

ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE VARIABLES MONITOREADAS EN TIEMPO
REAL DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO: BOMBEO ELECTRO-
SUMERGIBLE.

TOMÁS ANDRÉS LAGOS MORALES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2017

ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE VARIABLES MONITOREADAS EN TIEMPO
REAL DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO: BOMBEO ELECTRO-
SUMERGIBLE.

TOMÁS ANDRÉS LAGOS MORALES

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero de Petróleos

Director

Erik Giovany Montes Páez

Ingeniero de Petróleos, M. Sc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2017

CONTENIDO	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. EQUIPOS DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE	16
1.1 EQUIPOS EN SUPERFICIE	18
1.1.1 Tablero de frecuencia fija.....	18
1.1.2 Controlador de velocidad variable	18
1.1.3 Transformador.	19
1.1.4 Caja de venteo.....	19
1.1.5 Choque.	20
1.2 EQUIPOS EN SUBSUELO	21
1.2.1 Sensor	21
1.2.1.1 Variables monitoreadas.....	21
1.2.1.2 Tipo 0.	21
1.2.1.3 Tipo 1.	22
1.2.1.4 Lectura en superficie.	22
1.2.1.5 Telemetría	23
1.2.1.6 Señal análoga.....	24
1.2.1.7 Señal digital.	24
1.2.1.8 Cable a superficie.....	24
1.2.1.9 Diagnósticos de la PIC.	24
1.2.1 Motor electro sumergible.	24
1.2.1.1 Principio de operación.	25
1.2.1.2 Componentes.	28
1.2.1.3 Carga del motor.....	32
1.2.1.4 Refrigeración.	32
1.2.1.5 Aislante.....	33
1.2.1.6 Carcasa.	33
1.2.1.7 Configuración.	33
1.2.1.8 Nomenclatura.	36

1.2.1.9	Tipos de conexión.	37
1.2.1.10	Clases de aceite.	39
1.2.2	Protector.	40
1.2.2.1	Teoría de operación.	40
1.2.2.2	Tipo laberinto.	40
1.2.2.3	Tipo bolsa.	40
1.2.2.4	Tipo modular.	42
1.2.2.5	Maximus.	43
1.2.2.6	Tipo fuelle.	43
1.2.2.7	Selección.	44
1.2.2.8	Selección de la cámara.	44
1.2.2.9	Ciclo térmico.	45
1.2.2.10	Empuje.	49
1.2.2.11	Elastómeros.	49
1.2.3	Cable de potencia.	49
1.2.3.1	Conductor.	50
1.2.3.2	Aislamiento.	50
1.2.3.3	Barrera.	51
1.2.3.4	Chaqueta.	51
1.2.3.5	Armadura.	52
1.2.3.6	Selección.	52
1.2.3.7	Protector de acoplamiento.	54
1.2.4	Entrada y separador o manejador de gas.	54
1.2.4.1	Problemas asociados al gas.	55
1.2.4.2	Estándar.	55
1.2.4.3	Entrada ARZ.	56
1.2.4.4	Entrada Integral.	56
1.2.4.5	Separadores de gas de flujo inverso.	56
1.2.4.6	Separador de gas giratorio.	57
1.2.4.7	Manejador de gas.	57

1.2.4.8	Multiphase Gas Handler.....	57
1.2.5	Bomba.....	58
1.2.5.1	Concepto.....	59
1.2.5.2	Compresora.....	59
1.2.5.3	Flotadora.....	59
1.2.5.4	Construcción.....	59
1.2.5.5	Flujo radial.....	59
1.2.5.6	Flujo mixto.....	60
1.2.5.7	Flujo axial.....	61
1.2.5.8	Nomenclatura.....	61
1.2.5.1	Recomendaciones al seleccionar una bomba.....	62
2.	ANÁLISIS DE TENDENCIAS.....	63
2.1	MONITOREO.....	63
2.1.1	Arenamiento.....	64
2.1.2	Bajo Aporte.....	65
2.1.3	Bloqueo por Gas.....	66
2.1.4	Conificación de Agua.....	67
2.1.5	Datos de Sensor no Fiables.....	68
2.1.6	Contingencia.....	69
2.1.7	Ruptura de Eje.....	70
2.1.8	Transfer Line Roto.....	71
2.2	METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACION DE PROBLEMAS OPERACIONALES.....	72
2.2.1	Desarrollo de la metodología.....	73
3.	EJEMPLO DE OPTIMIZACIÓN.....	78
3.1	FUNDAMENTOS.....	78
3.1.1	Modo frecuencia.....	79
3.1.2	Modo presión de entrada (PIP).....	80
3.1.3	Modo Corriente.....	81
3.2	DIAGNOSTICO MEDIANTE EL DIAGRAMA DE FLUJO.....	82

3.3 APLICACIÓN DE GAS LOCK PROTECTION.....86

3.4 Implementacion de Gas Lock Protection.....87

4. CONCLUSIONES.....92

5. RECOMENDACIONES93

BIBLIOGRAFÍA.....94

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Estado mecánico de la instalación de un equipo de bombeo electro sumergible.	17
Fig. 2. Esquema del choque.	20
Fig. 3. Telemetría de sensor CTS.	23
Fig. 4. Telemetría para sensores XT y select.	23
Fig. 5. Estator.....	28
Fig. 6. Rotores.	28
Fig. 7. Conexión al motor.	29
Fig. 8. Eje.....	29
Fig. 9. Cojinete del rotor en un motor.....	30
Fig. 10. Camisa del cojinete.....	30
Fig. 11. Arandela de empuje.....	31
Fig. 12. Cojinete del motor.....	31
Fig. 13. Configuración de un conjunto simple.	34
Fig. 14. Configuración de un conjunto superior.....	34
Fig. 15. Configuración de un conjunto centrado.....	35
Fig. 16. Configuración de un conjunto inferior.....	35
Fig. 17. Conexión MaxLok.	38
Fig. 18. Conexión de motor.....	38
Fig. 19. Conexión convencional de un motor con el cable de potencia.	39
Fig. 20. Esquema de un protector tipo laberinto.	41
Fig. 21. Esquema de un protector tipo bolsa.....	41
Fig. 22. Esquema de un protector tipo modular.	42
Fig. 23. Esquema de un protector tipo fuelle.....	43
Fig. 24. Ciclo térmico para un protector LSB.	48
Fig. 25. Entrada estándar.	55
Fig. 26. Esquema de separación en separador de flujo inverso.	56
Fig. 27. Representación del flujo de fluido en un MGH.....	58

Fig. 28. Representación de la dirección del fluido en etapas de flujo radial.....	60
Fig. 29. Representación de la dirección del fluido en etapas de flujo mixto.....	60
Fig. 30. Representación de la dirección del fluido en etapas de flujo axial.	61
Fig. 31. Esquema del trayecto de la información entre el sensor y el controlador.	64
Fig. 32. Representación gráfica de un pozo con problemas de arenamiento.	65
Fig. 33. Representación gráfica de un pozo con bajo aporte.	66
Fig. 34. Representación gráfica de un pozo bloqueado por gas.	67
Fig. 35. Representación gráfica de un pozo con conificación de agua.	68
Fig. 36. Representación gráfica de un pozo con datos de sensor no fiables.	69
Fig. 37. Representación gráfica del manejo a un pozo por contingencia en el campo.	70
Fig. 38. Representación gráfica de la ruptura del eje.....	71
Fig. 39. Representación gráfica de un equipo con el transfer line roto.	72
Fig. 40. Diagrama de flujo.....	74
Fig. 41. Diagrama de flujo para modo frecuencia.	75
Fig. 42. Diagrama de flujo para modo PIP.	76
Fig. 43. Diagrama de flujo para modo Corriente.	77
Fig. 44. Comportamiento de un equipo en modo frecuencia.	80
Fig. 45. Comportamiento de un equipo en modo PIP.	81
Fig. 46. Comportamiento de un equipo en modo corriente.....	82
Fig. 47. Identificación del problema mediante el diagrama de flujo.....	84
Fig. 48. Identificación del problema mediante el diagrama de flujo.....	85
Fig. 49. Bloqueos de gas persistente.....	88
Fig. 50. Implementación de la protección de bloqueo de gas.	89
Fig. 51. Representación gráfica del equipo operando con la protección activa. ...	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Problemas, causas y soluciones en el choque.	20
Tabla 2. Corriente requerida por cada sensor.	22
Tabla 3. Condiciones eléctricas para el estado de la PIC en sensor CTS.	25
Tabla 4. Condiciones eléctricas para el estado de la PIC en sensor SELECT y XT 150.....	26
Tabla 5. Condiciones eléctricas para el estado de la PIC en sensor XT.....	27
Tabla 6. Características y tipos de aceites.	39
Tabla 7. Ventajas y desventajas de las cámaras.....	44
Tabla 8. Comportamiento de los elastómeros frente a diferentes agentes.	51
Tabla 9. Abreviatura y definición para la nomenclatura de bombas.....	62

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE VARIABLES MONITOREADAS EN TIEMPO REAL DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO: BOMBEO ELECTRO-SUMERGIBLE.*

AUTOR: TOMÁS ANDRÉS LAGOS MORALES.**

PALABRAS CLAVES: LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL, BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE, VIGILANCIA, DIAGNOSTICAR, PREVENIR, OPTIMIZAR.

DESCRIPCIÓN:

El equipo de bombeo electro sumergible (BES) es un sistema de levantamiento artificial usado para suplir de energía suficiente al fluido para ponerlo en superficie, entender este equipo y su funcionamiento es el objetivo principal de este trabajo, que se desarrollará en la empresa *Schlumberger surenco S.A.* Se tiene, para empezar, un análisis gráfico del comportamiento del equipo, con una descripción de las condiciones a las cuales está expuesto y la manera en la que se afecta su desempeño.

A continuación, es indispensable observar el comportamiento de cada una de las variables que presenta el equipo, a saber, la presión, la temperatura, la vibración, la frecuencia y el amperaje. El comportamiento de estas variables puede mostrar el problema, así que se describirán los diferentes problemas operacionales a los cuales el equipo puede estar expuesto y su observación mediante las gráficas.

Finalmente, se implementará un modo de operación especial a un pozo con un problema persistente, mediante los modos de operación se busca que el equipo trabaje de la mejor manera y también el pozo produzca lo requerido para que el proyecto sea viable. Ya que si bien existe una maniobra manual que se realiza cuando un equipo se encuentra frente a un bloqueo por gas, no siempre es efectiva y resultan equipos apagados, perdiendo tiempo y producción. Con el modo de operación especial se evita que el equipo se apague y que por sí mismo logre controlar los problemas de bloqueo por gas.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Erik Giovany Montes Páez, M. Sc.

ABSTRACT

TITLE: REAL TIME ELECTRO SUBMERGIBLE PUMPING SURVEILLANCE.*

AUTHOR: TOMÁS ANDRÉS LAGOS MORALES.**

KEYWORDS: ARTIFICIAL LIFT, ELECTRO SUBMERGIBLE PUMP, SURVEILLANCE, DIAGNOSE, PREVENT, OPTIMIZE.

DESCRIPTION:

The electro submersible pump equipment is an artificial lift equipment used to supply the enough energy to the fluid to travel from the well to the surface. Understand this equipment and its operation is the main purpose of this Project. Firstly, a graphical analysis of the different behaviors whit a description of the conditions it is displayed and how these conditions affects its performance.

Subsequently, to independently analyze the behavior of the variables that are present during the equipment operation, the pressure, temperature, vibration, frequency and amperage. The correctly interpretation of these can be a clue to define what is the equipment affected by. Operational problem cases to which the equipment affronts will be described and graphically viewed.

Finally, a special operational mode will be implemented to a well with a persistent issue, through the correctly selection of the operational mode an equipment could work better and produce the enough to make an unviable project, a viable one. Normally a manually maneuver its done when the equipment is blocked by gas but it is not always an effective maneuver and the equipment shutdowns, losing running time and production. With the implementation of a special mode this problem is avoided and it will be automatically controlled.

* Bachelor Degree Project.

** Physico-Chemical Engineering Faculty, School of Petroleum Engineering. Director: Erik Giovany Montes Páez, M.Sc.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de bombeo electro sumergible juegan un papel fundamental en la industria de los hidrocarburos puesto que ayudan a mantener la producción de los yacimientos, además de hacer económicamente viables proyectos que sin la implementación de estos sistemas no serían desarrollados. Es así como la necesidad de un sistema de levantamiento artificial se ha enfocado en los sistemas de bombeo electro sumergible.

El sistema de bombeo electro sumergible es uno de los sistemas más utilizados a nivel mundial, caracterizado por su eficiencia, su fuerza y su fácil adaptabilidad, es por ello que su gran demanda supone un reto para los fabricantes, que continuamente hacen mejoras en los equipos sobrepasando los diseños anteriores.

No obstante, aparte del éxito del bombeo electro sumergible como sistema de levantamiento artificial, existen problemas que afectan y dificultan su normal funcionamiento, por ello es de suma importancia monitorear su comportamiento y así evidenciar gráficamente las variables que registra el equipo, además, identificar las condiciones de operación o los posibles problemas a los que se encuentre expuesto.

Para hacer un correcto diagnóstico se requiere de una correcta interpretación de las gráficas y de un completo entendimiento del modo de operación del equipo. Existen diferentes modos de operación que son seleccionados por diferentes criterios. Se deben interpretar gráficamente estos modos de operación como también entender lo que sucede físicamente cuando un equipo opera en cada uno de estos modos. Mediante la adecuada selección del modo de operación y la correcta implementación es posible optimizar un pozo en función su producción.

En este orden de ideas, el presente trabajo pretende dar a entender todo lo concerniente a los componentes del sistema de bombeo electro sumergible, exponer un análisis de tendencias de problemas a los que los equipos están expuestos y optimizar un pozo mediante la implementación de una protección al modo de operación para un problema recurrente en él.

1. EQUIPOS DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE

Son equipos de levantamiento artificial implementados en la industria de los hidrocarburos para desplazar el fluido del yacimiento hasta el separador, utilizan energía eléctrica para alimentar el motor, el cual se encarga de convertirla en energía mecánica que se transmite por medio de un eje hasta la bomba donde es transformada a energía potencial.

Este equipo se encuentra sumergido en el fluido y por lo general encima de perforados, el motor debe estar totalmente aislado del fluido de yacimientos para evitar un mal funcionamiento y cortos circuitos, el protector cumple la función de aislar el fluido del yacimiento del fluido del motor. Encima del protector se encuentra la sección de entrada por donde el fluido encuentra su paso hacia la bomba.

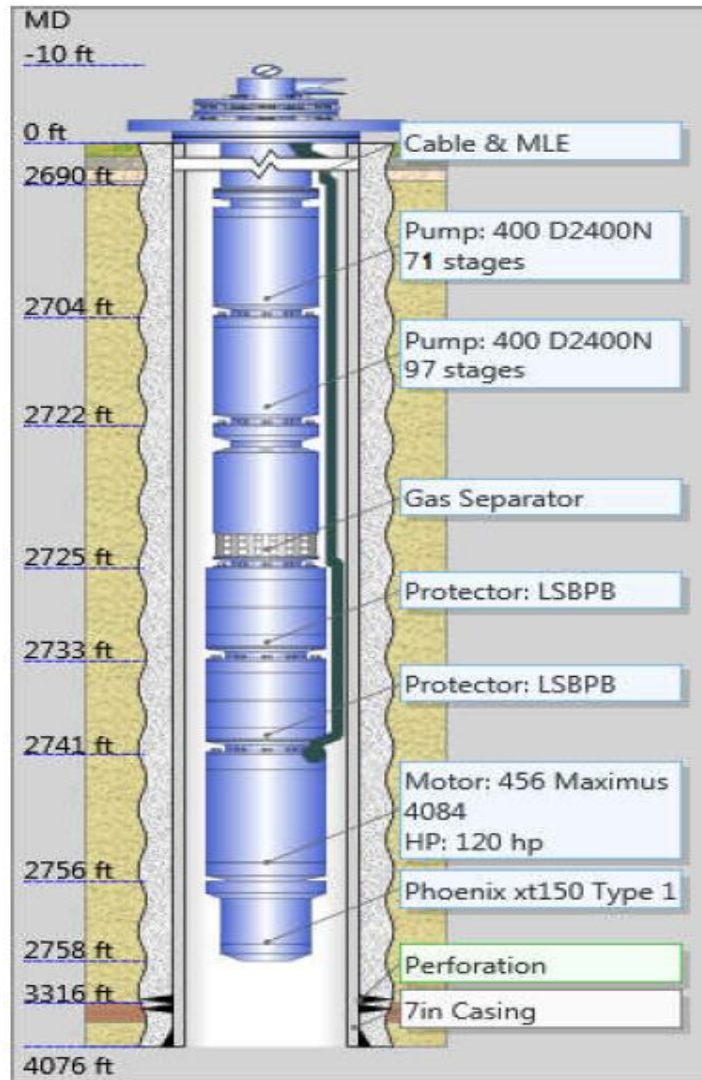
La alimentación del motor llega por medio de un cable de potencia que viene desde el variador, pasa por la cabeza del pozo y encuentra su camino hasta la conexión del motor. Se encuentra adherido a la sarta con unos amarres y también está totalmente aislado por varias capas, cada una con un fin diferente.

El equipo se ha convertido en una opción interesante para las empresas debido a las grandes ventajas con las que cuenta el sistema, a continuación, sus características:

- Altos caudales de producción 100 -20000 BPD.
- Instalación en altas y bajas profundidades 2000- 13000 ft.
- Buen manejo del gas.
- Opera con altos cortes de agua >90.
- Gran adaptabilidad al instalarse en pozos desviados 1°/100ft.

- Adaptabilidad a fluidos viscosos 1000 CP.
- Instalación en revestimiento hasta 4 ½”.
- Ambientes abrasivos o corrosivos.

Fig. 1. Estado mecánico de la instalación de un equipo de bombeo electro sumergible.



Fuente: SCHLUMBERGER SURENCO S.A.. DesignPro. [Software para el diseño de equipos de bombeo electro sumergible]. Última versión: 9.0. Fecha de Lanzamiento: 26 Julio de 2016. Requerimientos del sistema: Windows 7 SP1 64-bit operating system on a standard SLB image Disponible en <http://hub.slb.com>.

1.1 EQUIPOS EN SUPERFICIE

Los equipos en superficie están ubicados en una caseta que los protege de las condiciones extremas y también de posibles manipulaciones por personal no autorizado. Estos equipos son los encargados de darle la potencia al equipo de fondo, además son el interfaz que el especialista de campo tiene con el equipo de subsuelo.

1.1.1 Tablero de frecuencia fija. Es un equipo que provee electricidad al motor en una frecuencia fija, básicamente consiste en un interruptor para conectar o desconectar la alimentación. Se pueden establecer condiciones de seguridad como apagado por sobrecarga o baja carga y picos de voltaje.

1.1.2 Controlador de velocidad variable. Es un equipo que permite controlar la velocidad de operación del equipo de bombeo electro sumergible, en base a la variación de frecuencia de la onda de voltaje en la entrada del motor. Su funcionamiento consiste en convertir la corriente alterna de alimentación en corriente directa, y nuevamente convertirla en corriente alterna a la frecuencia deseada para alimentar el motor. Los beneficios que se obtienen mediante el uso de los variadores de frecuencia son: una maximización de la producción del pozo, lo cual extiende la vida operativa de los equipos y se puede ajustar la producción en función de procesos llevados en superficie; una mayor eficiencia del sistema de levantamiento artificial que permite en rampas extendidas dar arranques suaves al motor. La corriente de salida de estos equipos es de 480V que posteriormente será la alimentación del transformador elevador.

1.1.3 Transformador. Es un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico, para los equipos de bombeo electrosumergible se requieren transformadores reductores o elevadores. Su principio de operación se basa en que la energía puede ser transferida por inducción de un bobinado a otro. Cuando el primer bobinado es cargado eléctricamente se crea un flujo magnético, a través del cual se le induce una corriente eléctrica al segundo bobinado, los bobinados reciben el mismo voltaje, pero este puede ser modificado por el número de vueltas que tenga el segundo bobinado, del número de vueltas del bobinado se obtiene un transformador reductor o uno elevador, a continuación, la relación matemática que rige los transformadores:

$$\frac{\text{Volts } 1}{\text{Volts } 2} = \frac{\text{Turns } 1}{\text{Turns } 2} \quad (1)$$

Como ejemplo, pondremos un transformador que en su primer bobinado tiene 10 vueltas y 2 vueltas para el segundo, esto quiere decir que hay una relación $10/2 = 5$, entonces, por cada 5 voltios entrantes habrá 1 voltio a la salida. Cuando se requiere modificar esta relación en un transformador, se debe verificar que esté desenergizado para evitar un arco eléctrico.

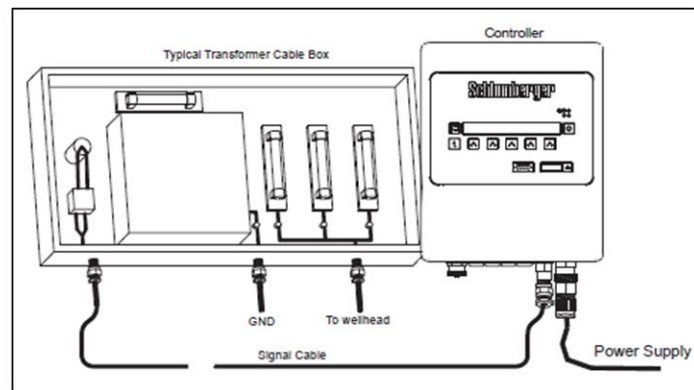
1.1.4 Caja de venteo. La caja de venteo tiene dos funciones principales: la primera, es conectar el cable de potencia en fondo con el variador en superficie y la segunda, es ventear el gas proveniente de fondo que ha logrado subir a través de la chaqueta.

Esta conexión tiene una distancia mínima para poder ser realizada, la caja debe estar ubicada mínimo a 15 pies del pozo (lo recomendado es 25 pies) y mínimo a 25 pies del variador.

1.1.5 Choque. Es un equipo ubicado en superficie, que se usa para aislar el alto voltaje AC en la alimentación del equipo y para permitir la alimentación del sensor a 120 V.

El choque cuenta con fusibles de 125 mA y 5 kV de acción retardada, brindando protección eléctrica al equipo.

Fig. 2. Esquema del choque.



Fuente: SCHLUMBERGER. Surface Choke assembly. Schlumberger Surencó S.A.

Tabla 1. Problemas, causas y soluciones en el choque.

PROBLEMA	CAUSA	SOLUCIÓN
No le llega señal a la PIC	Conexión no lo suficientemente apretada	Apretar la conexión
	Ruptura en cable	Verificar si hay rupturas
	Cable no conectado	Verificar los cables de entrada
Señal	Conexión de la tarjeta	Ver el PIC manual
	Tarjeta dañada	
Baja resistencia	Fusible fundido	Cambiar fusible

Fuente: SCHLUMBERGER. Surface Choke assembly. Schlumberger Surencó S.A.

1.2 EQUIPOS EN SUBSUELO

El ensamblaje de fondo de un sistema de bombeo electro sumergible se compone por:

1.2.1 Sensor. Es un dispositivo instalado en la parte más baja de todo el ensamblaje, hace un monitoreo constante de las condiciones de operación del sistema donde cada variable es registrada para posteriores diagnósticos y evaluaciones. También es importante mencionar que los sensores pueden ser análogos o digitales, donde se tienen diferentes velocidades de transmisión de información.

1.2.1.1 Variables monitoreadas. Además de constatar que el valor de cada variable se encuentre entre los valores establecidos para el equipo, evitando que este se apague, también se puede establecer con las tendencias. Para cada variable los siguientes comportamientos de operación del equipo: Presión de entrada y descarga: con estas podemos identificar, restricciones en tubería, si ingresa otro pozo a la troncal o si el pozo es chocado. También podemos verificar si hay *draw-down*, verificando el aporte del sistema. Temperatura de motor y entrada: Con estas variables podemos identificar restricciones en la tubería, colocación de orgánicos y flujo de fluido. Vibración: Con esta variable se puede identificar la producción de sólidos y también la ruptura del eje. Corrientes de fuga: con esta variable se puede establecer si hay bajo aislamiento alterando la telemetría y la fiabilidad de los datos.

1.2.1.2 Tipo 0. Los sensores tipo cero, registran las variables de presión, temperatura en la entrada, temperatura del motor, vibración y corrientes de fuga. El hecho de que existan dos tipos de sensores, no quiere decir que uno sea mejor que otro, la elección del tipo de sensor se deja a consideración del cliente y del presupuesto.

1.2.1.3 Tipo 1. Los sensores tipo uno, registran las mismas variables del tipo cero y adicionalmente registran la presión de descarga. Mediante la conexión de un capilar de 1/4" conocido como *transfer line* que va desde el sensor hasta la descarga de la bomba.

1.2.1.4 Lectura en superficie. Es importante poder conocer los valores de cada variable que está registrando el sensor, para ello hay un controlador (*Uniconn* o *Instruct*) por medio del cual se tiene acceso a esos datos, además de ser el interfaz entre el usuario y el equipo. El controlador puede hacer la lectura de cada variable gracias a la denominada tarjeta PIC, que es la encargada de interpretar los pulsos eléctricos y asignarle un valor a las variables.

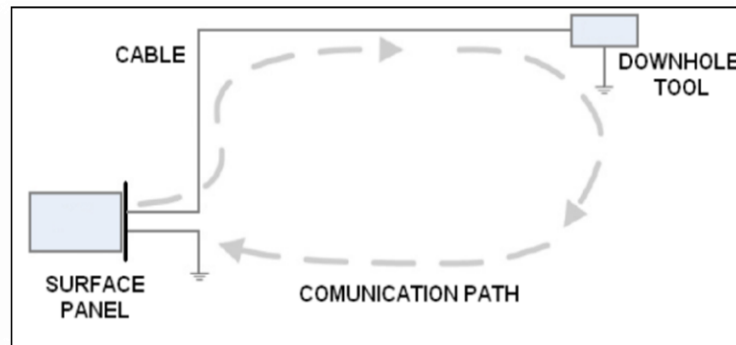
Tabla 2. Corriente requerida por cada sensor.

Sensor	Corriente de funcionamiento (mA)	Corriente para telemetría (mA)	Corriente Total (mA)
MultiSensor XT	10	8	18-21
UltraLite	16-21	2-4	21-25
10 bps CTS	16-21	2-4	21-25
12.5 bps CTS	26-28	2-4	28-32
Select	16-21	2-4	21-25
XT 150	16-21	2-4	21-25

Fuente: SCHLUMBERGER. Phoenix Interface Card (PIC) Installation Manual. Schlumberger Sureenco S.A.

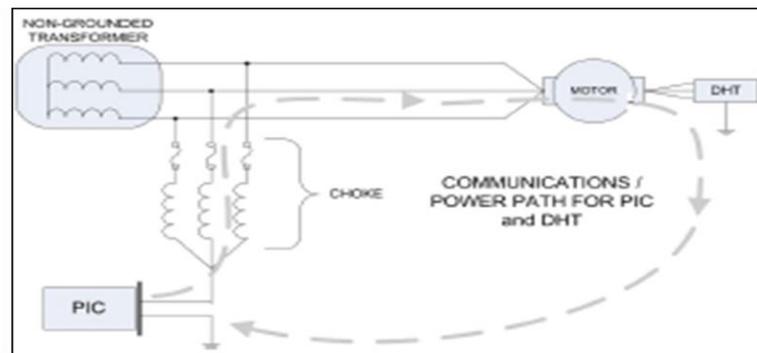
1.2.1.5 Telemetría. La telemetría es un esquema de comunicación por medio del cual las lecturas obtenidas en fondo son llevadas a superficie para darles lectura y asignarle un valor a cada variable. Este camino se da por medio del cable de potencia, por donde también se envía la alimentación del motor, una pieza cable para la lectura de estos datos es el choque, encargado de filtrar la corriente DC de la AC, permitiendo así mandar una señal a la tarjeta PIC para que esta dé una lectura a través del controlador.

Fig. 3. Telemetría de sensor CTS.



Fuente: ARAUJO. Jose. Downhole Monitoring Systems. Schlumberger Surencó S.A. 2007, Vol. 1, no 03, p. 3.

Fig. 4. Telemetría para sensores XT y *select*.



Fuente: SCHLUMBERGER. Phoenix Interface Card (PIC) Installation Manual. Schlumberger Surencó S.A.

1.2.1.6 Señal análoga. Es una señal variable que tiene continuos cambios en el tiempo. Midiendo las caídas de voltaje a cero y el máximo voltaje. Estos pulsos se trasladan a superficie por medio de un cable. Es difícil mantener el pulso a través del cable, debido a las pérdidas y en ocasiones al bajo aislamiento.

1.2.1.7 Señal digital. Es una señal que solo puede ser representada por 0 y 1, donde se establecen niveles para cada uno, cuando se tienen cambios de la corriente en el tiempo solo se registran los valores como valores falsos o verdaderos.

1.2.1.8 Cable a superficie. Este es un sensor instalado en múltiples sistemas de levantamiento artificial. Cuenta con un cable delicado y la instalación del equipo se hace en el *Tubing* y no mediante la conexión a un acople.

1.2.1.9 Diagnósticos de la PIC. Para saber si los datos que nos traduce la tarjeta PIC son fiables, la tarjeta cuenta con varios estados, para cada uno de ellos y por herramienta hay unos parámetros. A continuación, las tablas de diagnóstico para CTS, XT y XT 150. (Tabla 3.) (Tabla 4.) (Tabla 5.)

1.2.1 Motor electro sumergible. Los motores son una parte vital en los equipos BES, puesto que son los encargados de generar la energía mecánica suficiente para dar movimiento al sistema. Es un componente esencial y se le debe dar un cuidado especial a la temperatura de operación. A continuación, una explicación de todo lo que son los motores electro sumergibles.

En el sistema BES se utilizan motores eléctricos trifásicos de corriente alterna, asíncronos de construcción de jaula tipo ardilla. Los cuales operan en elevados

rangos de voltaje. La longitud y el diámetro establecen la potencia del motor. Su función es brindarle energía mecánica necesaria al sistema por medio del eje.

Tabla 3. Condiciones eléctricas para el estado de la PIC en sensor CTS.

PIC Alarms Conditions for CTS tools (units in mA)				
Cz	Cf	Cl-a	Cf-Cz	FAULT
9–30mA	Any	<21 mA	>0.3 mA	TOOL GOOD
9–30mA	Any	Any	0.3 – 0.7 mA	FAULT_DH_CF_DROPPED
9–30mA	Any	Any	<0.3 mA	FAULT_DH_TOOL_STUCK
<30 mA	Any	<1 mA	<0.3 mA	FAULT_DH_OPEN_CIRCUIT
>30 mA	>30 mA	>21 mA	Any	FAULT_DH_SHORT_CIRCUIT
>30 mA	>30 mA	<1 mA	Any	FAULT_DH_TOOL_SHORT
<30 mA	<30 mA	>21 mA	Any	FAULT_DH_NEG_SATURATION
If none of above AND→			>0.3 mA	FAULT_DH_NON_TOOL_FAULT
If not “Tool Good” AND none of these above				FAULT_DH_OTHER_FAULT

Fuente: ARAUJO. Jose. Downhole Monitoring Systems. Schlumberger Surencó S.A. 2007, Vol. 1, no 03, p. 20.

1.2.1.1 Principio de operación. Faraday establece que al tener un campo magnético variable en el tiempo se genera una fuerza electromotriz, este campo magnético se da al hacer pasar la corriente por un embobinado conductor. El motor cuenta con tres embobinados por los cuales fluyen las tres fases, donde hay un campo magnético que se encuentra rotando. Este es el estator con su explicación electromagnética.

Ley de Faraday

“El voltaje inducido a través de un conductor que se desplaza transversal a un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor.”

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

Lorentz establece que al introducir un conductor cerrado en un campo magnético (rotor) se le induce una corriente, así mismo un campo magnético, el cual va a querer repelerse y alinearse con el campo magnético del estator. En este caso el conductor usado es una jaula de ardillas y se le llama así, por su construcción.

Ley de Lorentz

“Al introducir una carga en un campo magnético, se genera una fuerza”

$$\vec{F} = \vec{I}L \times \vec{B} \quad (3)$$

Tabla 4. Condiciones eléctricas para el estado de la PIC en sensor SELECT y XT 150.

PIC Alarms Conditions for SELECT and XT 150 Tools				
Cz	Cf	Cl-a	Cf-Cz	FAULT
9 – 27 mA	Any value	<21 mA	>0.3 mA	TOOL GOOD
9 – 27 mA	Any value	Any value	0.3 – 0.7 mA	FAULT_DH_CF_DROPPED
9 – 27 mA	Any value	Any value	<0.3 mA	FAULT_DH_TOOL_STUCK
<2 mA	Any value	<1 mA	<0.3 mA	FAULT_DH_OPEN_CIRCUIT
>30 mA	>30 mA	>21 mA	Any value	FAULT_DH_SHORT_CIRCUIT
>30 mA	>30 mA	<1 mA	Any value	FAULT_DH_TOOL_SHORT
<30 mA	<30 mA	>21 mA	Any value	FAULT_DH_NEG_SATURATION
If none of above AND→			>0.3 mA	FAULT_DH_NON_TOOL_FAULT
If not “Tool Good” AND none of these above				FAULT_DH_OTHER_FAULT

Fuente: ARAUJO. Jose. Downhole Monitoring Systems. Schlumberger Surencó S.A. 2007, Vol. 1, no 03, p. 20.

Tabla 5. Condiciones eléctricas para el estado de la PIC en sensor XT.

PIC Alarms Conditions for XT Tools				
Cz	Cf	Cl-a	Cf-Cz	FAULT
9 – 12 mA	Any value	Any value	>6 mA	TOOL GOOD
9 – 12 mA	Any value	Any value	<1 Ma	FAULT_DH_TOOL_STUCK
9 – 12 mA	Any value	Any value	1 – 6 mA	FAULT_DH_CF_DROPPED
6 – 9 mA	Any value	Any value	<1 mA	FAULT_DH_PSU_NOT_BOOTING
11 – 18 mA	Any value	Any value	<1 mA	FAULT_DH_TOO_STUCK_RSR
<1 mA	Any value	<1 mA	<2 mA	FAULT_DH_OPEN_CIRCUIT
<21 mA	<21 mA	<21 mA	Any value	FAULT_DH_NEG_SATURATION
>21 mA	>21 mA	<21 mA	Any value	FAULT_DH_SHORT_CIRCUIT
>21 mA	>21 mA	<1 mA	Any value	FAULT_DH_TOOL_SHORT
If none of above AND→			>6 mA	FAULT_DH_NON_TOOL_FAULT
If not “Tool Good” AND none of these above				FAULT_DH_OTHER_FAULT

Fuente: ARAUJO. Jose. Downhole Monitoring Systems. Schlumberger Surencó S.A. 2007, Vol. 1, no 03, p. 20.

1.2.1.2 Componentes. Estator: es la parte estacionaria del motor que contiene láminas de acero, cable conductor, papel aislante y un bobinado. Al hacer pasar una corriente eléctrica a través de este, se genera un campo magnético perpendicular a la corriente, el sentido del campo magnético se rige por la ley de mano derecha.

Fig. 5. Estator.



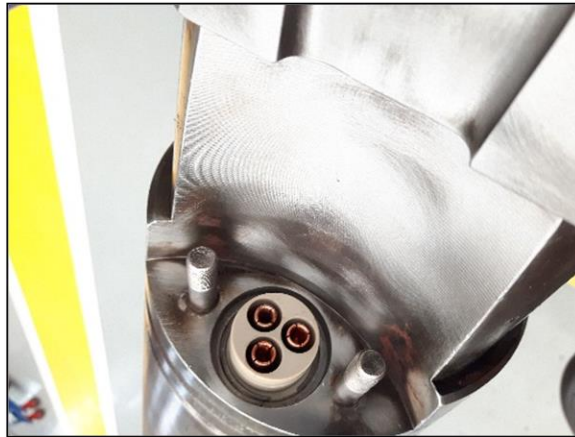
Rotor: el rotor en conjunto con el eje, los cojinetes y la manga conforman la parte rotatoria del motor. El rotor está hecho del mismo material de las láminas del estator, las barras de bronce del rotor (jaula de ardilla) componen el armazón donde se insertan las láminas del rotor, las cuales brindan una inducción magnética más fuerte. Esta sección gira en sentido del campo magnético generado, pero nunca alcanza la misma velocidad de rotación.

Fig. 6. Rotores.



Conexión del cable: es una conexión ubicada en la parte superior de los motores, por medio de la cual se alimenta el motor. Existen varios tipos de conexión, pero todas tienen el mismo propósito.

Fig. 7. Conexión al motor.



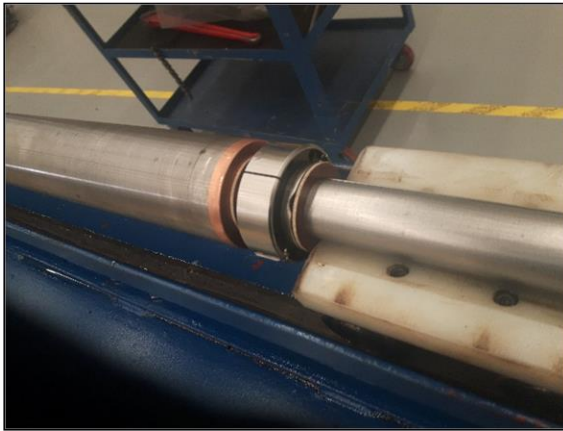
Eje: permite transmitir la energía mecánica generada por el motor a la bomba, además, permite la circulación de aceite dieléctrico a través de él, asegurando la lubricación de las partes del motor.

Fig. 8. Eje.



Cojinete del Rotor: es una pieza alrededor del eje que le da estabilidad cuando esta gira, su propósito es no dejar perder energía en algún otro tipo de movimiento y proteger el eje para que este solo gire en una posición.

Fig. 9. Cojinete del rotor en un motor.



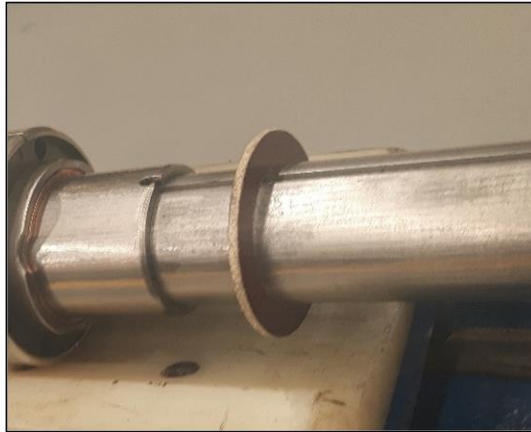
Camisa del Cojinete del rotor: es una camisa en la que su ID es justo como el OD del eje. Su finalidad es permitirle un recorrido al eje cuando este se expande o se contrae por la temperatura de operación del motor.

Fig. 10. Camisa del cojinete.



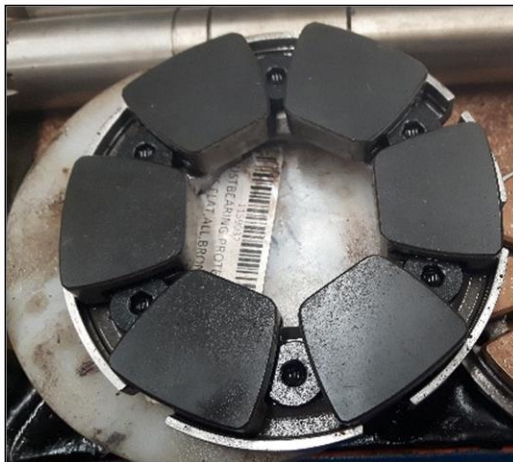
Arandela de Empuje: es una arandela hecha de resina y usada con el fin de minimizar la fricción metal a metal. Se instala entre el rotor y el cojinete del rotor.

Fig. 11. Arandela de empuje.



Cojinete: se encarga de sostener todo el peso del rotor y el eje. Se compone de dos piezas, la primera, es el *runner* y se sujeta al eje; la segunda, es el cojinete sobre el cual va a girar el *runner*. El cojinete tiene unas almohadillas cuya función es proveer la menor resistencia.

Fig. 12. Cojinete del motor.



1.2.1.3 Carga del motor. La carga del motor equivale al par motor (Fuerza) que se debe generar para vencer la resistencia que se opone a su movimiento. La mayoría de los motores están diseñados para funcionar con cargas entre 50% y 100%, con el máximo rendimiento aproximadamente al 75%.

Se puede pensar que al usar un motor más potente se podrá vencer cualquier carga, pero se tendrá un motor sobredimensionado, siendo un problema común y perjudicial puesto que su alimentación será superior a lo requerido, esta diferencia se disipará en forma de calor, lo cual tendrá dos efectos: se calentará el motor y aumentará el costo de alimentación.

Por otra parte, en ocasiones se tienen motores sub-dimensionados, que van a trabajar forzados y finalmente su resultado será un sobrecalentamiento.

1.2.1.4 Refrigeración. La temperatura de los devanados del motor es la vida del sistema electro sumergible, es por ello que controlar la temperatura es un factor importante. Para mantener el motor funcionando de manera prolongada se debe asegurar una temperatura por debajo de la temperatura crítica. En su interior hay un aceite dieléctrico, estos aceites cuentan con malas propiedades eléctricas con el fin de evitar algún corto, también cuentan con muy buenas propiedades térmicas, con el fin de transferir eficientemente el calor generado en los devanados hacia el exterior. Aprovechando el paso de fluido a cierta velocidad (1 ft por segundo) alrededor del motor también se refrigera, cuando la velocidad del fluido no es lo suficientemente rápida el motor no se estará refrigerando de la manera adecuada. Esto puede suceder en pozos cuando producen muy poco o cuando el anular que queda entre el motor y el *casing* es muy amplio; para el primer caso, se debe bajar la velocidad de operación, para evitar así pérdidas eléctricas, y trabajar en condiciones críticas, para el segundo caso, se procede a encamisar el motor con el fin de lograr aumentar la velocidad del fluido.

1.2.1.5 Aislante. Los aislantes se utilizan para evitar cortos circuitos, actuar como conductores térmicos previniendo sobrecalentamientos, mantener el embobinado en su posición, además de prolongar y mejorar las propiedades eléctricas y mecánicas. Estos aislantes son un recubrimiento que se da al embobinado. No se puede dejar de lado que la temperatura es la limitante para estos aislantes.

1.2.1.6 Carcasa. Se denomina *Housing* a la carcasa que recubre el exterior del motor. Esta puede estar constituida por acero o *redalloy*, según se requiera. Los diámetros varían desde 3.75 hasta 7.38 pulgadas, esto depende la serie del motor que se vaya a cubrir.

1.2.1.7 Configuración. En ocasiones es necesario tener configuraciones en las cuales se ven involucrados 1 o más motores, pero estos no pueden ser conectados en cualquier orden y existe una configuración que rige la posición en la que se deben ensamblar.

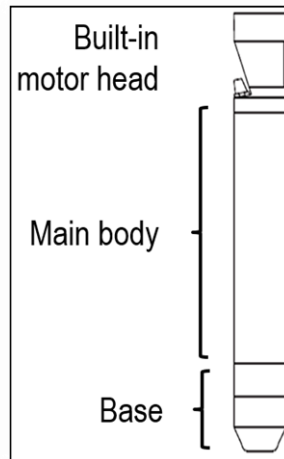
Conjunto simple: El cabezal del motor está diseñado para aceptar el cable de alimentación en la parte superior. La base tiene una conexión en "Y" que conecta los devanados y no se puede conectar en conjunto con algún otro motor. (Fig. 13.)

Conjunto superior: El cabezal del motor está diseñado para aceptar la conexión del cable de alimentación en la parte superior y un motor de conjunto centrado, motor de conjunto inferior o la base universal en su parte más baja. (Fig. 14.)

Conjunto centrado: el cabezal del motor está diseñado para conectarse a la parte inferior de un motor de conjunto superior o a un motor de conjunto central y tiene una base diseñada para conectarse tanto a otro motor de conjunto central, como a un motor de conjunto inferior o una base universal. Todas las conexiones de brida

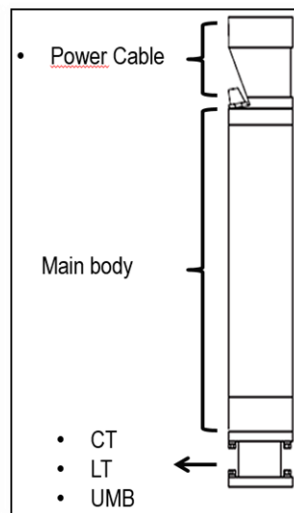
están diseñadas para que los devanados de un motor se conecten a los devanados correspondientes del motor adyacente. (Fig. 15.).

Fig. 13. Configuración de un conjunto simple.



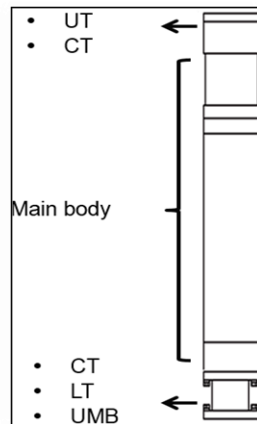
Fuente: BANAGA, Mohamed. Electrical Submersible Pump Manual for clients. Schlumberger, 2009, Vol. 1, no 01, p. 51.

Fig. 14. Configuración de un conjunto superior.



Fuente: BANAGA, Mohamed. Electrical Submersible Pump Manual for clients. Schlumberger, 2009, Vol. 1, no 01, p. 51.

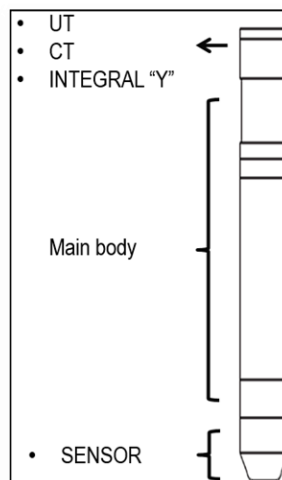
Fig. 15. Configuración de un conjunto centrado.



Fuente: BANAGA, Mohamed. Electrical Submersible Pump Manual for clients. Schlumberger, 2009, Vol. 1, no 01, p. 51.

Conjunto Inferior: el cabezal del motor está diseñado para conectarse a la parte inferior de un motor de conjunto superior o de conjunto central y una conexión en "Y" en la parte inferior conecta los devanados entre sí.

Fig. 16. Configuración de un conjunto inferior.



Fuente: BANAGA, Mohamed. Electrical Submersible Pump Manual for clients. Schlumberger, 2009, Vol. 1, no 01, p. 51.

1.2.1.8 Nomenclatura. La nomenclatura es una identificación estándar, para los motores se encuentra la siguiente nomenclatura que será explicada detalladamente, (Por ser una nomenclatura internacional, a conveniencia, se mostrará en inglés).

Capacidad del motor (XX-XX, XXXX, XXX)

D "S" *With All Steel (AS) Laminations & Non-Magnetic Spring Locked Key (SLK) Bearings*

H *Hotline Fixed Horsepower Rating (550°F Internal Motor Temperature)*

M *Intermediate (Conservative) Fixed HP Rating (300°F BHT) 90-0 Intermediate*

P *High Performance (Conservative) Fixed HP Rating (250°F BHT) Series 91 Type*

R *Optimum (Variable) HP Rating (400°F Internal Motor Temperature)*

S *Standard Fixed Horsepower Rating (250°F BHT) 90-0 Type*

Aislamiento del motor (XX-XX, XXXX, XXX)

A *Unvarnished Polyimide (Kapton)*

B *BC325 Varnished Polyimide (Kapton)*

K *M-11 Varnished Polyimide (Kapton)*

X *Unvarnished Polyimide (PEEK)*

Configuración del motor (XX-XX, XXXX, XXX)

S *Single*

UT *Upper Tandem*

CT *Center Tandem*

LT *Lower Tandem¹*

Carcasa del motor (XX-XX, XXXX, XXX)

CS *Carbon Steel*

RLOY *Redalloy*

Características especiales (XX-XX, XXXX, XXX)

¹ SCHLUMBERGER. ESP Motor Nomenclature. 2008. P. 1.

1 DIR-CON - *Direct Connect #1*
1 POTHEAD - *Direct Connect # 1 Pothead*
6 OIL Reda # 6 Motor Oil
AFL *Aflas Elastomers*
AS *All Steel Stator w/ non-magnetic SLK bearings,
Longer Shaft & Extra Rotor Bearing*
CWM *Cold Well Modified*
HSFT *Hardened 4130 Steel Shaft Material*
HSN *HSN Elastomers*
KTB *Bronze Bearing, KMC*
LIMITED *Low Temp. Rating (250 F BHT) 180HP Max., sing. sec. motor
w/ Integral (short) Base.*
MD *Maximum Duty*
M-TRM *Monel Trim*
MSB *Integral MultiSensor Base (Adapter)*
NTB *No babbitt on REDA bronze thrust bearing*
PLUG-IN *Plug-in Pothead*
SRPR *Snap Ring Per Rotor*
X-BSE *Extended Base*
XD *For Extreme Duty: ARZ Bearing In Base,
HL Thrust Bearing & SS Filter (ext. Base)*
XRB *Extra Rotor Bearing Base²*

1.2.1.9 Tipos de conexión. El motor en fondo debe recibir la alimentación para poder funcionar, existen varias conexiones que son el punto de unión entre los terminales del motor y el cable de potencia. Existen tres tipos:

- *MaxLok*: es una conexión fácil y de rápida instalación, elimina la necesidad de cinta protectora y al final se asegura con dos tuercas y se garantiza sello con *O ring*.

² SCHLUMBERGER. ESP Motor Nomenclature. 2008. P. 1-2.

Fig. 17. Conexión *MaxLok*.



- *Plug In-Trident*: es una conexión en la que se conecta cada fase de forma individual. Esta conexión se hace en motores que requieren voltajes elevados.

Fig. 18. Conexión de motor.



- *Tape In*: este tipo de conexión lleva una cinta de teflón con el propósito de aislar las fases, posteriormente es asegurada con dos tuercas.

Fig. 19. Conexión convencional de un motor con el cable de potencia.



1.2.1.10 Clases de aceite. El uso de aceite dieléctrico en motores tiene como función principal aislar las fases y evitar arcos eléctricos, esto se da gracias a su baja conductividad eléctrica. También disipa el calor generado por el motor gracias a su alta conductividad térmica.

En climas fríos el aceite debe ser calentado en superficie para proceder al llenado del motor.

Tabla 6. Características y tipos de aceites.

Temperatura del Motor	Aceite	Volumen
<270 degF	Reda #3	5, 15 and 55 Gals.
<360 degF	Reda #5	
<400 degF	Reda #6	

Fuente: Modificado de SCHLUMBERGER, Artificial Lift Field Operations Reference Manual – Downhole. 2014, vol. 1, no. 3.7, p. 56.

1.2.2 Protector. El protector, aunque tiene gran importancia en el sistema de bombeo electro sumergible es comúnmente un componente poco entendido, lo cierto es que es casi igual de importante a la bomba o al motor. El protector no solo cumple una función en específico, sino que se encarga de brindarle buenas condiciones de funcionamiento al motor, alargando así la vida útil del equipo.

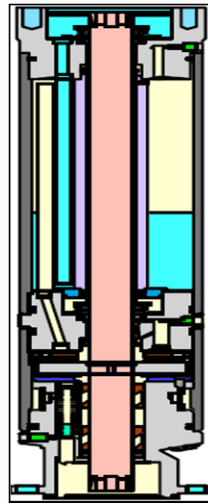
1.2.2.1 Teoría de operación. El protector es una pieza vital del sistema, estando ensamblado se encuentra posicionado entre el motor y la sección de entrada; cumple funciones de gran importancia como: ser un sello entre los fluidos del pozo y el aceite del motor, donde se busca que el aceite del motor permanezca intacto y no llegue a ser contaminado; servir como una cámara de almacenamiento de aceite debido a la contracción y expansión que tiene el aceite del motor por cambios en la temperatura; absorber el empuje ascendente o descendente de la bomba mediante el cojinete de empuje axial.

1.2.2.2 Tipo laberinto. Es una cámara que permite el contacto directo entre el aceite del motor y el fluido del pozo, utiliza la diferencia de densidades entre el fluido del pozo y el aceite del motor, para mantenerlos separados. Cuenta con un diseño de tubo en U, el nivel sube o baja dependiendo las condiciones. La mayor desventaja de este protector es la producción de un crudo de mayor gravedad específica que la del aceite del motor, puesto que puede abrirse camino al motor y desplazar al aceite del motor, se recomienda usarlo cuando la gravedad específica del crudo sea menor a 0.85 también se recomienda usarlo en pozos horizontales o donde la inclinación no exceda los 45 grados con respecto a un eje vertical. Comúnmente se les conoce como “66L”. (Fig. 20.)

1.2.2.3 Tipo bolsa. Es una bolsa que separa físicamente los fluidos, está diseñada para aplicaciones donde la gravedad específica del fluido y del motor es aproximadamente igual o en pozos altamente desviados. Esta bolsa está hecha de

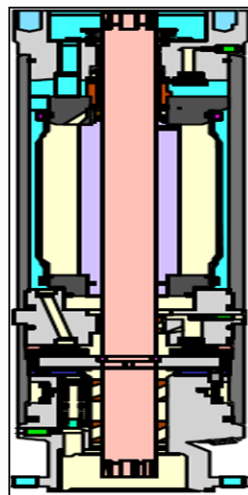
un elastómero de alta temperatura que puede resistir las agresivas condiciones del ambiente al cual es expuesta. La bolsa mantiene el fluido del pozo fuera y el aceite del motor en su interior, cuando el aceite del motor se expande o contrae la bolsa se flexiona para acomodarse al cambio de volumen. (Fig.21.)

Fig. 20. Esquema de un protector tipo laberinto.



Fuente: REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 48.

Fig. 21. Esquema de un protector tipo bolsa.



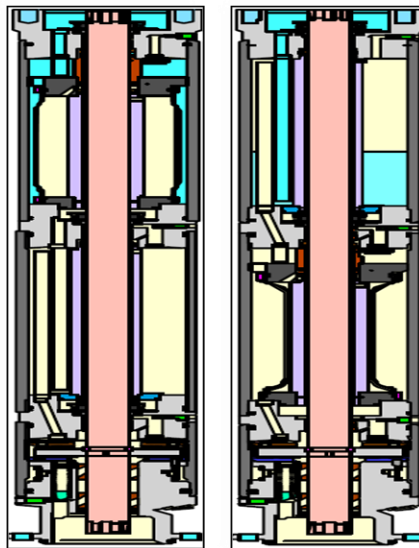
Fuente: REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 49.

1.2.2.4 Tipo modular. Es un protector que ofrece las características del protector tipo bolsa y laberinto combinando sus cualidades en un solo protector. El protector modular tiene la ventaja de brindar un sello más sin gastar innecesariamente en más piezas como un doble cojinete de empuje o eje. Adicionalmente se puede diseñar el protector según la necesidad y como se considere conveniente. El sistema consiste en cabeza, base, eje, sello y un cuerpo sellante.

El protector es nombrado por el tipo de sellos usados y la manera en la que han sido conectados: serie o paralelo; la conexión en serie no es más que un sello tras otro conectados linealmente, para que el fluido del pozo llegue al motor, debe desplazar completamente el aceite almacenado en el sello superior (esto en el caso de dos laberintos); en el caso de dos bolsas conectadas en serie la inferior es de respaldo y funciona en caso de que la superior falle.

Dos bolsas conectadas en paralelo en cambio, aumentarán la capacidad de expansión y son usadas en motores de gran potencia y que así mismo desplazan un mayor volumen de aceite.

Fig. 22. Esquema de un protector tipo modular.



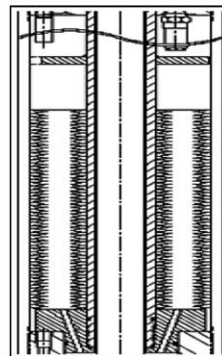
Fuente: REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 49.

1.2.2.5 Maximus. El sistema de protectores *maximus* permite sacar ventajas en tiempo y en menores riesgos, al exponer menos al aceite a diferentes ambientes perjudiciales. Vienen llenos de aceite desde la fábrica y cuentan con un sistema de *plug and play*, que hace que su instalación también sea más rápida y sencilla. Estos han sido diseñados usando piezas que también se usan en los protectores modulares, con el fin de hacer más fácil su mantenimiento, reparación o el intercambio de cualquier pieza si fuese necesario. También se pueden hacer configuraciones como en los protectores modulares.

1.2.2.6 Tipo fuelle. Al igual que los protectores de bolsa el protector tipo fuelle funciona separando físicamente los fluidos. Adicionalmente al ser diseñado para condiciones hostiles, mejora ciertos aspectos en los que el protector tipo bolsa podría fallar, cuenta con varias características importantes, como: mayor resistencia química y a la corrosión; cambio del elastómero por Inconel 625; tiene un mayor rango de resistencia a la temperatura; no es susceptible a la migración del ácido sulfhídrico.

Con este tipo de protector también se pueden hacer combinaciones modulares, se denota con las letras “MB” el protector tipo fuelle y “HT” el cual hace referencia a una característica de alta temperatura

Fig. 23. Esquema de un protector tipo fuelle.



Fuente: SCHLUMBERGER. Product Bulletin – Advanced Protector. Schlumberger Sureco S.A, 2003, Vol. 1, no 01. P. 6.

1.2.2.7 Selección. Al seleccionar cualquier protector ciertos parámetros deben ser tenidos en cuenta: la compatibilidad del protector con la bomba y el motor; el suficiente espacio para que el cable sea instalado; la capacidad de expansión del fluido; la temperatura y posibles agentes químicos al cual será expuesto. Por lo general el protector es seleccionado si su diámetro nominal es igual al de la bomba.

1.2.2.8 Selección de la cámara. Cada configuración tiene diferentes ventajas y por supuesto desventajas. Hay que conocer las características del fluido que tendremos en fondo para realizar la correcta selección.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de las cámaras.

Configuración	Ventajas	Desventajas
Laberinto (L)	Excelente separación en pozos verticales y posibilidad de ser reutilizados.	Instalaciones en inclinaciones sobre 45 grados suelen ser cuestionadas; inclinaciones por encima de 70 grados lo dejan totalmente inservible.
Bolsa (B)	Sello físico el cual puede ser usado sin importar la desviación del pozo ni la gravedad específica.	Ataques químicos; Vulnerable a altos contenidos de H ₂ S y la alta temperatura.
Fuelle (M)	Buen sello, resistente a altas temperaturas y no tiene problemas de compatibilidad química.	Alto costo

Fuente: Modificado de SCHLUMBERGER. Artificial Lift Application Engineering Reference Manual. 2008, vol. 1, no. 01, p. 154.

1.2.2.9 Ciclo térmico. El protector es puesto bajo diferentes condiciones múltiples veces, estando inicialmente en superficie para después ser bajado y puesto en funcionamiento. Las condiciones a las cuales está sometido van a cambiar y este tiene que adaptarse para cumplir sus funciones de la mejor manera. Se explica el ciclo térmico que sufre un protector a continuación: Para el ejemplo se muestra un protector modular, LSB. Se observará cómo cambia el volumen de aceite en función de la temperatura.

1. Todos los protectores son llenados con aceite previamente inspeccionado y probado en la fábrica o en las instalaciones de Servicio de Reda. Durante el ensamblaje del equipo en la locación el técnico de servicio de campo vuelve a rellenar el protector con aceite limpio para reemplazar el aceite perdido durante el acople de los componentes.

Debido al complejo diseño del sistema de protectores, el procedimiento de llenado es exacto y debe ser realizado solamente por técnicos calificados. Cualquier desviación de los procedimientos especificados para cada tipo de protector puede ocasionar problemas como la presencia de aire atrapado en el interior del protector lo que potencialmente puede causar la falla de los sellos mecánicos durante la operación, lo que a su vez causaría daños en el protector y en el motor.³

2. En este paso a medida que la BES es bajada en el pozo el aceite del motor y del protector se va calentando gradualmente hasta llegar a la profundidad de asentamiento⁴.

El incremento gradual de temperatura originará que el aceite del motor y del protector comience a expandirse hasta que la temperatura se equilibre

³ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 51 – 52

⁴ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53

con la temperatura externa.⁵ El volumen expandido del aceite dependerá del diferencial térmico entre la superficie⁶ y la temperatura a la profundidad de asentamiento.⁷

3. Cuando el sistema se arranca y la BES entra en servicio, la temperatura del motor se incrementa a partir de la temperatura de fondo⁸ hasta que alcanza la temperatura a la cual se estabiliza para la operación del sistema.⁹ Este incremento de temperatura provoca una expansión adicional del aceite.¹⁰

4. Después de cierto tiempo de operación se apaga el equipo, sea para realizar mantenimiento de los equipos de superficie, por una falla en el suministro de energía o cualquier otra razón. En el transcurso de cierto tiempo, generalmente entre 2 a 4 horas, la temperatura del motor disminuye¹¹ hasta equilibrarse nuevamente con la temperatura externa del fluido,¹² por lo tanto, el aceite se contraerá el mismo volumen que se expandió en el punto anterior.¹³

Si la cámara superior es de tipo laberinto, el fluido del pozo entra por el tubo y se deposita en el fondo de la cámara superior, donde permanecerá porque su gravedad específica es mayor que la del aceite del motor. Este

⁵ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53

⁶ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53

⁷ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53

⁸ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53

⁹ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53

¹⁰ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53

¹¹ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53

¹² REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53

¹³ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53

fluido es el que primero se expelle cuando el motor se arranca nuevamente y su temperatura se incrementa.

Si la primera cámara es una bolsa, la bolsa se contraerá para adaptarse al nuevo volumen de aceite. El vacío parcial que se produce permitirá el ingreso de fluido del pozo hacia el exterior de la bolsa superior donde permanecerá debido a que el sello positivo de la bolsa evitará su ingreso al interior de la bolsa.¹⁴

5. Aun cuando en teoría durante la operación cíclica del sistema el protector debiera expulsar exactamente la misma cantidad de fluido del pozo que ingresó a la primera cámara, siempre y cuando los ciclos ocurran exactamente entre las mismas temperaturas, existen algunos factores que pueden contribuir a que el protector pierda cierta cantidad adicional de aceite, como:

- El incremento de la temperatura de operación del motor.
- Los cambios en la gravedad específica del fluido pueden incrementar la carga del motor, incrementando también su temperatura de operación.
- En pozos con cantidades considerables de gas, puede presentarse gas disuelto en el aceite del motor y expandirse durante los ciclos de operación.
- Se pueden formar emulsiones en las cámaras, etc.

Si el sistema tiene una bolsa, la bolsa no colapsará a menos que el volumen de aceite expelido por el sistema sea igual al volumen contenido en el interior de la bolsa.

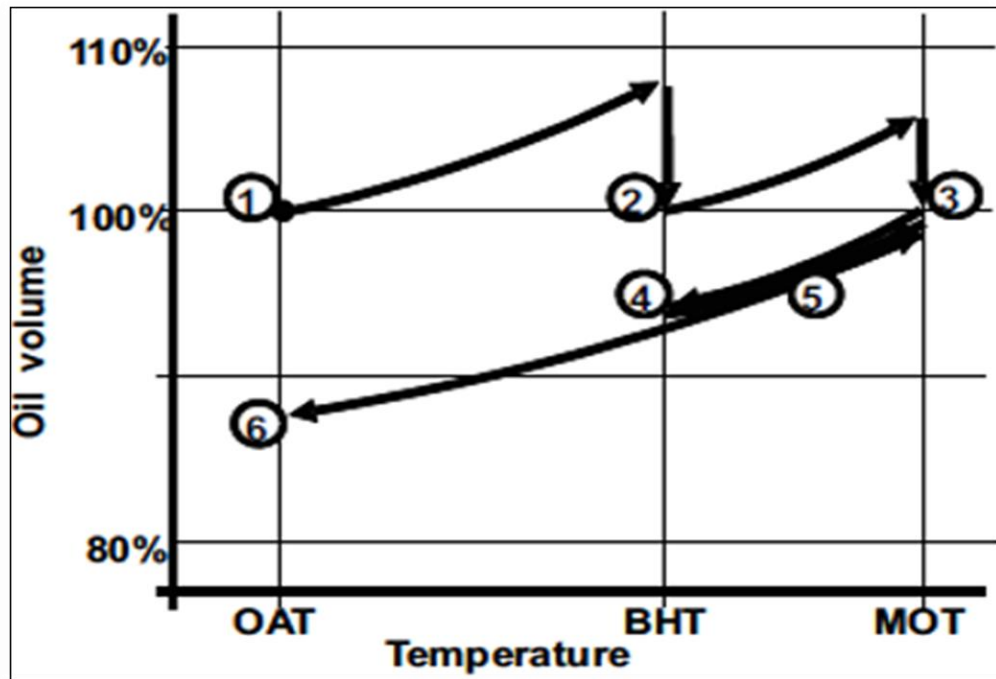
¹⁴ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 53-54

6. A medida que se saca la unidad hacia la superficie, el aceite se va enfriando progresivamente hasta llegar nuevamente a la temperatura ambiente.¹⁵

Dependiendo de la operación cíclica a la que estuvo sometido el equipo y de la temperatura de fondo, el volumen contraído puede exceder la capacidad de la cámara de laberinto o de la bolsa, lo que se evidencia como desgarramiento de los elastómeros de las bolsas y presencia de fluido en las cámaras inferiores.

La mayoría de los daños de las bolsas se producen durante la recuperación de la BES del pozo, no durante la operación del equipo.¹⁶

Fig. 24. Ciclo térmico para un protector LSB.



Fuente: REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 55.

¹⁵ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 54

¹⁶ REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. P. 54

1.2.2.10 Empuje. Otra de las funciones, de hecho puede considerarse de las más importantes, es absorber el empuje generado por la bomba, no importa si es ascendente o descendente.

El cálculo de la carga para la selección del cojinete debe hacerse asumiendo la máxima carga posible, simulando el peor escenario, cuando el flujo es cero debido a una válvula cerrada y el empuje ejercido es considerado el máximo. Es recomendable que su diseño sobrepase las necesidades del peor escenario. En caso de que el empuje del futuro pozo exceda al que soportan los cojinetes, *Designpro* dará un aviso.

1.2.2.11 Elastómeros. Al hacer la selección del elastómero se debe considerar la vida del pozo y las futuras intervenciones que este podría llegar a tener, para asegurar que el elastómero seleccionado pueda soportar las cargas a las cuales será expuesto.

Todas las temperaturas a las cuales será expuesto el elastómero deben ser tenidas en cuenta, como la temperatura de almacenamiento, transporte e instalación.

Esta selección de elastómeros se hace para el sello del eje, *O-rings* y las bolsas. Se le presta especial atención a la selección de la bolsa puesto que es un factor determinante en el *run life* del equipo. (Tabla 8.)

1.2.3 Cable de potencia. El cable de potencia es uno de los componentes más importantes y sensibles en el sistema de BES. Su función es transmitir la energía eléctrica desde la superficie al motor y transmitir las señales de presión, temperatura, etc. desde el instrumento sensor de fondo a la superficie.

Todos los cables Reda 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.

1.2.3.1 Conductor. La esencia del cable es el conductor. Los conductores típicos son el cobre con un revestimiento para resistir el ataque de H₂S. *Schlumberger* es el único proveedor que utiliza *Amalloy* para recubrir los conductores del cable de alimentación, una aleación de plomo-estaño que se ha probado contra estaño puro, ya que es superior a otros revestimientos. La propiedad primaria de un conductor es su tamaño; la propiedad secundaria es su configuración (sólida / trenzada). El tamaño de un conductor se refiere al área de la sección transversal. La mayoría de los fabricantes de cables se refieren al calibre de alambre americano (AWG) para indicar el tamaño del conductor.

1.2.3.2 Aislamiento. La segunda parte del cable es el aislamiento. Es la capa directamente aplicada sobre el conductor. *Schlumberger* ofrece dos tipos de aislantes, polipropileno (EPP) y etileno propileno dieno metileno (EPDM).

- **Polipropileno.** Es un aislante termoplástico con las siguientes características: Aplicaciones para baja temperatura, excelente resistencia al fluido del pozo, excelentes propiedades eléctricas y bajo costo.
- **Etileno propileno dieno metileno.** Es un aislante termo-endurecido con las siguientes características: Resistente a altas temperaturas, excelentes propiedades eléctricas y débil ante ataques químicos.

1.2.3.3 Barrera. La barrera es la siguiente capa del cable, se utiliza para apoyar y proteger el aislamiento. Bajo ataque químico, el aislamiento se hinchará típicamente. La barrera previene la hinchazón reforzando el aislamiento, por lo tanto, la resistencia de la barrera es una propiedad importante. Además, la barrera ofrece una primera línea de defensa contra ataques químicos. *Schlumberger* ofrece varios tipos de barreras: cinta adhesiva, cinta PTFE, extrusión y plomo. Cada tipo de barrera tiene un límite de temperatura, por lo que la selección de barrera está relacionada con la selección del aislante.

1.2.3.4 Chaqueta. Para el cable redondo, la chaqueta sirve para mantener las tres fases juntas. Los materiales para la chaqueta son polietileno de alta densidad HPDE, Nitrilo o EPDM. La selección de la chaqueta depende de las propiedades a la resistencia química y las consideraciones de temperatura.

Tabla 8. Comportamiento de los elastómeros frente a diferentes agentes.

Temp	Neoprene 250	Carboxy Nitrile 275	HSN 300	Viton 350	Aflas 400
Agua/Aceite	1	1	1	2	1
Ácido Sulfhídrico	1	3	1	4	1
Aminas	3	3	3	4	1
Químicos	4	4	1	3	3
CO2	2	2	2	4	2
1 = Excelente. 2 = Bueno. 3 = Regular. 4 = Malo.					

Fuente: REDA Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1993. Sección 2. P. 60.

1.2.3.5 Armadura. La armadura proporciona dos funciones al cable. En primer lugar, protege el cable contra daños mecánicos durante el manejo y la instalación. En segundo lugar, proporciona una resistencia extra para proteger de ataques químicos y así mismo contra la hinchazón. Esta segunda función no debe ser subestimada; muchos análisis de fallos de cable han determinado que la pérdida de la armadura debido a la corrosión fue la razón que condujo a la falla del cable.

- **Material.** Hay tres materiales para la armadura: galvanizado, acero o monel. Nombrados en orden ascendente en cuanto a la protección que brinda cada material.
- **Grosor.** Aunque el grosor varía con el tipo de material, por lo general el rango es de 0.015 y 0.025 pulgadas.
- **Perfil.** Existen dos tipos de perfil: el redondo y el plano. También existen de bajo perfil y de doble armadura.

1.2.3.6 Selección. El proceso de selección del cable de potencia es básicamente un proceso de dos pasos:

- **Tamaño o calibre AWG del cable.** En general la selección del calibre del cable se hace balanceando las condiciones de operación y el costo. En lo referente al calibre del cable, el propósito principal es transportar la energía eléctrica desde la superficie al motor. En este sentido, se podría decir que el cable de mayor calibre es mejor porque en éste se tendrán menores pérdidas de voltaje lo que se traduce en mayor eficiencia del sistema.

Cables de mayor calibre contribuyen a la mayor eficiencia del sistema, por otro lado, se debe considerar también que los cables de mayor calibre son más costosos. Por ello se debe buscar un punto de equilibrio entre costo inicial y costo de operación.

Para seleccionar el calibre del cable se debe evaluar la caída de voltaje en los conductores, que es la función de la intensidad de corriente que pasa por el conductor, la longitud del cable y de la temperatura del conductor.

- **Selección de la configuración del cable.** Con respecto a las limitaciones físicas *tubing/casing* que determinan si el cable cabe o no en el pozo, en general, se puede decir que mientras más pequeño el cable mejor. Esto se puede lograr usando un calibre menor o usando cable de construcción plana (conductores paralelos) en lugar de cable redondo.

Una desventaja del cable plano sobre el cable redondo es que en general ofrece menor protección mecánica que su equivalente cable redondo, haciendo que sea más susceptible a daño durante la instalación.

Bajo una carga de compresión los conductores en el cable redondo pueden moverse ligeramente permitiendo manejar la carga. En cambio, en el cable paralelo no hay lugar para desplazarse y absorber esfuerzo, por lo tanto, se comprime el aislamiento.

La otra desventaja del cable plano es su asimetría, el cable redondo es completamente simétrico. Cierta cantidad de la corriente que circula por los conductores se pierde en forma de calor de tal forma que el cable tiende a calentarse sobre la temperatura ambiente.

En el cable redondo, los tres conductores se calientan uniformemente. En el cable plano, los dos conductores de los extremos están en ambientes similares, por lo que tienden a calentarse uniformemente. Sin embargo, el conductor central está rodeado por dos calentadores de tal forma que no puede disipar el calor al fluido del pozo. Como resultado de esto, el conductor central del cable paralelo funciona más caliente que los otros dos.

Dado que la caída de voltaje en un conductor es función de la temperatura, si aumenta la temperatura, la caída de voltaje también se incrementa. Cuando se usa

cable plano, por lo general, el voltaje en las tres fases de los terminales del motor están desbalanceados, aun cuando el voltaje este perfectamente balanceado en superficie. El desbalance de voltaje puede provocar un calentamiento adicional en el motor.

1.2.3.7 Protector de acoplamiento. Los protectores de acoplamiento para el cable poseen un papel importante en la protección contra daños mecánicos durante la instalación. Además, sirven como una abrazadera de fricción para que el cable esté conectado de manera efectiva a la tubería, por lo tanto, no tienen su propio peso.

Están diseñados para sujetar el cable a la tubería y para hacer un ajuste de compresión. En general, los protectores de acoplamiento para el cable están proyectados para un diseño específico y usualmente no se pueden usar en diseños diferentes, ya que cambian cualquier cosa (tamaño del conductor, perfil, tipo de cable, tipo de rosca, etc.)

1.2.4 Entrada y separador o manejador de gas. La sección de entrada comúnmente llamada *Intake* está ubicada sobre el protector y es una sección de gran importancia para todo el sistema, puesto que es la entrada del crudo, del gas y de cualquier otra partícula que esté presente en el pozo. Como principal función tienen el objetivo de evitar la entrada de gas al sistema ya que la entrada de este puede comprometer la operación de un equipo y recortar su vida de operación. Diseños especiales de entrada son desarrollados para evitar o permitir el gas a través de la bomba, se encuentran no solo diseños de separadores sino también diseños de manejadores. Los manejadores tal como su nombre lo indica, permiten manejar el gas libre, bajo diferentes principios, permiten el ingreso del gas al sistema posterior a un acondicionamiento y es la mejor opción que hay para pozos que superan el porcentaje de gas libre que los separadores son capaces de manejar.

1.2.4.1 Problemas asociados al gas. En un principio en la industria el gas no fue bien valorado por la dificultad que había para controlarlo y manejarlo. Se consideraba más bien como un problema por lo cual se quemaba o se venteaba a la atmosfera; prácticas que hoy en día aún se llevan a cabo, pero con ciertas restricciones y no con todo el gas, aunque en teoría el venteo de gas a la atmosfera está prohibido.

Si bien el gas no es un problema y actualmente le encontramos un valor y una función en diferentes industrias (porque para el sistema electro sumergible es un problema) la respuesta de esta pregunta está en los problemas operacionales que se presentan al haber gas, puede haber una interferencia de gas o más bien baches de gas, un bloqueo completo, una carga del motor que fluctúa y una pérdida de eficiencia volumétrica de la bomba.

1.2.4.2 Estándar. La entrada estándar tiene unos orificios que son la entrada del fluido, están cubiertos por una reja metálica la cual evita el taponamiento de las cavidades que llevan el fluido a la bomba.

Fig. 25. Entrada estándar.



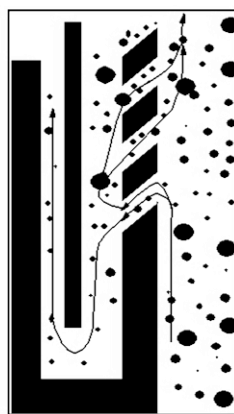
1.2.4.3 Entrada ARZ. La ARZ utiliza camisas y cojinetes de zirconio, es una cerámica muy dura y llega a ser comparada con el diamante. Este material brinda una mejor protección y confiabilidad contra la abrasión y la vibración lateral

1.2.4.4 Entrada Integral. Algunas bombas tienen la entrada incorporada.

1.2.4.5 Separadores de gas de flujo inverso. El diseño original de los separadores de gas estáticos se basaba en el incremento de la separación por medio de la inversión de la dirección del flujo en la sección de entrada. Por esto se los conoce como separadores de gas de flujo inverso, 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.

Fig. 26. Esquema de separación en separador de flujo inverso.



Fuente: REDA. Curso avanzado de operaciones de B.E.S. 1996. Sección 2. p. 27.

1.2.4.6 Separador de gas giratorio. Los separadores de gas sí ejercen un trabajo sobre el fluido para lograr una 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, es expulsada 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 se producen los fluidos que 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*.

1.2.4.7 Manejador de gas. Los manejadores acondicionan el gas para su posterior ingreso al sistema, incrementando la habilidad de la bomba de producir gas sin llegar a tener bloqueos. El manejador de gas tiene las siguientes características: homogenizar el fluido, reducir el tamaño de las burbujas de gas, poner el gas de vuelta en solución y ayudar a que el gas se mueva con la corriente principal.

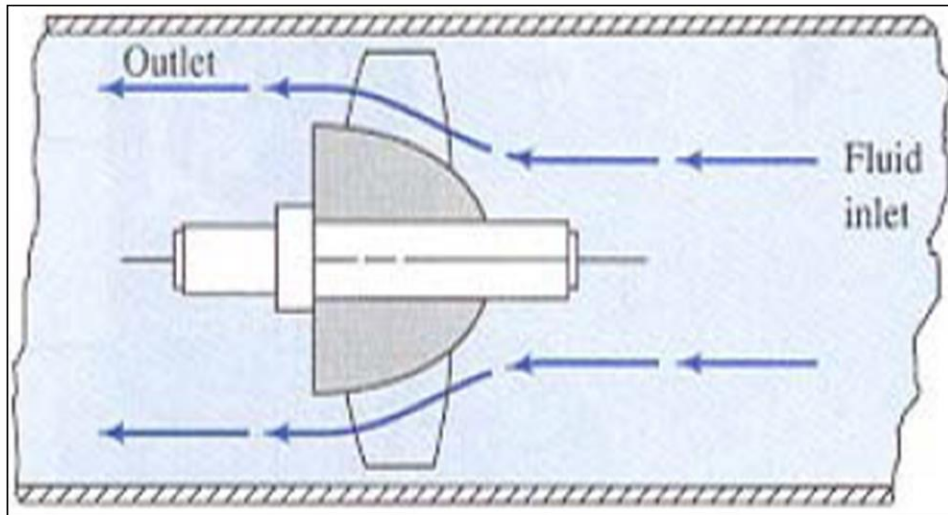
Los manejadores de gas son instalados cuando el separador de gas no alcanza a separar eficientemente el gas y este tiene la posibilidad de entrar a la bomba. De este porcentaje se ocupa el manejador y lo envía a la bomba en condiciones aptas.

1.2.4.8 Multiphase Gas Handler. El *Multiphase Gas Handler* es una bomba de flujo axial que permite un mayor manejo de gas libre debido a su diseño.

Existen más tipos de bombas, como la radial y mixta, donde manejan porcentajes de 10%, 20% o 25% de gas libre respectivamente, mientras que una bomba de flujo axial llega a manejar hasta un 75%. Esto debido al diseño del impulsor del MGH, el

cual fue diseñado por el instituto francés del petróleo en compañía de *Statoil* y *Total Fina Elf*.

Fig. 27. Representación del flujo de fluido en un MGH.



Fuente: SCHLUMBERGER. Poseidon multiphase pumping system. p. 18.

1.2.5 Bomba. Una bomba centrífuga es una máquina que mueve fluidos rotándolos con un impulsor rotativo dentro de un difusor que tiene una entrada central y una salida tangencial. La trayectoria del fluido es una espiral que se incrementa desde la entrada en el centro a la salida tangente del difusor. El impulsor transmite energía cinética al fluido. En el difusor, parte de la energía cinética es transformada en energía potencial por medio del incremento del área de flujo.

La bomba centrífuga REDA es multi-etapa, conteniendo un número seleccionado de impulsores equipados con álabes, dentro de sus respectivos difusores de una forma ajustada, situado en el eje de forma axial, accionado por el motor eléctrico.

1.2.5.1 Concepto. Una bomba centrífuga crea presión por medio de la rotación de una serie de álabes de un impulsor. El movimiento del impulsor forma un vacío parcial, el fluido ingresa al impulsor; la función del impulsor es transferir energía al rotar el líquido, elevando así la energía cinética del fluido. El difusor, entonces, convierte esta energía en energía potencial, elevando la presión de descarga. El fluido es expulsado a la periferia hacia el difusor gracias a la velocidad de rotación del impulsor.

Cada etapa tiene un impulsor y un difusor, una vez más el impulsor toma el líquido y le imparte energía cinética, posteriormente, el difusor convierte la energía cinética en energía potencial. La función de las bombas es levantar fluidos de un nivel a otro.

1.2.5.2 Compresora. Todos los impulsores están fijos al eje, por lo tanto, se mueven en un solo cuerpo. Para evitar que los impulsores se asienten en el difusor por efectos de la gravedad se realiza una operación denominada *shimming*, que consiste en levantar el eje, ubicando unas láminas en el acople, transfiriendo así el esfuerzo generado al eje del protector.

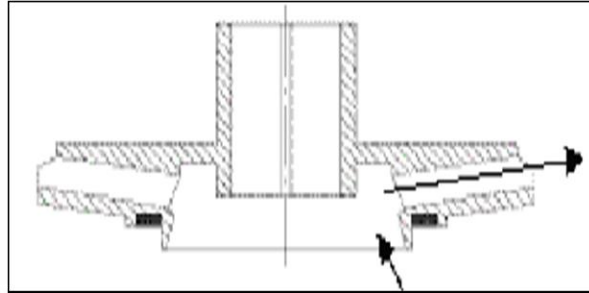
1.2.5.3 Flotadora. Cada impulsor es libre de moverse hacia arriba o hacia abajo del eje, donde cada etapa maneja su propio empuje, por lo que se pueden usar múltiples etapas sin preocuparse por el *thrust bearing* del protector.

1.2.5.4 Construcción. Hay diferentes clases de impulsores, determinados por su geometría y el caudal que pueden manejar. Existen tres tipos de impulsores y son seleccionados según la aplicación que van a tener. La diferencia entre estos tres tipos, es el ángulo, tamaño y forma que tiene cada etapa y por la cual el flujo de fluido debe pasar.

1.2.5.5 Flujo radial. El flujo de fluido debe pasar la etapa en giros de 90 grados. La presión impartida en este tipo de bombas se debe solamente a la

fuerza centrífuga.

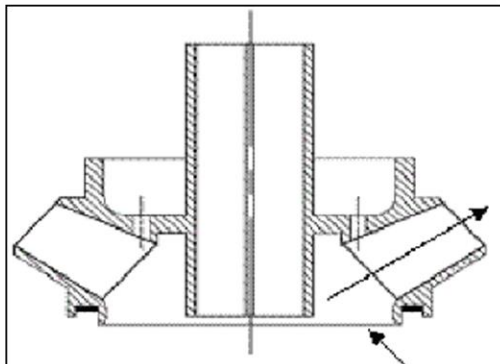
Fig. 28. Representación de la dirección del fluido en etapas de flujo radial.



Fuente: SCHLUMBERGER. Artificial Lift Engineering. Artificial lift application engineering reference manual. 2008, vol. 1, no. 01, p. 94.

1.2.5.6 Flujo mixto. El flujo de fluido debe pasar por la etapa a 45 grados. La presión impartida al fluido se debe en parte a la fuerza centrífuga y a la acción del impulsor sobre el fluido.

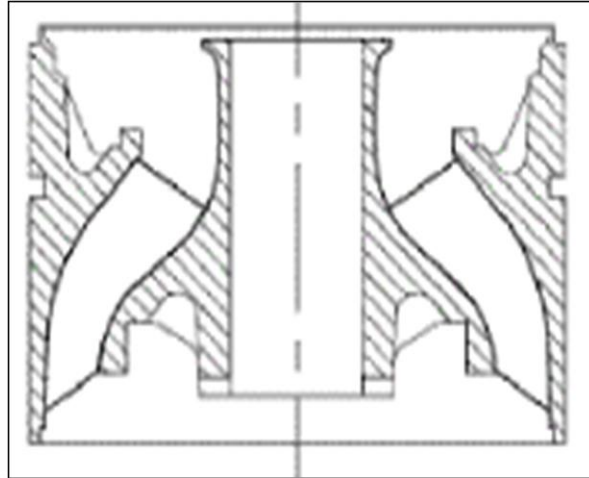
Fig. 29. Representación de la dirección del fluido en etapas de flujo mixto.



Fuente: SCHLUMBERGER. Artificial Lift Engineering. Artificial lift application engineering reference manual. 2008, vol. 1, no. 01, p. 95.

1.2.5.7 Flujo axial. El flujo de fluido pasa por la etapa a 180 grados. La presión es totalmente impartida por los álabes del impulsor.

Fig. 30. Representación de la dirección del fluido en etapas de flujo axial.



Fuente: SCHLUMBERGER. Artificial Lift Engineering. Artificial lift application engineering reference manual. 2008, vol. 1, no. 01, p. 96.

1.2.5.8 Nomenclatura. La nomenclatura nos indica número de etapas, serie, material de las etapas, caudal en el punto de eficiencia, tipo de construcción, configuración, aplicación especial y material de la carcasa. (Tabla 9.)

Ejemplo:

150 D N 1500 FL UT ES RA

En el anterior ejemplo vemos una bomba de:

150 etapas Flotantes con un caudal de máxima eficiencia de 1500 BPD ubicadas en Upper tandem, con estabilización mejorada y la carcasa constituida por redaloy.

Tabla 9. Abreviatura y definición para la nomenclatura de bombas.

	Abreviatura	Definición
Aplicación especial	ARZ	Resistente a la abrasión
	ES	Estabilización mejorada
Material de la carcasa	RA	<i>Redaloy</i>
	CS	Acero-carbón
	SS	Acero inoxidable
Construcción	C	Compresora
	FL	Flotadora
	CR	Anillo de compresión
Configuración	CT	<i>Center tandem</i>
	LT	<i>Lower tandem</i>
	UT	<i>Upper tandem</i>
	S	Single
Eje	HSS	Eje de alta resistencia

Fuente: Traducido de SCHLUMBERGER. Artificial Lift Application Engineering Reference Manual. 2008, vol. 1, no. 01, p. 93-94.

1.2.5.1 Recomendaciones al seleccionar una bomba. Para la adecuada selección de una bomba es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- En general, es mejor seleccionar la bomba de mayor diámetro.
- Seleccionar la bomba más eficiente al caudal de operación de diseño.
- Configure *tandem* de bombas con *housing* de igual tamaño o parecidos.
- Verificar la capacidad de carga del cojinete de empuje del protector (en caso de que sea compresora).
- Fluidos abrasivos. Gas libre a la entrada de la bomba.

2. ANÁLISIS DE TENDENCIAS

La principal tarea en ALROC es llevar a cabo el análisis y diagnóstico de los equipos que se encuentran actualmente operando como también realizar operaciones remotas a solicitud del cliente. Los equipos están expuestos a condiciones cambiantes en fondo y es crítico vigilar su funcionamiento, donde también se ven perturbados ante cualquier cambio de modo de operación, frecuencia, cierres en superficie, obstrucciones en anular, taponamientos (gasificación), sedimentación y posibles problemas directamente del equipo.

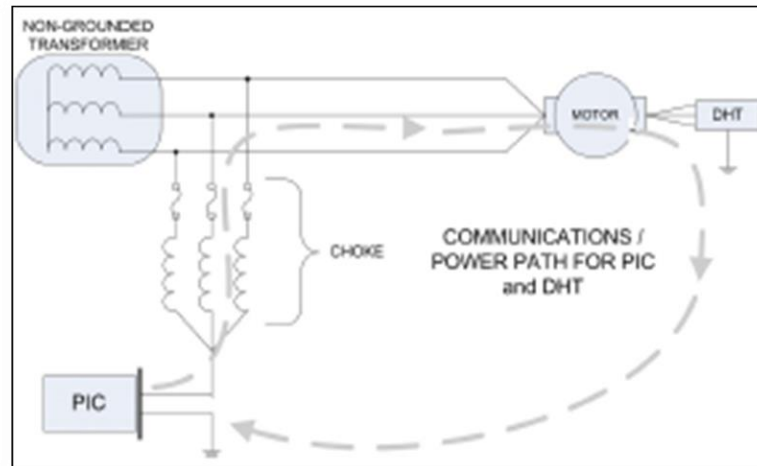
Es por esto que surge el análisis de tendencias, donde se establecerá y se evidenciará el comportamiento regular que tiene el equipo para determinados inconvenientes, más adelante se mostrarán y explicarán las diferentes circunstancias que se pueden llegar a tener. También es necesario conocer cómo se pueden ver afectados los equipos por diferentes fenómenos físicos, facilitando así la comprensión de las variables graficadas.

2.1 MONITOREO.

El monitoreo de los equipos se realiza remotamente, gracias a la transmisión satelital. El sensor en fondo es el encargado de registrar las variables en fondo como: presión de entrada de la bomba, presión de descarga, temperatura de entrada de la bomba, temperatura del embobinado del motor, vibración y corrientes de fuga. Por medio del cable de potencia se transmiten pulsos de corriente directa, interpretados por la Tarjeta PIC. Posteriormente la caja nombra estos valores, gracias a la COMMCARD y con ayuda de una antena, los datos son enviados al satélite, para después llegar a la plataforma de *Zedi*.

El objetivo de monitorear un equipo es protegerlo de condiciones de operación perjudiciales, optimizar los recursos usados en superficie, como también prevenir eventos, aumentando así el *run life* de los equipos, que se ve reflejado en la producción del pozo.

Fig. 31. Esquema del trayecto de la información entre el sensor y el controlador.



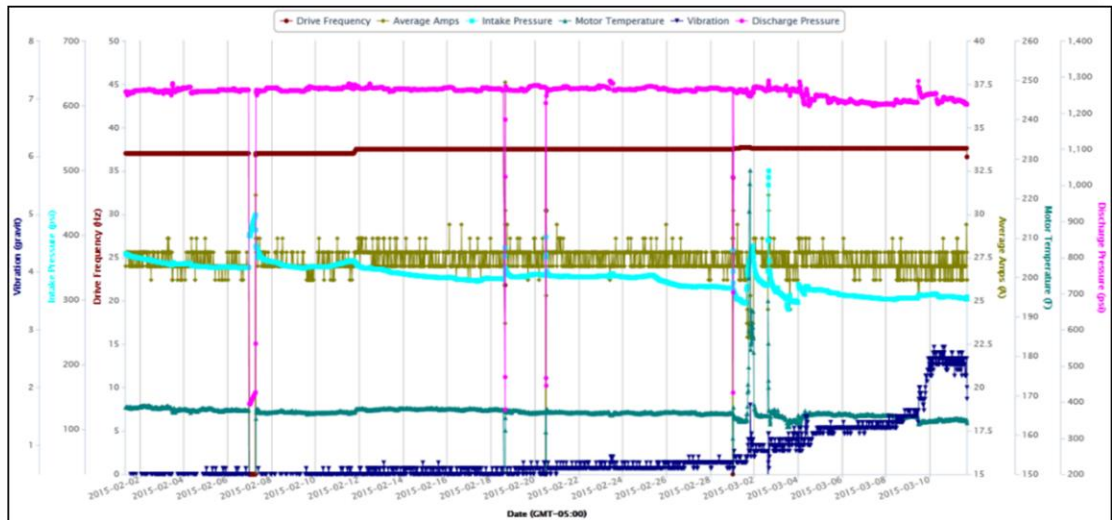
Fuente: SCHLUMBERGER. Phoenix Interface Card (PIC) Installation Manual. Schlumberger Sureenco S.A.

2.1.1 Arenamiento. El arenamiento de pozos se da en formaciones poco consolidadas, donde el *draw-down* generado es excesivo, por lo que genera el desprendimiento y movimiento de los granos desde la formación hasta el pozo. Aunque los equipos de *Schlumberger* cuentan con materiales que tienen gran resistencia a la abrasión, no quiere decir que estén exentos de sufrir un desgaste acelerado de las etapas, ejes y la posibilidad de un atascamiento del equipo. Cuando un equipo está produciendo bajo estas condiciones es crucial su operación continua, si el equipo se apaga y no es encendido rápidamente puede llegar a arenarse; debido al tiempo al que estuvo apagado los sólidos que van viajando por dentro del equipo por gravedad se decantan y hacen difícil el arranque del equipo, esto puede representarse en una sobrecarga y no arrancar o simplemente atascarse.

En este caso el cliente conoce la litología del pozo y para ello procede de la siguiente manera: al equipo se le ordena el incremento de frecuencia progresivos de 0.5 Hz en un tiempo a tiempos largos para lograr la mínima perturbación al pozo y evitar una mayor producción de sólidos. El 2 de marzo de 2015 en el sistema de

Schlumberger se observó que se incrementó la vibración de 0.5 a 2.8 *gravits*, la cual está asociada al manejo de sólidos.

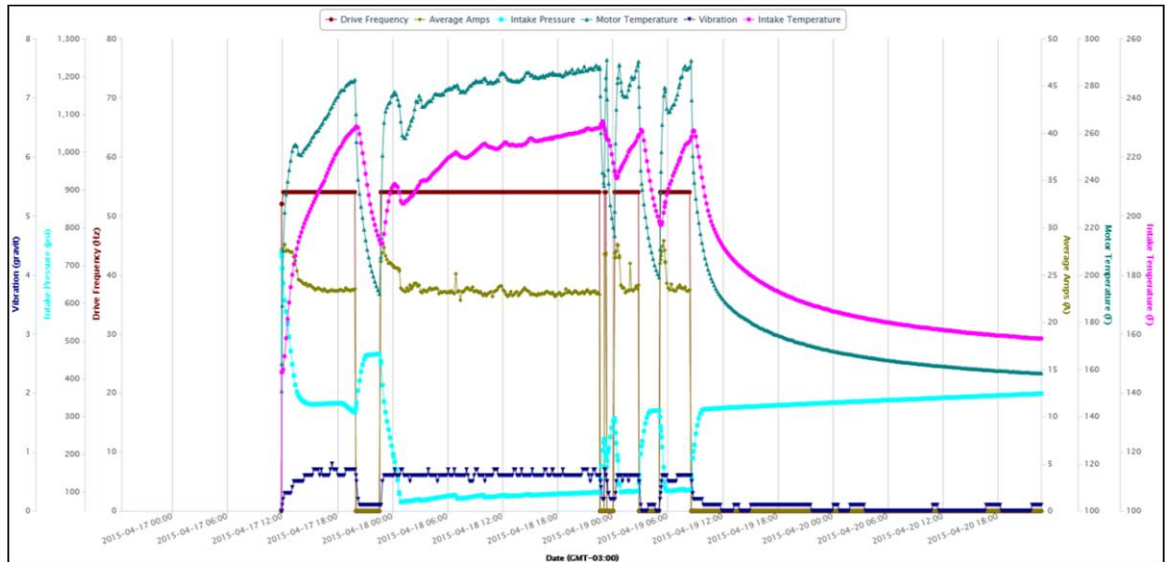
Fig. 32. Representación gráfica de un pozo con problemas de arenamiento.



2.1.2 Bajo Aporte. Cuando el aporte de la formación no es el esperado o es muy bajo, en los equipos de bombeo electro sumergible, se ve representado en la poca refrigeración que recibe el motor, pues el flujo del fluido alrededor del motor para generar la refrigeración necesaria no es el mínimo requerido de 1 pie por segundo, aunque la construcción de estos motores se da para su funcionamiento en temperaturas elevadas, de igual manera requieren las condiciones propicias de temperatura para su correcto funcionamiento e integridad de los devanados. Se entiende que la debida selección y el cuidado del motor son cruciales para el funcionamiento de un equipo.

Para este caso se evidencian múltiples paradas del equipo, causadas por la alta temperatura del motor y la entrada de la bomba, así como decrementos drásticos en la presión de entrada cada vez que el equipo arranca. Esto se debe a que la formación presenta problemas de aporte y no alcanza a entregar el caudal necesario para refrigerar el equipo.

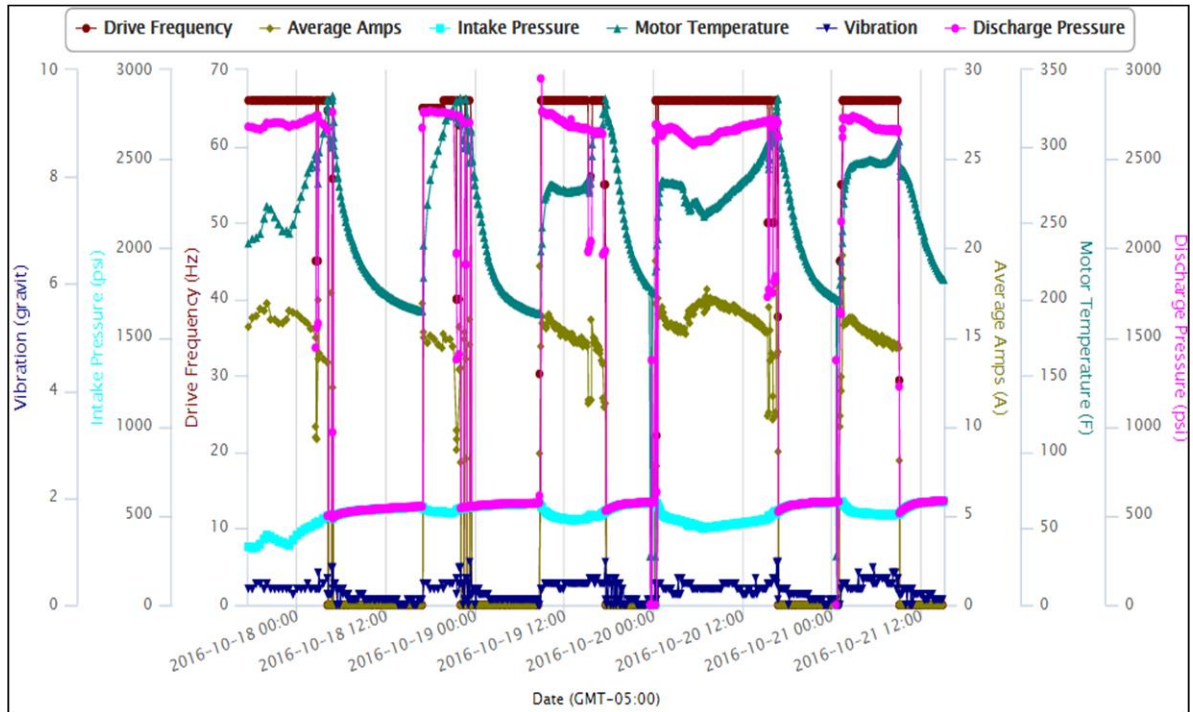
Fig. 33. Representación gráfica de un pozo con bajo aporte.



2.1.3 Bloqueo por Gas. Los equipos de bombeo electro sumergible son vulnerables a altos porcentajes de gas libre; por un lado, la baja transferencia térmica hace que la temperatura del motor se incremente y pueda llegar a sobrecalentar el motor, por otro lado, se produce un bloqueo por tapones de gas que impiden el ingreso del fluido donde se visualiza la disminución de la presión de descarga. En caso de que esté bloqueada la entrada, el motor hará un esfuerzo mayor para intentar desplazar el fluido.

Para este asunto se evidencian múltiples eventos de bloqueo por gas, en cada evento el equipo se apaga por una elevada temperatura de motor (331 degF), se puede evidenciar entonces, un incremento de la temperatura y su a vez fluctuaciones en la carga en la corriente del motor (15.6 @ 10.6 A), es importante analizar las presiones, partiendo de que se observa una frecuencia estable (66 Hz); cuando el equipo está en operación, se puede observar una tendencia en decremento en la presión de descarga (2756 @ 1648 psi) e igualmente un incremento en la presión de entrada (435.7 @ 518 psi).

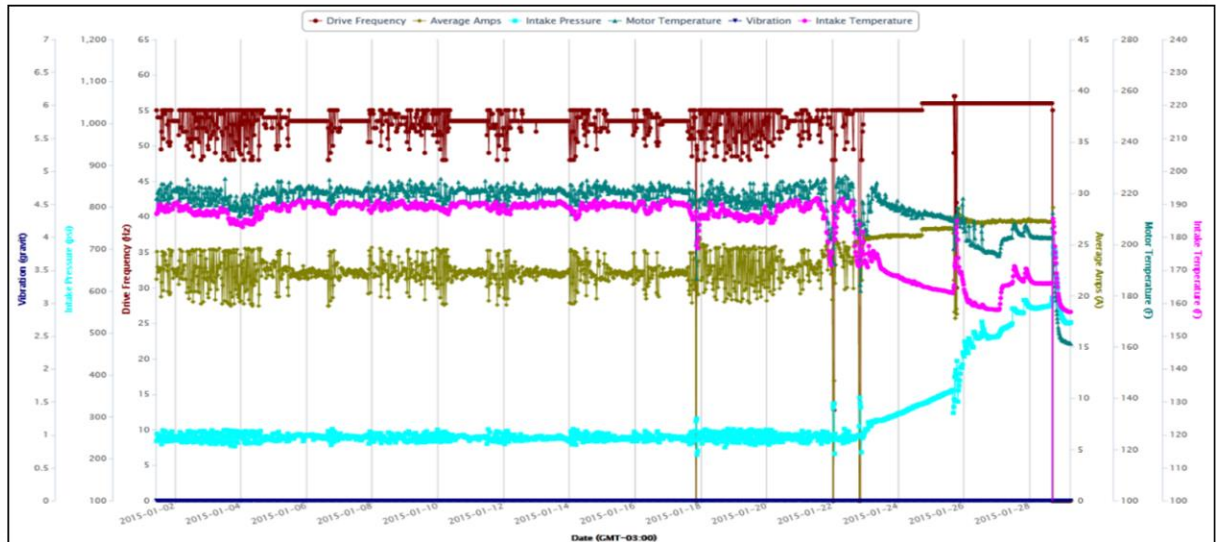
Fig. 34. Representación gráfica de un pozo bloqueado por gas.



2.1.4 Conificación de Agua. La conificación de agua en un pozo se da cuando un acuífero establece un canal de flujo con los perforados del pozo y donde la movilidad del agua restringe el ingreso del aceite, en consecuencia, se da un aumento del BSW y cae la producción de petróleo.

Para este caso se observa en la gráfica el comportamiento de un equipo que opera a modo de presión de entrada, en el cual se visualiza un incremento acelerado precisamente en la presión de entrada, lo cual, acompañado del incremento en amperaje del motor, indica que al sistema le está ingresando un fluido más pesado, entonces incrementa la presión en fondo y a su vez aumenta la carga del motor. Un factor clave en la identificación de este caso es la caída en las temperaturas de motor de entrada, donde el agua al tener mejores propiedades térmicas que el petróleo, brinda una mayor refrigeración.

Fig. 35. Representación gráfica de un pozo con conificación de agua.

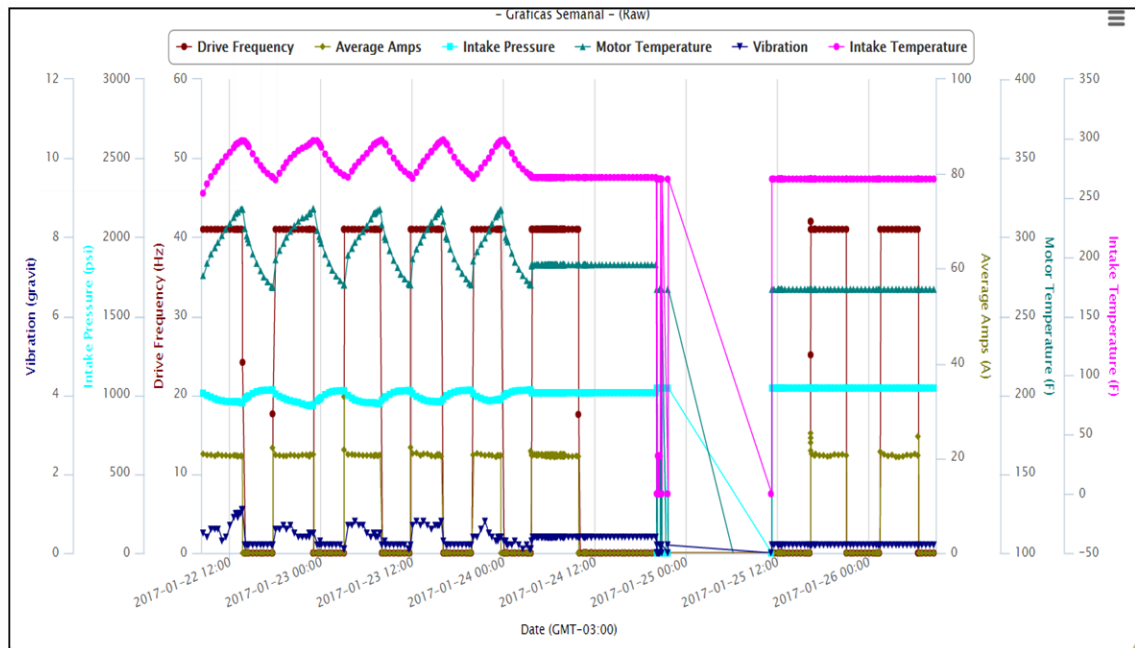


2.1.5 Datos de Sensor no Fiables. Para los equipos de bombeo electro sumergible es de suma importancia la información que se obtiene de fondo, la tarjeta PIC es la encargada de interpretar estos valores, aunque no siempre lo hace de manera precisa, y la consecuencia de estar expuesto a condiciones perjudiciales será un equipo dañado. Cuando se cuenta con datos fiables se podrá proteger la integridad del equipo e igualmente producir el pozo de manera óptima.

Para este caso vemos un equipo que tiene múltiples eventos de apagado, en cada evento el equipo se apaga por una alta temperatura de entrada de la bomba (299.1 degF) aunque también alcanza temperaturas de motor altas (317.7 degF). El equipo se apaga por las protecciones con las que cuenta para la temperatura, se le da un tiempo para su enfriamiento y posteriormente se le da arranque. Este problema se da por el bajo flujo de fluido alrededor del equipo. El día 24 de enero de 2017 en la empresa *Schlumberger Surencó S.A*, los datos de sensor del equipo quedaron pegados por debajo de las protecciones, (267.1 degF) de temperatura en la entrada a la bomba y (282.6 degF) de temperatura de motor, por lo cual el equipo siguió

trabajando hasta alcanzar temperaturas que resultan perjudiciales. El 24 de enero de 2017 se tomó la decisión de apagarlo para establecer un plan; el 25 de enero de 2017 se enciende nuevamente y se pone en operación por periodos de cinco horas y se apaga por cuatro horas. Los datos de sensor fiables brindan información importante para la operación de un equipo BES. (Fig. 36.)

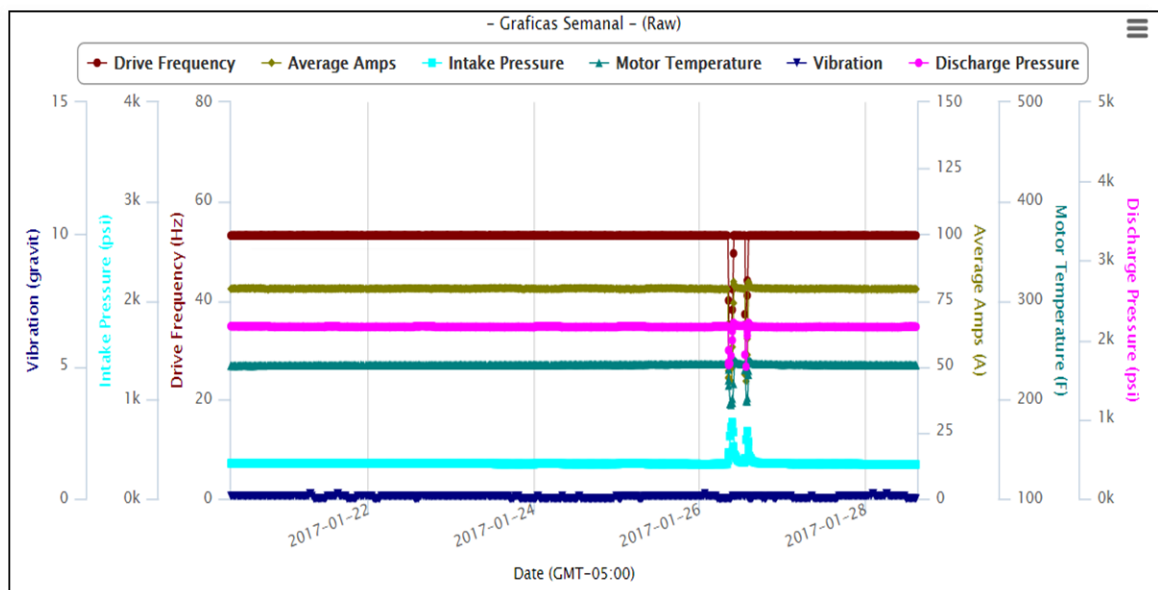
Fig. 36. Representación gráfica de un pozo con datos de sensor no fiables.



2.1.6 Contingencia. Una de las mayores ventajas de los equipos BES es que se ajustan según el requerimiento necesario. No solo es común ver que hacen maniobras en choque, sino que también reducen la frecuencia de operación a los equipos durante determinado tiempo por diferentes razones, como conocimiento previo; si se aprecia en la imagen a este pozo se le hicieron cambios de frecuencia como medida a una contingencia presentada en campo. Para este caso se sabe que 14 pozos de un cliente sobrepasan la capacidad de las facilidades con las que cuentan y es un problema recurrente. A esta maniobra se

recurre como urgencia para prevenir derrames de crudo y posibles castigos pecuniarios. A los 14 pozos se les hace el decremento al mismo tiempo, para este pozo se evidencia un decremento y posterior incremento de (53.1 @ 35 @ 53.1 Hz) y (53.1 @ 35 @ 53.1 Hz) desde las 8:17 horas hasta las 9:22 horas y desde las 13:02 horas hasta las 13:42 horas respectivamente. Con esta maniobra se incrementa la presión en fondo y se reduce el *draw down* generado, así el caudal de crudo que se obtiene se ve reducido. (Fig. 37.)

Fig. 37. Representación gráfica del manejo a un pozo por contingencia en el campo.

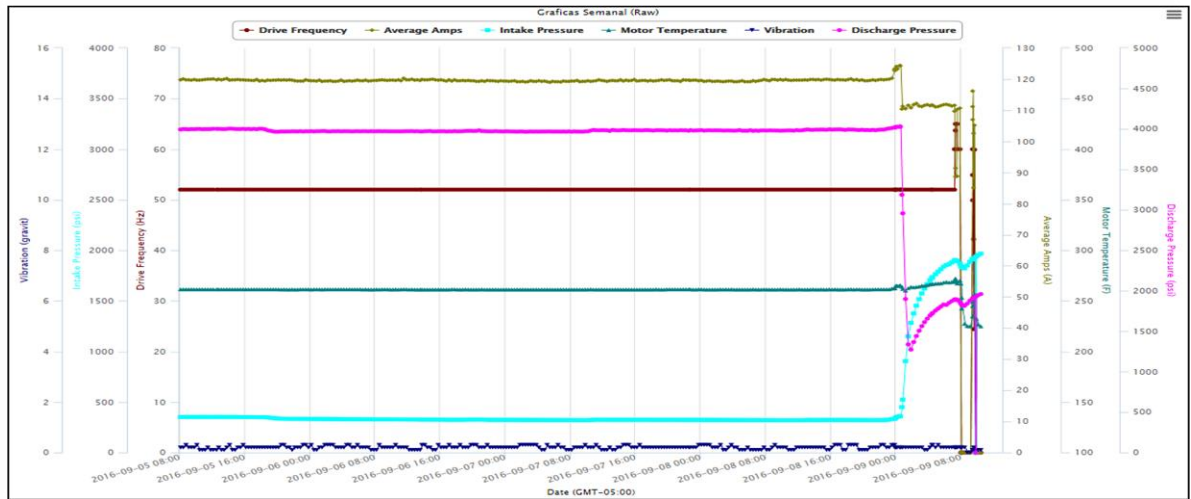


2.1.7 Ruptura de Eje. El eje es la conexión mecánica entre el motor, el protector y la bomba, permite transferir el torque por lo que está sometido a fuerzas de torsión, la resistencia del eje viene dada por su diámetro y el material por el cual fabrica, cuando se supera la resistencia mecánica del eje se genera una ruptura.

Para este caso el equipo presenta una caída repentina en la presión de descarga (3984.8 @ 1370.4 psi) y amperaje (119.8 @ 110.5 A), junto con un rápido incremento en la presión de entrada (480 @ 1790 psi), a esto se le atribuye una desconexión

mecánica entre el motor y la bomba, por lo que se deja de transmitir energía mecánica a la bomba y el rotor reduce su esfuerzo, esto se refleja en la caída de la presión de descarga, el amperaje y la presión de entrada se incrementan en función de la presión de formación.

Fig. 38. Representación gráfica de la ruptura del eje.

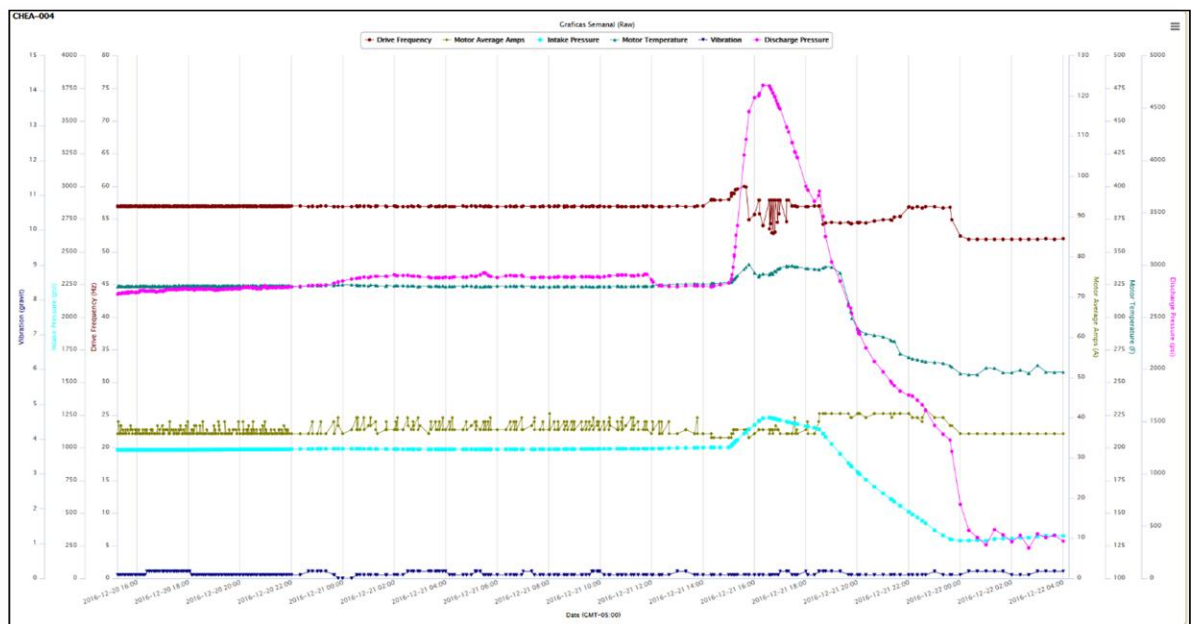


2.1.8 Transfer Line Roto. Para los equipos de bombeo electrosumergible la información registrada en fondo de las diferentes variables es esencial para conocer las condiciones reales de operación a las cuales el equipo está expuesto, donde lo ideal es tener datos de sensor fiables, como también poder registrar las variables para las que el sensor fue diseñado. Con la interpretación de esta información se puede tener un diagnóstico preciso para el equipo. En ocasiones el transfer line que es un capilar de $\frac{1}{4}$ de pulgada que une la descarga de la bomba con el sensor para el registro de la presión de descarga, puede taponarse o romperse, cualquiera de las dos se refleja en que la presión de descarga que se registre se encontrará errada.

En este caso el *transfer line* se tapona, después de un trabajo realizado se observó que el equipo registró un incremento en las presiones debido a una inyección de diésel. Las condiciones del fluido cambian y por lo tanto es importante cambiar

también las condiciones de operación del equipo. Durante la inyección la presión de descarga tuvo un incremento de 2808.4 @ 4716.8 psi y la presión de entrada un incremento de 1002.1 @ 1231.1 psi. Posterior a la inyección estas cayeron a un valor de 450 psi para la presión de entrada y 459 psi para la presión de descarga, también se redujo la temperatura de motor 339 @ 281 degF puesto que el motor tiene menor esfuerzo con las nuevas condiciones.

Fig. 39. Representación gráfica de un equipo con el transfer line roto.



2.2 METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACION DE PROBLEMAS OPERACIONALES.

A partir de un equipo de ingenieros con un amplio conocimiento en equipos de bombeo electro sumergible, de la revisión bibliográfica de sus componentes y funcionamiento y del historial de pozos con diversos inconvenientes. Se desarrolla un diagrama de flujo, no solo teniendo los problemas operacionales que se presentan en fondo sino también múltiples factores que resultan en un equipo

apagado. El propósito es generar una herramienta para la identificación de problemas operacionales dirigida al personal de campo y al ingeniero encargado de la vigilancia remota a través de zedi o un sistema scada.

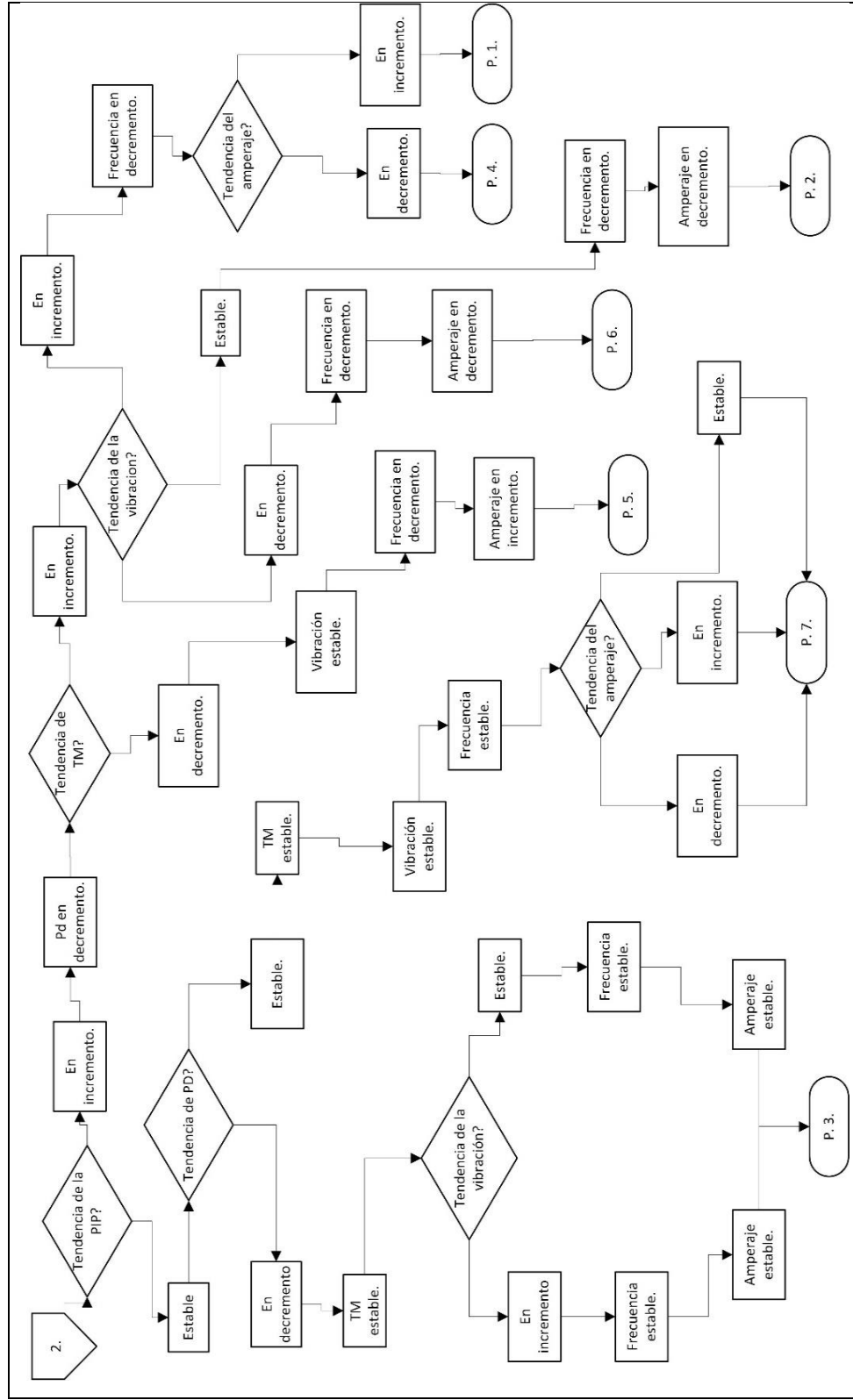
2.2.1 Desarrollo de la metodología. Como primera medida se estudiaron los diferentes modos de operación para posteriormente comprender como es la variación de los parámetros bajo los diferentes modos de operación y así mismo, identificar tendencias clave para la correcta interpretación grafica de los parámetros registrados en un equipo de bombeo electro sumergible.

En la siguiente etapa se analizaron diferentes situaciones que tenían como resultado un mismo problema, a partir de este punto, se entiende que habrá diferentes caminos para llegar a un mismo punto y tras analizar diferentes casos se evidenció que es más practico iniciar un análisis dependiendo el modo de operación del equipo, puesto que se tendrán diferentes respuestas del variador dependiendo el modo de operación.

Se inicia el diagrama de flujo con preguntas sencillas debido que pueden ser pasadas por alto, y así lograr disminuir al máximo la posibilidad de un diagnóstico erróneo. Se considera importante determinar en primera instancia si el equipo de bombeo electro sumergible esta encendido o no, aunque lo ideal es tener un equipo operativo el mayor tiempo posible, hay diferentes motivos por los que se puede programar una parada o en ocasiones la razón de la parada puede ser no programada, por lo que se debe averiguar que sucedió con el equipo. Claro está que también se pudo apagar por algún problema operacional y estará registrado como la última razón de parada.

Aunque el diagrama de flujo brinda un diagnóstico en determinadas situaciones, se recomienda no dejar de lado los manuales de los diferentes componentes y también recordar apoyarse en las diferentes cuadrillas.

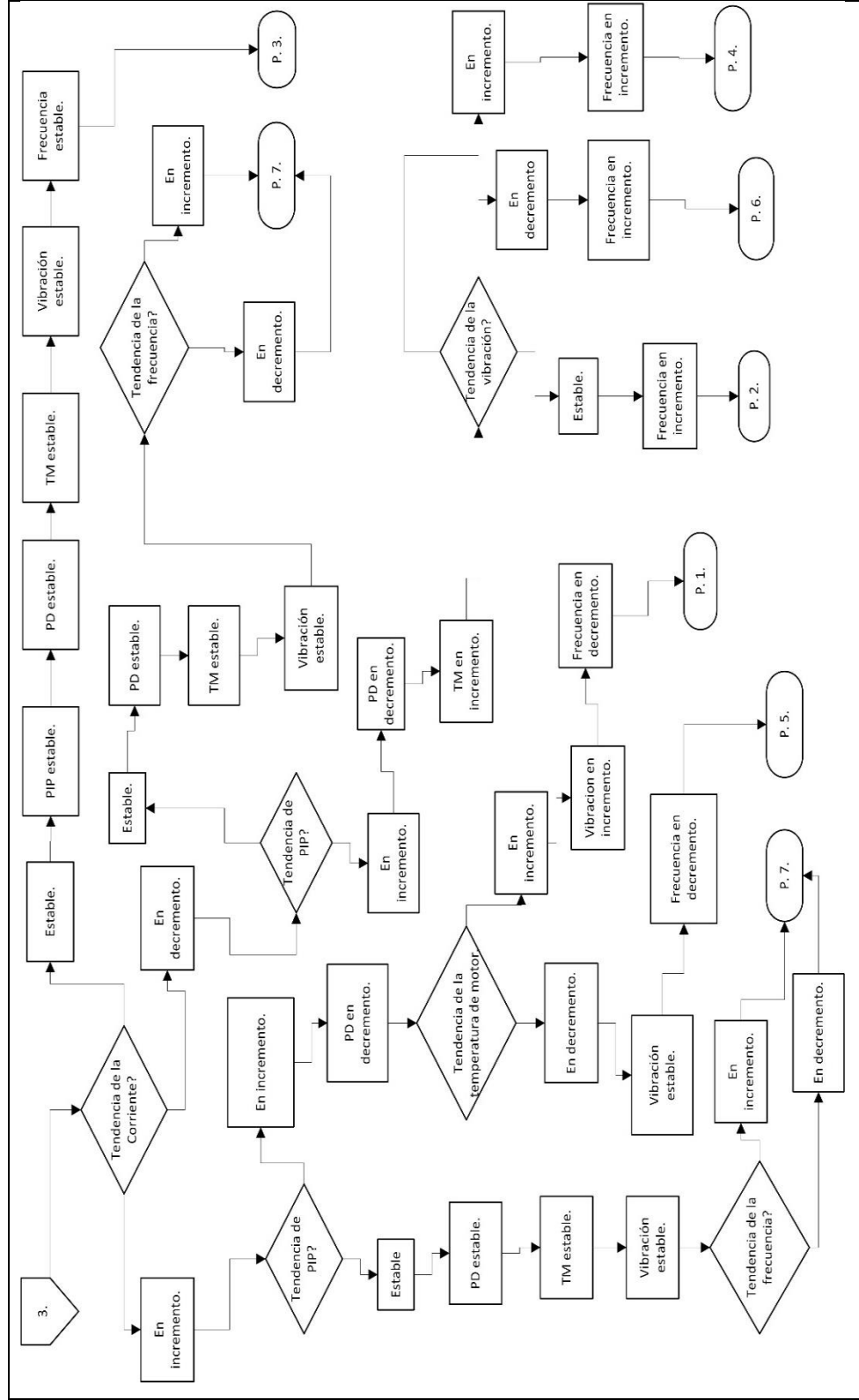
Fig. 42. Diagrama de flujo para modo PIP.



P. 1. Arenamiento. P. 2. Bajo aporte. P. 3. Transfer line roto. P. 4. Bloqueo de gas. P. 5. Conificación de agua.

P. 6. Ruptura de eje. P. 7. Datos de sensor no fiables.

Fig. 43. Diagrama de flujo para modo Corriente.



P. 1. Arenamiento. P. 2. Bajo aporte. P. 3. Transfer line roto. P. 4. Bloqueo de gas. P. 5. Configuración de agua.
 P. 6. Ruptura de eje. P. 7. Datos de sensor no fiables.

3. EJEMPLO DE OPTIMIZACIÓN.

A través de los modos de operación es posible optimizar el equipo en función de una variable o un problema operacional como lo son los bloqueos por gas, dándole así un uso adecuado, prolongando su vida útil y su eficiencia. También se logra una reducción significativa de los costos de operación y al final el beneficio es mayor. Conociendo la importancia de la correcta selección del método de operación en un equipo de bombeo electro sumergible, a continuación, se explicarán los diferentes métodos de operación con la adición de un método especial para el problema mencionado anteriormente.

La correcta selección del método de operación para el bombeo electro sumergible hace necesaria la compresión del yacimiento como también las posibles afectaciones que puede tener el equipo y su representación en este.

Lo ideal es mantener un equipo siempre en funcionamiento, esto se traduce en producción y en ganancias para la operadora. En este caso, se tiene un equipo que presenta problemas y se tiene el reto de mantenerlo operando por el mayor tiempo posible, este pozo es de un campo en Colombia y presenta grandes retos para el funcionamiento de un equipo de bombeo electro sumergible.

3.1 FUNDAMENTOS.

Una de las limitantes para la selección del bombeo electro sumergible como método de levantamiento artificial es el porcentaje de gas libre, aunque con ayuda de ciertos equipos (AGH y MGH) este puede manejar grandes porcentajes, aunque no quiere decir que todos los equipos lo hagan ya que dependen de la configuración que cada uno tenga. Esto lo dicta el diseño y siempre se espera que en el diseño la selección

de la configuración sea la correcta para las condiciones del pozo, a su vez, los ingenieros son los encargados de hacer dicha tarea ingenieril.

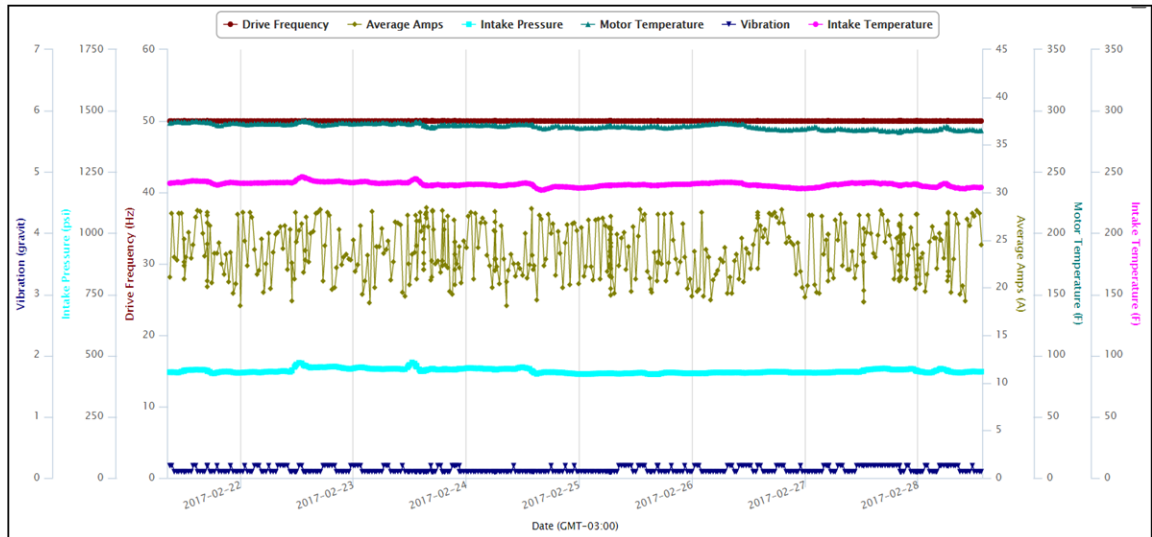
En ocasiones los equipos resultan operando a condiciones para las que no fueron diseñados y también pueden terminan estando expuestos a factores que no fueron tenidos en cuenta. La gasificación es un problema un común; también a medida que se produce un yacimiento la presión en fondo disminuye. La presión a la cual no se quiere llegar cuando se tiene un equipo de bombeo electro sumergible es por debajo de la presión de burbuja, donde la liberación de gas afecta el desempeño del equipo.

3.1.1 Modo frecuencia. En este modo el equipo opera a una frecuencia estable, la cual es definida por los ingenieros de producción. Gráficamente se puede ver cómo las variables de presión, temperatura, vibración y amperaje varían, del mismo modo, la frecuencia seguirá siendo la ya establecida, a menos que se comprometa la integridad del equipo o este tenga un fallo y se llegue a apagar.

Este modo de operación tiene el fin de controlar la producción, entendiendo que a mayor frecuencia se genera un mayor *drawdown* y por lo tanto el *inflow* y *outflow* serán mayores, lo cual se refleja en una mayor producción. Al bajar la frecuencia sucede lo contrario, el *drawdown* será menor y por lo tanto el fluido que ingresa a la bomba y sube a superficie también lo será.

Para la puesta en marcha de este modo de operación se debe tener en cuenta la frecuencia base, que representa el valor hasta el cual podrá llegar el equipo a determinado TAP. En caso de que se requiera cambiar la frecuencia se debe verificar la protección del equipo con el fin de que no se apague automáticamente; a continuación, se listan del siguiente modo: baja o alta presión en la entrada [psi], baja o alta carga en el motor [A], temperatura de motor [degF].

Fig. 44. Comportamiento de un equipo en modo frecuencia.

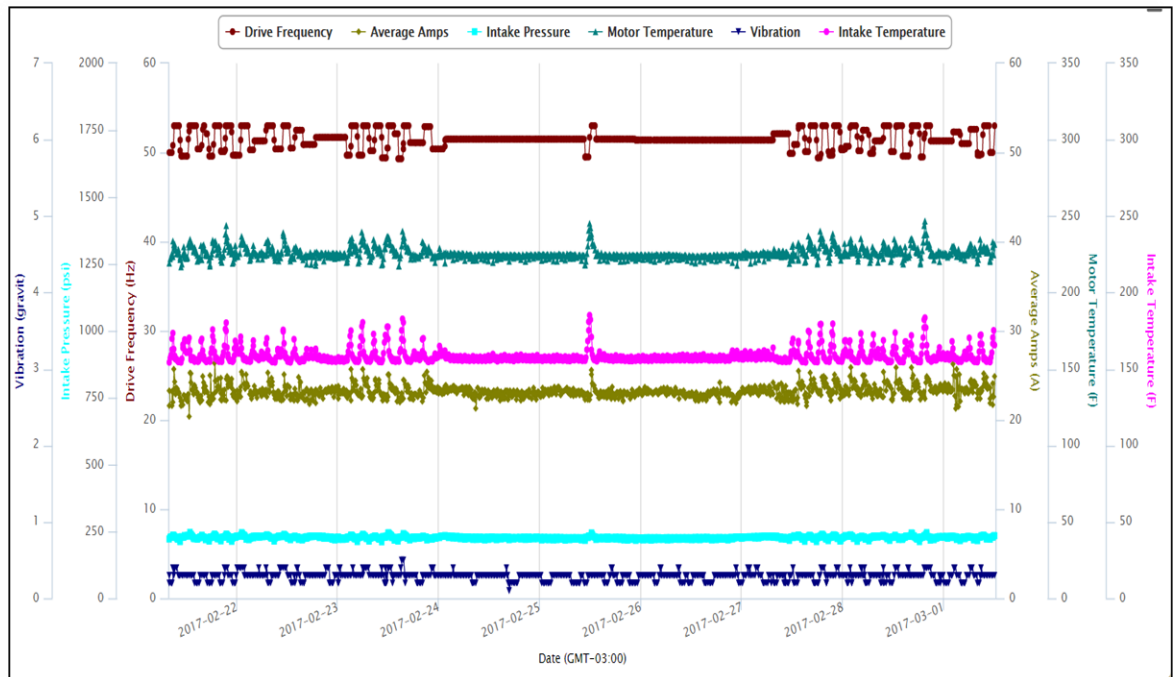


3.1.2 Modo presión de entrada (PIP). En este modo el equipo opera a un PIP estable, definido por los ingenieros de producción. Gráficamente se puede ver cómo la presión de entrada tiene una tendencia estable, la frecuencia varía en función de la presión, las demás variables fluctúan en función de la frecuencia y condiciones del fluido. En este modo predomina la presión en fondo, donde se quiere tener una (PIP) que fluctúe en un rango pequeño, aunque lo ideal sería que no fluctuara.

Este modo de operación tiene el fin de mantener la diferencia hidrostática entre la profundidad de la bomba y el nivel de fluido dinámico por encima de la bomba. Los ingenieros de producción conocen el valor de presión que se debe tener en fondo para evitar que el ingreso de fluido a la bomba sea excesivo y llegue a tener bajo sumergimiento. Para la puesta en marcha de este modo de operación se debe tener en cuenta cuál será el valor de PIP que se desea mantener y los rangos en los que la frecuencia podrá variar para contrarrestar cambios de PIP y mantener el valor deseado. Aun con el valor mínimo de la frecuencia se debe asegurar un aporte de

fluido a superficie y el valor máximo no debe generar un excesivo *drawdown*, con el fin de cuidar la litología.

Fig. 45. Comportamiento de un equipo en modo PIP.

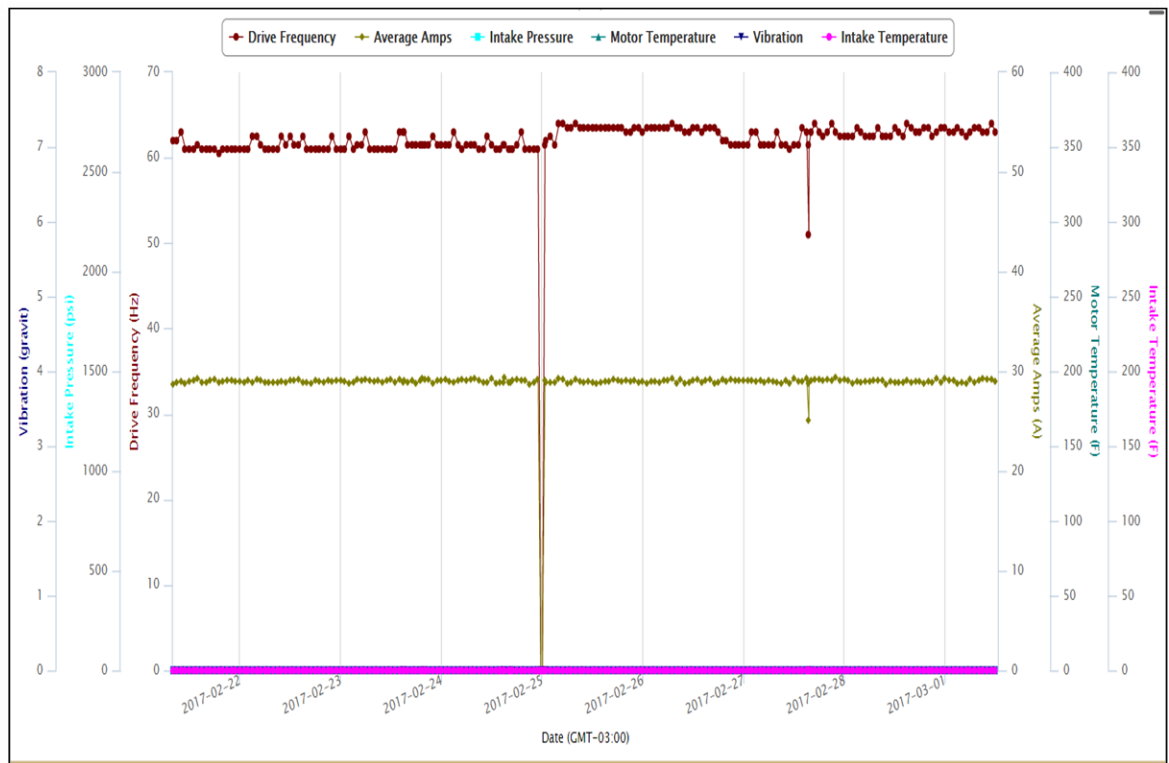


3.1.3 Modo Corriente. En este modo el equipo opera a corriente estable, es frecuentemente utilizado para proyectos cercanos al límite económico, controlando el consume energético del equipo, evitando así que sean apagados, además de ser útil en ausencia de datos de fondo. Gráficamente se puede ver cómo la corriente tiene una tendencia estable, la frecuencia varía en función de la corriente y las demás variables se ajustan a las condiciones del fluido.

Este modo de operación tiene como fin ajustar los costos operativos en un rango al cual sean viables y se perciban ganancias.

Para la puesta en marcha de este modo de operación se deben tener en cuenta las siguientes protecciones en los equipos: *range permissible* para fluctuación de frecuencia y protección inferior y superior del amperaje.

Fig. 46. Comportamiento de un equipo en modo corriente.



3.2 DIAGNOSTICO MEDIANTE EL DIAGRAMA DE FLUJO.

Al presentarse un problema operacional, es importante identificarlo y solucionarlo en el menor tiempo, reconociendo las tendencias que pueden registrar los parámetros del equipo y mediante el uso del diagrama de flujo es posible dar un diagnóstico preciso para los equipos de bombeo electro sumergible, con el fin de

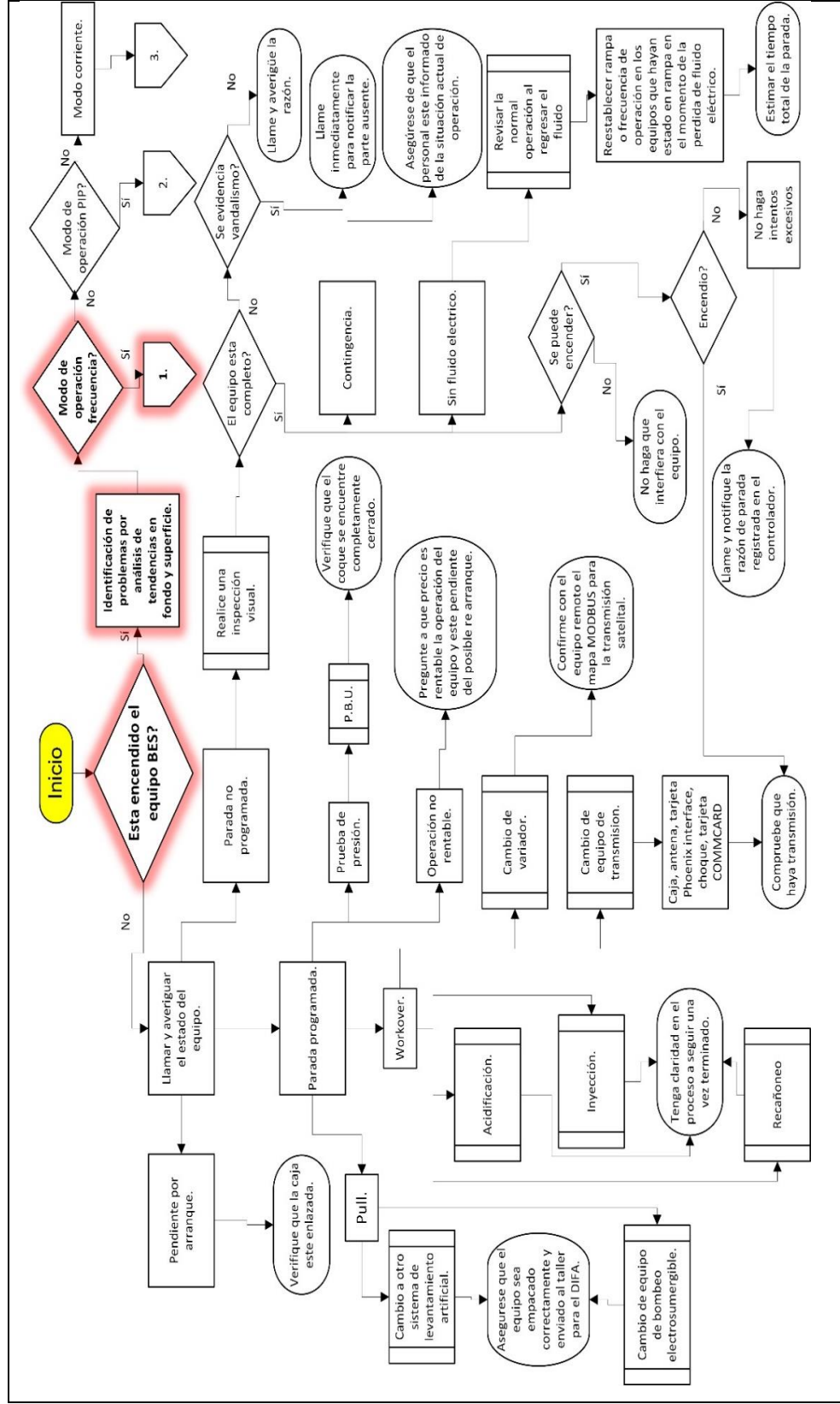
ilustrar lo anteriormente dicho, se procedió a diagnosticar un pozo con un problema recurrente.

Para el correcto uso de la metodología es indispensable comprender porque el variador y sensor en fondo registran diferentes tendencias y como estas en grupo pueden ser interpretadas para dar razón a dicho comportamiento, dependiendo el modo de operación en el que el equipo se encuentre operando, el variador reacciona de determinada manera frente a cambios en la variable que predomine la operación del equipo, es decir, la frecuencia tendrá una respuesta diferente para cada uno de los tres modos de operación. A continuación, se expondrá el evento de un pozo y se procederá a la identificación del comportamiento de las variables que llevan a el reconocimiento del problema del pozo el día 15 de enero del 2017:

Gráficamente se evidencia una tendencia en los diferentes parámetros por fuera de la tendencia normal del equipo y se pone bajo vigilancia especial el pozo. Siendo de especial cuidado porque por debajo de 2600 psi de presión de descarga el equipo no aporta.

Finalmente se decidió identificar el problema del equipo por medio del diagrama de flujo. Se confirma que el equipo se encuentra encendido puesto que está transmitiendo datos de variador con valores diferente de cero y a una frecuencia estable, indicador de un equipo operando en modo frecuencia, sin embargo, esto se puede verificar con personal en campo o por medio del controlador. El amperaje se encontraba en decremento debido a que a la bomba estaba ingresando un menor volumen de fluido, como resultado la carga del motor disminuyo, la presión en fondo se incrementó, la presión de descarga cayo y el equipo dejo de aportar, el flujo de fluido fue disminuido y la temperatura de motor se había elevado alarmantemente, exponiendo la integridad del motor. La protección del equipo hizo que este se apagara, el equipo tuvo una sacudida al intentar debido a que el fluido intenta ingresar y esto se ve como un aumento en la vibración. El diagnóstico es que el equipo presenta un bloqueo por gas.

Fig. 47. Identificación del problema mediante el diagrama de flujo.



P. 1. Arenamiento. P. 2. Bajo aporte. P. 3. Transfer line line roto. P. 4. Bloqueo de gas. P. 5. Conificación de agua. P. 6. Ruptura de eje. P. 7. Datos de sensor no fiables.

3.3 APLICACIÓN DE GAS LOCK PROTECTION.

La correcta aplicación del modo bloqueo de gas puede incrementar el tiempo de funcionamiento, minimizar picos en la temperatura de motor, reducir el tiempo de funcionamiento sin producción y puede incrementar el *drawdown* generado. Esto quiere decir que el equipo operará bajo uno de los modos anteriormente mencionados mientras que la protección de bloqueo de gas estará en función de la corriente de motor, cuando esté activo.

El bloqueo de gas está por delante del modo de corriente convencional, puesto que en el modo corriente el equipo seguirá operando sin tomar ninguna acción que mitigue los bloqueos de gas.

Para una implementación satisfactoria es recomendable que el equipo esté operando en modo corriente. Es importante saber que en equipos sobredimensionados, la protección de bloqueo de gas no será satisfactoria.

Los bloqueos de gas son identificados por decrementos en la corriente de motor, donde la corriente de motor se disminuye al no tener carga, esto quiere decir que el motor no estará haciendo el esfuerzo que normalmente hace para subir el fluido en su interior. Está claro que en su interior no hay fluido porque hay un bloqueo de gas que impide el ingreso del fluido.

La protección de bloqueo de gas consiste en que la corriente de motor está siendo vigilada y ante decrementos, automáticamente hará una maniobra para desbloquear el equipo. La maniobra consiste en hacer un decremento abrupto de frecuencia, mantenerlo por un tiempo e incrementar a la frecuencia nominal. Cuando la frecuencia es reducida abruptamente el fluido en el interior de la bomba retrocederá para salir del equipo junto con el gas que logró entrar, el tiempo que dura este cambio de frecuencia es para que el gas que logró salir, ascienda a través del fluido que se encuentra en el anular. Posteriormente, se incrementa la frecuencia con el

fin de continuar la producción a la frecuencia nominal y se espera que el gas se aleje de la entrada del equipo.

Los bloqueos de gas ocurren sin previo aviso y de una manera no periódica. Pero son eventos que al identificarlos se deben corregir inmediatamente, evitando así que el equipo pueda sufrir algún daño y que el tiempo sin producción sea mínimo.

La puesta en marcha del modo de bloqueo de gas es diferente para cada pozo puesto que la maniobra establecida para cada uno es diferente. A continuación, se mostrará el procedimiento para la selección de la frecuencia de bloqueo de gas:

En cuanto a los bloqueos de gas, se recomienda iniciar con decrementos de 5 Hz y posteriormente regresarlo a la frecuencia nominal, si estos 5 Hz no fueron suficientes para contrarrestar el bloqueo se le deben incrementar 5 Hz al decremento las veces que sean necesarias, hasta que se evidencie que en tres eventos de bloqueo de gas la protección resultó efectiva. Para la selección del amperaje de activación del bloqueo de gas, es obligatorio ver el historial de eventos ocurridos para el pozo al cual se hará la optimización. Está claro que el amperaje tiene un decremento ante bloqueos de gas y se mantiene mientras el evento persista, gráficamente en el historial se identifica el valor máximo al cual ha caído el amperaje en anteriores bloqueos de gas, este valor será la referencia de activación del bloqueo de gas, pero no debe ser tan alto para evitar que el equipo ante fluctuaciones entre en el modo de bloqueo de gas; de igual manera se debe seleccionar un tiempo de activación, que comenzará cuando el amperaje caiga al punto de referencia y se mantenga por debajo de este. Este tiempo al igual que la adecuada selección del valor de referencia es importante, debido a que evita activaciones innecesarias de la protección de bloqueo de gas.

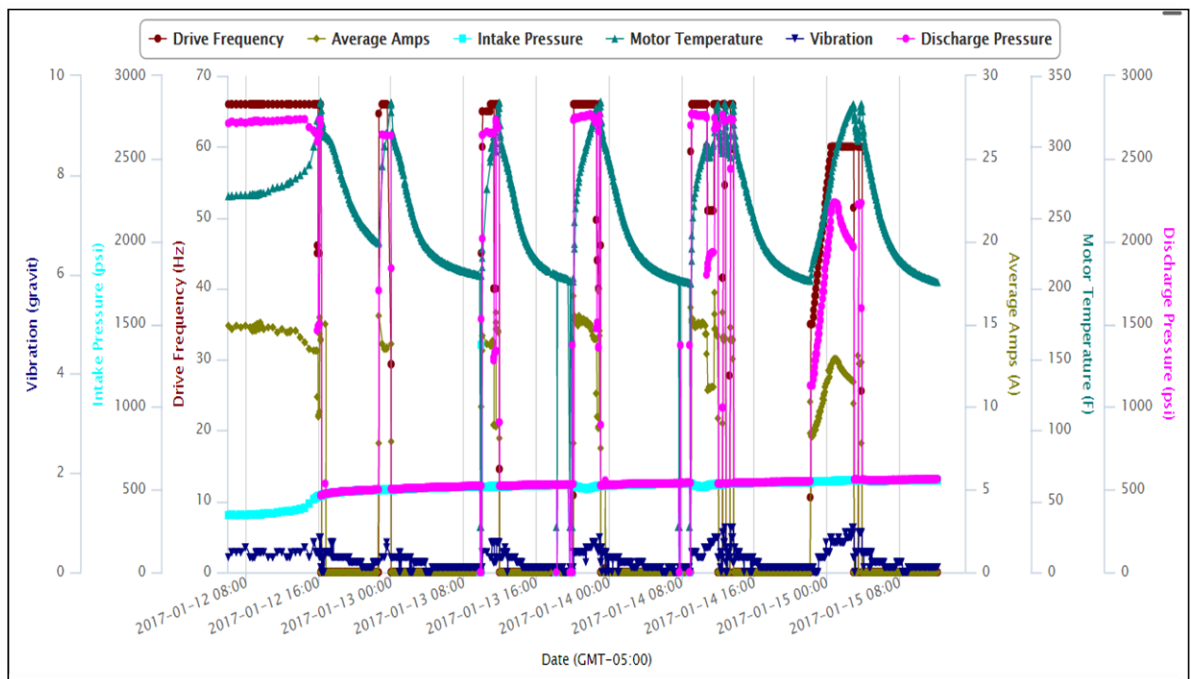
3.4 IMPLEMENTACION DE GAS LOCK PROTECTION.

Hay pozos con eventos de bloqueo de gas recurrentes, algunos de estos pozos son de suma importancia debido a su producción. En el siguiente caso veremos un pozo

que presenta múltiples eventos que como consecuencia apagan el equipo y resultan en una pérdida de producción.

Se puede observar la tendencia del equipo durante 4 días, con 6 paradas debidas a bloqueos de gas. En estas 96 horas, el equipo estuvo parado y sin producción por más de 60 horas. No es conveniente para el equipo tener múltiples arranques y tampoco para la viabilidad económica del pozo. El anterior es un pozo que opera a modo frecuencia y sin importar de qué manera las demás variables cambien él seguirá operando hasta que las protecciones del equipo lo apaguen. Se puede evidenciar que de los 6 eventos solo se hizo la maniobra de desbloqueo en 1 evento. Esta maniobra consistió en hacer un detrimento de frecuencia de 66 Hz a 51 Hz por 50 minutos, posteriormente se regresó el equipo a 66 Hz. La maniobra funcionó, pero 20 minutos después el equipo se apagó por alta temperatura de motor 330.4 degF.

Fig. 49. Bloqueos de gas persistente.



Los casos como el descrito suponen un reto para los ingenieros, donde se busca evitar este tipo de inconvenientes, mediante la astucia y correcta utilización de la tecnología con la que cuentan los equipos de bombeo electro sumergible. Este pozo fue candidato para la implementación de la protección de bloqueo de gas.

El día 20 de febrero de 2017 se tomó la decisión de agregar al modo de operación del equipo (modo frecuencia) la protección de bloqueo de gas. Puesto que históricamente el pozo sufrió bloqueos de gas y también en días anteriores el pozo se apagó repetidamente por la misma razón.

El día 20 de febrero de 2017 cuando se implementó la protección se notó un comportamiento normal que describe la función de la protección, sin embargo, el pozo continúa apagándose por altas temperaturas de motor, en ocasiones generadas por la alta exigencia hacia el equipo y en otras por eventos de bloqueo de gas.

Fig. 50. Implementación de la protección de bloqueo de gas.

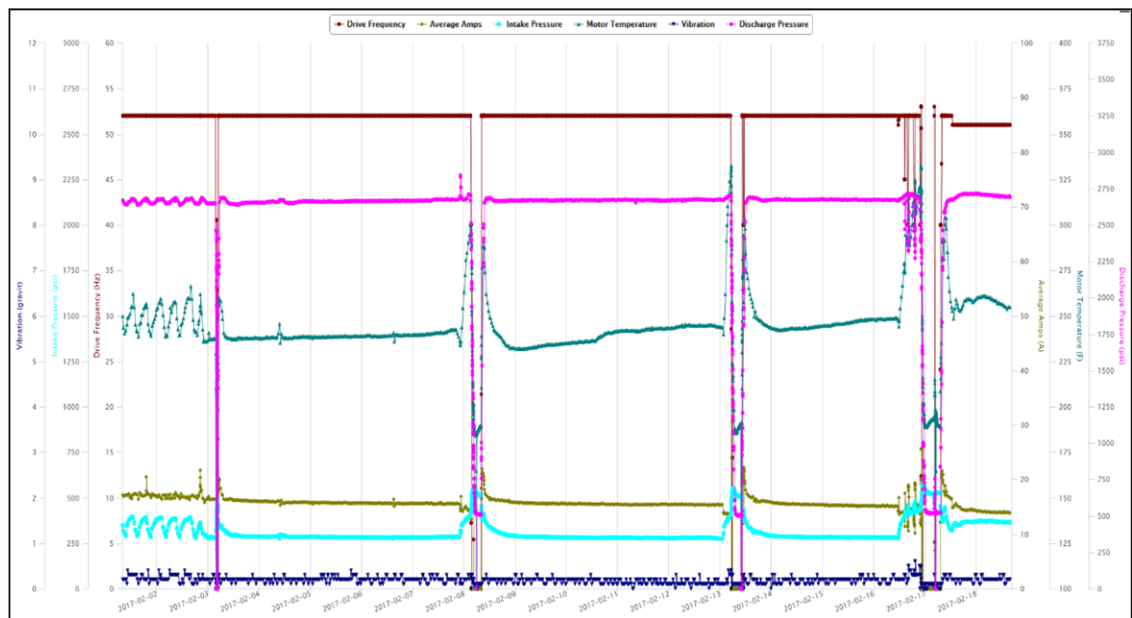
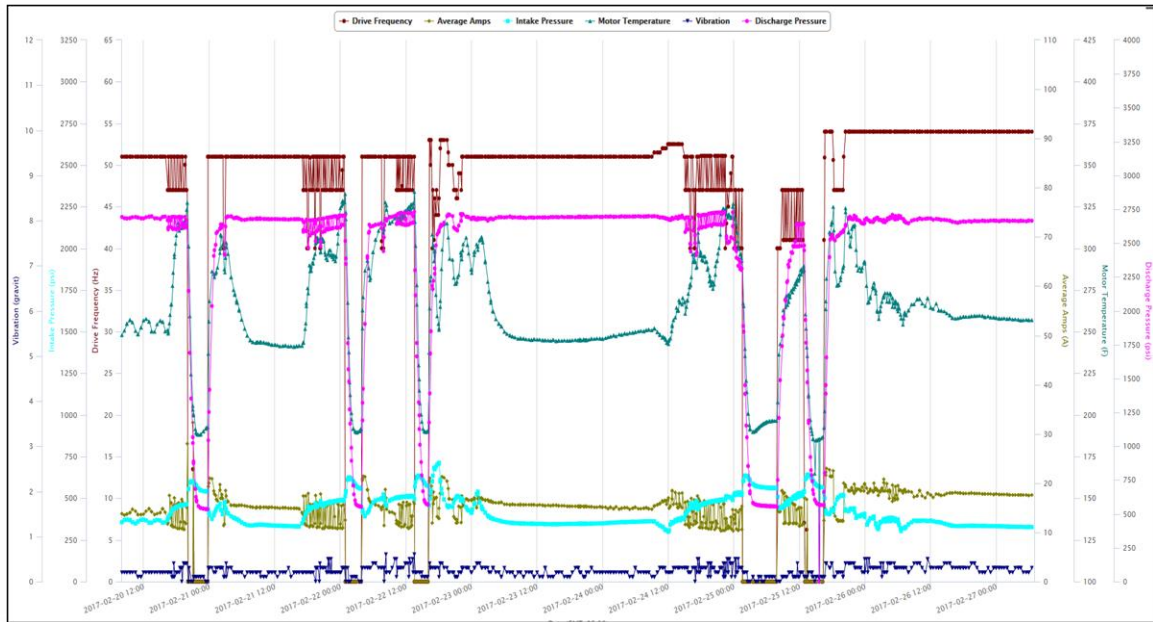


Fig. 51. Representación gráfica del equipo operando con la protección activa.



El rango de fluctuación de la frecuencia fue de 51 Hz a 47 Hz, tal como se debe hacer. Permitiendo una fluctuación de 5 Hz para la frecuencia. El amperaje de referencia fue de 14 Amperios y el tiempo para su activación fue de 3 minutos. Sin embargo, el equipo continuó apagándose, problema al que se le tenía que dar fin.

Tras su operación continua durante 2 días, se decide hacer un incremento de frecuencia en rampa de 0.5 Hz cada 30 minutos. Fue una acción contraproducente, el amperaje fluctuó lo suficiente para activar la protección y entró en múltiples fluctuaciones de la frecuencia, esto se tradujo en una parada por alta temperatura del motor. Tras encenderlo nuevamente el día 25 de febrero de 2017 a las 8:00 Horas el pozo opera durante 5 horas y nuevamente se apaga por la misma razón. Tras la parada del día 25 de febrero a las 13:00 Horas se decidió retirar la protección de bloqueo de gas al modo de operación del equipo. El equipo es encendido nuevamente a las 16:36 Horas del 25 de febrero de 2017 y a las 18:13 Horas se

evidencia oportunamente un evento de bloqueo de gas al cual se procede remotamente y se logra controlar.

Nace un interrogante tras lograr controlar un evento de bloqueo de gas remotamente y es ¿Por qué la protección no fue capaz de hacerlo?. Se decide que el equipo operará en modo frecuencia mientras se investiga y se logra entender lo sucedido. A continuación, la serie de errores que se pudieron evidenciar al momento de emplear la protección en este pozo:

El pozo se encontraba en modo frecuencia y no en modo corriente como debía ser. En modo frecuencia el amperaje fluctúa continuamente y la protección usa los valores de amperaje para guiarse. Lo cual resulto confuso para el equipo. También se evidenció que después de 3 eventos de bloques de gas donde el equipo termino apagándose, no se hizo el incremento de 5 Hz correspondientes a la fluctuación de frecuencia cuando la protección se activó. Para tener un decremento de 10 Hz ya que el de 5 Hz no fue suficiente. Finalmente, la selección del amperaje de referencia no fue el valor adecuado. Se había seleccionado un valor de 14 Amperios, valor contrario a lo que muestra el histórico para el pozo, además el tiempo de activación fue demasiado corto.

4. CONCLUSIONES

Se considera de gran importancia que a la profesión se integren conocimientos de electricidad y así el ingeniero de petróleos tenga la formación suficiente para lograr identificar fallas eléctricas, comprender el alcance que dicha falla puede llegar a tener y finalmente proponga soluciones a los problemas eléctricos que enfrentan los equipos de bombeo electro sumergible

La vigilancia de los equipos requiere de un continuo seguimiento a su comportamiento mientras estos se encuentren operando, cuando una falla se encuentra en su etapa inicial muestra un comportamiento determinado, el cual indicio del problema que se presentara. Las fallas son de carácter predictivo y brindan un margen de tiempo ajustado para su detección y ejecución de medidas preventivas.

Para una correcta interpretación y detección del problema operacional, las tendencias de las variables no deben ser separadas en variables de superficie y variables de fondo, puesto que la variación de las variables en superficie es afectada directamente por las variables de fondo. Es por ello que el personal encargado de la integridad de los equipos de bombeo electro sumergible debe conocer sobre los componentes del equipo y como estos se ven afectados frente a los diferentes problemas que el equipo puede afrontar.

El diagrama de flujo es una herramienta dirigida a los ingenieros de vigilancia y de campo para diagnosticar equipos que presentan tendencias características de diferentes problemas operacionales, es de fácil entendimiento y rápida implementación, además minimiza la posibilidad de un diagnóstico erróneo al tener en cuenta diversas razones por las que un equipo puede encontrarse no operativo. Un factor importante que debe ser tenido en cuenta para la correcta implementación de la protección del bloqueo de gas es la comunicación entre el personal de trabajo remoto y el de campo. Dicha comunicación debe darse de manera clara para evitar interferir con los procedimientos que se estén llevando a cabo sobre el equipo.

5. RECOMENDACIONES

1. Establecer cuáles podrían ser unas medidas remotas de contingencia para los comportamientos anómalos y perjudiciales para los equipos. Donde la decisión será tomada con total autonomía, entendiendo que se busca un bien para el pozo.
2. Realizar un flujo de trabajo para la adecuada implementación de la protección de bloqueo de gas, para evitar caer en errores e improvisación.
3. Además de las optimizaciones del modo de operación de un equipo de bombeo electro sumergible, también existen otros tipos. Las optimizaciones eléctricas en superficie resultan ser de fácil implementación y mínima inversión, además, no es necesario cambiar el equipo de fondo.

BIBLIOGRAFÍA

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

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

ARAUJO, Jose. Downhole Monitoring Systems. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2012. 4349867.

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

BENOIT, Chris. Dismantle, Inspection, and failure analysis (DIFA) Reference Manual for REDA Electric Submersible Pumping Systems. Intouch Support: Artificial Lift Engineering., 2008. 3352230.

BOOKER, Jack; WATSON, Arthur. Phoenix Select ESP (LITE, Standard, Advanced, Reservoir Tailpipe) Operating Manual. Intouch Support: AL Engineering – SPPC., 2010. 4399658.

FENGJIE, Huang; TOH KOK, Jason; ABBOTT, Jack. Phoenix MultiSensor XT Installation and Operations Manual. Intouch Support: AL – Downhole Monitoring., 2012. 3977624.

FENGJIE, Huang; MIN, Shi; HEDEMAN, James; PETERSON, Isaac. Phoenix MultiSensor xt150 Installation and Operations Manual. Intouch Support: AL – Downhole Monitoring., 2013. 5387396.

KOBYLINSKI, Lee; BROWN, Alan; REESE, Greg; LEON, Jose; VERGARA, Luis; DIJKSTRA, Niek; BOYD, Scott; DOWLING, Mike. Artificial Lift Engineering Reference Manual. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2008. 4227449.

LAMBERT, Michael. Application of Witness Marks on ESP Equipment. Intouch Support: Artificial Lift Engineering., 2014. 6588835.

MIN, Shi; FENGJIE, Huang; MUKHERJEE, Arindam; TOH KOK ONN, Jason. Phoenix Select CTS Installation and Operations Manual. Intouch Support: AL – Downhole Monitoring., 2013. 4079252.

REDA. Curso Avanzado de Operaciones de BES. Schlumberger Sureenco S.A., 1996, vol. 2.

REDA. Intake/Gas Separator Training Manual. Intouch Support: Artificial Lift Engineering.

REDA. Motor Training Manual. Intouch Support: Artificial Lift Engineering.

REDA. Protector Training Manual. Intouch Support: Artificial Lift Engineering.

SCHLUMBERGER. Bombeo Electro Sumergible (BES) Lista de Verificación de Instalación. Intouch Support: Artificial Lift Engineering., 2016. 6338508.

SCHLUMBERGER. ESP Motor Nomenclature – Updated. Intouch Support: Artificial Lift Engineering., 2008.

SCHLUMBERGER. Phoenix Interface Card (PIC) Installation Manual. Intouch Support: Artificial Lift Engineering.

SCHLUMBERGER. Product Bulletin – Advanced Protector. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2003. 3861308.

SCHLUMBERGER. Surface Choke Assembly. Intouch Support: Artificial Lift Engineering.