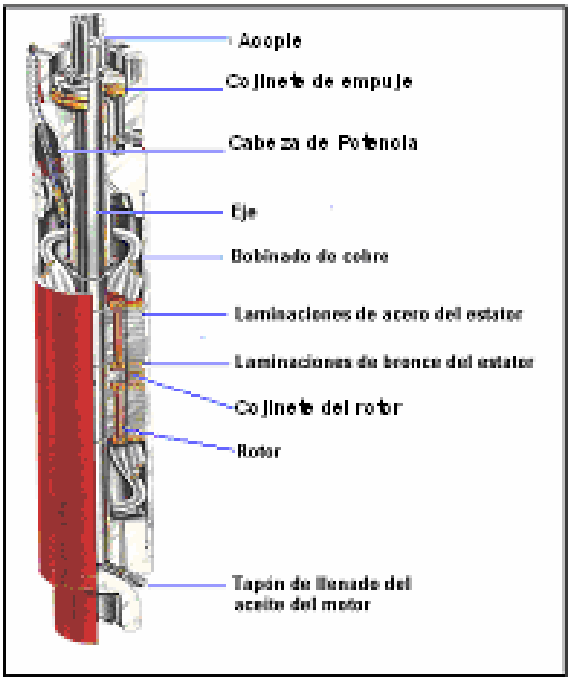


Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

4.2.2 Motor. Los principios básicos de diseño y operación de los motores de la B.E.S son los mismos que los motores eléctricos normales de superficie. Son motores de inducción, trifásicos, tipo jaula de ardilla, con dos polos de inducción.

Puesto que el motor de la B.E.S. debe ser instalado en el interior del revestimiento, debe tener una geometría adecuada. Debido al ambiente en el cual opera el motor, también existen otras diferencias en el diseño y construcción del motor de la B.E.S para que resista este tipo de condiciones extremas. Los motores son llenados completamente con aceite mineral altamente refinado o con aceite sintético el cual lubrica los cojinetes y provee resistencia dieléctrica y conductividad térmica para disipar el calor generado hacia el housing (Camisa Externa) del motor. El calor es luego transferido al fluido que pasa por la superficie externa del motor.

Figura 28. Motor



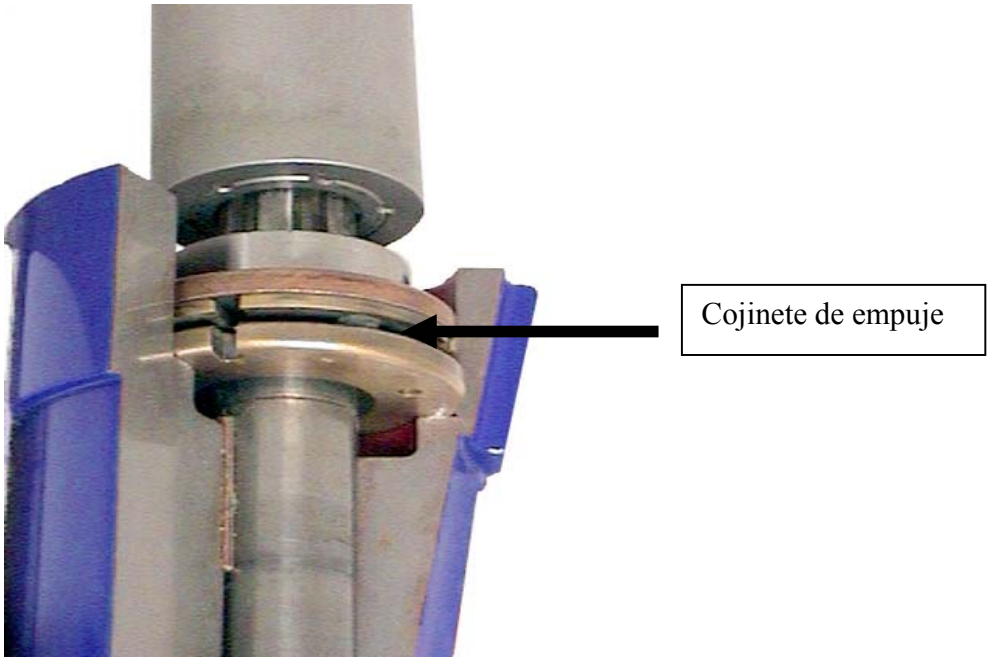
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

El thrust bearing “cojinete de empujes” del motor soporta la carga de los rotores y el eje.

El motor puede ser utilizado con corriente alterna a 60 Hz ó 50 Hz. Físicamente no hay diferencia entre un motor para operación a 50 Hz y uno de 60 Hz.

Los motores Schlumberger están disponibles en cinco series diferentes: 375, 456, 540, 562 y 738 para aplicaciones en pozos con revestimiento de diámetro externo de 4.50”, 5.50”, 6.625”, 7.00”, 8.625” y mayores, respectivamente.

Figura 29. Cojinete de empuje.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

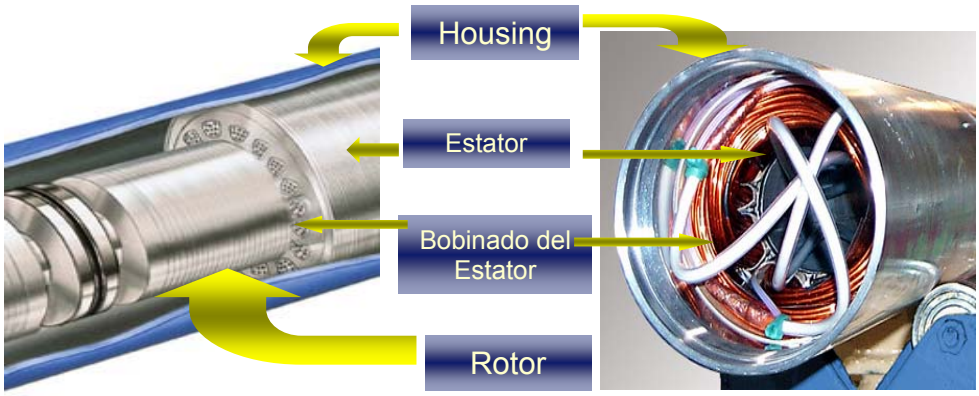
El comportamiento de los motores cambia de acuerdo a la carga a que están sometidos. Cada tipo de motor tiene sus curvas de rendimiento de velocidad, factor de potencia, eficiencia y amperaje en función del porcentaje de carga.

Normalmente un motor gira entre 3400 y 3500 RPM @ 60 Hz. El sentido del movimiento depende de la dirección de la corriente, permitiendo en un momento dado girar la bomba en sentido contrario con solo invertir el sentido de la corriente eléctrica en superficie.

- *Partes del Motor.*

En términos generales el motor consta principalmente de tres partes: El Estator, el rotor y los elementos mecánicos.

Figura 30. Partes del motor



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

• *Estator*. Es la pieza del motor que genera el campo magnético al hacer circular corriente por su bobinado. Utilizando un tubo metálico (housing), en su interior son colocados unos anillos o láminas perforadas. El material utilizado en las laminaciones es acero de bajo contenido de carbono y últimamente acero inoxidable. Este conjunto forma el cuerpo del estator. Por las láminas perforadas se hacen pasar los alambres que constituyen las bobinas del motor, dejando en el centro un espacio donde se colocará el rotor.

• *Rotor*. Está compuesto por un eje donde se colocan pequeños rotores de 12 pulgadas de largo cada uno. Cada rotor está sostenido en sus extremos por una balinera, la cual soporta cualquier movimiento radial que pueda tener el rotor al

girar. Por regla general, cada uno de estos rotores puede aportar determinada potencia Hp, (varía de acuerdo al motor). De ésta forma, un motor típico de 200 Hp tiene 16 rotores de 12.5 HP cada uno. El conjunto descrito (eje y rotores) es colocado dentro del estator. Al circular la corriente por el estator, genera un campo magnético entre sus bobinas, el cual es cortado por el metal de los estatores generando un movimiento rotacional de éstos. Este movimiento es trasmitido hasta la bomba utilizando conectores (couplings) entre los ejes de los sellos y las bombas.

- *Elementos mecánicos*. los elementos mecánicos están constituidos por: un cojinete de rodamiento que soporta el conjunto eje-rotores, balineras de soporte de movimiento radial de cada rotor, bujes en cada una de estas balineras, conectores de cables entre motores y conectores de cable de potencia.

4.2.3 Cable de Potencia. El cable de potencia es uno de los componentes más importantes y sensible en el Sistema de B.E.S. Su función es transmitir la energía eléctrica desde la superficie al motor y transmitir las señales de presión y temperatura registradas por el sensor de fondo a la superficie.

Figura 31. Cable de potencia.

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Todos los cables utilizan conductores de cobre estañado. Las tres fases son aisladas individualmente, el aislamiento es físicamente pegado con adhesivo al conductor. Los conductores pueden tener además una barrera protectora y/o una fibra trenzada sobre el aislamiento. Luego, los conductores son encamisados para proveer protección mecánica y química y finalmente, por lo general, se envuelven los conductores con armadura metálica.

El éxito o fracaso de la instalación depende en gran parte de la adecuada selección del cable de potencia para las condiciones de operación. En pozos muy profundos que requieren cables especiales. “El cable puede ser el componente más costoso del sistema.” Los cables están disponibles en configuración redonda y plana y los conductores a su vez pueden ser sólidos, trenzados o compactados.

La tabla 1 muestra las designaciones usadas para los materiales comúnes de los componentes del cable.

- *Designación de los cables.*

La designación de un cable se hace especificando el calibre del cable, el tipo de aislante que utiliza, los tipos de barrera y chaqueta que lo están recubriendo, el tipo de armadura que utiliza, el voltaje para el cual esta diseñado y la geometria en la que se presenta. Por ejemplo, un cable 2/7 POTB G4F será:

2/7 : #2 AWG con 7 conductores trenzados.
P : Aislante de polipropileno.
O : Chaqueta de nitrilo Oil-resistente.
TB : Cinta y trenza.
G : Armadura de acero galvanizado.
4 : Rango de 4 KV
F : Cable plano

Tabla 1. Materiales componentes del cable de potencia.

Componente	Abreviación	Material
Aislante	PPE, P	Copolimero polipropileno
	E	Goma EPDM (Etileno Propileno Dieno Metileno) goma
	K	Kapton
	T	Cinta Semiconductiva (REDASURFACE)
Barrera	S	PVDF (Fluoro-polivinilieano)
	TB	Cinta Tedlar
	F	Teflon de extrusión FEP
	TB	Cinta de alta temperatura
	L	Plomo
Chaqueta	PE	HDPE (Polietileno de alta densidad)
	O	Compuesto de caucho de nitrilo resistente al aceite
	E	EPDM, compuesto de caucho
Armadura	G	Acero galvanizado
	HG	Acero altamente galvanizado
	DG	Doble galvanizado
	SS	Acero inoxidable
	M	Monel

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- *Tipos de cable.*

Los cables de uso más común han sido agrupados en familias como REDALENE, REDABLACK, REDAHOT y REDALEAD. Dentro de estas familias de cables se pueden tener variaciones con diferentes rangos de operación, dependiendo de su construcción. Los más comunes son:

✓ Los cables de la familia **REDALENE** tienen aislamiento de polipropileno (P o PPE) y forro de nitrilo resistente al aceite, (O). La temperatura máxima de estos conductores es 205° F y la mínima temperatura para su manipulación e instalación es -45° F. **REDAVALU** es un tipo de cable alternativo al REDALENE, su costo es menor y puede usarse en pozos con fluidos que no son agresivos y de temperaturas relativamente bajas.

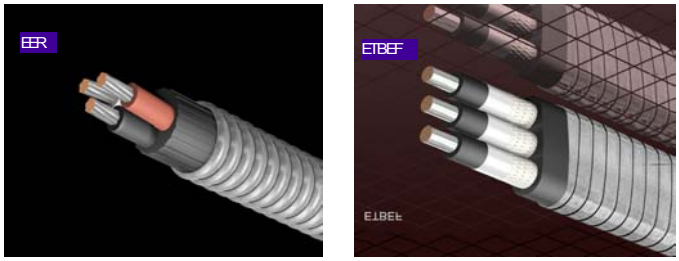
Figura 32. Cable redalene.

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

✓ Los cables tipo **REDAHOT** tienen aislamiento de EPDM (E) y forro de Nitrilo resistente al petróleo (O). La temperatura máxima de los conductores es 275° F.

✓ Los cables tipo **REDABLACK** utilizan aislamiento de EPDM (E) y también forro de EPDM (E). Los rangos de temperatura más comunes son 300 y 400° F, de acuerdo a las opciones seleccionadas.

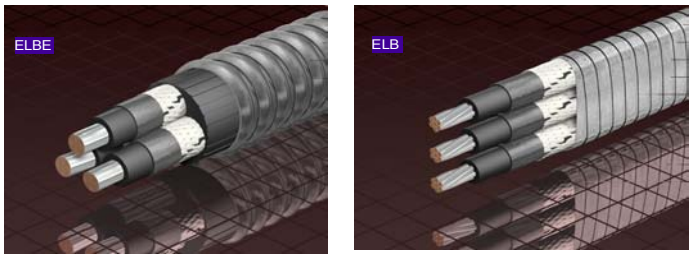
Figura 33. Cable redablack.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

✓ Los cables tipo **REDALEAD** tienen aislamiento de EPDM (E) y un forro impenetrable de plomo (L). El rango de temperatura para estos cables es 400° F o 450° F, dependiendo de su configuración.

Figura 34. Cable redalead.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

4.2.4 Extensión plana de cable o cable de conexión al motor. El cable de potencia ocupa espacio considerable dentro del casing, por lo cual es dificil bajar este cable hasta el empalme con el motor. Además, el empalme con el motor,que es de vital importancia para la correcta operación del equipo, tendria que hacerse manualmente lo que implicaría altos riesgos al momento de operar el equipo por las condiciones extremas donde se encuentra ubicado. Por esta razón se utiliza una sección de cable más delgada que el cable de potencia, y que además trae incorporada la unión al motor llamada extension plana. La extension plana es corrida desde la cabeza del motor a lo largo de las secciones del protector, el

separador de gas y la bomba, más un mínimo de 6 pies sobre la cabeza de descarga de la bomba. Normalmente es necesario utilizar construcción plana de cable debido al limitado espacio anular entre el O.D del equipo y el I.D del casing.

4.2.5 Válvula cheque. La válvula cheque usualmente se localiza 2 a 3 tubos sobre la cabeza de descarga de la bomba. Se emplea para mantener la columna de fluido sobre la bomba. Si la válvula cheque falla en mantenerla o si la válvula cheque no es instalada, el escurrimiento del fluido del tubing a la bomba puede causar una rotación en reversa de la unidad de subsuelo cuando el motor está apagado. La carga aplicada durante la rotación en reversa puede resultar en un motor quemado, cable quemado o un eje roto.

En las instalaciones donde la válvula cheque no es puesta, se debe dejar el tiempo suficiente para que el fluido del tubing drene hacia la bomba antes que el motor sea reiniciado. Un tiempo de 30 minutos es típicamente recomendado.

4.2.6 Válvula de drenaje. Cuando la válvula cheque es usada en el Bottom hole assembly, es recomendable instalar una válvula de drenaje seguidamente sobre la válvula cheque para prevenir que el tubing esté lleno cuando se saque el equipo. La función de esta válvula es la evacuación de todo el fluido que pueda estar en el tubing al momento de sacar el equipo del pozo.

4.2.7 Protector. El protector está ubicado entre la sección de entrada a la bomba y el motor. El protector es una pieza vital en el ensamblaje y su función es absorber todos los esfuerzos que puedan estar presentándose sobre el sistema. Si no es seleccionado apropiadamente puede reducir la vida útil del equipo. El protector va lleno de aceite mineral, que se comprime y se expande según los esfuerzos que se estén ejerciendo sobre el sistema.

Figura 35. Protector

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- *Tipos de protector.*

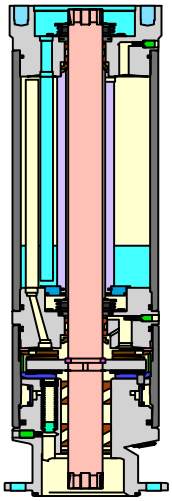
Hay algunos diseños de protectores que permiten la transferencia de esfuerzos (presión) sin que se produzca la mezcla de los dos fluidos (aceite mineral-fluidos del pozo). Uno de estos tipos es el tipo laberinto.

En la cámara de laberinto se utiliza la diferencia entre la gravedad especifica del fluido del pozo y el aceite del motor para mantenerlos separados, a pesar de que están en contacto directo ya que el protector esta abierto a la sección de entrada a la bomba en su parte superior.

El fluido del pozo es generalmente inmiscible con el aceite del motor, por esta razón aunque haya un contacto directo no hay tendencia para contaminar el aceite del moto

La cámara del laberinto está aislada de la rotación del eje por un tubo exterior al eje, por lo tanto no se mezcla cuando gira la unidad.

Figura 36. Protector de camara laberintica.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Hay sistemas en las que el sistema de laberinto no es aplicable. En casos donde el fluido del pozo es más liviano que el aceite del motor (aproximadamente 0.85), el aceite del motor iría al fondo de la cámara y seria desplazado rápidamente por el fluido del pozo.

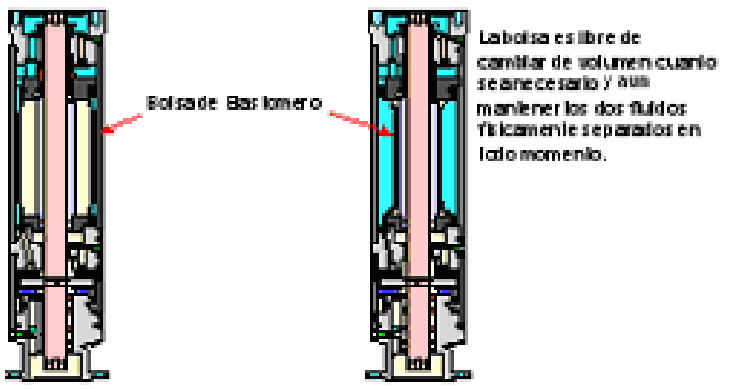
Si la gravedad específica del fluido del pozo es muy cercana o menor a la gravedad especifica del aceite del motor, este tipo de protector no debería ser utilizado.

Los protectores de laberinto tampoco deben ser aplicados en pozos horizontales o altamente desviados. El diseño de la separación por gravedad requiere que la unidad esté en posición vertical, o casi vertical. Mientras mayor es el ángulo, menor será la capacidad de expansión de aceite. Cuando se hacen inspecciones en el campo de los equipos recuperados del pozo la inspección del protector tipo

laberinto debe hacerse “antes” de que el protector sea acostado. Una vez que el protector ha sido puesto en posición horizontal el fluido del pozo se puede distribuir en todas las cámaras, lo que ocasionaria la mezcla de los fluidos.

Para aplicaciones donde las gravedades específicas del fluido del pozo y del aceite del motor son similares o en pozos demasiado desviados, se utilizan protectores de “sello positivo” o “bolsa” los cuales mantiene separados físicamente los dos fluidos.

Figura 37. Protectores tipo bolsa.



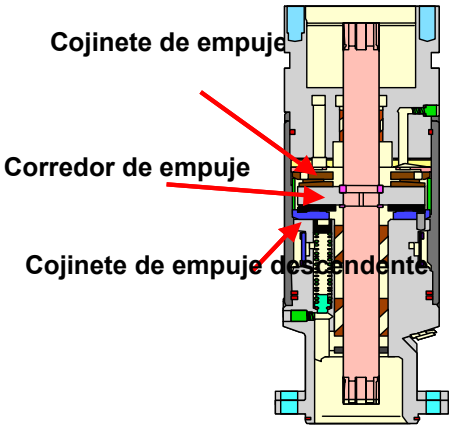
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Este sistema es similar al “fuelle” encontrado en algunos motores de pozos de agua excepto que la bolsa tiene mucha mayor capacidad para la expansión y contracción que un típico “fuelle”. El material de esta bolsa es un elastómero de alta temperatura y alto rendimiento que puede resistir las severas condiciones típicas encontradas en los pozos de petróleo. La bolsa mantiene el fluido del pozo en el exterior y el aceite limpio del motor en el interior. Cuando el aceite del motor se expande o se contrae, la bolsa simplemente se infla o se contrae para adaptarse al cambio de volumen.

El protector de sello positivo ofrece una gran ventaja por su flexibilidad y es útil en una amplia variedad de aplicaciones. Sin embargo, se debe tener cuidado en las aplicaciones de éste tipo de protectores en pozos con fluidos que contienen químicos o que son tratados continuamente con químicos. Como con cualquier elastómero que se aplica en el área petrolera, se debe tener en cuenta este efecto para garantizar que el elastómero no sea dañado por el fluido del pozo. Si el sello positivo se rompe, el motor puede ser contaminado fácilmente con el fluido del pozo.

Otra función del protector es absorber el empuje generado por la bomba. El cojinete de empuje del protector posee una superficie relativamente grande sobre la cual se absorbe el empuje. Además, puesto que el cojinete de carga (thrust bearing) opera y absorbe la carga en un entorno de aceite limpio, el tiempo de servicio de la B.E.S. se prolonga.

Figura 38. Cojinetes de carga en los protectores.



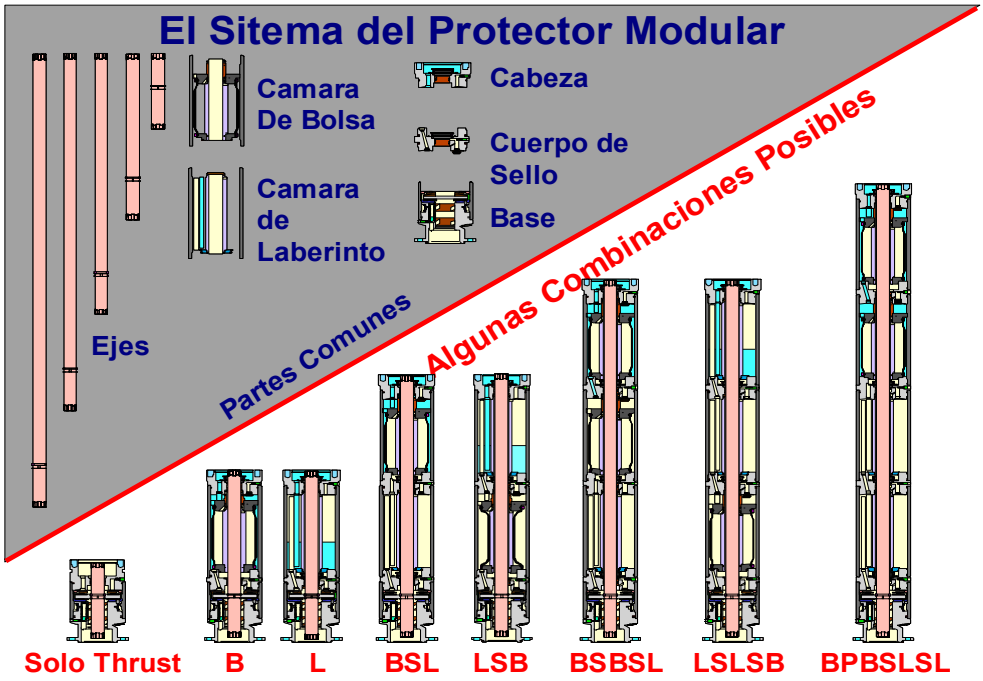
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

A través del tiempo se ha venido utilizando los protectores en diferentes configuraciones para cumplir con los requerimientos de las diferentes aplicaciones. Los protectores tipo laberinto 66L y protectores de sello positivo tipo pre-llenados,

de bolsa simple (PFSB) y de doble bolsa (PFDB) han sido usados exitosamente alrededor del mundo por décadas. Estos y algunas combinaciones de ellos se usan todavía en muchas partes.

El concepto de la tecnología de protectores modulares permite combinar múltiples secciones o cámaras, tanto de laberinto como de sello positivo, utilizando pocas partes para ensamblar un protector con la combinación requerida para cada aplicación. Aunque los diseños anteriores aun están disponibles, el sistema modular se esta volviendo más común. El sistema "modular" es realmente muy simple. Consiste en una cabeza, base, eje, sección de sello (tipo laberinto o bolsa) y un cojinete de empuje. Con pocos módulos o partes es posible fabricar muchas configuraciones.

Figura 39. Configuraciones en los protectores.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

La nomenclatura para denominar los protectores modulares es simple y brinda información de cómo esta configurado un protector.

La denominación del protector siempre comienza desde la cabeza y sigue hacia la base, se denomina de acuerdo a las cámaras de sello utilizadas y a la forma en que estas se conectan entre sí (por Ej: en “serie” o en “paralelo”).
La “L” se utiliza para cámara tipo laberinto y la “B” para cámaras de tipo bolsa. En cuanto al tipo de conexión, la “P” significa en “PARALELO” y la “S” significa conexión en “SERIE”.

En algunas ocasiones se encuentran también las letras “HL”, lo que indica que el protector tiene un cojinete de “alta carga”.

Dados estos códigos para la designación de los protectores, un protector BSBSL-HL es un protector de tres cámaras, que tiene una cámara de bolsa en la cabeza conectada en serie a otra cámara inferior de bolsa la cual esta luego conectada en serie a la última cámara de sello que es de tipo laberinto. Además, éste protector tiene cojinetes de alta carga.

Los protectores modulares están disponibles en series 400 (4.00”), 540 (5.40”), 562 (5.62”) y serie 738, el 540 y el 562 sin adaptadores. El protector 562 tiene una sección de empuje más larga y cojinete de mayor diámetro para aplicaciones de alto empuje descendente, todas las demás partes son exactamente las mismas.
Este protector fue desarrollado especialmente para aplicaciones de alto empuje, como por ejemplo con las bombas HN20000 y JN21000.

- *Funciones del protector.*

El protector tiene tres funciones principales:

✓ Proveer un sello y equilibrar las presiones interna y externa para evitar que el aceite del motor sea contaminado por el fluido del pozo, actuando también como un reservorio de aceite para el motor.

✓ Soportar la carga axial (empuje) desarrollada por la bomba.

✓ Transmitir el Torque desarrollado en el motor hacia la bomba, a través del eje del protector.

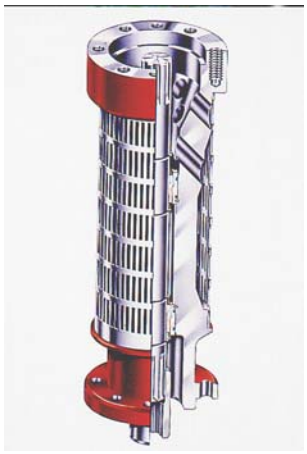
Una de las funciones del protector es evitar el ingreso del fluido del pozo al motor donde podría causar daños irreparables al sistema. Esto se logra a través de equilibrar la presión en el interior del protector con la presión externa del fluido del pozo, independientemente del valor de la presión.

Puesto que la base del protector está abierta al motor, la presión en el interior del motor se equilibra con la presión del ambiente externo del fluido que rodea a la unidad. Manteniendo una presión diferencial mínima se restringe el ingreso de fluido del pozo hacia el motor. Para lograr esta función, el protector debe permitir de alguna manera que el fluido del pozo se comunique con el aceite del interior del protector.

4.2.8 Sección de Entrada a la bomba o Intake. La mayoría de los diseños de las BES se hacen con finalidad de producir la máxima cantidad posible de petróleo sin comprometer el rendimiento del equipo. Una de las razones que degradan el rendimiento del sistema es la cantidad de gas libre a la entrada de la bomba. Dependiendo de la cantidad de gas esperada en la sección de entrada a las condiciones de diseño se determina el uso de una sección de entrada simple – intake – o un separador de gas.

Aunque todavía están disponibles secciones de entrada con cojinetes metálicos estándar, la recomendación de ingeniería de Reda es usar solamente secciones de entrada tipo ARZ los cuales tienen cojinetes resistentes a la abrasión. Los separadores de gas tipo *RS, *RS-ES y Vortex tienen cojinetes resistentes a la abrasión ARZ en su construcción estándar.

Figura 40. Intake



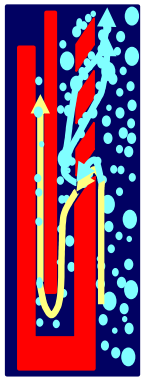
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Debido a la eficiencia y resistencia del sistema de cojinetes resistentes a la abrasión tipo ARZ el rendimiento y tiempo de servicio del sistema BES se mejora sustancialmente. El beneficio se entiende fácilmente si se considera que la sección de entrada está ubicada inmediatamente por encima del protector en el ensamble del equipo.

Los separadores de gas son también secciones de entrada pero tienen algunos componentes adicionales diseñados para evitar el paso de gas libre hacia la bomba. La tecnología de separación y manejo de gas libre en las aplicaciones de BES ha ido evolucionando y perfeccionandose continuamente.

El diseño original de los separadores de gas estático se basaba en el incremento de la separación por medio de la inversión de la dirección del flujo en la sección de entrada a la B.E.S. Por eso son conocidos como separadores de gas de flujo inverso (RF, Reverse Flow).

Figura 41. Flujo inverso dentro de un separador de gas.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Puesto que estos separadores no entregan efectivamente ningún trabajo al fluido también se los conoce como Separadores Estáticos.

Cuando el fluido entra al separador de gas la dirección del flujo se invierte, disminuyendo la cantidad de gas arrastrada por el líquido que entra al separador. Algunas de las burbujas de gas siguen su camino por el espacio anular, otras entran al separador pero se separan en el espacio anular entre el housing y la camisa interna del separador de gas, y finalmente el gas que no se logra separar pasa con el líquido al interior de la bomba.

A diferencia de los separadores estáticos, los separadores de gas “Dinámicos o Rotativos” sí ejercen un trabajo en el fluido para lograr mayor separación de gas dentro del separador. Para entender el proceso de separación en un separador dinámico, se puede dividir el separador en tres secciones: Cámara de incremento

de presión, Cámara de separación y By-pass. En la primera sección el inductor aumenta la presión de la mezcla. En la Cámara de separación las fases se separan por medio de centrifugación. Puesto que la fase líquida es más pesada, ésta es impulsada hacia afuera (contra la pared interna del housing) y la fase gaseosa se concentra en el centro por ser más liviana. En la parte superior del separador los fluidos de producción son re-direccionados, el gas que venía por la parte central es direccionado al espacio anular y la fase líquida desde el exterior es dirigida hacia la bomba por la parte interior del By-pass.

La desventaja de los separadores dinámicos KGS y RS es que el subconjunto del inductor y centrifuga (la cámara de presión y la de separación) representan una longitud considerable entre cojinetes y una masa también considerable que puede estar en desbalance por algunos factores como que el inductor y la centrifuga manejan un fluido heterogéneo de gravedad específica variable, que pueden ser erosionados en forma irregular por la presencia de abrasivos, o por un efecto combinado.

Figura 42. Separador de gas dinamico.

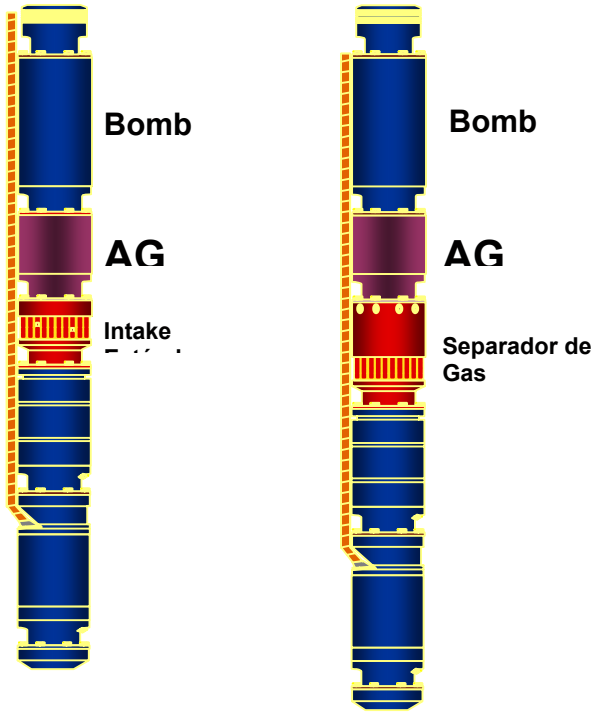
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Para minimizar este efecto Schlumberger desarrolló la línea de separadores de gas tipo RS-ES que reduce considerablemente la masa del elemento rotativo y también disminuye la distancia entre cojinetes pero manteniendo la misma eficiencia de separación.

La última tecnología de los separadores dinámicos de gas es la línea de separadores tipo VORTEX. Este separador utiliza el efecto de remolino (Vortex) que se genera en el fluido al pasar por los puertos de entrada, inductor, propulsor y By-pass de descarga. El separador Vortex también utiliza el sistema de cojinetes flexibles resistentes a la abrasión ARZ bajo un nuevo esquema de distribución que ha permitido obtener mucho mayor rendimiento y durabilidad en fluidos severamente abrasivos.

Los manejadores de gas trabajan con el mismo principio que los separadores. Se diferencian en que manejan cantidades mayores de gas. La siguiente es la manera como se realiza el montaje de dichos componentes:

Figura 43. Configuracion del equipo de fondo.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

4.2.9 Bomba. La bomba es de tipo centrífuga, es una bomba multi-etapas, que contiene un número seleccionado de impulsores (según la aplicación) muy bien encajados en difusores, ubicados en serie sobre un eje, movidos por un motor eléctrico.

Figura 44. Bomba

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

La bomba centrífuga genera presión por la rotación de una serie de aspas que posee el impulsor.

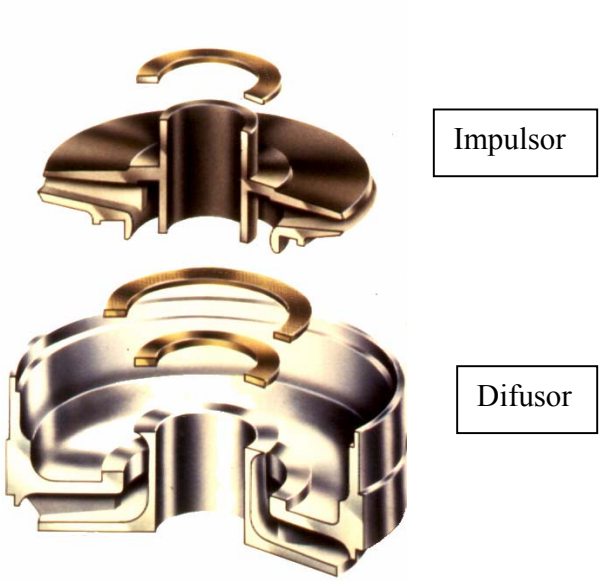
El movimiento del impulsor forma un vacío parcial en la succión final del impulsor. El trabajo del impulsor es transferir energía al fluido que pasa por él, logrando así elevar su energía cinética y el difusor convierte esta energía cinética en energía potencial (presión) elevando la presión de descarga.

Fuerzas externas, tales como, la presión atmosférica y el peso de la columna de fluido empujan el fluido dentro del ojo del impulsor y hacia fuera de la periferia del impulsor. De allí, que la rotación del impulsor de gran velocidad arroja el líquido dentro del difusor.

Figura 45. Corte de una etapa.

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Figura 46. Impulsor y Difusor.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Cada etapa consiste de un impulsor y un difusor. Y en conjunto la función principal de las bombas es levantar el fluido de un nivel a otro transformando energía cinética en energía potencial (cabeza).

Hay dos tipos de impulsores que determinan la cantidad de fluido disponible para el diseño específico y son los impulsores de tipo flujo radial y los de tipo flujo mixto. La diferencia entre estos dos tipos de diseños se describe por el ángulo que forma el pasaje de fluido con respecto a la vertical.

Como su nombre lo indica el de flujo radial mueve el fluido en sentido 100% radial sin producir fuerzas componentes diferentes.

El impulsor de flujo mixto mueve el fluido generándole un cierto ángulo lo cual genera componentes de fuerzas hidráulicas. Un impulsor de flujo mixto tiene los ángulos de las aspas cercanos a 45 grados y por tanto normalmente se encuentran para rangos de bombas con mayores tasas de flujo. Su uso depende del caudal y calidad del fluido que se maneja.

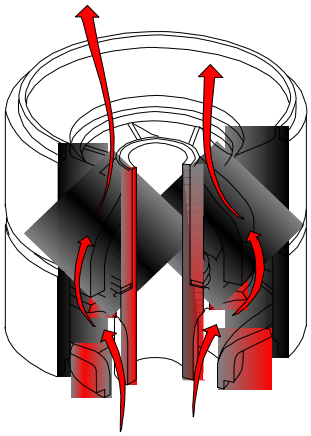
Los impulsores radiales predominan para pequeños caudales (hasta 3,500 BFPD) y fluidos limpios (sin arenas). Los impulsores de flujo mixto son usados para caudales grandes (más de 4,100 BFPD) y donde no se esta seguro de tener fluidos limpios.

Un impulsor de flujo radial tiene los ángulos de las aspas cercanos a los 90 grados, y por lo tanto se encuentran normalmente en rangos de bombas para tasas de flujo menores.

El tipo o geometría de la etapa determina el volumen de fluido que maneja la bomba y el número de etapas determina el levantamiento total generado (TDH).

Las bombas se construyen en un amplio rango de capacidades para aplicaciones en diferentes tamaños de revestimiento.

Figura 47. Movimiento de flujo dentro de una etapa.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Figura 48. Etapa tipo pancake, flujo radial.

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- *Configuración de la bomba.*

Las bombas Schlumberger vienen en diferentes configuraciones, la mayoría de ellas (especialmente las de diámetro menor) vienen como tipo sencillo (S), Tandem Central (CT). Otros tipos son Tandem Superior "Upper" (UT) y Tandem Inferior "Lower" (LT).

Una bomba single tiene una sección de entrada a la bomba (intake) y una cabeza de descarga intrínseca a la misma y no se puede adherir ninguna otra bomba al sistema.

Una bomba central tandem (CT), no tiene cabeza o descarga inherente y se le debe proporcionar de alguna manera otra bomba, y/o una sección de entrada y/o la cabeza de descarga.

Una bomba Upper Tandem (UT) tiene una cabeza de descarga pero no tiene sección de entrada. Esta se puede colocar en el tope de otra bomba o de una sección de entrada.

Una bomba Lower Tandem (LT) tiene sección de entrada integral pero no tiene cabeza de descarga, esta puede ir debajo de otra bomba o ser completada adicionando una cabeza de descarga.

- *Tipo de construcción de la bomba para el manejo de empuje.*

Con respecto a la forma en que se maneja el empuje generado en la bomba, La carga axial desarrollada por un impulsor depende del diseño mecánico e hidráulico de tal impulsor y del punto de operación de la bomba. Si la bomba opera a una rata mayor que la de diseño, se puede producir excesivo empuje ascendente (Upthrust) o por el contrario cuando la bomba opera a una rata menor que la de diseño se puede presentar excesivo empuje descendente (Downthrust).

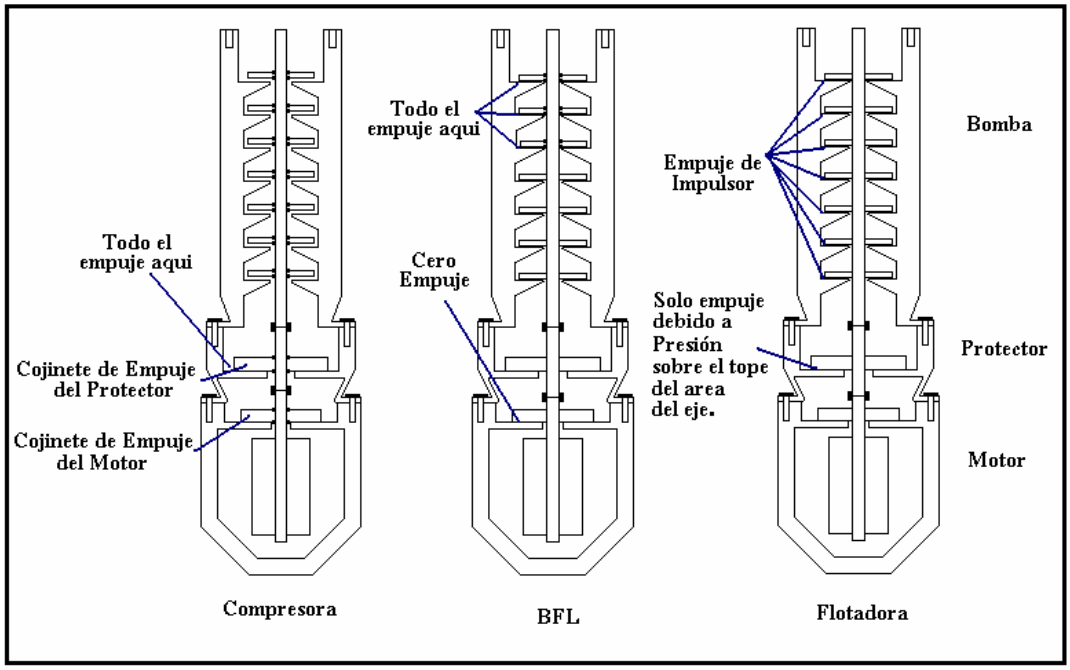
Schlumberger cuenta con tres tipos básicos de construcción de bombas.

✓ Construcción Flotante – “FL”. Cada impulsor tiene libertad de moverse hacia arriba o hacia abajo a través del eje, se puede decir que “flota” en el eje.

✓ Tipo “BFL” construcción con los impulsores del fondo tipo flotante. Los impulsores superiores son del tipo compresión mientras los inferiores son del tipo flotante. Este es un diseño especial para eliminar todo el empuje descendente transmitido al protector.

✓ Construcción tipo compresión “CR”. Cada impulsor está fijo al eje de forma rígida de modo que no puede moverse sin movimiento del eje. Todos los impulsores son comprimidos en conjunto conformando un solo cuerpo rígido, de esta forma si un impulsor trata de moverse hacia arriba o hacia abajo, éste tratará de mover también al eje y al conjunto de todos los impulsores también.

Figura 49. Tipos de construcciones para las bombas.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

El impulsor tipo compresor, evita el movimiento sobre el eje, permaneciendo en un punto fijo en la etapa. De esta manera todos los impulsores se tocan entre sí, trasmitiendo los empujes hidráulicos generados al eje, el cual a su vez lo transmite al cojinete del protector que lo debe soportar.

Para un impulsor de tipo compresor o balanceado, debe tenerse mucho cuidado, ya que durante el arranque se puede dañar el eje, debido al empuje axial producido por los impulsores.

- *Especificación de la Bomba.*

Existe una serie de parámetros que se deben tener en cuenta para especificar la bomba a usar. La especificación incluye códigos que resumen las características de la bomba. Por ejemplo: **122-DN 3000 CR (UT-CT) ARZ-RA,**

Que significa en su orden:

No. de etapas	*:*	*"122" en éste caso 61 etapas por bomba*
Serie	*:*	*"D", Serie 400, (OD = 4.0")*
Material del Impulsor	***:***	*"N", Ni-resistente*
Tipo	***:***	*"3000", Caudal que maneja*
Construcción	***:***	*"CR", Compresora*
Tándem	*:*	*"UT", Tándem superior y central*
Etapas especiales	***:***	*"RA", Resistente a la corrosión*
Etapas especiales	***:***	*"ARZ", Resistente a la abrasión.*

5. DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO

5.1 DATOS REQUERIDOS

Para garantizar que el sistema de bombeo electrosumergible sea el apropiado para determinado pozo, se debe tener los datos iniciales sobre los cuales se va a elaborar el diseño del equipo. Además de tenerlos, éstos deben ser confiables y actuales. Existe un conjunto de datos mínimos que se requieren para realizar el diseño inicial de la unidad electrosumergible y cada uno de ellos tiene una justificación de su necesidad.

5.1.1 Tamaño, peso y profundidad de asentamiento del revestimiento. El equipo y como tal las bombas electrosumergibles existen en diferentes diámetros externos con el fin de ofrecer diversas opciones de aplicación y también para manejar diferentes tasas de producción. Por esto se debe conocer el tamaño del revestimiento y su diámetro interno para garantizar que la unidad encaje dentro del revestimiento.

5.1.2 Profundidad de los intervalos perforados. El fluido de producción es el que se encarga de refrigerar el motor del sistema cuando éste se encuentra en operación. Si se ubica la unidad por debajo de los intervalos perforados, se deberá realizar una instalación encamisada, esto con el fin de lograr que el fluido de producción pase por la carcaza del motor disipando el calor que esté generando.

5.1.3 Tamaño y Rosca de la tubería de producción. El tamaño de la tubería de producción es de suma importancia para calcular cuanta pérdida por fricción debe incluirse en el diseño, éste valor de pérdidas por fricción es uno de los tres

parámetros para el calculo de la carga total en pies que debe generar la bomba para lograr llevar hasta superficie el fluido de producción desde el fondo. El tipo de rosca y el tamaño de los hilos deben conocerse de modo que se pueda escoger el tipo adecuado de rosca de las diferentes válvulas, acoples y cabeza del pozo.

5.1.4 Corte de agua y relación gas-petróleo (GOR). Se hace necesario conocer la proporción en que se presentan los fluidos que se están produciendo en el pozo, para realizar un adecuado diseño del equipo.

5.1.5 Gravedad específica de los líquidos y del gas que se van a producir. Es necesario conocer la gravedad específica de los líquidos que se van a producir, puesto que es indispensable para calcular cuanta potencia se requiere para producir el fluido, (mezcla de agua, aceite y gas dado el caso).

5.1.6 Temperatura del fondo del pozo (BHT). Es un dato indispensable para seleccionar el tipo de cable que se utilizará, además tiene un efecto directo sobre la temperatura a la cual el sistema va a operar, aunque no es tan significativo como lo es la temperatura que genera el motor como tal, pero si es un punto sobre el cual se puede saber que tanto puede llegar a refrigerarse el motor o no.

5.1.7 Índice de productividad (J) o relación de desempeño de flujo (IPR). Este indice es importante para conocer la capacidad de producción que tiene el pozo como tal a medida que se va generando una caída de presión en la cara del pozo. Conociendo este indice se garantizará que la unidad no quede sobre ni bajo diseñada.

5.1.8 Presión en cabeza del pozo (THP). Para garantizar que el fluido de producción llegue hasta la estación de recolección o batería, es necesario incluir la

presión en cabeza en la tubería de producción en los cálculos de la carga dinámica total en pies (TDH).

5.1.9 Nivel de sumergencia deseado y presión de entrada a la bomba (PIP) deseada. Este dato ayuda a determinar la profundidad de asentamiento de la bomba. Muchas veces no es necesario sumergir la bomba hasta el valor máximo posible. Esto permite ahorrar en el uso innecesario de tubería de producción y de cable el cual es uno de los componentes más costosos del sistema de bombeo electro sumergible.

5.1.10 Voltajes disponibles en superficie. Antes de terminar el diseño del sistema de bombeo electrosumergible y seleccionar los componentes eléctricos tales como transformadores y variador o controlador de frecuencia es importante conocer los voltajes o potencia disponible.

La selección de estos equipos es de suma importancia por dos aspectos: el primero evitar que por una fuente errada de potencia se genere daño en cualquiera de los componentes eléctricos tales como motor, transformador elevador (SUT), variador o controlador de frecuencia y del transformador reductor; y segundo, evitar que a las condiciones de operación el sistema se quede limitado por el hecho de no poder someter uno de los componentes a cargas eléctricas superiores de las que puede soportar y que aun la bomba y motor puedan obtener ganancia en producción.

5.2 PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO SUBMERGIBLE

Existe una secuencia de etapas que se deben seguir para diseñar un sistema de bombeo electrosumergible.

Dicha secuencia se detalla a continuación:

5.2.1 Recopilación de Datos

- *Estado mecánico*

- ✓ Diámetro del revestimiento.
- ✓ Diámetro de la tubería de producción y características.
- ✓ Intervalos abiertos (perforaciones)

- *Datos de producción*

Actuales

- ✓ Presión estática del pozo @ nivel de referencia.
- ✓ Presión en cabeza (THP Y CHP)
- ✓ Presión en el revestimiento
- ✓ Rata de producción
- ✓ Profundidad del punto medio de perforaciones (MPP)
- ✓ Temperatura de fondo del pozo (BHT)
- ✓ Relación gas-aceite (GOR)
- ✓ Corte de agua

Proyección

- ✓ La proyección de producción depende directamente del yacimiento y lo suministra el grupo de ingeniería de yacimientos de cada compañía operadora incluyendo los siguientes datos.
- ✓ Presión estática del pozo al nivel de referencia.
- ✓ Presiones en cabeza (THP y CHP)
- ✓ Nivel de sumergencia de la bomba
- ✓ Corte de agua
- ✓ Relación gas-aceite (GOR)
- ✓ Temperatura en fondo (BHT)

- Datos del fluido a producir

- ✓ Gravedad específica del agua (SG_W)
- ✓ Gravedad API del aceite
- ✓ Gravedad específica del gas (SG_g)
- ✓ Presión de burbuja del aceite (P_b)
- ✓ Viscosidad del aceite (μ_o)

- Fuentes de energía

- ✓ Voltaje disponible en superficie
- ✓ Frecuencia en superficie

- Posibles problemas

- ✓ Producción de arena
- ✓ Formación de escamas
- ✓ Depositación de parafinas
- ✓ Corrosión

5.2.2 Capacidad de producción. Se debe determinar la productividad del pozo a la profundidad de la bomba o determinar la profundidad de asentamiento de la bomba a una rata de producción deseada. También hay que predecir el comportamiento del pozo, dependiendo si se usa el índice de productividad (PI), o la relación de desempeño de flujo de Vogel (IPR) según sea el tipo de yacimiento.

5.2.3 Cálculos de gas. Para tener certeza si se debe instalar algún accesorio para manejo del gas se debe calcular la cantidad de gas presente en la entrada a la bomba (intake), la presencia de gas en la entrada a la bomba y en la bomba misma puede generar bloqueos por gas y ocasionar dificultad para levantar el fluido a superficie. Esto se debe a que la presencia de gas hace que la presión y la densidad del fluido varíen constantemente dentro del sistema.

Hay casos en los cuales no se conoce con certeza la relación gas-aceite. En estos casos se pueden usar correlaciones que han sido desarrolladas para esta tarea. Una de las más útiles y aplicadas son las de Standing que sirven para determinar la relación gas-aceite y el factor volumétrico de formación:

- *Relación gas-aceite en solución*

$$R_s = SG_g \left(\frac{P_b}{18} * \frac{10^{0.0125 * API}}{10^{0.00091 * T(^\circ F)}} \right)^{1.2048} \quad \text{.....Ecuación 5.1}$$

Donde: SG_g = Gravedad específica del gas

P_b = Presión de burbuja [psi]

T = Temperatura de fondo del pozo [F]

- *Factor volumétrico de formación del aceite*

$$B_o = 0.972 + 0.000147 F^{1.175} \quad \text{.....Ecuación 5.2}$$

Donde:

$$F = R_s \left(\frac{SG_g}{SG_o} \right)^{0.5} + 1.25T \quad \text{.....Ecuación 5.3}$$

T = Temperatura de fondo, BHT [F]

SG_g = Gravedad específica del gas

SG_o = Gravedad específica del aceite

- *Factor volumétrico de formación del gas*

$$B_g = 5.04 \frac{ZT}{P} \quad \text{.....Ecuación 5.4}$$

Donde: Z = Factor de compresibilidad del gas (0.81 a 0.91)

T = Temperatura del fondo del pozo [R] (R = 460 +F)

P = Presión de sumergencia [psi]

Se puede determinar el volumen de agua y de gas libre a partir de datos de producción cuando se conoce la relación gas-aceite (GOR) usando las siguientes ecuaciones:

$$Gas\ total = \frac{GOR * BOPD}{1{,}000}[MCF]$$ …….Ecuación 5.5

El gas en solución a la profundidad de asentamiento puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$Gas\ en\ solución = \frac{R_S * BOPD}{1{,}000}[MCF]$$ …….Ecuación 5.6

El gas libre que pasa a través de la entrada a la bomba, se calcula cómo:

$$Gas\ Libre = Gas\ total - Gas\ en\ solución$$ …….Ecuación 5.7

Para el cálculo del volumen de aceite, de agua y de gas a la profundidad de asentamiento de la bomba se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$V_O = BOPD * B_O \quad [BOPD]$$ …….Ecuación 5.8

$$V_g = Gas\ Libre * B_g \quad [BGPD]$$ …..….Ecuación 5.9

$$Vw = BwPD * B_w \quad [BwPD]$$ …….Ecuación 5.10

El volumen total del fluido que va a manejar la bomba será:

$$V_T = V_O + V_G + V_W \quad [Bls]$$ ……..….Ecuación 5.11

Cuando se realiza un diseño de un sistema de bombeo electrosumergible se recomienda que el porcentaje de gas libre que pasa a través de la bomba no sea superior al 10%. Este porcentaje se puede calcular de la siguiente forma:

$$\%\ Gas\ Libre = \frac{Gas\ Libre}{V_T} * 100 \quad \text{.....Ecuación 5.12}$$

Cuando el porcentaje de gas libre es mayor al 10%, es indispensable instalar un separador de gas a cambio de la sección de entrada a la bomba estándar (intake), el cual va ubicado en la misma posición que iría el intake.

5.2.3 Cálculo de la cabeza dinámica total en pies (TDH).

La cabeza dinámica total (TDH) corresponde a la cabeza que la bomba debe vencer para que el fluido llegue a superficie; en general la ecuación para calcularla es la siguiente:

$$TDH = LNV + Pf + THP \qquad [pies] \quad \text{.....Ecuación 5.13}$$

Donde:

LNV = Es el levantamiento neto vertical y es la cabeza en pies que requiere levantar la bomba desde el nivel dinámico de fluido.

Pf = Pérdidas por fricción en la tubería y demás accesorios.

THP= Cabeza requerida para que el fluido entre al sistema de superficie y llegue hasta la estación de recolección o batería.

5.2.4 Seleccionar el tipo de bomba. Utilizando los catálogos de los proveedores, con el caudal deseado de diseño y la cabeza dinámica total en pies calculada, se podrá seleccionar el tipo de bomba que tendrá la más alta eficiencia para producir dicho caudal dentro de un rango de bombas que podrían realizar éste trabajo.

5.2.5 Determinar el tamaño óptimo de los componentes. Con la ayuda de un catálogo, se debe seleccionar el número de etapas, tamaño optimo del motor y sello, así como verificar las limitaciones del equipo.

$$Total\ etapas = \frac{TDH}{Cabeza\ por\ etapas} \quad \text{……Ecuación 5.14}$$

Para calcular la potencia requerida de la bomba seleccionada se utiliza la siguiente ecuación, tomando de las curvas de desempeño por etapa la potencia requerida por etapa de la bomba seleccionada:

$$HP = [Etapas\ totales] * [HP\ por\ etapa] \text{……Ecuación 5.15}$$

5.2.6 Selección del cable. La selección del cable involucra: tamaño, tipo y longitud. El tamaño del cable depende de factores como caída de voltaje, amperaje y espacio disponible en el anular.

El fluido del pozo y la temperatura son condiciones que afectan directamente la selección del tipo de cable que se va a usar, o mejor del tipo de armadura que debe tener éste para enfrentar las condiciones de operación; ya sea por temperatura o por ambiente corrosivo.

La longitud del cable a usar la determina la profundidad de asentamiento de la bomba. Generalmente se adicionan 100 o 200 pies más de cable, los cuales se usan para conectar el equipo de subsuelo con el equipo eléctrico de superficie.

5.2.7 Determinación de la capacidad del equipo eléctrico. Para seleccionar el variador y transformadores que serán usados, es necesario calcular la potencia eléctrica que requieren estos equipos con el fin de escoger el que mejor se ajuste

a las condiciones de operación del equipo de subsuelo. La potencia eléctrica se mide en Kilovoltio-Amperio y se puede calcular con la siguiente expresión:

$$KVA = \frac{V_S * Amp * \sqrt{3} * 1.1}{1{,}000} \quad \text{……Ecuación 5.16}$$

Donde:

V_s = Voltaje en superficie

Amp = Amperaje nominal del motor

El voltaje en superficie se calcula conociendo el voltaje de operación del motor y las perdidas en el cable con la siguiente ecuación:

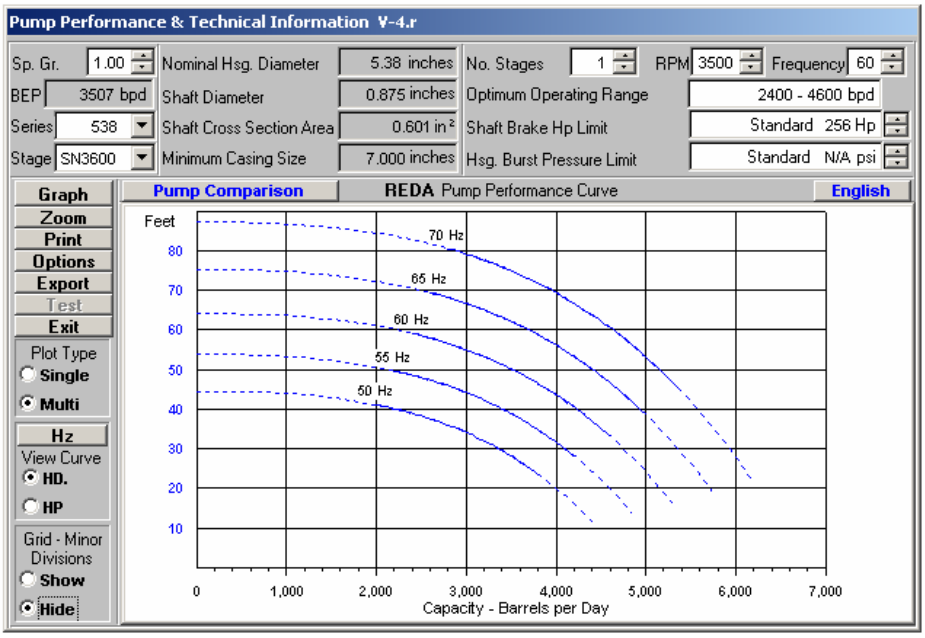
$$V_S = V_{OPE} + Pérdidas\ en\ el\ cable \quad \text{……Ecuación 5.17}$$

Donde: las pérdidas en el cable se obtienen de graficas suministradas por los proveedores, y el voltaje de operación a la frecuencia de trabajo del equipo se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{OPER} = \frac{Hz}{60} * V_{No\ \min\ al} \quad \text{……Ecuación 5.18}$$

5.2.8 Variador de Frecuencia VSD. Los efectos de variación de frecuencia pueden verse al elaborar las curvas de capacidad a diferentes frecuencias basados en la curva de comportamiento a 60 Hertz como se observa en la figura 50.

Figura 50. Curva de capacidad a diferentes frecuencias, Bomba SN3600.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Las ecuaciones usadas para tal fin son las siguientes y se conocen como leyes de afinidad de las bombas centrifugas.

$$\frac{Nueva\ Tasa}{Tasa\ a\ 60Hz} = \frac{Nueva\ \ frecuencia}{60Hz} \quad \text{.....Ecuación 5.19}$$

$$\frac{Nueva\ Cabeza}{Cabeza\ a\ 60Hz} = \left[\frac{Nueva\ \ frecuencia}{60Hz}\right]^2 \quad \text{.....Ecuación 5.20}$$

$$\frac{Nueva\ Potencia}{Potencia\ a\ 60Hz} = \left[\frac{Nueva\ \ frecuencia}{60Hz}\right]^3 \quad \text{.....Ecuación 5.21}$$

5.3 DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

5.3.1 Recopilación de Datos

- Estado mecánico

- Diámetro del revestimiento : 7”, 23 lpp
- Diámetro de la tubería de producción: 3 1/2”, 9.3 lpp
- Punto medio de perforaciones (MPP): 3320 pies TVD
- Profundidad de perforaciones : 3047-3368 pies

- Actuales

- Presión estática (Pr) : 950 psi a MPP
- Presión en cabeza (WHP) : 115 psi
- Presión en el revestimiento : 0 psi
- Rata de producción deseada : 2200 bpd
- Presión de prueba (PwfTest) : 220 psi
- Rata de producción de prueba (QTest) : 2500 bfpd
- Temperatura de fondo (BHT) : 160 F
- Corte de agua : 95 %

- Datos del fluido a producir

- Gravedad específica del agua (SG_W) : 1.03
- Gravedad API del aceite : 27˚ API
- Gravedad específica del gas (SG_g) : 0.65
- Gravedad específica del fluido (SG_{mix}) : 1.024
- Presión de burbuja (P_b) : 950 psi
- Factor de compresibilidad del gas (Z) : 0.85

- Fuentes de energía

- Voltaje disponible en superficie : 13.8 KV
- Frecuencia en superficie : 60 Hz

- *Posibles problemas*

  - Arena
  - Tipo de fluido corrosivo.

5.3.2 Cálculos del diseño. A continuación se mostrará un procedimiento paso a paso para el diseño de un sistema electrosumergible.

- *Selección de la profundidad de la bomba*

Profundidad de la bomba = 2936 ft

Se escoge una profundidad de pocos pies por encima de las perforaciones en este caso (2936 ft)

- *Cálculo de PIP*

- Cálculo de *IP*

Sabiendo que estamos por debajo de la Pb (Ps y PwfTest) utilizamos siguiente ecuación:

$$IP = \frac{Q_{Test}}{Fo * \left[\frac{Ps\left(1 - 0.2\left(\frac{Pwf_{Test}}{Ps}\right) - 0.8\left(\frac{Pwf_{Test}}{Ps}\right)^2\right)}{1.8} \right] + Fw\left(Ps - Pwf_{Test}\right)}$$ …….Ecuación 5.22

$$IP = \frac{2500}{0.05 * \left[\frac{Ps\left(1 - 0.2\left(\frac{220}{950}\right) - 0.8\left(\frac{220}{950}\right)^2\right)}{1.8} \right] + 0.95 * \left(950 - 220\right)}$$ ……Ecuación 5.23

IP = 3,47 bfpd / psi

- Cálculo de Pwf al caudal deseado (2200 bfpd)

Utilizamos la ecuación de Vogel debido a que la Ps se encuentra por debajo de la Pb

$$\frac{Q}{Q\max} = 1 - 0.2\left(\frac{Pwf_{Test}}{Ps}\right) - 0.8\left(\frac{Pwf_{Test}}{Ps}\right)^2 \text{ ……..Ecuación 5.24}$$

Hallamos primero Qmax con la QTest y PwfTest

$$Q\max = \frac{2500}{1 - 0.2\left(\frac{220}{950}\right) - 0.8\left(\frac{220}{950}\right)^2}$$

Qmax = 2744 bfpd

Ahora hallamos la Pwf o la producción deseada (2200 bfpd)

$$\frac{2200}{2744} = 1 - 0.2\left(\frac{Pwf}{950}\right) - 0.8\left(\frac{Pwf}{950}\right)^2$$

Solucionamos la anterior ecuación con la ecuación cuadrática obteniendo que:

Pwf = 373 psi

- Cálculo PIP a la tasa deseada (2200 bfpd)

PIP = Pwf - 0,433 SGmix (MPP – Profundidad de la bomba)

PIP = 373 - 0,433 (1,024) (3320 - 2936)

PIP = 203 psi

- Se hallan *los volúmenes de fluidos en los diferentes nodos.*

Primero se deben calcular las siguientes relaciones*:*

- Relación gas-aceite en solución

Se calcula a través de la ecuación de Standing (Ecuación 5.1).

Donde en este caso Pb = PIP ya que estamos trabajando por debajo de Pb

$$R_s = 0.65 * \left(\frac{203}{18} * \frac{10^{0.0125*27}}{10^{0.00091*160}} \right)^{1.2048}$$

Rs = 26.68 scf/STB

- Factor volumétrico de formación de aceite (Bo)

Se calcula de acuerdo a la ecuación de Standing (Ecuación 5.2):

$$B_o = 0.972 + 0.000147 * \left(26.68 * \left(\frac{0.65}{0.893} \right)^{0.5} + 1.25 * 160 \right)^{1.175}$$

Bo = 1,0563 res bl / STB

- Factor volumétrico de formación del gas (Bg) con la ecuación 5.4:

$$B_g = 5.04 * \frac{0.85 * (160 + 460)}{203 + 14.7}$$

Bg = 12,2 res bl / Mscf

Ahora se procede a hallar los volúmenes de:

Superficie

- Gas producido total (Ecuación 5.5).

$$Gas_{Total} = \frac{bopd * GOR}{1000} = \frac{2200(0.05) * 471}{1000} = 51.8$$

- Gas en solución (Ecuación 5.6).

$$Gas_{Solucion} = \frac{bopd * Rs}{1000} = \frac{2200(0.05) * 26.68}{1000} = 2.93$$

- Gas libre (Ecuación 5.7).

  Free gas = 51, 8 Mscf – 2,93 Mscf

  Free gas = 48. 87 Mscf

Antes de Intake

- Volumen de aceite (Vo) (Ecuación 5.8)

  Vo = 110 * 1,0563 = 116 res bl / day

- Volumen de gas (Vg) (Ecuación 5.9)

  Vg = 48,87 * 12,2 = 596,2 bgpd

- Volumen de agua (Vw) (Ecuación 5.10)

  Vw = 2200 * (0,95) = 2090 bwpd

- Volumen total antes de Intake (VT) (Ecuación 5.11)

  VT = 116 + 596,2 + 2090 = 2802,2 bfpd

- Porcentaje de gas libre antes de Intake con el fin de determinar si es necesario implementar algún equipo para el manejo del gas (Ecuación 5.12).

$$\%FreeGas = \frac{Vg}{Vt} * 100 = \frac{596.2}{2802.2} * 100 = 21\%$$

Sabiendo que el desempeño de la bomba se verá afectado si el porcentaje de gas libre que entra a su primera etapa es mayor al 10%, es necesario instalar un equipo para manejo de gas, en este caso un VGSA el cual cuenta con una eficiencia de entre 80 a 95%. El VGSA será de construcción ARZ debido a los problemas de arena presentes en el pozo.

Para este diseño se asume una eficiencia del 80% para el VGSA y una separación natural de un 15% de acuerdo a las condiciones del fluido.

De acuerdo a lo anterior se procede a determinar los volúmenes de fluido que entran a la primera etapa de la bomba.

<u>A través de la primera etapa de la bomba.</u>

- Volumen de gas (Vg)

  Vg = Vg (antes de Intake) * (1 – Sep. Nat)*(1-Ef. separador)……..Ecuación 5.25

  Vg = 596,2 * (1-0,15)*(1-0,8) = 101,35 bgpd

- Volumen total (VT) sabiendo que Vw y Vo permanecen constantes con referencia a los volúmenes antes de Intake.

  VT = Vo + Vg + Vw = 116 + 101,35 + 2090 = 2307 bfpd

- Gas libre que pasa por la primera etapa de la bomba como porcentaje de la mezcla total.

$$\%FreeGasPump = \frac{Vg}{Vt} * 100 = \frac{101.35}{2307} * 100 = 4.39\%$$

- *Cálculo de la cabeza dinámica total (TDH*) (Ecuación 5.13)

- Se determina el levantamiento neto vertical

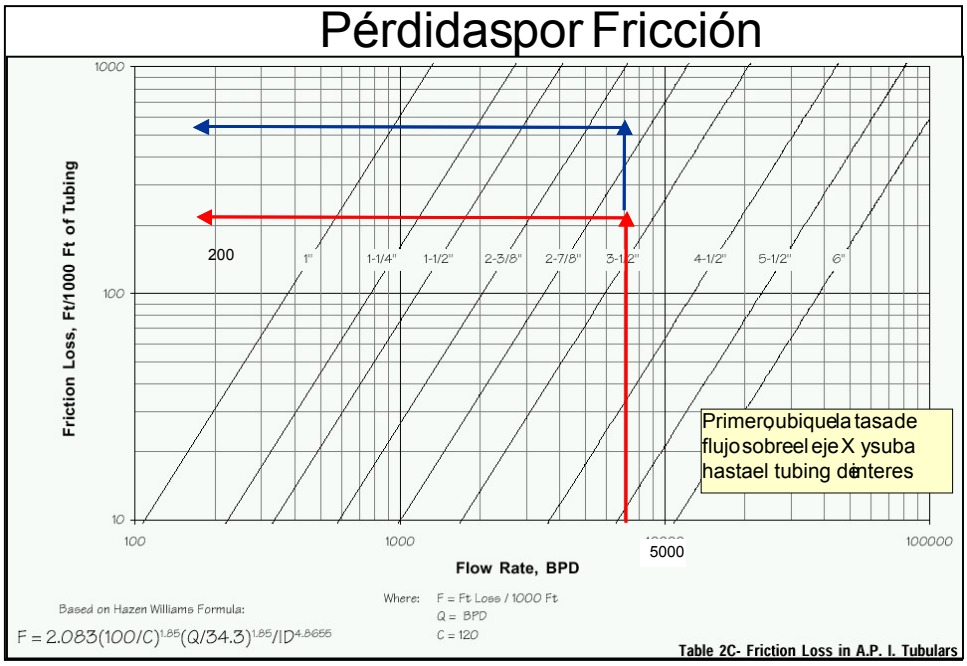
$$LNV = PumpVerticaDepth - \left(\frac{PIP * 2.31 ft / psi}{SG_{Mix}} \right) \quad \text{……Ecuación 5.26}$$

$$LNV = 2936 - \left(\frac{203 * 2.31 ft / psi}{1.024} \right) = 2478 ft$$

- Determino pérdidas de fricción (tbg 3 ½ , 9,3 # / ft)

De la figura 51 se obtiene un valor de 20 ft/1000ft de tubing de acuerdo al volumen total de fluido (2307 bfpd).

Figura 51. Perdidas por fricción en la tuberia.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Entonces:

$$Perd.xFricción = \frac{20}{1000} * 2936 = 58.72\,ft \text{ .....Ecuación 5.27}$$

- Se determina la presión en cabeza en pies de columna

THP (ft) = THP (psi) * 2,31 ft/psi = 115 * 2,31 = 259,4 ft

- Se determina entonces la TDH

TDH = 2478 + 58,72 + 259,4 = 2796 ft

- *Selección de la bomba.*

Teniendo en cuenta el caudal o manejar por la bomba, (2307 bfpd) además del Drift que se tiene para el casing de 7" y 23 #/ft (6,241"), las siguientes tres bombas se ajustan a esta condición.

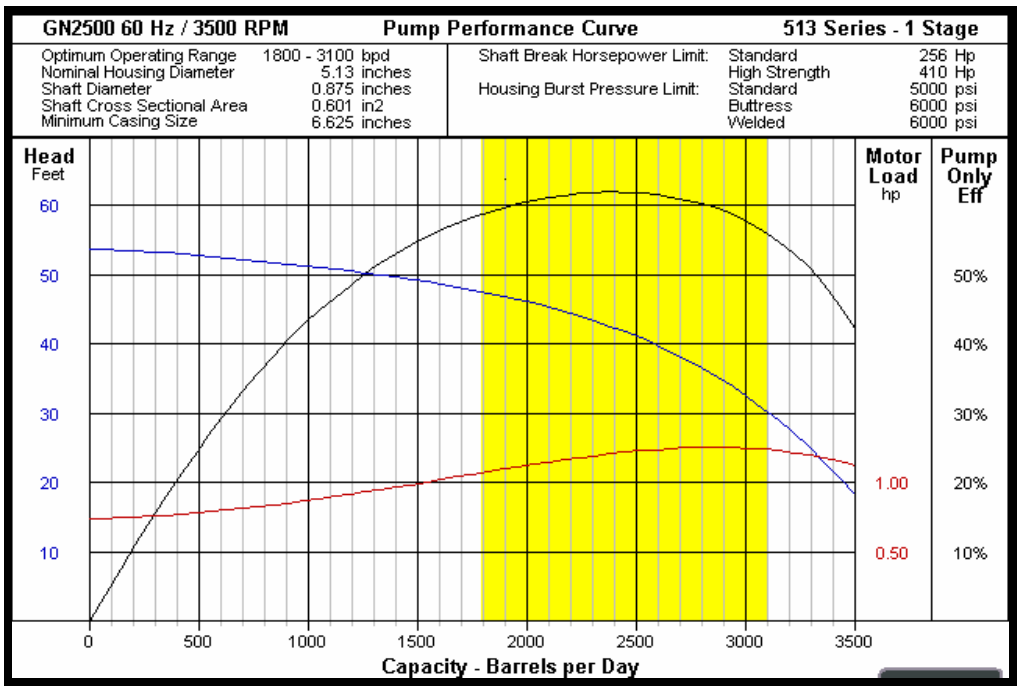
Tabla 2. Algunas bombas con sus respectivos diametros y caudales.

BOMBA	OD	Caudal min	Caudal máx.
GN 2500	5,125	1800	3100
G 2700	5,125	2000	3400
SN 2600	5,375	1600	3200

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

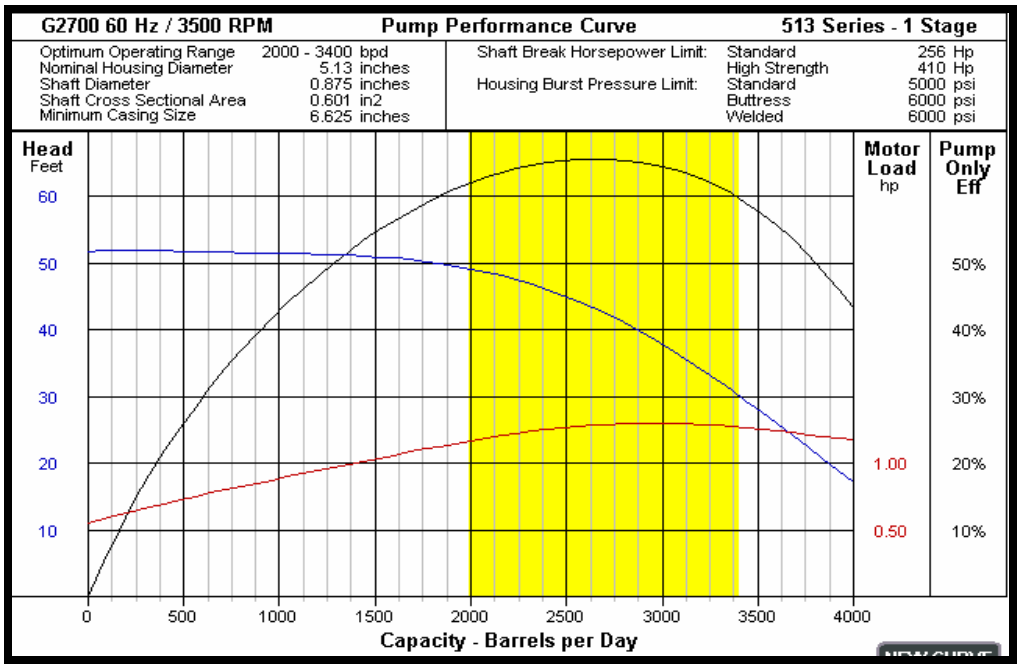
A continuación se muestran las tres curvas de desempeño de las bombas para una etapa a 60 Hz.

Figura 52. Curva de desempeño a 60 Hz para una etapa. Bomba GN2500



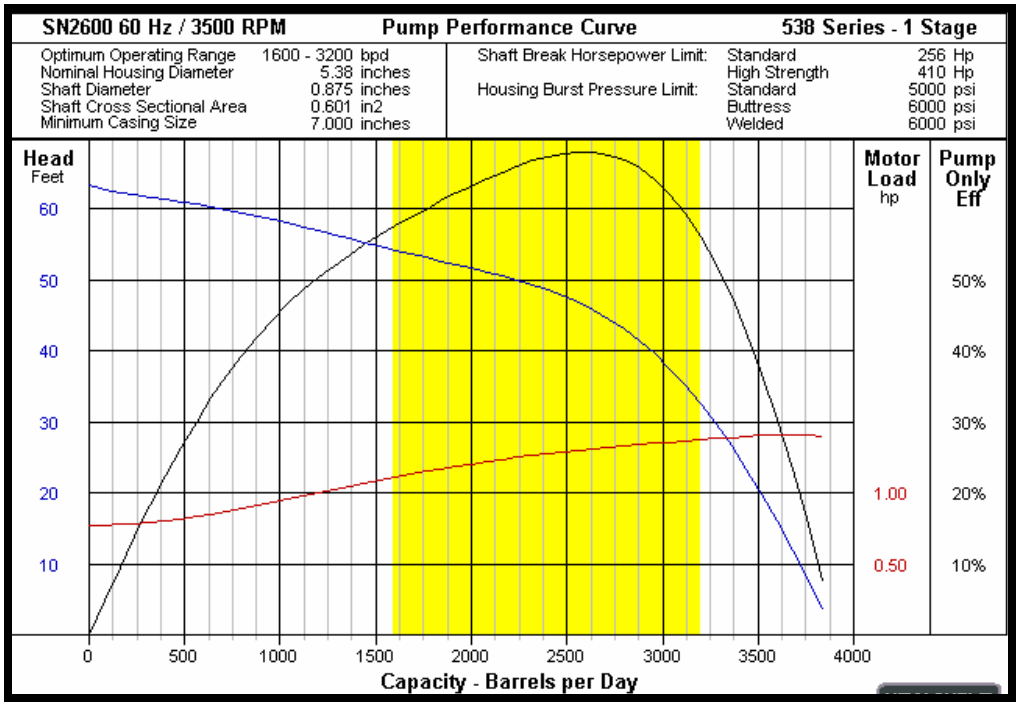
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Figura 53. Curva de desempeño a 60 Hz para una etapa. Bomba G2700



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Figura 54.Curva de desempeño a 60 Hz para 1 etapa. Bomba SN 2600



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Uno de los criterios para la selección de la bomba es que ésta cuente con un amplio rango de operación por debajo del caudal actual total para operar en el futuro, de acuerdo a las proyecciones de productividad del pozo suministrados por la compañía operadora.

Entonces el rango para operar en el futuro para cada bomba es:

GN 2500 → 2307 – 1800 = 507 bpd

GN 2700 → 2307 – 2000 = 307 bpd

SN 2600 → 2307 – 1600 = 707 bpd

De acuerdo al anterior criterio la bomba seleccionada debe ser la **SN 2600**.

- *Cálculo del número de etapas de la bomba*.

- Se determina el número de etapas calculadas.

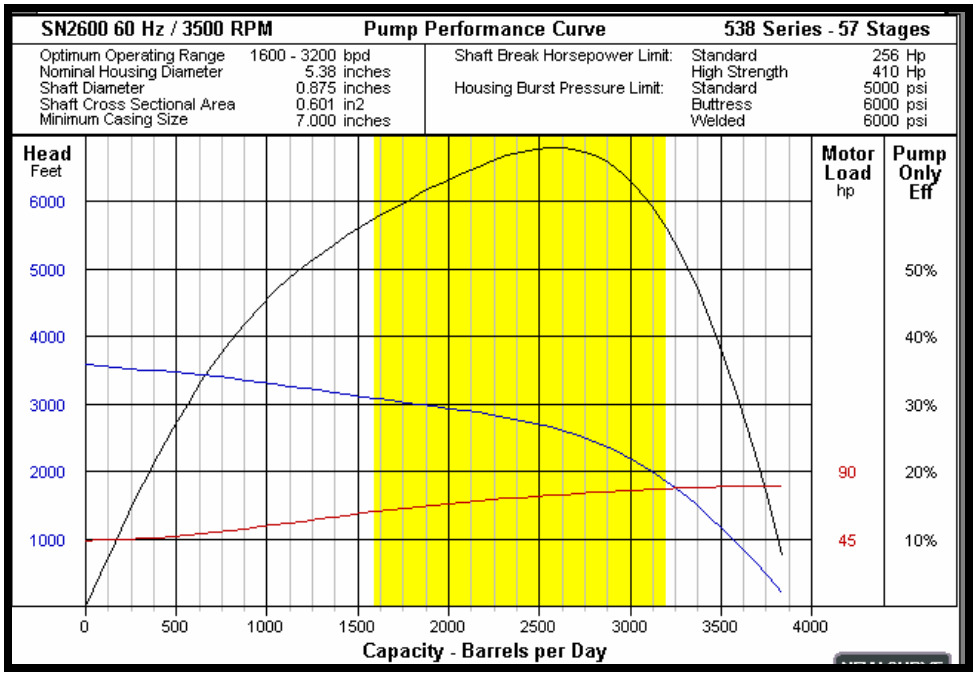
De acuerdo a la gráfica de desempeño de la bomba seleccionada (**SN 2600**) se observa que el levantamiento por etapa a 60 Hz para el manejo del caudal que entra a la primera etapa de la bomba (2307 bfpd) es de 49,2 ft.

Por lo tanto el número de etapas calculadas se obtiene utilizando la ecuación 5.14

$$Total\ etapas = \frac{2796}{49.2\ ft/etapa} = 57$$

A continuación se muestra la gráfica de desempeño de la bomba SN 2600 de 57 etapas a 60 Hz.

Figura 55. Curva de desempeño a 60 Hz para 57 etapas. Bomba SN 2600



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- Se selecciona el housing

Teniendo en cuenta que los posibles problemas son la alta producción de arena y la corrosión presente debido a la composición del fluido es conveniente utilizar construcciones de bombas ARZ- Redalloy la cual es la más aconsejable en ambientes abrasivos y corrosivos.

Los housing disponibles para la bomba SN 2600 de construcción ARZ-Redalloy se muestran en la figura 56.

Se observa que el housing que se ajusta más al número de etapas calculadas (57 etapas) es el Hsg 60 el cual posee una capacidad máxima de 63 etapas.

Figura 56. Housing disponibles para bomba SN 2600 de construcción ARZ

SN2600 Pump Models CLOSE

PUMP SERIES: 538 DIA: 5.13 in. (13.66 cm) O.D.

PUMP TYPE: SN2600 ARZ - Redalloy

Hsg	Length	Weight	Max Stages	FL-CT Part #
10	2.1	93	8	
20	3.5	157	18	
30	4.9	220	29	
40	6.3	284	40	
50	7.7	347	52	
60	9.1	412	63	
70	10.5	473	74	
80	11.9	537	86	
90	13.3	602	97	
100	14.7	665	109	
110	16.1	729	120	
120	17.5	793	131	

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- Número de etapas reales de la bomba.

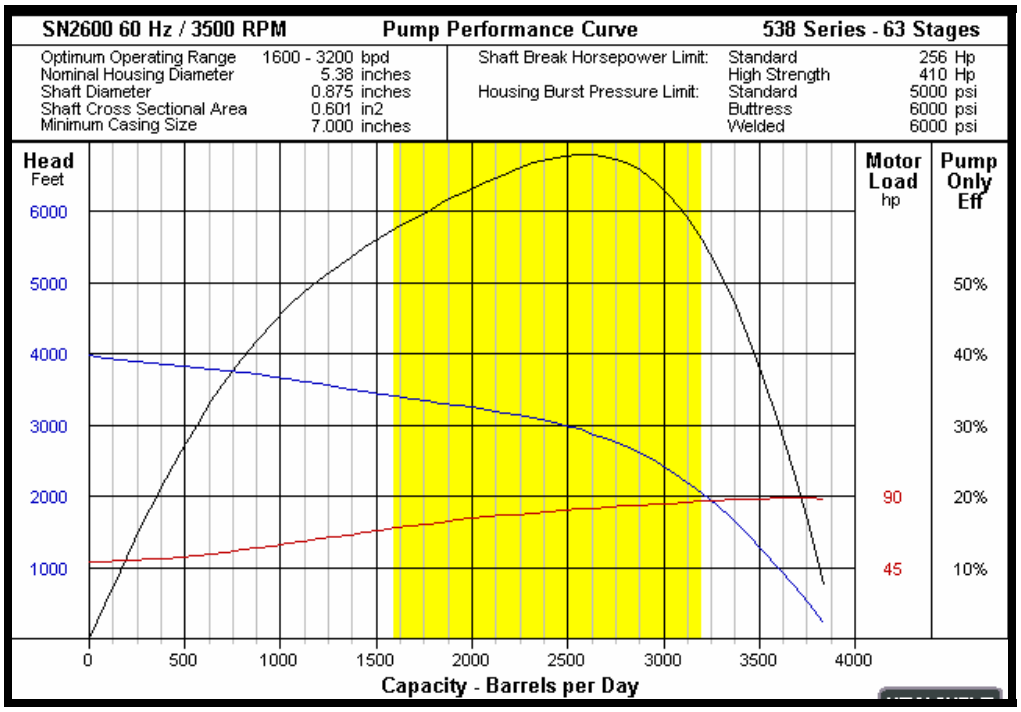
De acuerdo a la capacidad de etapas del housing seleccionado, el número de etapas reales con que va a contar la bomba es de **63 etapas**.

- *Cálculo de la frecuencia de operación.*

Teniendo en cuenta que el número de etapas calculadas es de 57 etapas y que el número de etapas reales que va a tener la bomba es de 63 etapas, tendríamos un excedente de 6 etapas las cuales implicarían una mayor producción teniendo en cuenta que el TDH es el mismo (2796 ft).

En la figura 57 se muestra la curva de desempeño de la bomba SN 2600 de 63 etapas a 60 Hz; en esta, se puede observar que la producción en barriles de fluido por día a la TDH de diseño (2796 ft) para las 63 etapas sería de 2720, la cual excede en alrededor de 417 barriles a la producción deseada a condiciones de bomba. (2720 – 2307 = 417 bfpd).

Figura 57.Curva de desempeño a 60 Hz para 63 etapas. Bomba SN 2600

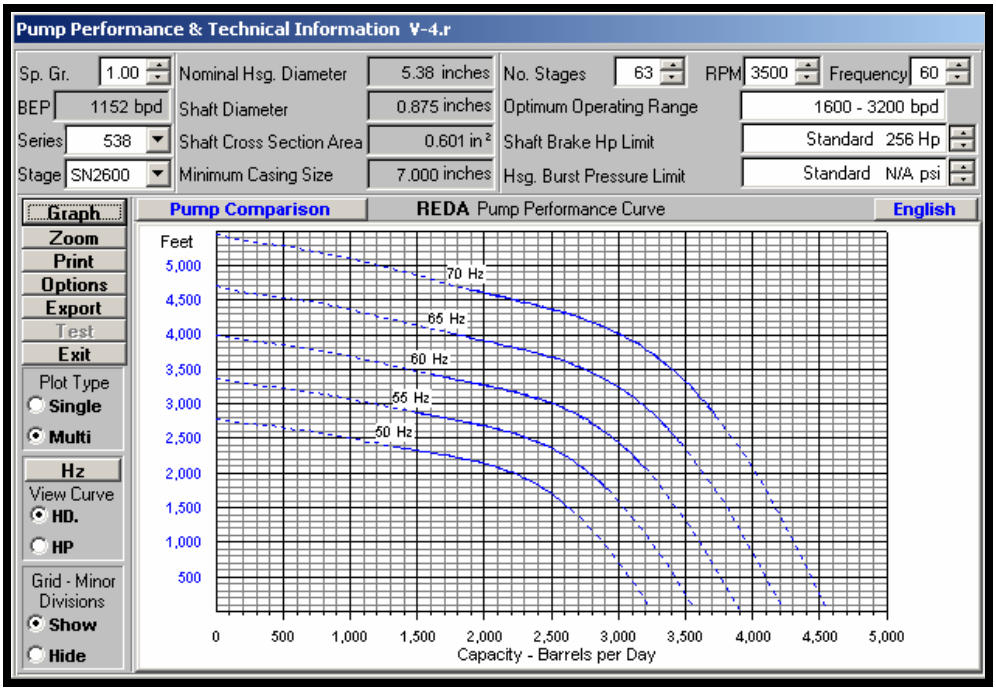


Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Debido a lo anterior es conveniente evaluar con que frecuencia debe trabajar la bomba para que cumpla tanto con la condición de producción deseada a condiciones de bomba (2307 bfpd) como con la TDH (2796 ft).

Con el fin de conocer la frecuencia de trabajo se ingresa con los valores de producción deseada (2307 bfpd) y TDH (2796 ft) a las curvas de desempeño de frecuencia variable de la bomba SN 2600 de 63 etapas mostrados en la Figura 58; de allí se obtiene que la frecuencia de trabajo es de 57 Hz.

Figura 58. Curvas de desempeño a frecuencia variable para 63 etapas. Bomba SN 2600



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- *Cálculo de la potencia requerida por la bomba a la frecuencia de operación.*

Antes de calcular la potencia a la frecuencia de operación de la bomba (57 Hz) es necesario hallar la potencia requerida a 60 Hz. la cual en definitiva será la potencia requerida del motor.

- Se determina la potencia requerida por cada etapa a 60 Hz.

De la figura 57 que muestra la curva de desempeño de la SN 2600 a 60 Hz, tenemos que:

BHP/etapa @ 60Hz = 1,25 BHP/etapa

- Se determina la potencia requerida por las 63 etapas:

BHP/63etapas = 1,25 BHP/etapa*63 etapas

BHP = 78,75 BHP

- Se determina la potencia requerida por el separador de gas es este caso modelo **VGSA, S 20-90, serie 538**; a 60 Hz

De acuerdo a la Tabla 3**,** tenemos que:

Tabla 3. Potencia requerida para diferentes tipos de separadores.

Separador Rotativo	*Potencia Requerida @ 60 Hz*
Serie 338, ARS	1.75 HP
Serie 400, DRS	1.25 HP
Serie 540, GRS	7.00 HP
Serie 538, VGS S20-90	< 5.0 HP.

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

BHPsep.gas @ 60 Hz. = 5 BHP

- Se determina la potencia requerida por la bomba a 60 Hz. A partir de la siguiente expresión:

$$\left(BHP_{Bomba}@60Hz\right)_{Total} = \left(BHP_{Bomba}@60Hz\right) + \left(BHP_{SepGas}@60Hz\right) \text{.....Ecuación 5.28}$$

$$\left(BHP_{Bomba}@60Hz\right)_{Total} = 78.75 + 5 = 83.75BHP$$

- Ahora se determina la potencia requerida por la bomba a 57 Hz a partir de la siguiente expresión:

$$BHP_{Bomba}@Hz = \left[\left(\frac{HzOperación}{60}\right)^3 * \left(BHP_{Bomba}@60Hz\right)_T\right] \text{.....Ecuación 5.29}$$

$$BHP_{Bomba}@57Hz = \left[\left(\frac{57}{60}\right)^3 * \left(83.75\right)\right] = 71.8BHP$$

- *Selección de la serie, el tipo y la configuración del motor*.

Entre los principales criterios para la selección del motor se encuentran:

- Se debe seleccionar el motor de mayor diámetro que pueda ser instalado libremente dentro del casing.
- Se debe tener en cuenta que la temperatura de fondo (BHT) no se encuentre fuera del rango de temperatura en el cual el motor puede operar.
- Se debe seleccionar la configuración (un solo motor o tandem de motores) que cumpla con los requerimientos de potencia por parte de la bomba.

De acuerdo a los anteriores criterios se selecciona un solo motor, serie 540, tipo MK de 100 HP, ver figura 59.

El voltaje del motor puede ser seleccionado basado en las siguientes consideraciones económicas.

- Los motores de alto voltaje (por lo tanto baja corriente) tienen mas bajas pérdidas de voltaje por tanto requieren cables de menor tamaño.

- Entre más alto el voltaje del motor, mayor será el costo del controlador de superficie.

Figura 59. El Rango de los Motores MK, serie 540, a 60 Hz y a 50 Hz

HP		Volts		Amps	Type	L (ft)	Wt (lbs)	C. Steel Part #	Redalloy Part #
100	83	1305	1088	51.5	S	15.7	1007	1089846	1090943
					UT	15.8		1090216	1091313
		2313	1928	27	S	15.7	1007	1089853	1090950
					UT	15.8		1090224	1091321
120	100	1105	921	69.5	S	18.5	1194	1089861	1090968
					UT	18.5		1090232	1091339
					CT	18.8		1090372	1091479
		2270	1892	32.5	S	18.5	1194	1089879	1090976
					UT	18.5		1090240	1091347
140	117	1022	852	85	S	21.2	1380	1089887	1090984
					UT	21.2		1090257	1091354
					CT	21.5		1090380	1091487
		1299	1083	69.5	S	21.2	1380	1089895	1090992
					UT	21.2		1090265	1091362
					CT	21.5		1090398	1091495
		2101	1751	40.5	S	21.2	1380	1089903	1091008
					UT	21.2		1090273	1091370
160	133	1153	961	82.5	S	23.9	1580	1089911	1091016
					UT	24.0		1090281	1091388
					CT	24.3		1090406	1091503
		2078	1732	47.5	S	23.9	1580	1089929	1091024
					UT	24.0		1090299	1091396

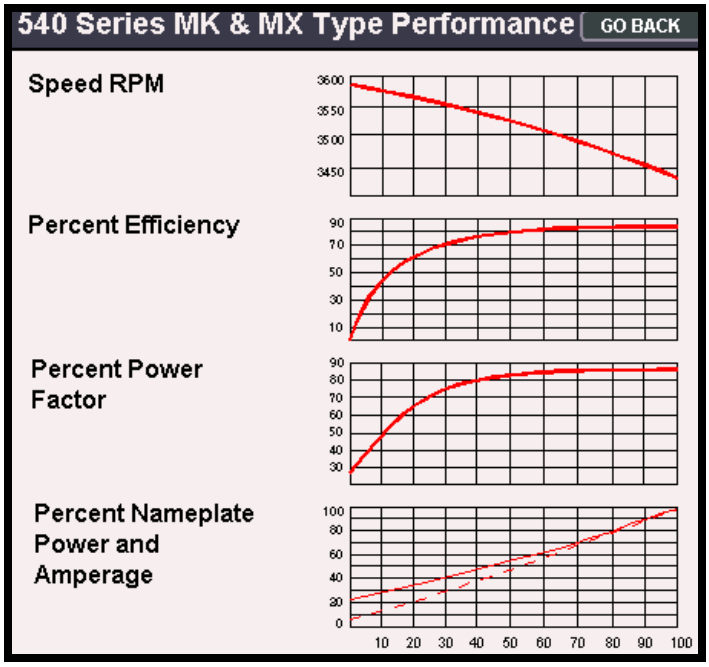
Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- *Selección del voltaje del motor.*

Para este caso se escogió (indistintamente de los anteriores criterios ya que se necesitaría un análisis económico adicional) un motor: (Ver figura 59)

MK – UT de 100 HP, 1305V y 51,5 Amp.

Figura 60. Curvas de desempeño de los motores MK, serie 540.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- *Cálculo de la carga del motor en operación*.

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\%C\arg aMotor = \left(\frac{(BHP_{Bomba}@60Hz)_T}{PotenciaPlacaMotor} \right) * 100 \text{ ……..Ecuación 5.30}$$

$$\%C\arg aMotor = \left(\frac{83.75}{100} \right) * 100 = 83.75\%$$

- *Cálculo de la corriente de operación*

Entrando con el porcentaje de carga del motor en la figura 60, se obtiene que el porcentaje de amperaje con respecto al de la placa es igual a 83,75%. Con este valor se halla la corriente de operación a partir de la siguiente expresión:

$$Amp_{Opèración} = Amp_{Placa} * \left(\frac{\%Amp.con\,\mathrm{Re}specto@Placa}{100} \right)$$ .....Ecuación 5.31

$$Amp_{Opèración} = 51.5 * \left(\frac{83.75}{100} \right)$$

Amp. Operación = 43,13 Amp.

- *Selección de serie y configuración del protector.*

- Selección de la serie

Normalmente la serie de la sección del protector es la misma que la de la bomba, aunque, hay excepciones y adaptadores especiales están disponibles para conectar las unidades. En este ejemplo se escogerá un protector serie 540.

- Selección de la configuración del protector.

De acuerdo a la tabla 4, una de las configuraciones que se podría utilizar para esta aplicación sería la de laberinto serie bolsa paralelo bolsa (LSBPB) ya que aplicaría bien teniendo en cuenta las condiciones de este pozo.

- *Selección del material de las bolsas.*

De acuerdo a la sección de aplicación del protector, tenemos que el elastómero mas apropiado, a relativas bajas temperaturas (< 250 °F), a utilizar en las bolsas es el nitrilo.

Tabla 4. Configuraciones del protector según el tipo de aplicaciones.

Tipo de Aplicación	L	LSL	LSLSL	B	LSB	LSBPB	BSL	BSBSL	BPBSL	LSBSB
BHT < 250° F	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2
250° F < BHT < 300° F	3	3	2	4	3	3	3	3	3	3
(A)	2	2	1	3	2	1	2	2	1	2
G < 0.82	4	4	4	3	1	1	1	1	1	1
Operación Intermitente	4	4	2	3	2	2	2	2	2	1
Pozo desviado	4	4	4	3	2	2	2	2	2	3
Fluido del pozo miscible	4	4	4	3	1	1	1	1	1	3
HP < 50	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2
HP < 150	2	2	1	4	1	1	1	1	1	2
HP > 150	2	2	1	4	4	1	4	4	1	3
Fluido del pozo agresivo (B)	2	2	1	4	2	2	4	4	4	2

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- *Selección del cojinete de empuje (Thrust Bearing.)*

▪ Se determina el máximo levantamiento por etapa (a flujo 0) a la frecuencia de operación.

Se lee de la curva de desempeño de la bomba (SN 2600) para una etapa a 60 Hz. Que el levantamiento máximo es de 63 ft / etapa.

Este valor se lleva a condiciones de operación mediante la siguiente ecuación.

$$H\max_{(HzOperación)} = H\max_{(60Hz)} * \left(\frac{HzOperación}{60}\right)^2$$ ……Ecuación 5.32

$$H\max_{(57Hz)} = 63 * \left(\frac{57}{60}\right)^2 = 57\,ft/etapa$$

- Se determina el empuje máximo (a caudal 0) generado por la bomba en lb-f a partir de la ecuación:

Fmáx = N * Hmáx * 0,433 psi/ft * (SG) * A……Ecuación 5.33

Donde A es el área de la sección transversal del eje de la bomba (SN 2600) que es igual a 0,595 pulg ^{2}.

Entonces:

Fmáx = 63 * 57 * 0,433 * 1,024 * 0.595

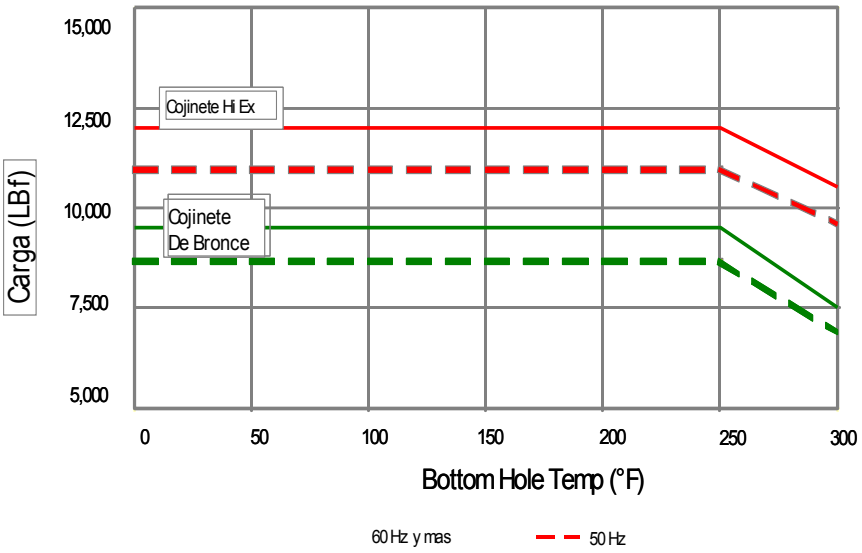
Fmax = 947,37 lb-f

Por lo tanto de acuerdo a la figura 61, que muestra los límites de carga que el cojinete puede absorber con seguridad en función de la temperatura para protectores serie 540, podemos concluir que se puede utilizar un cojinete standard (Thrust Bearing) el cual maneja una carga máxima de 2500 lb-f a las condiciones de temperatura presentes (BHT = 160).

- *Selección del tamaño del cable (AWG)*

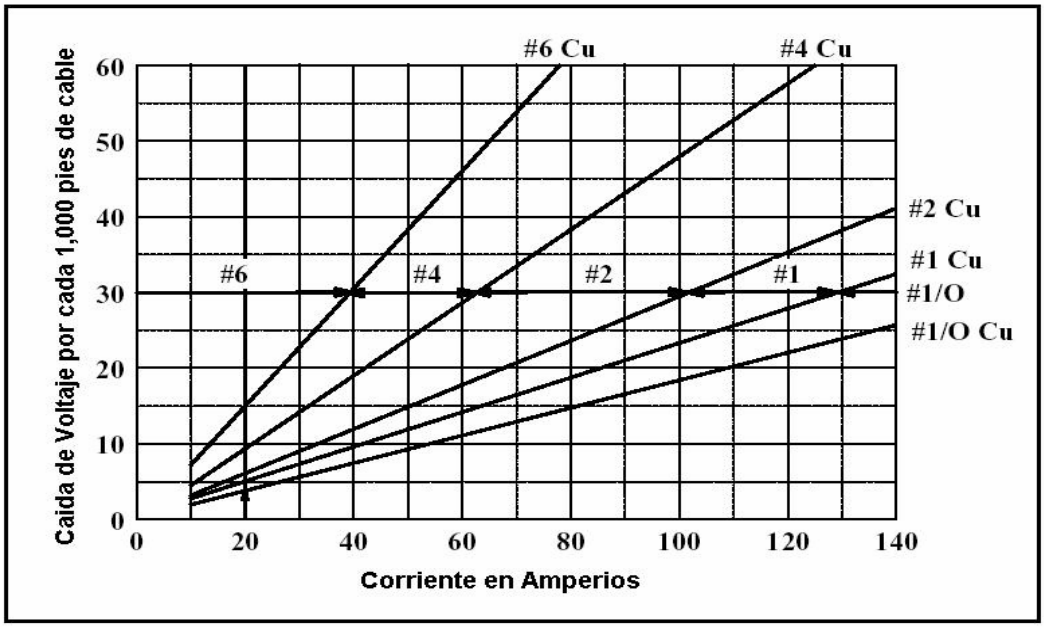
La selección del cable se realiza por medio de la figura 62, la cual muestra las pérdidas de voltaje por cada 1000 ft para los diferentes tamaños de cable. Es recomendable seleccionar el calibre que nos resulte en una caída de voltaje máxima de 30 voltios por cada cien pies para la corriente de placa de motor.

Figura 61. Ratings de carga para protector Vs Temperatura para aceite REDA 2.



Fuente: SCHLUMBERGER – ARTIFICIAL LIFT

Figura 62. Carta de pérdida de voltaje en el cable



Fuente: REDA. Submersible Pump Handbook

Para este diseño se selecciona un cable número 2 el cual tiene unas pérdidas de 16 voltios por cada 1000 pies a la corriente de placa (51,5 Amp.) y de 13 a la corriente de operación (41.13 Amp.).

- Cálculo de la caída de voltaje en la longitud total del cable (Para este caso 3000 pies la cual incluye la longitud del cable necesario en superficie).

- Se determina la temperatura del conductor

La temperatura del conductor se determina a partir de la ecuación:

$$Tc = (a * I^2) + BHT \quad \text{.....Ecuación 5.34}$$

Donde a es una constante para cada tipo de cable, para este caso a = 0,0090

$$Tc = (0{,}0090 * 51{,}5^2) + 160$$
$$Tc = 184\ °F$$

- Se determina la pérdida de voltaje en la longitud del cable.

La perdida de voltaje se determina a partir de la siguiente expresión:

$$PerdidaVoltaje = \frac{\left(PerdidaVoltaje@\ Amp._{Operacion} / 1000\,ft\right) * L_{Cable} * F_{cT}}{1000} \quad \text{.....Ecuación 5.35}$$

Donde FcT es un factor de corrección por temperatura a la temperatura del conductor (Tc = 184 °F), para este caso FcT = 1,288.

Entonces sabiendo que los amperios de operación son 43.13 tenemos que:

Pérdida de voltaje = $\frac{13 * 3000 * 1{,}288}{1000}$

Pérdida de voltaje = 50 Voltios

- *Selección del tipo de cable.*

Teniendo en cuenta la temperatura del conductor se usará cable de la línea REDAHOT que tolera una temperatura de hasta 275 °F, posee aislamiento EPDM y forro de nitrilo resistente al petróleo.

Para este caso se utilizará cable plano con armadura monel.

- *Cálculo del voltaje requerido en superficie*.

Voltaje superficie = Voltaje de operación del motor + Perdida de voltaje

$$VoltajeSuperficie = 1305 * \left(\frac{57}{60}\right) + 50 \text{ =1290 V}$$

- *Cálculo de los KVA requeridos en superficie* (Ecuación 5.16)

KVA = $\frac{\text{Voltaje superficie} * \text{Amp.Op..Motor} * 1{,}73*1.1}{1000}$

KVA = $\frac{1290 * 43.13 * 1{,}73*1.1}{1000}$ = 101 KVA

- *Selección de la extensión de conexión del motor (Motor Lead Extension)*

Tipo: Serie 540, #4, 4 KV; KELB.
Metalurgia: Monel.

La longitud del Motor Lead Extensión debe ser mayor en por lo menos 6 pies a la suma de las longitudes del protector, el separador de gas, y la bomba, asegurándose además que la sección del empalme no quede en las uniones de las juntas. Entonces:

Bomba: 10.8 pies
Separador de gas: 4 ft
Protector: 8.9 ft
Total: 23.7 pies

Se utilizará el estándar de 40 pies.

Clearance:	ID CSG:	6,241" DRIFT
	OD BHA:	5,40"
	Cable:	0,525"
	Total:	*0,316" OK*

No hay problemas con el clearance al usar este tipo de Extensión plana de cable (FCE).

- *Selección del sensor de fondo*

Se seleccionará un sensor de fondo Phoenix tipo 0 el cual permite medir a demás de la presión de entrada y la temperatura de fondo, la vibración del motor, las fugas de corriente del sistema eléctrico ESP y la temperatura del devanado del motor o del aceite del motor

- *Selección del Transformador Reductor (Step Down Transformer)*

Como la potencia disponible es de 13,8 KV es necesario usar un transformador reductor de voltaje de tres fases SDT para reducir el voltaje hasta 480 voltios que es el requerido para el funcionamiento del variador o controlador de frecuencia (VSD).

De 13,800 V @ 480 V

- *Variador de Frecuencia (VSD)*

▪ Se selecciona el VSD apropiado.

Para seleccionar el VSD es necesario tener en cuenta los KVA requeridos en superficie que para este caso son 101 KVA. Con este valor mas un 15% de factor de seguridad se busca en los catálogos el VSD apropiado.

Los KVA mínimos que debe tener el VSD teniendo en cuenta el factor de seguridad son:

$$KVA_{MinVSD} = 1.15 * 101 = 116.1 KVA$$

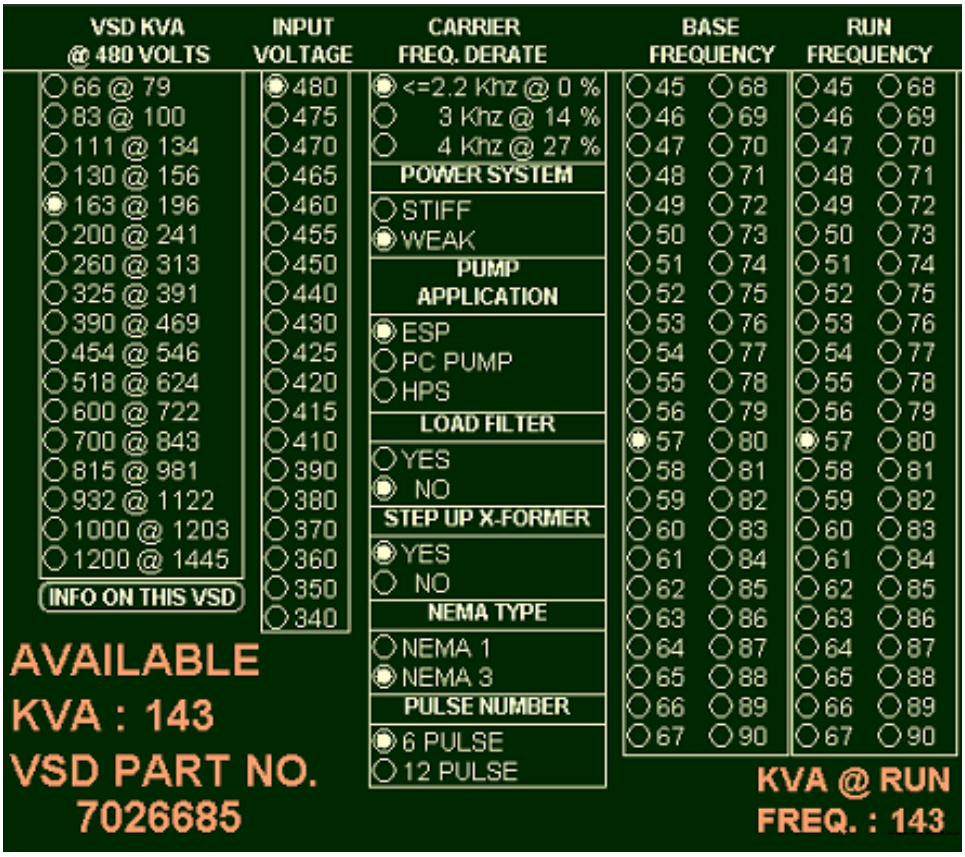
De acuerdo a la figura 63, los KVA a la frecuencia de operación son 143 KVA con un voltaje de entrada de 480 V.

Por tanto, el VSD seleccionado es: *De 163 KVA y 196 Amp.*

Onda de Frecuencia: 2,2 KHz, Sistema de potencia débil, Nema 3, 6 Pulsos.

Todas las características del VSD están en la figura 64.

Figura 63. Selección del variador de frecuencia.



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

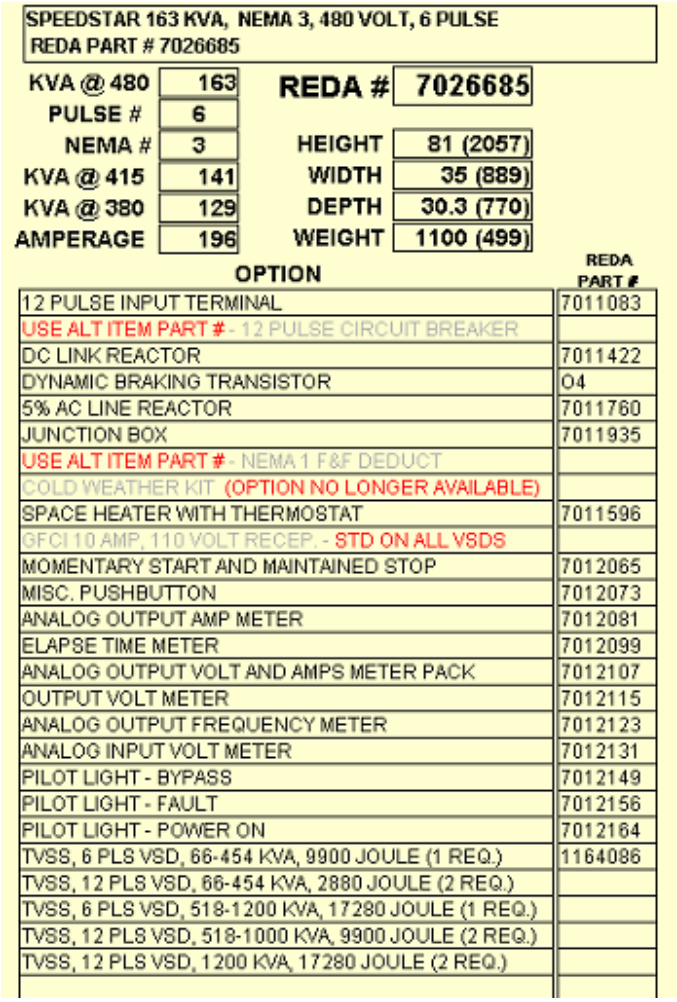
- Se determina la carga de VSD en operación.

Esta se determina a través de la siguiente expresión:

$$\%C\arg a_{VSD} = \frac{KVA_{Superficie}}{KVA_{PlacaVSD}} * 100 \text{ .....Ecuación 5.36}$$

$$\%C\arg a_{VSD} = \frac{101}{163} * 100 = 62\%$$

Figura 64. Características del variador de frecuencia.



SPEEDSTAR 163 KVA, NEMA 3, 480 VOLT, 6 PULSE
REDA PART # 7026685

KVA @ 480	163	REDA #	7026685
PULSE #	6		
NEMA #	3	HEIGHT	81 (2057)
KVA @ 415	141	WIDTH	35 (889)
KVA @ 380	129	DEPTH	30.3 (770)
AMPERAGE	196	WEIGHT	1100 (499)

OPTION	REDA PART #
12 PULSE INPUT TERMINAL	7011083
USE ALT ITEM PART # - 12 PULSE CIRCUIT BREAKER	
DC LINK REACTOR	7011422
DYNAMIC BRAKING TRANSISTOR	O4
5% AC LINE REACTOR	7011760
JUNCTION BOX	7011935
USE ALT ITEM PART # - NEMA 1 F&F DEDUCT	
COLD WEATHER KIT (OPTION NO LONGER AVAILABLE)	
SPACE HEATER WITH THERMOSTAT	7011596
GFCI 10 AMP, 110 VOLT RECEP. - STD ON ALL VSDS	
MOMENTARY START AND MAINTAINED STOP	7012065
MISC. PUSHBUTTON	7012073
ANALOG OUTPUT AMP METER	7012081
ELAPSE TIME METER	7012099
ANALOG OUTPUT VOLT AND AMPS METER PACK	7012107
OUTPUT VOLT METER	7012115
ANALOG OUTPUT FREQUENCY METER	7012123
ANALOG INPUT VOLT METER	7012131
PILOT LIGHT - BYPASS	7012149
PILOT LIGHT - FAULT	7012156
PILOT LIGHT - POWER ON	7012164
TVSS, 6 PLS VSD, 66-454 KVA, 9900 JOULE (1 REQ.)	1164086
TVSS, 12 PLS VSD, 66-454 KVA, 2880 JOULE (2 REQ.)	
TVSS, 6 PLS VSD, 518-1200 KVA, 17280 JOULE (1 REQ.)	
TVSS, 12 PLS VSD, 518-1000 KVA, 9900 JOULE (2 REQ.)	
TVSS, 12 PLS VSD, 1200 KVA, 17280 JOULE (2 REQ.)	

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

- Se determina los amperios de operación del VSD

Esto se halla multiplicando los amperios de placa del VSD por el porcentaje de carga.

Entonces:

$$AmpOperacion = \frac{62 * 196}{100} = 121.5A$$

- *Se selecciona el transformador elevador apropiado (SUT)*

El voltaje requerido por el motor más las pérdidas de voltaje en el cable es de 1290, por lo cual es necesario tener al menos ese voltaje en superficie.

El voltaje de salida del variador es solamente 480 V, es indispensable instalar un transformador elevador -SUT. Con las siguientes características:

KVA_{SUT} =200 KVA

Relación de transformación de 480 V a 1290 V.

En la figura 65 se presenta un diagrama del equipo seleccionado, y en la tabla 5 se muestra el equipo de fondo seleccionado.

Tabla 5. Equipo de fondo seleccionado

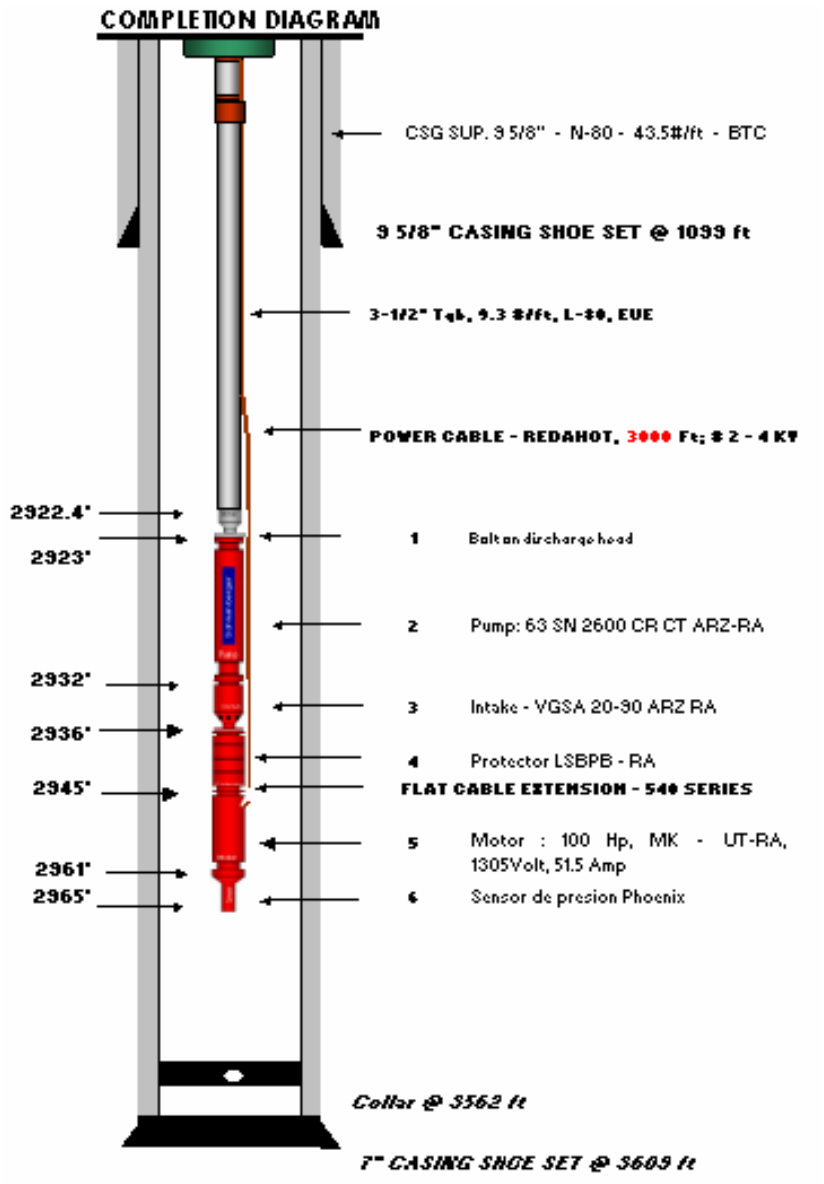
Item	Equipment	OD	Length	Weigth	Qty	Depth	OBSERVACION
	Tubing 3 1/2", 9.3 lbs/ft	3 1/2	31'	9 1/3			Hasta superficie
1	Bolt on discharge head	5.40 X 3 1/2"	0.6	10	1	2,923'	
2	Pump: 63 SN 200 CR CT ARZ-RA	5.38	9.1	412		2,932'	
3	Intake - VGSA 20-90 ARZ RA	5.40	4	74	1	2,936'	
4	Protector LSBPB - RA	5.40	8.9	385	1	2,945'	
5	Motor : 100 Hp, MK - UT-RA, 1305 Volt, 51.5 Amp	5.40	15.8	1007	1	2,961'	
6	Sensor de presion Phoenix	5.40	4	70	1	2,965'	
		TOTAL	42.4	1958			

Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Con respecto al cable, la elección será:

- Cable plano REDAHOT #2 – 4 KV. Monel.
- Flat lead extensión tipo: Serie 540, #4, 4 KV; KELB. Monel.

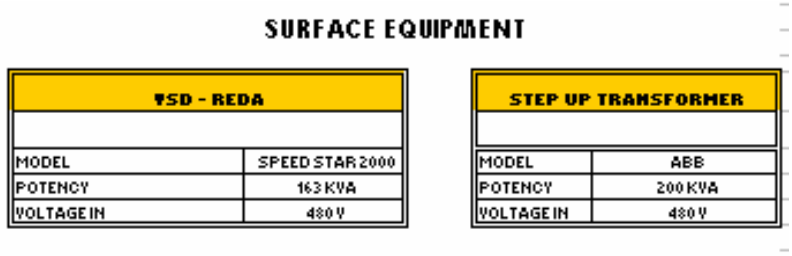
Figura 65. *Diagrama de completamiento.*



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

En la figura 66 se muestra el equipo de superficie seleccionado.

Figura 66. Equipo de superficie seleccionado



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

El transformador a utilizar sera un Transformador reductor (SDT): 13,8 KV @ 480 Voltios.

6. SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO InterACT

Los sistemas de monitoreo y control remoto se han convertido en una herramienta valiosa y poderosa para la industria global. Lo que se busca es que los procesos en general se lleven a cabo de una forma eficiente, segura y de la manera más rápida posible, características que reflejan excelencia y eficiencia en las actividades realizadas, mejorando de esta forma la toma de decisiones y reducción de costos operacionales.

En los últimos años la industria Petrolera se ha valido de la tecnología satelital para lograr optimizar los procesos que realiza, tecnología que permite manejar diversas operaciones y actividades vía remota en tiempo real que solo podrían ser realizadas desde locación.

InterACT se convierte en una herramienta poderosa, que permite mejorar los procesos y actividades realizadas en los pozos, busca además brindarle a los clientes acceso fácil a información detallada sobre el comportamiento de éstos y el estado de operación de los equipos instalados.

6.1 QUE ES INTERACT?

Es un Sistema de Control y Monitoreo remoto, mediante el cual se puede obtener información en tiempo real de un pozo productor o equipo instalado, desde cualquier lugar del mundo a través de un computador personal o portátil y una conexión de Internet o Intranet.

InterACT es una herramienta tecnológica con ventajas notables (Supervisory Control And Data Adquisition) ya que permite el monitoreo y vigilancia de alarmas, manejo y control de las operaciones del campo desde cualquier PC ya que no necesita de un software especial, debido a que se ingresa a una página en Internet con todos los protocolos de seguridad y control de Schlumberger.

Una aplicación especifica de InterACT a los procesos de producción en la Industria petrolera es *ESPWatcher*, herramienta de monitoreo y control para sistemas de levantamiento artificial ESP.

6.2 CUALES SON LAS FUNCIONES DE INTERACT?

Algunas de las funciones de InterACT son:

✓ Proporciona información inmediata de datos recientes o históricos de cualquier locación remota.

✓ Dos vías de comunicación lo que significa que se puede enviar y recibir información esencial para el funcionamiento y monitoreo de los pozos y los equipos instalados.

✓ Acceso en tiempo real a datos de las variables de producción desde cualquier PC con conexión a Internet.

✓ Detecta y envía alarmas de atención de variables monitoreadas por el sistema, tales como temperatura, amperaje del motor, presión, entre otras.

✓ Las alarmas enviadas por el sistema pueden ser determinadas para que informen al personal vía beeper, celular, fax, líneas telefónicas fijas.

✓ Control remoto del equipo instalado en las locaciones desde cualquier lugar del mundo a través de una línea de Internet o intranet.

6.3 CENTRO DE CONTROL Y MONITOREO ESPWATCHER

Es el encargado de vigilar y realizar una supervisión continua sobre los parámetros de operación de los pozos monitoreados vía InterACT.

ESPWactcher realiza un seguimiento de 24 horas diarias al comportamiento de todas las variables monitoreadas, detectando cualquier patrón de anormalidad que pueda presentarse en el funcionamiento del equipo ESP instalado en los distintos pozos. La supervisión continua de la operación y comportamiento de los pozos permite tener un control más detallado y específico sobre ellos, traduciéndose en menores pérdidas de producción y permitiendo tomar acciones preventivas con el fin de protejer la integridad tanto del pozo como de los equipos instalados.

ESPWatcher actúa como una interfase entre el sistema InterACT y el cliente, manteniéndolo informado de los acontecimientos anormales ocurridos en los pozos.

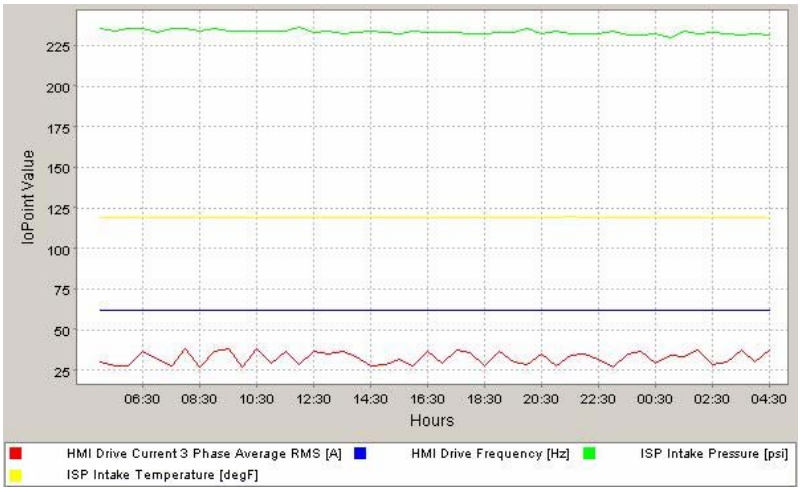
ESPWatcher actúa cuando se presentan eventos en locación que pueden ser manejados vía remota, o cuando no, informa a las estaciones de recolección de dicho evento para que tomen las medidas pertinentes.

6.4 PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN LA LOCACIÓN Y LA MANERA DE DETECTARLOS EN INTERACT.

El sistema satelital InterACT permite realizar una continua supervisión de las condiciones de operación de los diferentes pozos que se encuentran bajo el control del centro de monitoreo, permitiendo así realizar un seguimiento preventivo y un continuo analisis de las variables de operación de los pozos, y ayudando a evitar la presencia de posibles problemas en el equipo instalado así como actuar de manera rapida cuando estos problemas se presentan.
Se muestran a continuación algunas gráficas obtenidas de los parámetros monitoreados (Presión, Temperatura, Frecuencia, Corriente, entre otros.) los cuales permiten detectar anomalías que afectan la producción.

6.4.1 Comportamiento normal de un pozo. Cuando un pozo que está siendo monitoreado por el sistema InterACT tiene un comportamiento normal, es decir, está trabajando sin presentar ningun tipo de problemas, se observa en las graficas obtenidas un comportamiento casi lineal en los diferentes parámetros monitoreados, como se puede ver en la figura 67.

Figura 67. Comportamiento normal de un pozo

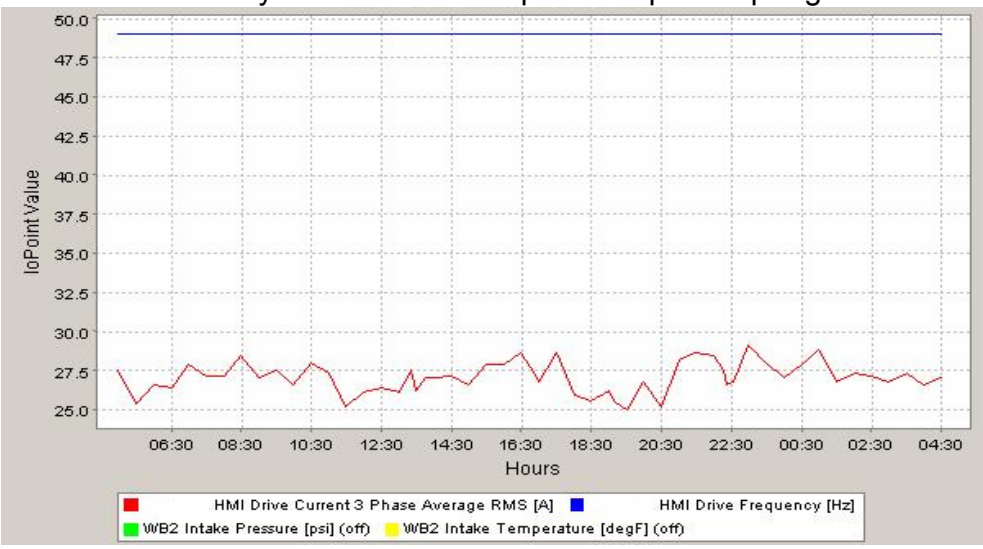


Fuente: SCHLUMBERGER -WCP-Artificial Lift System

6.4.2 Pozo bloqueado por gas. Un problema frecuente que se presenta en la operación de pozos que tienen instalado bombeo electrosumergible es el bloqueo por gas. Este problema se presenta en pozos que tienen una alta relación gas-petróleo. En un pozo que tiene un alto GOR, se presenta una interferencia del gas libre en las primeras etapas de la bomba, lo que provoca el efecto de atascamiento, conocido como bloqueo por gas. El bloqueo por gas se produce cuando el gas llena completamente los pasajes de fluido de los impulsores y difusores bloqueando la entrada de fluido.

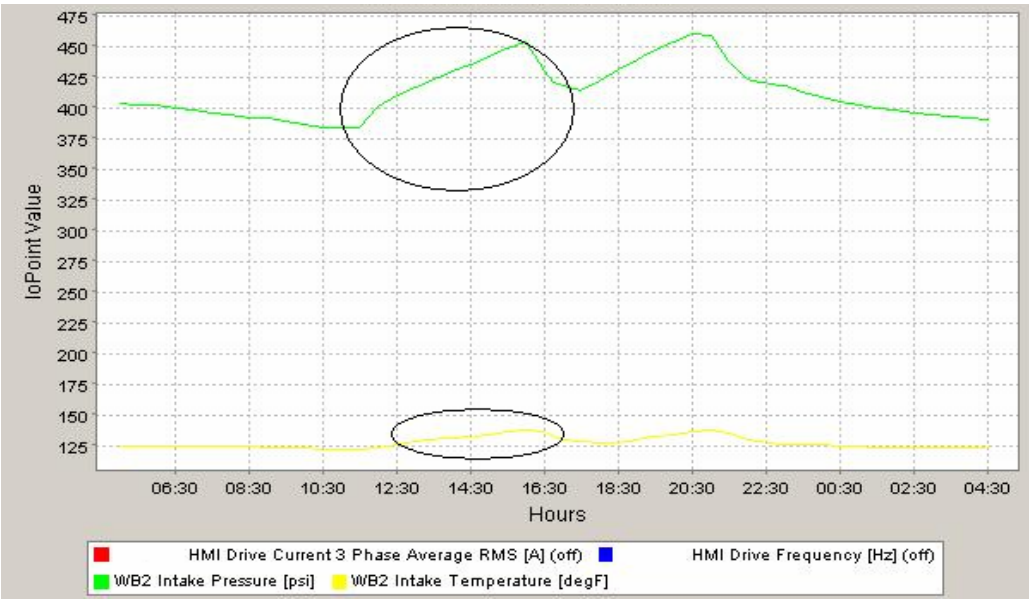
Un efecto colateral del bloqueo por gas es el recalentamiento del motor por la falta de flujo y tambien el recalentamiento del equipo en general que puede causar la falla del motor, la extensión plana del cable o el protector. Otro efecto que se presenta al manejar fluidos gaseosos es la baja carga del motor, que se produce debido a la menor gravedad específica del gas, la cual ocasiona que la carga sobre el motor disminuya drásticamente, y de manera contraria, aumente la presión que se esta manejando en la entrada de la bomba. Estos efectos se pueden observar en la figura 68 y la figura 69.

Figura 68. Corriente y frecuencia de un pozo bloqueado por gas



Fuente: SCHLUMBERGER -WCP-Artificial Lift System

Figura 69. Presión y temperatura en un pozo bloqueado por gas



Fuente: SCHLUMBERGER -WCP-Artificial Lift System

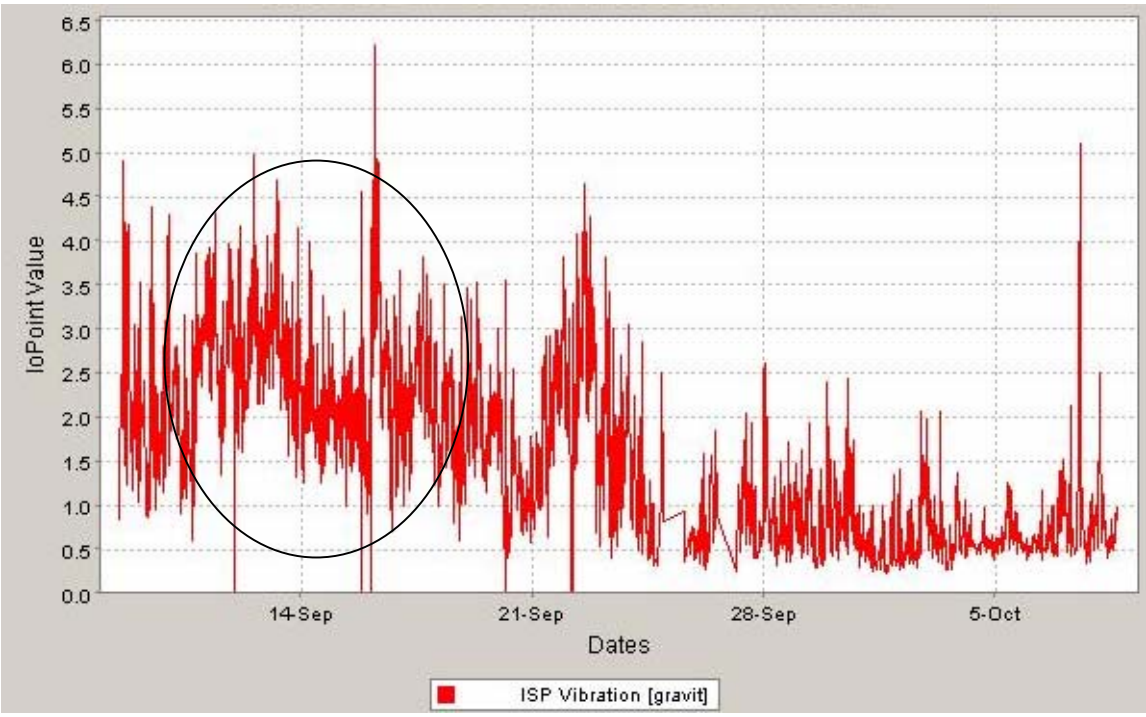
6.4.3 Pozo con problema de sólidos. Durante la operación de algunos sistemas de bombeo electrosumergible, el fluido de producción acarrea tambien arena no consolidada. Dependiendo de la cantidad, composición de la arena y de las condiciones de operación, los efectos serán más o menos evidentes y de acuerdo a esto será el tiempo que transcurra para darse cuenta de que se está produciendo un fluido con arena.

Ahora, con el monitoreo de los parámetros de operación a través del sistema InterACT se notará un aumento en los valores de vibración, parámetro que también se encuentra registrado en el monitoreo como se puede ver en la figura 70, informando de inmediato acerca de la producción de fluidos con presencia de sólidos.

Para este caso se recomienda realizar trabajos en el pozo para evitar la perdida del equipo ya que los sólidos son un agente abrasivo y deterioran nuestro sistema B.E.S.

Se debe tener en cuenta que si la vibración se ha presentado por un periodo muy largo, esto me puede indicar el desgaste de la bomba.

Figura 70. Pozo afectado por el ingreso de sólidos al sistema



Fuente: SCHLUMBERGER -WCP-Artificial Lift System

6.4.4 Pozos trabajando a baja carga. Cuando en un pozo se baja la carga, se puede pensar en lo siguiente:

▪ Esta ingresando gas en el pozo, por lo tanto la gravedad específica del fluido se reduce, disminuyendo por lo tanto la carga al motor, el pozo se está bloqueando por gas.

▪ En superficie se ha realizado un choque en alguna válvula lo cual me genera que el fluido que se encuentra en la bomba empiece a adquirir la misma velocidad de

los impulsores y al estar cercana a esta velocidad la carga disminuye porque el motor no requiere la misma carga para levantar este fluido.

Como se puede ver, es esta una poderosa herramienta, por medio de la cual se puede tener una continua supervisión de pozos, logrando así un continuo control sobre las condiciones de operación y el desempeño de los sitios monitoreados.

7. CONCLUSIONES

- Es necesario tomar conciencia de que el diseño y la aplicación de un sistema electrosumergible serán tan buenos y confiables como los datos que se usaron para el diseño. Estos datos no son sólo los del yacimiento sino tambien los datos de operación de instalaciones anteriores.

- Una vez que se ha puesto en servicio una unidad de bombeo electrosumergible se debe comenzar a monitorear, registrar y analizar los parámetros bajo condiciones normales de operación y así se tendrá un punto de referencia muy útil al momento en que se detecten condiciones anormales de operación.

- Si se dispone de un registro histórico completo de los parámetros de operación del sistema instalado, se pueden preveer posibles daños a presentarse tanto en los equipos como en el yacimiento.

- La operación de una unidad de bombeo electrosumergible con un instrumento sensor, permitirá optimizar la producción del pozo en el que está instalada, ya que se pueden mantener controladas las variables de operación del mismo.

- El minitoreo contínuo de los parámetros de operación de un pozo permite mejorar el funcionamiento del equipo instalado y aumentar el tiempo de vida útil de dicho equipo.

- Los parámetros básicos de operación de una unidad de bombeo electrosumergible que se deben registrar son el amperaje, la frecuencia de trabajo de la bomba, la presión de entrada a la bomba, la temperatura del fluido

a la entrada de la bomba, la temperatura del motor y la vibración del equipo. Si es posible estos datos se deben monitorear diariamente durante la operación normal del equipo.

- En base a los parámetros registrados se pueden obtener gráficas del comportamiento de dichos párametros para cada pozo. Estas gráficas constituyen una herramienta muy útil para analizar las tendencias de los parámetros de operación de un sistema BES.

- La visualización de las tendencias de los parámetros de operación en gráficas es muy expresiva, y usada en conjunto con la experiencia y el conocimiento de campo ayuda a identificar rapidamente cualquier situación anormal.

- Durante la operación normal de un equipo electrosumergible, hay ocasiones en que el ingeniero de operaciones tiene que tratar de deducir que puede estar mal en una bomba (o en el pozo) basándose en una información muy limitada. El sistema de monitoreo satelital InterACT permite obtener datos de operación del equipo BES que ayudan a identificar rapidamente problemas y a encontrar soluciones apropiadas para dichos problemas.

- La incursión de las nuevas tecnologías en el campo petrolero, se han reflejado en procesos con mayor efectividad, y ahorros de tiempo y de costos. Además el monitoreo remoto permite disminuir el riesgo de exposición de personal en las diferentes operaciones en campo.

BIBLIOGRAFÍA

OFS-1 Schlumberger, Course. Artificial Lift Systems.

REDA, Production Systems, Motor Training Manual 2002.

REDA, Production Systems, Protector Training Manual 2002.

REDA, Service Manual, 1995.