

**REDISEÑO DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES)
PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA APLICADO A UN CAMPO COLOMBIANO**

**JEFFERSON CLYDE BENÍTEZ GARCÍA
JOHN ALEXANDER CRISTO AGUDELO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2015

**REDISEÑO DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES)
PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA APLICADO A UN CAMPO COLOMBIANO**

JEFFERSON CLYDE BENÍTEZ GARCÍA

JOHN ALEXANDER CRISTO AGUDELO

**Monografía para optar al título de
Especialista en Producción de Hidrocarburos**

Director de monografía:

ERIK GIOVANY MONTES PÁEZ

Ingeniero de Petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2015

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS.....	16
1.INTRODUCCIÓN A LOS CONCEPTOS BASICOS.....	17
1.1Petróleo.....	17
1.2Trampas Geológicas.....	20
1.3Propiedades de las Rocas.....	22
1.3.1 Porosidad.....	22
1.3.2 Permeabilidad.....	23
1.3.3 Saturación.....	25
1.4Índice de Productividad (IP).....	26
1.5 IPR (Inflow Performance Relationships).....	27
1.6 Fundamentos Eléctricos.....	28
1.6.1 Corriente Alterna (AC).....	28
1.6.2 Voltaje (V),.....	29
1.6.3 Corriente (I).....	29
1.6.4 Resistencia (R).....	29
1.6.5 Ley de Ohm.....	29
1.6.6 Potencia (P).....	30
1.6.7 Frecuencia (Hertz).....	31
1.6.8 Inductancia (L).....	31
1.6.9 Capacidad Eléctrica o Capacitancia (C).....	32
1.6.10 Impedancia (Z).....	32
1.6.11 Conductores.....	32
1.6.12 Aislantes.....	32
1.6.13 Factor de Potencia (PF).....	32
2.BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE.....	33
2.1 Introducción al Bombeo Electrosumergible.....	33
2.2 Componentes del Bombeo Electrosumergible.....	34

2.2.1 Componentes de subsuelo.....	35
2.2.2 Componentes de superficie	48
2.3 Operación Bajo Condiciones Especiales.....	48
2.3.1 Flujo Multifásico (Gas-Líquido)	49
2.3.2 Altas Temperaturas.....	51
2.3.4 Altas Viscosidades	52
2.4 Dimensionamiento de un Sistema de Bombeo Electrosumergible	53
2.4.1 Dinámica (TDH)	55
2.4.2 Presencia de Gases	61
2.4.3 Bomba Electrosumergible.....	66
2.4.4 Motor	69
3.CASO DE ESTUDIO.....	74
3.1 Descripción General del Campo.....	74
3.2 Sistemas de Levantamiento Artificial BES – Componentes	76
3.2.1 Equipos de Subsuelo	77
3.2.2 Equipos de Superficie.....	79
3.3 Condiciones de Operación	80
3.4 Metodología para el Diseño.....	85
3.4.1 Diagnostico y Análisis de Fallas.....	85
3.4.2 Desarrollo de la Solución	86
3.4.3 Presentación de Diseños y Análisis comparativo.....	87
4. CONCLUSIONES.....	109
5. RECOMENDACIONES.....	112
BIBLIOGRAFÍA.....	115
ANEXOS	117

ÍNDICE DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Trampas geológicas.....	16
Figura 2. Medidas de permeabilidad al gas mostrando el efecto Klinkenberg..	19
Figura 3. Distribución de fluidos en el yacimiento.....	20
Figura 4. IP constante.....	22
Figura 5. IPR_{Vogel}	22
Figura 6. Onda senosoidal de AC.....	24
Figura 7. Cambio de la línea de voltaje en circuitos AC trifásicos.....	25
Figura 8. Efectos de la inductancia sobre la corriente.....	26
Figura 9. Instalación convencional BES.....	29
Figura 10. Partes del motor.....	31
Figura 11. Protector tipo laberinto.....	32
Figura 12. Protector tipo bolsa.....	33
Figura 13. Protectores modulares.....	33
Figura 14. Intake.....	34
Figura 15. Separadores estáticos.....	35
Figura 16. Separadores dinámicos vortex.....	36
Figura 17. Difusor e impulsor.....	37
Figura 18. Tipo de impulsores.....	37
Figura 19. Construcción de la bomba (FL, CR, BFL).....	38
Figura 20. Curva de la bomba (Flujo monofásico).....	39
Figura 21. Tornado de la bomba.....	40
Figura 22. Tipo de cable.....	42
Figura 23. Pot Head.....	42
Figura 24. Impulsor en flujo multifásico.....	46

	pág.
Figura 25. Curva de la bomba bajo flujo multifásico.....	47
Figura 26. Curva de la bomba bajo fluido viscoso.....	48
Figura 27. Instalación de bomba y motor.....	70
Figura 28. Generadores estáticos.....	71
Figura 29. Motor Franklin Electric.....	72
Figura 30. Bomba GRUNDFOS SP 125 – 5.....	72
Figura 31. Cable de potencia.....	73
Figura 32. Sensor de nivel modelo 409.....	73
Figura 33. Construcción de caseta.....	74
Figura 34. Variador Danfoss.....	74
Figura 35. Porcentaje de intervenciones.....	77
Figura 36. Centrilift KC 12000 en WebPlotDigitizer.....	90
Figura 37. Perfil de Velocidades del fluido a través del revestimiento del pozo..	105

ÍNDICE DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición elemental del petróleo crudo (% peso).....	12
Tabla 2. Series químicas de hidrocarburos del petróleo.....	13
Tabla 3. Clasificación °API del petróleo crudo.....	14
Tabla 4. Fracciones típicas separadas del petróleo crudo.....	15
Tabla 5. Selección de constante Hazen – Williams.....	55
Tabla 6. Prueba inicial de los pozos de agua.....	75
Tabla 7. Resumen de intervenciones por falla.....	76
Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos medidos al agua.....	78
Tabla 9. Índice de saturación de Langelier.....	79
Tabla 10. Diagnóstico y análisis de fallas en bombas electrosumergible.....	81
Tabla 11. Presiones de reservorio, fondo fluyendo e índices de productividad para los pozos de agua en estudio.....	85
Tabla 12. Calculo de la TDH pozo “B”.....	88
Tabla 13. Proveedores y referencias de bombas electrosumergibles.....	89
Tabla 14. Etapas requeridas y eficiencia desarrollada.....	91
Tabla 15. Pozo de agua “B” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 5 ½ pulg.....	92
Tabla 16. Pozo de agua “B” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 3 ½ pulg.....	93
Tabla 17. Pozo de agua “B” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 2 7/8 pulg.....	94
Tabla 18. Profundidad máxima BES.....	95
Tabla 19. Pozo de agua “B” @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 5 ½ pulg.....	95
Tabla 20. Pozo de agua “B” @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 5 ½ pulg.....	96

Tabla 21. Pozo de agua “B” @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 3 ½ pulg.....	96
Tabla 22. Pozo de agua “B” @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 3 ½ pulg.....	97
Tabla 23. Pozo de agua “B” @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 2 7/8 pulg.....	98
Tabla 24. Pozo de agua “AA” @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 2 7/8 pulg.....	98
Tabla 25. Características de motores seleccionados.....	99
Tabla 26. Parámetros de la bomba BOREST.....	100
Tabla 27. Desempeño de los motores electrosumergibles en los pozos de agua usando un cable AWG 4.....	102
Tabla 28. Relaciones de pérdida de voltaje para los distintos calibres de cable seleccionados @ BHT= 115°F.....	103
Tabla 29. Cable de conducción de poder para los sistemas BES ubicados en los pozos de agua.....	103
Tabla 30. Perfil de Velocidades entre tubería de producción y revestimiento...	106

INDICE DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Diseño pozo de agua (AA, H, B).....	112
Anexo B. Calculo de la TDH.....	114
Anexo C. Datos de operación de bombas electrosumergible.....	115
Anexo D. Análisis comparativo pozo “H”.....	118
Anexo E. Análisis comparativo pozo “AA”.....	124
Anexo F. Cartas amperimétricas.....	131

RESUMEN

TITULO “REDISEÑO DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES) PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA APLICADO A UN CAMPO COLOMBIANO”

PALABRAS CLAVES: Bombeo Electrosumergible (B.E.S), análisis de falla por intervenciones, WebPlotDigitizer y análisis de sensibilidad.

DESCRIPCION

Este documento monográfico es elaborado con el fin de proporcionar de manera metódica y detallada un diagnóstico de los sistemas de bombeo electrosumergible (B.E.S) usados para la extracción de agua y posterior inyección en forma de vapor para la reducción de la viscosidad de los hidrocarburos producidos en un campo petrolero colombiano ubicado en el Magdalena Medio. Para la elaboración del respectivo documento, en primera instancia, se procedió con la recolección de la información correspondiente a informes finales de entrega de las instalaciones, estados mecánicos de los pozos en donde se sitúan los sistemas (B.E.S), resumen de las intervenciones realizadas (tour report) e inventarios de los componentes básicos de los sistemas (B.E.S) como motores, bombas, sensores de nivel y cables con sus respectivas referencias y dimensiones características. Obteniéndose la información inicial se realizó un análisis a los sistemas encontrándose que las principales fallas de los sistemas descritos radican en el control del sistema de levantamiento y fallas en la instalación.

Para el rediseño de los sistemas (B.E.S) se consideraron distintos proveedores encontrados en el mercado, por medio de la aplicación WebPlotDigitizer y posterior apoyo de Microsoft Excel se obtuvieron las expresiones polinomiales de las curvas características de las referencias seleccionadas. Adicionalmente se realiza un análisis de sensibilidad evaluando la pertinencia de algunos parámetros de diseño como frecuencia de trabajo, diámetro de la tubería de producción y profundidad de la sarta (B.E.S) y distintas combinaciones motor-bomba.

Finalmente se proporcionan las mejores configuraciones obtenidas en el análisis de sensibilidad y recomendaciones para mejorar el desempeño de los sistemas de bombeo electrosumergible que pasan por mejorar aspectos operativos y componentes de los sistemas para la extracción de agua en dicho campo.

ABSTRACT

TITLE “REDESIGN OF ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPING SYSTEMS (E.S.P) FOR THE WATER EXTRACTION IN A COLOMBIAN OIL FIELD”

**AUTHORS: JEFFERSON CLYDE BENITEZ GARCIA
JOHN ALEXANDER CRISTO AGUDELO**

Key words: Electric submersible pumps (E.S.P), failures analysis by interventions, WebPlotDigitizer and sensivity analysis.

This monographic document is prepared in order to provide a methodical and detailed diagnosis of the electric submersible pumping systems (E.S.P.) used for water extraction and subsequent steam injection for reducing viscosity Hydrocarbons produced in a Colombian oil field located in the Magdalena Medio. To prepare the respective document, at first sight, we proceeded with the collection of the final delivery information of installations reports, well's mechanical states where E.S.P. are located, summary of interventions (tour report) and inventory of the basic components of the system (E.S.P) as motors, pumps, level sensors and cables with their references and dimensions features. After initial information analysis, we have concluded that major system failures described reside in the lifting system control and installation failures.

For redesigning systems (E.S.P) we found different vendors in the market, through the implementation support WebPlotDigitizer and later used of Microsoft Excel obtaining polynomial characteristic expressions curves of the references. A further sensitivity analysis was performed, evaluating the relevance of some parameters as working frequency, diameter of the tubing string and installation depth (E.S.P) with several motor-pump combinations.

Finally we provide the best configurations obtained in the sensitivity analysis and paragraph recommendations for improving performance of electric submersible pumping systems (E.S.P) passing through operational aspects and replace components of the systems for the extraction of water in the field.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las empresas dedicadas a la producción de hidrocarburos han intentado hacer sus procesos más eficientes y productivos por medio de la realización de pequeñas y novedosas modificaciones a las facilidades existentes con miras a mejorar la capacidad de producción sin tener que acudir a costosas inversiones realizando ajustes o rediseños totales de sus esquemas de operación a nivel de los sistemas de levantamiento artificial, implementación de estrategias de recobro y demás como respuesta dinámica a los cambios estructurales y físicos que sufren los yacimientos con la intención de incrementar o mantener la producción, lo que finalmente repercute en inversiones de gran magnitud. En cualquiera de los casos tales modificaciones impactan positivamente a la operación debido al alza en el precio internacional del petróleo y a la disminución de las reservas del mismo, lo que ameritaría optimizar los procesos de extracción de crudo.

Actualmente, el uso de las bombas electrosumergibles (BES) en la extracción tanto de hidrocarburos como de agua es más frecuente debido a su alta capacidad de bombeo y del poco espacio requerido en superficie para la instalación de los elementos que conforman el sistema. Sin embargo, un mal diseño de las mismas en la mayoría de los casos trae consigo dificultades de tipo operacional y económico, que se ven reflejados en los estados de producción de los campos y conlleva al rediseño del sistema BES que en últimas es el encargado de garantizar una operación eficiente e ininterrumpida del proceso de producción.

En esta monografía se presenta un estudio realizado a las bombas electrosumergibles que operan en un campo petrolífero en Colombia para la extracción de agua con fines de inyección en forma de vapor a los pozos de crudo en operación, dicho estudio abarco una propuesta de diseño del bombeo electrosumergible en base al análisis de condiciones actuales de operación, que incluyeron características del agua producida, tubería, motores, bombas electrosumergibles, entre otros. Dando como resultado la mejor eficiencia en la operación de las bombas para satisfacer las necesidades hídricas del campo, sin exceder la normativa ambiental de la cantidad de agua producida agua por pozo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un rediseño del sistema de levantamiento electrosumergible para la extracción de agua utilizado en la producción de hidrocarburos aplicado a un campo colombiano.

OBJETIVO ESPECIFICOS

- ✓ Describir y analizar los elementos del sistema que se usan en la extracción de agua mediante la utilización del bombeo electrosumergible en un campo colombiano.
- ✓ Identificar y presentar los factores que potencialmente generen fallas en el sistema (BES) durante la producción de agua hacia superficie.
- ✓ Proponer nuevos diseños de bombas electrosumergibles que se acomoden a las necesidades del campo basados en la infraestructura disponible.
- ✓ Realizar un análisis comparativo entre los diseños utilizados actualmente en el campo y los propuestos.

1. INTRODUCCIÓN A LOS CONCEPTOS BASICOS

Con el fin de entender el funcionamiento de las instalaciones de bombeo electrosumergible, es necesario conocer algunos conceptos básicos que ayudaran con su diseño. En este capítulo se presenta un breve resumen que abarca desde la composición del petróleo pasando por su clasificación, trampas geológicas, propiedades de la roca, índice de productividad e IPR y fundamentos eléctricos, que se encuentran involucrados en el bombeo electrosumergible.

1.1 PETRÓLEO

El petróleo crudo es una mezcla compleja de hidrocarburos con pequeñas cantidades de otros compuestos que resultan de la descomposición de materia orgánica de origen animal y vegetal, París de Ferrer (2009). En su apariencia (color) este varía desde amarillo pálido, verde y marrón hasta marrón oscuro o negro, además son naturalmente aceitosos (textura) y tienen una amplia variedad de viscosidades entre 1,4 a 19,400 cSt en superficie, que son función de la temperatura, edad y profundidad del petróleo, Selley (2015). Respecto a los hidrocarburos contenidos, el más simple y común en los componentes de los fluidos provenientes del yacimiento es el metano (CH_4), debido a que contiene un átomo de carbono en su estructura, Christensen (2007) (**ver tabla 1**). Según McCain (1990) la clasificación química del petróleo crudo se establece en relación a la estructura de las moléculas más grandes contenidas en la mezcla, en esta clasificación hay cuatro de particular importancia; parafinas, naftenos, aromáticos y asfáltenos.

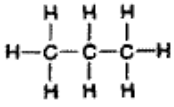
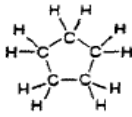
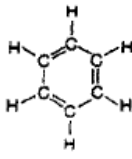
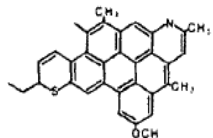
Tabla 1. Composición elemental del petróleo crudo (% peso)

Elemento	Mínimo	Máximo
Carbón	82.2	87.1
Hidrogeno	11.8	14.7
Sulfuro	0.1	5.5
Oxigeno	0.1	1.5
Nitrógeno	0.1	1.5
Otros	Trazas	0.1

Fuente: Selley, 2015,30

Las **Parafinas**, están formadas por segmentos de hidrocarburos tipo (C_nH_{2n+2}), donde el número de carbonos varía desde 1 a 40¹. Asimismo, están divididas en n-parafinas e i-parafinas; en el primer caso los átomos de carbono forman cadenas lineales, mientras en el segundo contiene al menos una cadena lateral, en ocasiones también se les refiere como alcanos² (**Ver tabla 2**).

Tabla 2. Series químicas de hidrocarburos del petróleo

Series	Estructura	Descripción
Parafinas (C_nH_{2n+2})		Cadenas ramificadas en línea
Naftenos (C_nH_{2n})		Estructura en un anillo cerrado
Aromáticos		Estructura básica de un anillo hexagonal
Resinas y asfáltenos		Redes de anillos aromáticos con impurezas

Fuente: Paris de Ferrer, 2009, 8

Los **Naftenos**, son similares a las parafinas en el sentido que están formados del mismo tipo de segmentos de hidrocarburos, pero difieren de estos porque contienen una o más estructuras cíclicas (e.g., CH_2) conectadas por un enlace simple, los naftenos también son llamados cicloalcanos, Selley (2015)

¹ Paris de Ferrer, M. Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos. Venezuela.2009.

² Selley, R.; Sonnenberg, S. Elements of Petroleum Geology. Third edition. Elsevier 2015.

Los **aromáticos** se basan en una estructura de anillos hexagonales, con enlaces simples y dobles alternados (e.g., benceno). El último grupo son los **asfáltenos** y **resinas**, conformado por la fusión de redes de anillos bencénicos que contienen impurezas y químicamente no se consideran hidrocarburos, las impurezas son compuestos de alto peso molecular referidos a los compuestos del azufre, nitrógeno y oxígeno, París de Ferrer (2009).

Una vez entendida la clasificación química del petróleo crudo, es posible definir los diferentes tipos de crudos basados en la proporción de su enriquecimiento con los cuatro grupos mencionados anteriormente. De acuerdo con este criterio, los crudos pueden ser:

- ✓ Base nafténica.
- ✓ Base parafínica
- ✓ Base intermedia o mixta.
- ✓ Base aromática o bencénica (gran cantidad de hidrocarburos aromáticos)

Tabla 3. Clasificación °API del petróleo crudo

Tipo de crudo	°API
Extrapesados	Hasta 9.9
Pesados	10-21.9
Medianos	22-29.9
Livianos	Más de 30.0

Fuente: París de Ferrer, 2009, 11

Adicionalmente, los crudos pueden ser clasificados según su gravedad °API en extrapesado, pesado, mediano y liviano dicha clasificación se puede apreciar en la **tabla 3**.

Tabla 4. Fracciones típicas separadas del petróleo crudo

Fracción	Punto de ebullición, °F (Punto de fusión)	# Carbonos	Usos
Gasolina	100-350	C ₅ - C ₁₀	Combustible de motor
Kerosén	350-450	C ₁₁ - C ₁₂	Combustible de aceite, calefacción
Diesel	450-580	C ₁₃ - C ₁₇	Combustible de motor
Lubricantes del petróleo	580-750	C ₁₈ - C ₂₅	Lubricantes, pomadas
Ceras	750-950 (100)	C ₂₆ - C ₃₈	Impermeabilizaciones, velas
Residuos	950+ (200+)	C ₃₈ +	Carreteras, materiales para techos

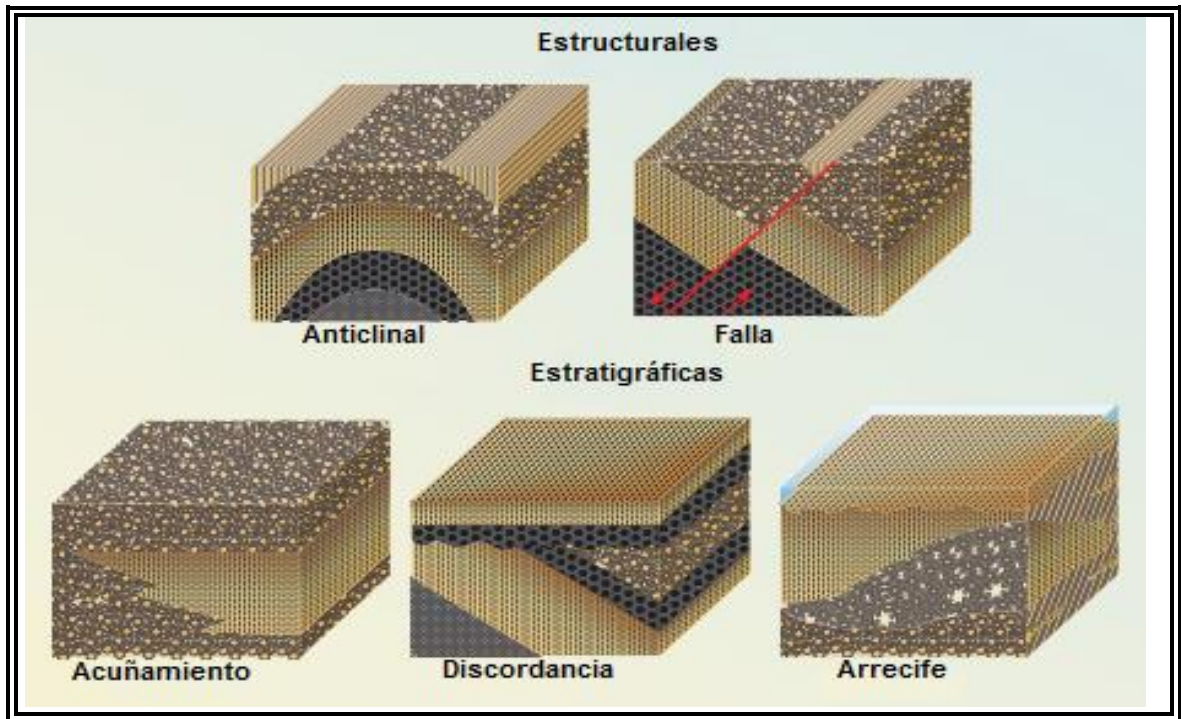
Fuente: McCain, 1990, 2

Para la obtención de algunos productos refinados de petróleo, estos son normalmente separados en fracciones de crudo de acuerdo al rango de punto de burbuja de los compuestos incluidos en cada fracción, McCain (1990). La **tabla 4**, brinda una lista de las fracciones típicas obtenidas separadas del petróleo crudo.

1.2 TRAMPAS GEOLÓGICAS

Hoy en día la implementación de las herramientas geofísicas facilita obtener la información detallada de las capas de rocas al interior del subsuelo, Kearey (2002). Este proceso e interpretación de la información geofísica plantea una imagen de las capas de roca, por medio del cual, se identifican formas físicas denominadas trampas, que poseen características geológicas especiales que permiten ubicar yacimientos de hidrocarburos en el subsuelo (**ver figura 1**). Las trampas geológicas según París de Ferrer (2009); pueden categorizarse en tres grupos:

Figura 1. Trampas geológicas



Fuente: Caldwell, 1997, 51

Trampas estructurales: originadas por movimientos tectónicos posteriores al depósito de los sedimentos. Dentro de esta clasificación se encuentran las trampas anticlinales, las cuales típicamente tienen forma de arco y son las más comúnmente detectadas, conteniendo las $\frac{3}{4}$ partes de la reservas de petróleo descubiertas en el mundo.

Trampas estratigráficas: creadas como producto de las pérdidas de permeabilidad y porosidad del yacimiento, en razón de un cambio litológico; cambios en la composición de la roca o su tipo (e.g., ígnea, sedimentaria o metamórfica).

Trampas mixtas: son el resultado de la combinación de dos o más trampas estructurales y estratigráficas en varias modalidades, cuyo resultado es una combinación de procesos tectónicos y cambios litológicos.

1.3 PROPIEDADES DE LAS ROCAS

1.3.1 Porosidad, es descrita como el espacio en la roca que no es ocupado por algún material sólido, permitiendo el almacenamiento de los fluidos, donde los valores de porosidad pueden ser expresados en porcentaje o fracción que varía entre 0 y 1, París de Ferrer (2009). Estos espacios pueden encontrarse interconectados o aislados unos con otros, según dicha comunicación pueden distinguirse dos tipos de porosidades: **absoluta** y **efectiva**, en el primer caso se define como la relación entre el espacio poroso total en la roca y el volumen bruto (**ver ecuación 1**); la efectiva como el porcentaje del espacio poroso que se encuentra interconectado con respecto al volumen total de la roca (**ver ecuación 2**).

$$\phi = \frac{V_t - V_{gr}}{V_t} = \frac{V_p}{V_t} \dots \dots \dots (\text{Ecuación 1})$$

$$\phi = \frac{V_{inter}}{V_t} \dots \dots \dots (\text{Ecuación 2})$$

Dónde

- ϕ = Porosidad, fracción
- V_{gr} = Volumen de los granos
- V_p = Volumen de poro
- V_t = Volumen bruto de la roca
- V_{inter} = Volumen de poros interconectados

Por otro lado, también podemos clasificar la porosidad en relación a su origen y tiempo de depósito de estratos en: **primaria** (intergranular) o **secundaria** (vugular), respecto a la intergranular se desarrolla al mismo tiempo que los depósitos de sedimentos y la vugular es producto de procesos geológicos (fractura, dolomitización, lixiviación de las aguas subterráneas) posteriores al depósito del material. En relación a los factores que afectan la porosidad son; tipos de empaque, material cementante, geometría y distribución de los granos, presencia de partículas de arcilla, presión de las capas suprayacentes y confinantes.

1.3.2 Permeabilidad, adicionalmente de ser porosa una roca de yacimiento debe tener la habilidad de permitir el flujo de fluidos a través del medio poroso interconectado, esta cualidad es conocida como la permeabilidad (k). Así, esta propiedad de la roca es dependiente de la porosidad efectiva, y en consecuencia es afectada por los factores descritos anteriormente, Tiab (2012). Henry Darcy en el siglo XIX desarrollo una ecuación que determinaba la permeabilidad cuando el agua fluía a través de filtros de arena, esta ecuación es conocida como la **Ley de Darcy (ver ecuación 3)**:

$$v = \frac{q}{A_c} = \frac{k}{\mu} \frac{dP}{dL} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 3)}$$

Despejando k de la **ecuación 3**, se obtiene:

$$k = \frac{q\mu L}{(p_1 - p_2)A_c} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 3a)}$$

Dónde

v = Velocidad del fluido (cm/s)

q = Caudal (cm³/s)

k = Permeabilidad (mD)

A_c = Área seccional (cm²)

μ = Viscosidad fluido (cP)

L = longitud de la muestra (cm)

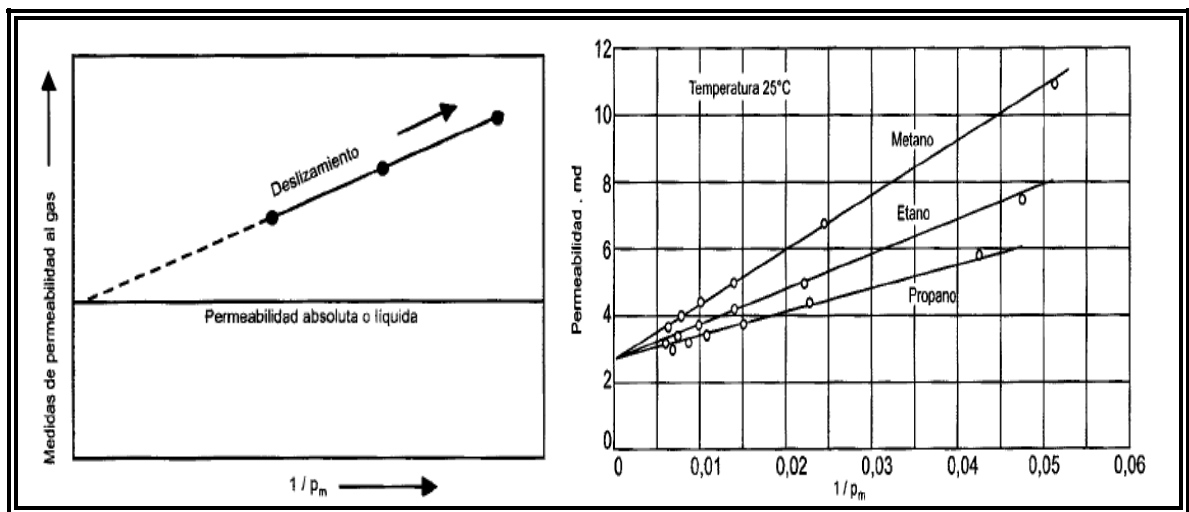
dP/dL = Gradiente de presión en la dirección del flujo (atm/cm)

Una vez definido el concepto de la permeabilidad es posible medirla o expresarla de las siguientes formas:

- ✓ **Permeabilidad absoluta (k)**, hace referencia a cuando un fluido está saturado el 100% del espacio poroso.
- ✓ **Permeabilidad efectiva (k_e)**, es la permeabilidad medida cuando el espacio poroso está siendo ocupado por más de un fluido. ($k_e < k$)
- ✓ **Permeabilidad efectiva (k_r)**, involucra la relación entre permeabilidad efectiva y la permeabilidad absoluta de una roca. ($k_r = k_e/k$)

Cabe resaltar que la permeabilidad de una muestra cuando se implementa gas como fluido siempre es mayor que la medida cuando fluye un líquido, dicho comportamiento fue analizado por **Klinkenberg**, quien observó sobre la superficie de contacto de la roca una velocidad cero de los líquidos, mientras los gases presentan velocidades infinitas, es decir, exhiben un deslizamiento en las paredes de la roca. Además encontró que para un medio poroso dado a medida que la presión promedio aumenta, la permeabilidad calculada disminuye, París de Ferrer (2009) (**ver figura 2**). La línea recta resultante de la relación entre la permeabilidad del aire y líquido puede ser apreciada en la **ecuación 4**:

Figura 2. Medidas de permeabilidad al gas mostrando el efecto Klinkenberg



Fuente: París de Ferrer, 2009, 258

$$k_g = k_L + c (1/P_m) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 4)}$$

Dónde

k_g = Permeabilidad medida del gas

k_L = Permeabilidad medida del líquido (absoluta)

$P_m = (P_1 + P_2)/2$; (" P_1 ", " P_2 " representan las presiones a la entrada y salida de la corriente respectivamente)

$C = b * k_L$; (" b " es una constante que depende del tamaño de los poros abiertos al flujo y es inversamente proporcional al radio de los capilares)

La permeabilidad de un reservorio de petróleo también puede ser de carácter primaria donde la matriz permeable fue originada durante el tiempo de depósito o litificación de rocas sedimentarias, o secundaria como resultado de alteraciones de la roca debido a la compactación, cementación y fracturamiento.

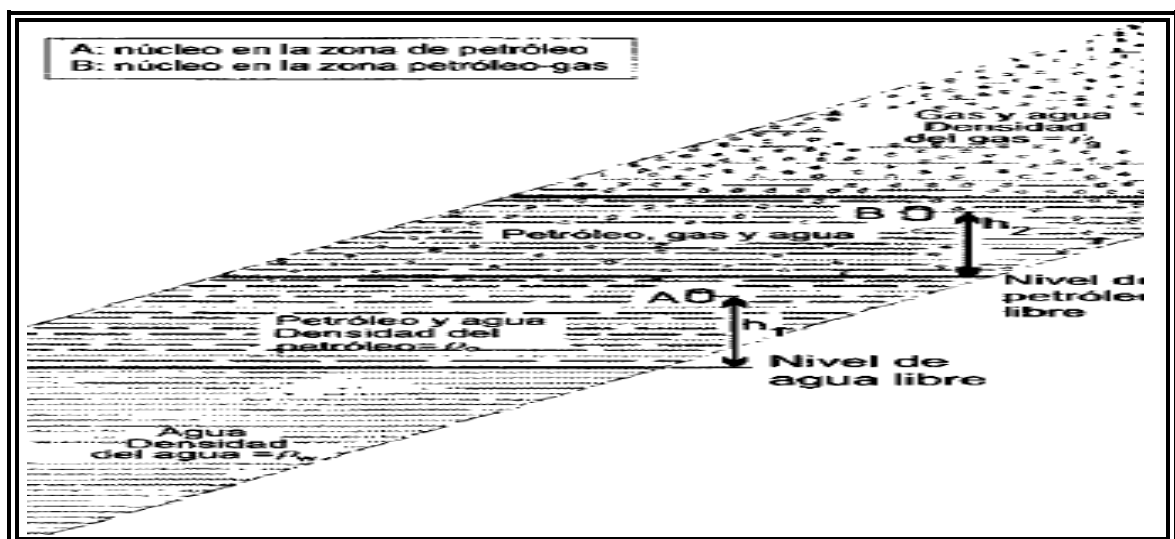
1.3.3 Saturación, Es referida como la fracción del volumen poroso ocupado por cada uno de los fluidos presentes (petróleo, agua y gas), a dicha fracción se le conoce como saturación de fluido y se puede expresar como el volumen total de fluido sobre volumen poroso, donde la suma de las saturaciones de los presentes en el espacio poroso deber igual a la unidad (**ver ecuación 5**). En la industria petrolera se utiliza la porosidad multiplicada por la saturación del fluido en consideración, ya que todas las saturaciones están basadas en el volumen poroso y no en el volumen del yacimiento. La **figura 3**, muestra la distribución típica de los fluidos al interior yacimiento de hidrocarburos.

$$S_w + S_o + S_g = 1 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 5)}$$

Dónde

- S_w = Saturación de agua
- S_o = Saturación de aceite
- S_g = Saturación de gas

Figura 3. Distribución de fluidos en el yacimiento



Fuente: París de Ferrer, 2009, 237

1.4 ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD (IP)

Para describir el comportamiento de los fluidos provenientes del yacimiento hacia el pozo y hasta superficie, se utiliza el índice de productividad (IP); que es una relación entre la tasa de producción de pozo y la caída de presión para producir (**ver ecuación 6**). Este fue desarrollado bajo algunas consideraciones; flujo radial alrededor del pozo, monofásico e incompresible, la distribución de permeabilidad en la formación es homogénea y está totalmente saturada con el fluido.

$$q = \frac{0.00708 kh}{\mu B \ln(r_e/r_w)} (P_R - P_{wf}) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 6)}$$

Dónde

- q = Tasa de producción (STB/d)
- k = Permeabilidad efectiva (mD)
- h = Espesor de la zona de pago (ft)
- μ = Viscosidad fluido (cP)
- B = Factor volumétrico de líquido (bbl/STB)
- r_e = Radio de drenaje del pozo (ft)
- r_w = Radio del pozo (ft)
- P_R = Presión del yacimiento (psi)
- P_{wf} = Presión fondo de pozo (psi)

La mayoría de los parámetros expuestos en la **ecuación 6**, puede considerante como constantes y se pueden agrupar como un solo coeficiente llamado IP (**ver ecuación 6a**):

$$q = IP (P_R - P_{wf}) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 6a)}$$

En la **figura 4**, se aprecia una línea recta que representa la ecuación 6a, en donde para $Q=0$ se obtiene la presión $P=P_r$, y para $Q=Q_{max}$ (máximo potencial del pozo) a $P=0$, este Q_{max} es conocido como AOFP (Absolute Open Flow Potencial) que representa únicamente la presión en el fondo del pozo si pudiera ser reducida a cero, sin embargo en la práctica esto no es posible solo se usa para comparar la entrega de fluidos de diferentes pozos.

Figura 4. IP constante

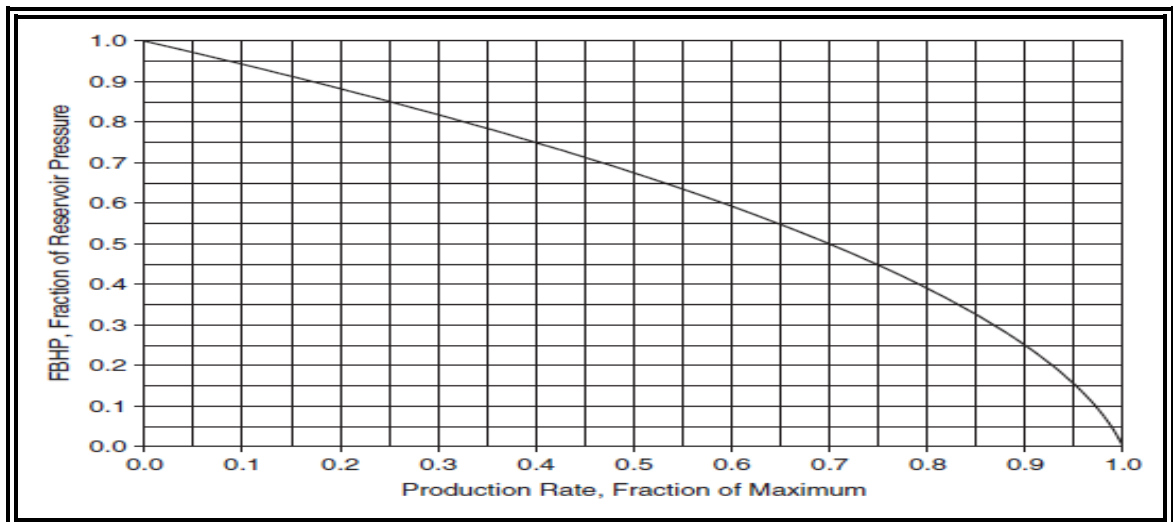


Fuente: Takács, 2009,12

1.5 IPR (INFLOW PERFORMANCE RELATIONSHIPS)

En pozos que se encuentran por debajo de la presión de burbuja, los supuestos que fueron desarrollados anteriormente para la ecuación IP no son válidos, debido a liberación del gas en solución por la disminución de la presión en los alrededores del pozo que desencadena en cambios de la **figura 4**, obteniéndose una curva en vez de una línea recta para $P < P_b$ (ver **figura 5**).

Figura 5. IPR_{Vogel}



Fuente: Takács, 2009,14

Con el fin de estudiar este tipo de comportamiento en los reservorios, **Vogel** presento un simulador numérico que incluía casos de yacimientos por debajo del punto de burbuja y variedad en la caída de presión, además de datos de propiedades de roca y fluidos. Esta simulación arrojó como resultados similitudes en la forma de la curva IPR presentada en la **figura 5** para los yacimientos estudiados, que lo llevaron a proponer la “**Correlación de Vogel**” (ver ecuación 7):

$$\frac{q}{q_{\max}} = 1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_R} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_R} \right)^2 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 7)}$$

Dónde

q = Tasa de producción a la presión Pwf, (STB/d)

qmax = Máxima tasa de producción (STB/d)

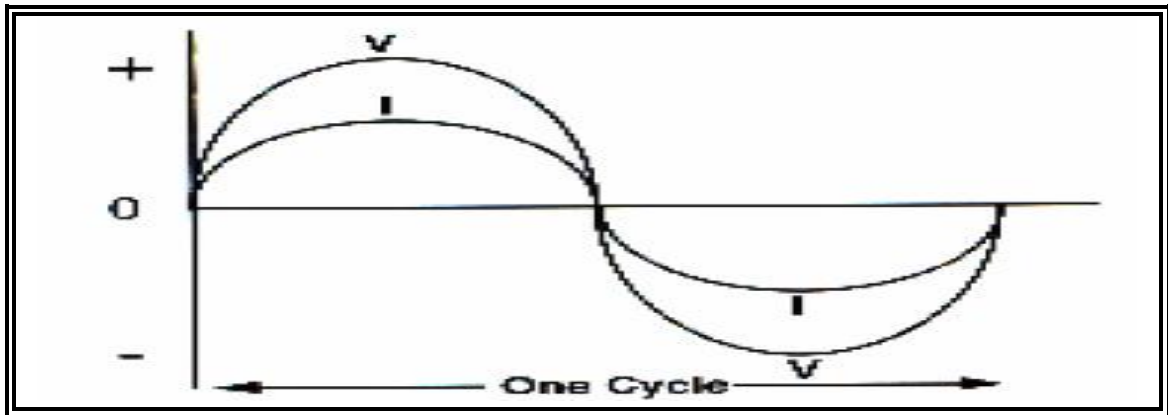
PR = Presión del yacimiento (psi)

1.6 FUNDAMENTOS ELÉCTRICOS³

1.6.1 Corriente Alterna (AC), Los motores usados para el manejo del bombeo electrosumergible son de AC (Corriente alterna), estos motores son trifásicos donde cada fase tiene un voltaje y corriente alterna asociada y cambian de acuerdo a la onda senoidal como se muestra en la **figura 6**. En un ciclo (360°) la dirección de la corriente cambia 2 veces, el número de ciclos por segundo es conocido como frecuencia de la electricidad, con valores usuales de 60Hz o 50 Hz.

³ Basado en: Takács, G. Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operation, and Maintenance. USA: Elsevier 2009; Peña F. Bombeo Electrosumergible (Descripción, Diseño y Monitoreo) 2005.

Figura 6. Onda senosoidal de AC



Fuente: Peña, 2005,43

1.6.2 Voltaje (V), La distribución equitativa de electrones en una sustancia, requiere una fuerza llamada electromotriz para desprenderlos de los átomos y hacerlos fluir en una dirección definida. Dicha fuerza es comúnmente llamada potencia eléctrica o voltaje, siendo la unidad de medida conocida como voltio.

1.6.3 Corriente (I), La corriente eléctrica es producto del flujo de electrones, debido a la suficiente fuerza aplicada a una sustancia. La tasa de flujo de corriente es medida en amperio, donde un amperio representado por el movimiento de la cantidad de electrones por segundo.

1.6.4 Resistencia (R), Respecto a la resistencia, un material que proporcione baja resistencia permite a la electricidad fluir con pequeñas pérdidas de voltaje; mientras un material con alta resistencia causa una gran caída de voltaje.

1.6.5 Ley de Ohm, El voltaje requerido para hacer fluir una corriente depende de la resistencia del circuito (*e.i.* un voltaje de un voltio hará fluir un amperio a través de una resistencia de un Ohm), esta relación se llama ley de Ohm (**ver ecuación 8**).

$$I = \frac{V}{R} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 8)}$$

Dónde

I = Corriente en amperios

V = Voltaje en voltios

R = Resistencia en Ohms

1.6.6 Potencia (P), Representa la energía necesaria para mantener un flujo de corriente, y puede ser medida en Vatios que es una unidad pequeña de potencia. En un circuito puramente resistivo, cuando el voltaje y la corriente están en fase, la potencia puede ser definida de la siguiente manera (**ver ecuación 9**):

$$P=V*I..... (\text{Ecuación 9})$$

Dónde

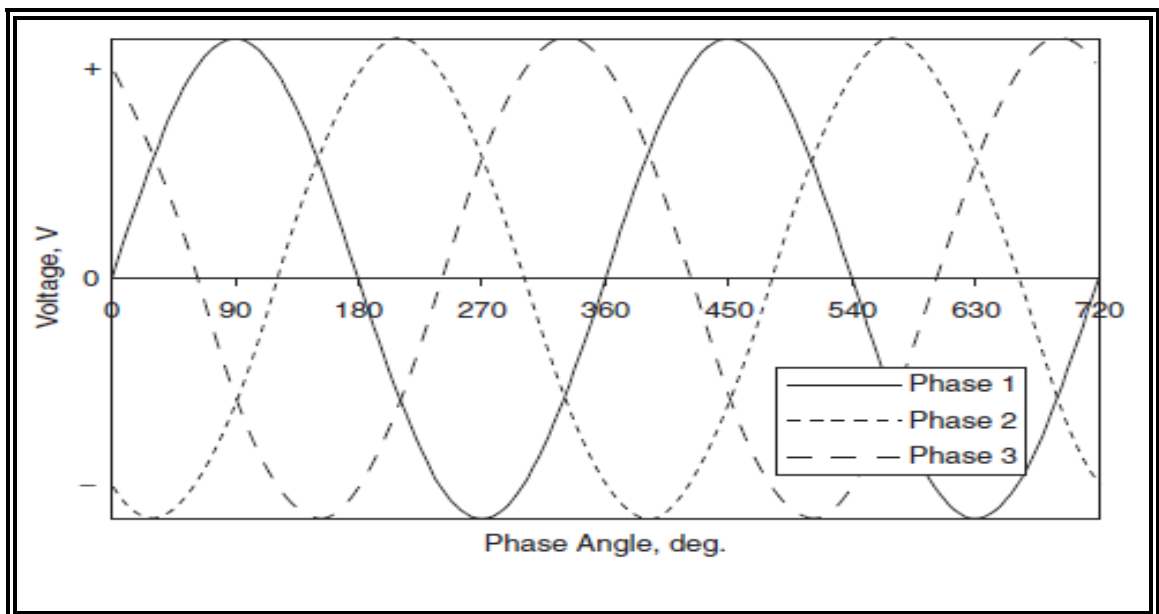
P = Potencia en vatios

V = Voltaje en voltios

R = Corriente en amperios

Un sistema de distribución de electricidad AC trifásico, indica tres sistemas de electricidad AC de una sola fase. Dichos sistemas se encuentran distribuidos de tal forma que el voltaje obtenido en cualquiera de las fases se ha ubicado 120° de las otras dos (**ver figura 7**). En donde la potencia total suministrada por un sistema de tres fases balanceado es igual a tres veces la potencia enviada por cada fase.

Figura 7. Cambio de la línea de voltaje en circuitos AC trifásicos



Fuente: Takács, 2009,37

1.6.7 Frecuencia (Hertz), Al rotar un generador 360° (revolución completa), el voltaje generado completa un ciclo. Si dicho generador rota a 50 revoluciones por segundo, el voltaje generado completará 50 ciclos en un segundo (*e.i.* el voltaje generado tiene una frecuencia de 50 ciclos o 50 Hertz). Por otro lado, la ecuación que permite relacionar la frecuencia generada, la velocidad del rotor y su número de polos se muestra a continuación:

$$F = (NP/120) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 10)}$$

Dónde

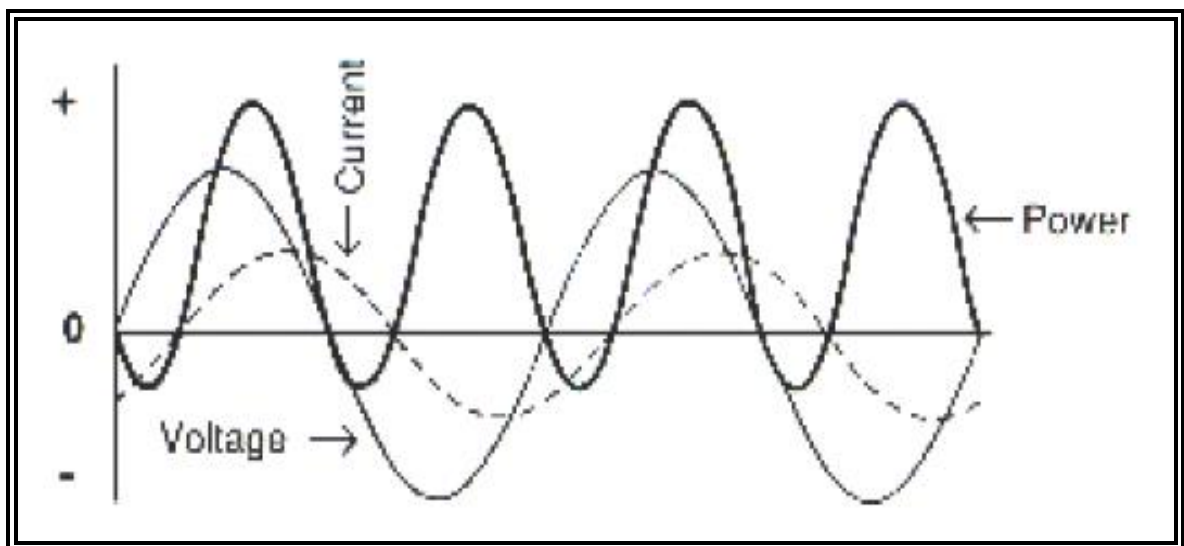
F = Hertz

N = rpm

P = Números de polos del motor

1.6.8 Inductancia (L), Al aumentar la corriente, un circuito almacena energía en el campo magnético. Caso contrario ocurre cuando la corriente disminuye haciendo que el circuito abandone la energía del campo, estos efectos magnéticos reaccionan sobre la corriente retardándola y posicionándola detrás de la onda de voltaje (**ver figura 8**).

Figura 8. Efectos de la inductancia sobre la corriente



Fuente: Peña, 2005,45

1.6.9 Capacidad Eléctrica o Capacitancia (C), Es la habilidad de mantener o acumular una carga eléctrica al circuito para devolverla al mismo, esta reacción es medida en Faraday y tiende a contrarrestar la inductancia en un circuito. Lo anterior es útil para superar el retardo inductivo en la corriente inherente en la mayoría de motores AC.

1.6.10 Impedancia (Z), La impedancia en un circuito es denominada como la oposición total al flujo de corriente, debido a los efectos de la resistencia, inductancia y capacitancia. La unidad de medida de un circuito es el Ohm.

1.6.11 Conductores, Su función es permitir el flujo de electrones libremente a través de ellos (e.g. plata, oro, aluminio hierro, etc.), la forma más común de los conductores son los alambres y los cables.

1.6.12 Aislantes, Actúan como opositores al flujo de electrones, es decir dificultan su viaje (e.g. vidrio, algunos plásticos, fibra y papel). Estos materiales son llamados aislantes, no conductores o dieléctricos.

1.6.13 Factor de Potencia (PF), El factor de potencia es la razón entre la potencia verdadera (KW) y la potencia aparente (KVA), el cual mide la eficiencia de un circuito AC: entre más grande es la relación más eficiente es la potencia consumida en el sistema. Esta relación se aprecia a continuación:

$$PF = (KW/KVA) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 11)}$$

Dónde

$$KVA = (\sqrt{3}) (V_{\text{linea}} I_{\text{linea}} / 1000) = 1.732 \cdot 10^{-3} (V_{\text{linea}} I_{\text{linea}})$$

$$KW = (\sqrt{3}) (V_{\text{linea}} I_{\text{linea}} / 1000) \cdot \cos \phi = 1.732 \cdot 10^{-3} (V_{\text{linea}} I_{\text{linea}}) \cos \phi; \text{ considerando que } I_{\text{real}} = I_{\text{linea}} \cdot \cos \phi$$

El factor de potencia es igual a uno si el voltaje y la corriente están en fase (e.i alcanzan su máximos valores), en algunos sistemas de corriente alterna el voltaje alcanza su máximo valor en una dirección dada antes de que la corriente alcance su máximo valor, por lo que la corriente estará retardada con respecto al voltaje. La **Ecuación 12**, permite también calcular el kilovatio de entrada a cualquier maquina por medio de la multiplicación de los KVA de entrada por el factor de potencia:

$$KW = KVA \cdot PF \dots \dots \dots \text{(Ecuación 12)}$$

2. BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

En este capítulo abarca todo los componentes que constituyen la instalación del bombeo electrosumergible y su diseño de una manera metodológica. Asimismo, se presenta algunos aspectos que pueden influir en la disminución del desempeño de las bombas, y que ocasionan problemas a nivel operativo para llevar los fluidos hacia superficie.

2.1 INTRODUCCIÓN AL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

Actualmente la implementación de los sistemas de levantamiento artificial BES en campos petrolíferos colombianos y alrededor del mundo, han facilitado la producción de hidrocarburos cuando la presión del yacimiento no es suficiente para vencer las pérdidas de presión a lo largo del sistema o simplemente su utilización en pozos, donde se necesite aumentar la tasa de producción.

Las bombas electrosumergible fueron inventadas en 1910 por Armais Arutunoff, quien un año más tarde fundo la compañía Russian Electrical Dynamo (REDA) y desarrollo el primer motor eléctrico que operaba sumergido en un pozo de petróleo, pero la primera instalación exitosa de las bombas electrosumergibles se dio en 1926 en el campo EL DORADO en Kansas después del traslado de Armais a los Estados Unidos.

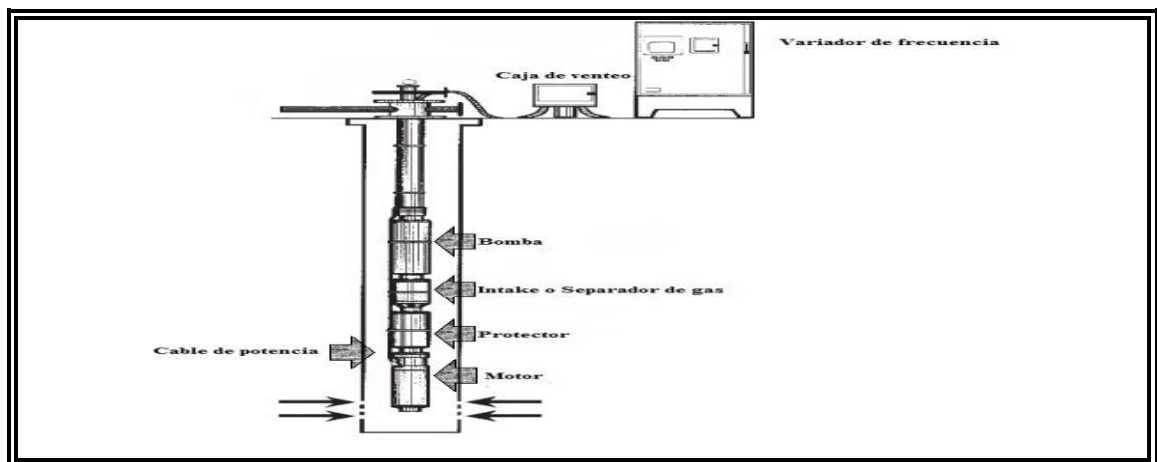
Para 1950 y 1970, se realizaron diversas modificaciones respecto al sello y separadores de gas que mejoraron el funcionamiento de las BES prolongando su vida útil, según Takács (2009) para agosto de 1977 se instaló la primera electrosumergible con control de frecuencia variable del motor que permitía modificar el comportamiento de la cabeza de la bomba garantizando un mayor levantamiento de los fluidos provenientes del yacimiento, a raíz su éxito “REDA” hoy en día hace parte la compañía petrolera schlumberger quien se posiciona como un proveedor importante de bombas electrosumergibles para la industria petrolera.

Respecto a la demanda del bombeo electrosumergible para el año 2000, este represento aproximadamente el 15% de la producción mundial de hidrocarburos⁴, lo que nos dice su importancia como un sistema de levantamiento artificial en la industria del petróleo para la producción e inyección de fluidos en campo. Por este motivo es importante comprender su funcionamiento y los componentes que conforman el bombeo electrosumergible, a continuación se brinda una breve explicación y función de los componentes que comprenden que conforman las instalaciones de subsuelo y superficie de una instalación BES.

2.2 COMPONENTES DEL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

Los componentes que conforman una BES se pueden dividir en; subsuelo (cable, bomba, intake, sello, motor, sensor) y superficie (caja de venteo, transformador, controlador de frecuencia variable), apreciables en la **figura 9** donde se muestra una instalación convencional para el bombeo electrosumergible, adicionalmente a los componentes descritos posteriormente se pueden instalar equipos complementarios tales como; separadores o manejadores de gas, sensores y accesorios entre los que encontramos los centralizadores, protectores de cable, herramienta en “Y”, conectores eléctricos, sistemas de inyección de químicos ,empaquetaduras, válvula de cheque y blender, lo que posibilita según su diseño el manejo de altos caudales de crudo a profundidades medias.

Figura 9. Instalación convencional BES



Fuente: Takács, 2009,51

⁴ Banjar et al. Experimental Study of Liquid Viscosity Effect on Two-Phase Stage Performance of Electrical Submersible Pumps. SPE 166374, 2013.

2.2.1 Componentes de subsuelo

- **Sensor**

Es una herramienta utilizada para la recolección de datos en fondo como temperatura y presión de los fluidos provenientes del yacimiento, esta última se puede relacionar con la tasa de producción para sugerir algún cambio en el diseño de la bomba y para trabajos de workover en el pozo.

- **Motor**

Los motores usados en las BES son de inducción de dos polos, tipo jaula de ardilla y trifásicos. Estos trabajan sobre el principio de inducción electromagnética donde la corriente eléctrica es inducida a cualquier conductor que se mueve en relación a un campo magnético originado en el estator, este campo rota con los cambios de dirección de la corriente porque los electroimanes cambian sus dos polos magnéticos para cada ciclo de la corriente⁵.

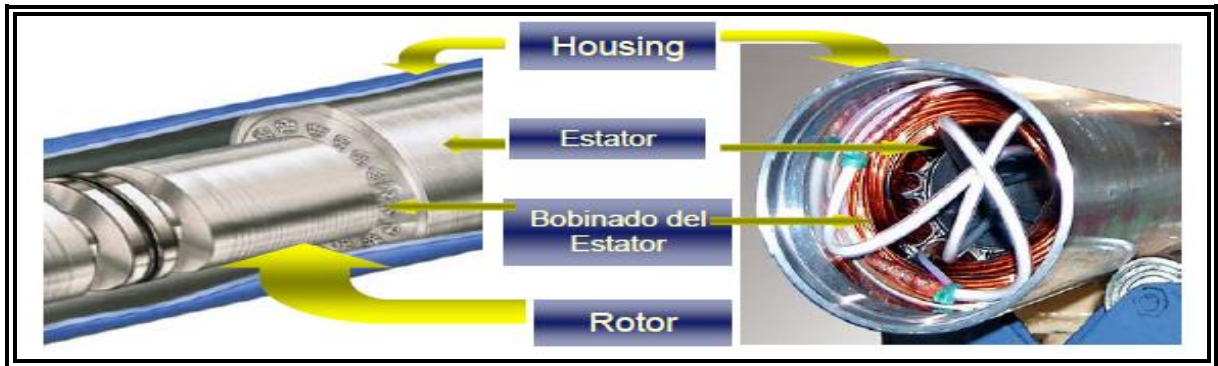
Durante su funcionamiento los motores BES generan calor debido a su operación por eso son cargados con aceite mineral o aceite sintético, el cual lubrica y provee resistencia dieléctrica, asimismo conductividad térmica que ayuda a expulsar el calor generado hacia el housing del motor⁶, por lo general un motor BES gira entre 3500 RPM @ 60 Hz ó 2900 RPM @ 50Hz, Takács (2009).

Podemos dividir el motor en tres partes principales; el **estator** se encarga de generar un campo magnético debido a la corriente que pasa a través de su bobinado proveniente de superficie, para este fin se instalan discos de acero con orificios por donde pasa el bobinado y a los cuales se les conoce como “laminas”, esto se puede apreciar con detalle a continuación:

⁵ Takács, G. Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operation, and Maintenance. USA: Elsevier 2009

⁶ Peña F. Bombeo Electrosumergible (Descripción, Diseño y Monitoreo) 2005.

Figura 10. Partes del motor



Fuente: Peña, 2005, 83

El **rotor**, se ubica dentro del estator y consiste en pequeños rotores similares a los usados para el estator, donde cada uno tiene 12 pulgadas de largo. Cada rotor está sostenido en sus extremos por una balinera, encargada de soportar cualquier movimiento radial que pueda tener el rotor. El campo magnético generado por el estator entre sus bobinas, generan un movimiento rotacional que es transmitido hasta la bomba utilizando conectores conocidos como “Coupling” entre los ejes del sello y la bomba, Peña (2005).

Los **elementos mecánicos**, están conformados por el cojinete de rodamiento que soporta el conjunto eje-rotor, balineras de soporte de movimiento radial de cada rotor, bujes en cada una de estas balineras, conectores de cable entre motores y conectores de cable de potencia.

Para la selección del motor se debe tener en cuenta la serie del motor, tipo de motor (se presenta una configuración de dos letras donde la primera representa información del rating del motor y la segunda las características del tipo de aislamiento) y configuración dependiendo de las características de operación del pozo.

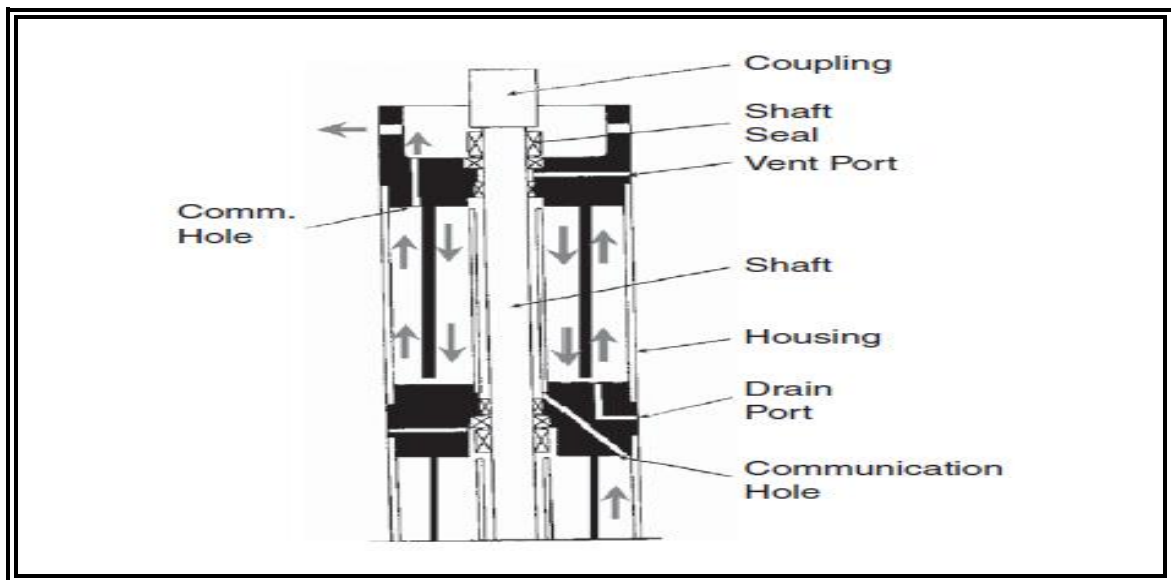
- **Protector**

Situado entre el motor y la bomba, el protector tiene como funciones principales evitar que los fluidos provenientes del pozo viajen hacia el motor, evitando cualquier contaminación que perjudique su desempeño normal. En algunos casos, esto se traduce en una pérdida de lubricación en la estructura del cojinete y decrecimiento de la fuerza de aislamiento eléctrico del aceite del motor ocasionando un cortocircuito al interior del motor, Takács (2009).

Asimismo, absorbe los esfuerzos que se pueden generar sobre el sistema durante su operación normal prolongando la vida útil de la bomba.

Tipos de protector, En actualidad la clasificación de los protectores se presenta en dos grandes grupos: **tipo laberinto**, donde los aceites del motor se encuentran en contacto con los fluidos del pozo bloqueando el ingreso de estos ultimo hacia el motor, debido a la expansión y contracción del aceite del motor. Por lo general, los dos fluidos son inmiscibles y raramente se contamina el fluido del motor al estar en contacto, esto se debe a la diferencia entre las gravedades específicas de los fluidos. Para actividades de campo se recomienda un aceite del motor entre 0.8 -0.83 y para los fluidos del pozo una mínima de 0.9 con el fin de mantenerlos separados (**Ver figura 11**).

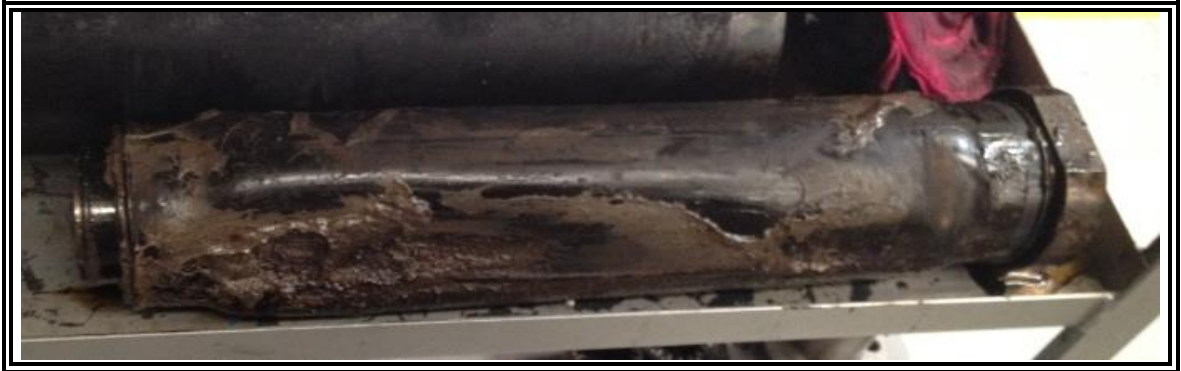
Figura 11. Protector tipo laberinto



Fuente: Takács, 2009,93

Los fluidos al interior de la cámara están aislados del eje de rotación por un tubo exterior al eje mismo, que evita que los fluidos se mezclen cuando la unidad se encuentra en operación. Este tipo de configuraciones no son recomendables en pozos que sean horizontales o altamente desviados (Ángulos $>30^{\circ}$), ya que la capacidad de expansión del aceite es inversamente proporcional al ángulo de colocación de la instalación, sin embargo para estos casos se recomienda utilizar los protectores de “sello positivo” o “**tipo bolsa**” que funcionan como una barrera entre los dos fluidos (**Ver figura 12**).

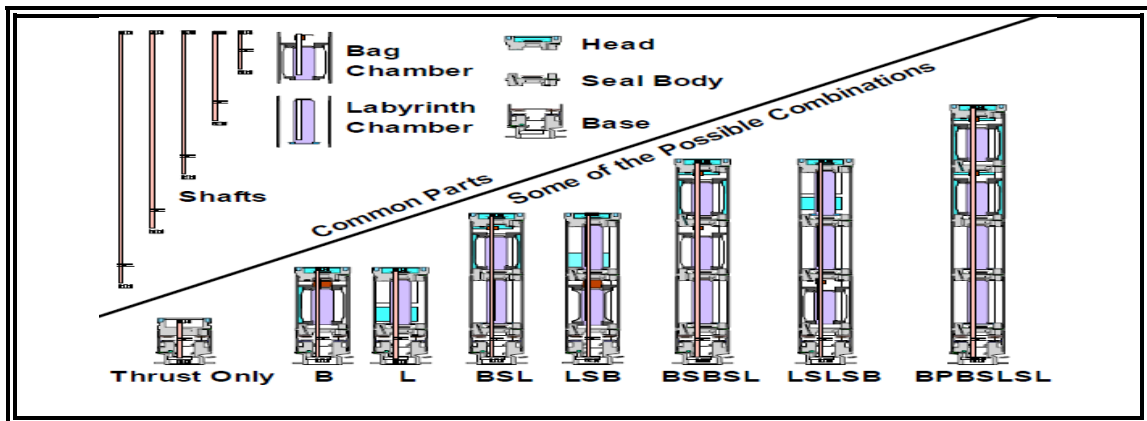
Figura 12. Protector tipo bolsa



La bolsa está construida de un elastómero de alto rendimiento que puede resistir el ambiente agresivo en el fondo del pozo protegiendo al motor. Durante el proceso de expansión del aceite dieléctrico proveniente de la cámara inferior se desplaza hacia arriba entrando a la bolsa a través de unos orificios en el tubo del eje permitiendo que la bolsa se infle bloqueando cualquier acceso al motor, Takács (2009).

Tanto los protectores tipo bolsa como los laberinto, pueden ser combinados y conectados en múltiples secciones en una misma instalación de bombeo electrosumergible, estos son conocidos como protectores modulares o configuración tándem (**Ver figura 13**).

Figura 13. Protectores modulares



Fuente: Tomado de Pinto, 2013,31

- **Intake**

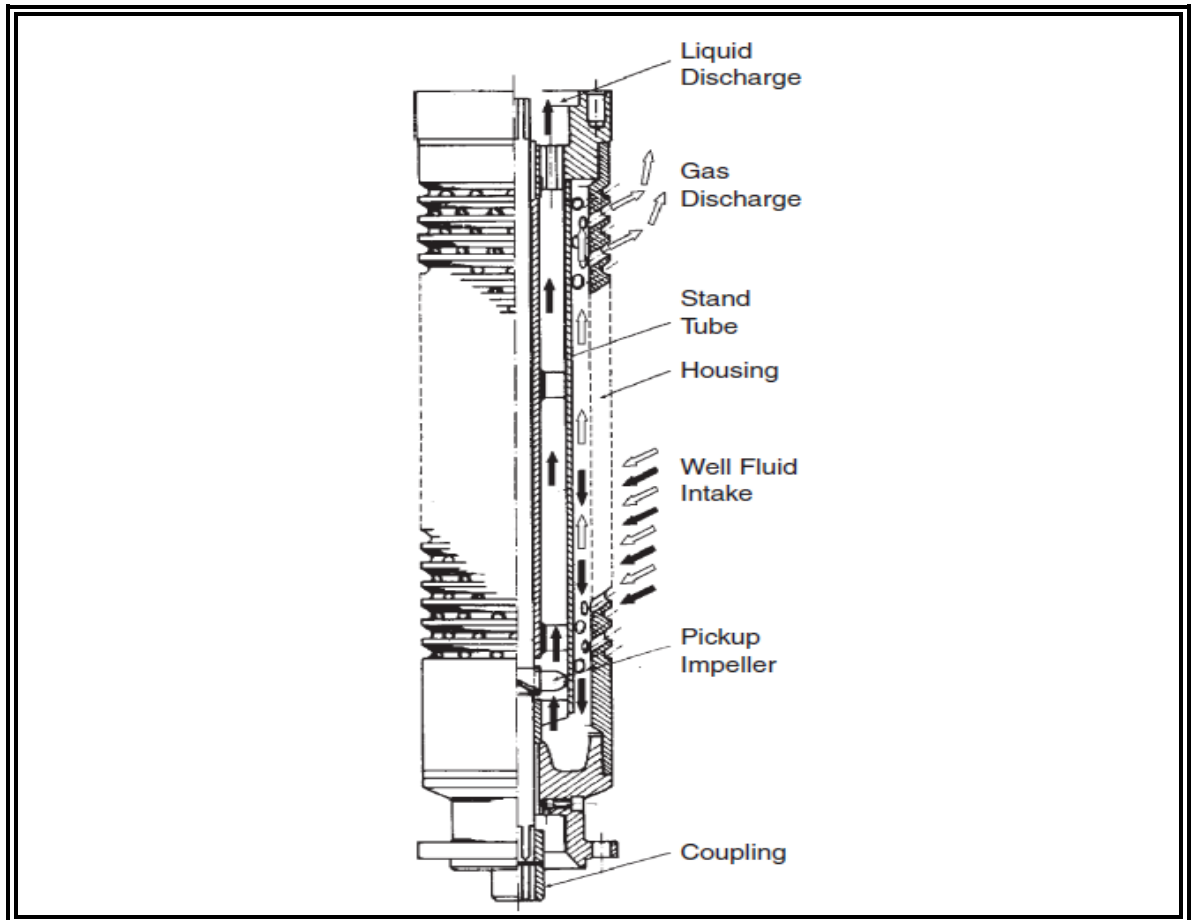
Es la sección de entrada hacia la bomba la cual se diseña teniendo en cuenta la cantidad de fluido y gas libre a manejar durante la operación de producción de hidrocarburos hacia superficie (ver figura 14), la implementación de “**manejadores de gas**” o “**separadores de gas**” en el diseño del bombeo dependerá del volumen de gas manejado. Donde la función de los “**manejadores de gas**” es solubilizar el gas libre en el líquido para obtener una sola fase y facilitar su transporte a través de la bomba, por otra parte los “**separadores de gas**” evitan el paso del gas libre hacia la bomba asegurando que esta no sufra daños por la presencia de gas al interior.

Figura 14. Intake



En la actualidad respecto a los separadores de gas se pueden dividir en: **estáticos** (flujo inverso), utilizan solamente la inversión del flujo a la entrada de la bomba para separar la mayor cantidad de gas posible, el gas que no se alcanza a separar pasa con el líquido hacia a la bomba electrosumergible (ver figura 15).

Figura 15. Separadores estáticos

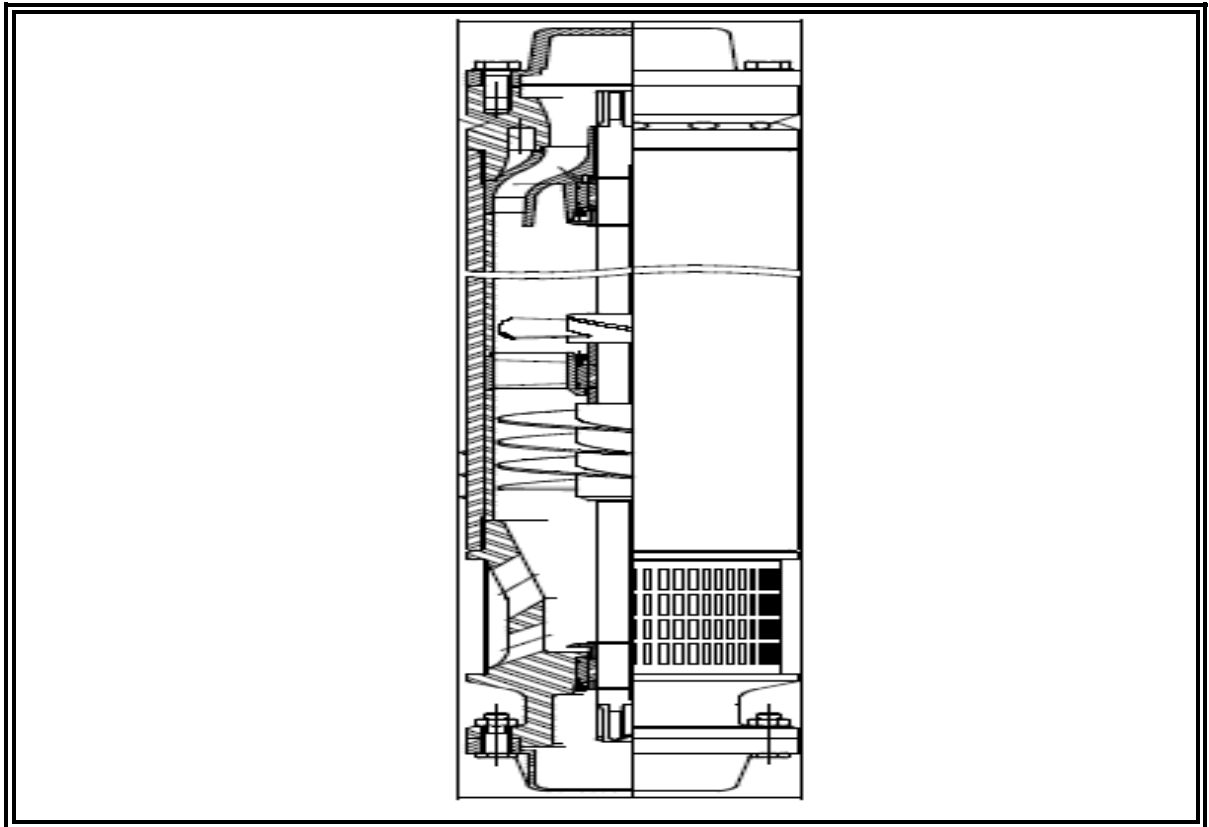


Fuente: Takács, 2009,101

Por otra parte, a diferencia de los estáticos los separadores **dinámicos** ejercen un trabajo sobre el fluido con el fin de obtener la mayor cantidad de separación de gas antes de llegar a la bomba. Además, los dinámicos cuentan con una cámara de aumento de presión, cámara de separación y un by-pass, este último redirige tanto el gas como el líquido hacia el anular y la bomba respectivamente, obtenidos productos de la separación por medio de la centrifugación en la cámara de separación. (ver imagen 16)

La eficiencia de separación dependerá de muchos factores tales como; tamaño de casing, características y patrón de flujo, caudal de operación, dimensiones de equipos, velocidad de rotación (caso de los separadores dinámicos).

Figura 16. Separadores dinámicos vortex

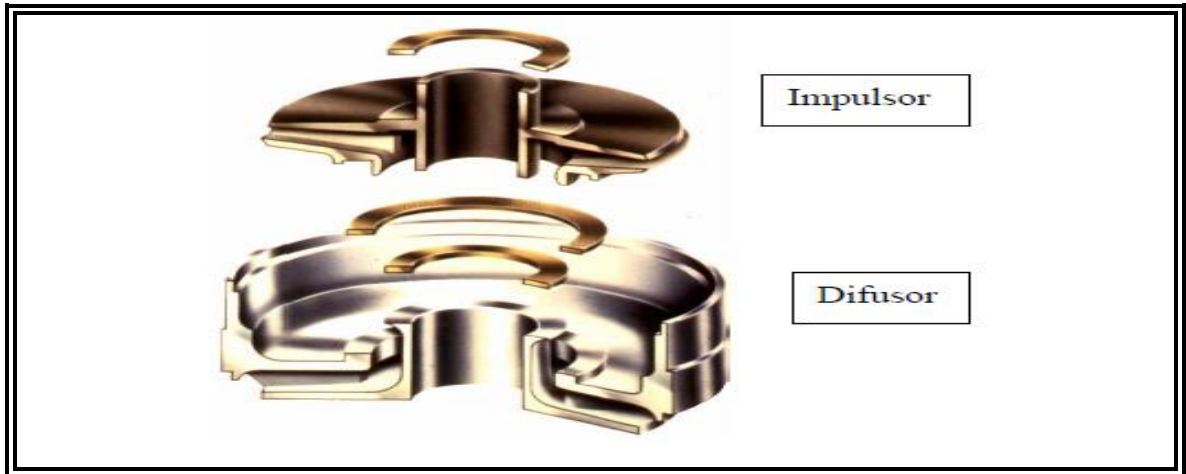


Fuente: Pinto, 2013,13

- **Bomba**

La bomba es considerada el corazón de la unidad BES, y su funcionamiento se basa en el principio de las bombas centrifugas de etapas múltiples, donde cada etapa está formada por una pareja de impulsor y difusor, que permiten el desplazamiento de los fluidos a lo largo de la bomba debido a la transferencia de energía aplicada a los fluidos por el impulsor en forma de presión y energía cinética; mientras el difusor convierte parte de la energía cinética en presión adicional a los fluidos necesaria para transportarlo hacia superficie, Banjar et al (2013) (**Ver figura 17**).

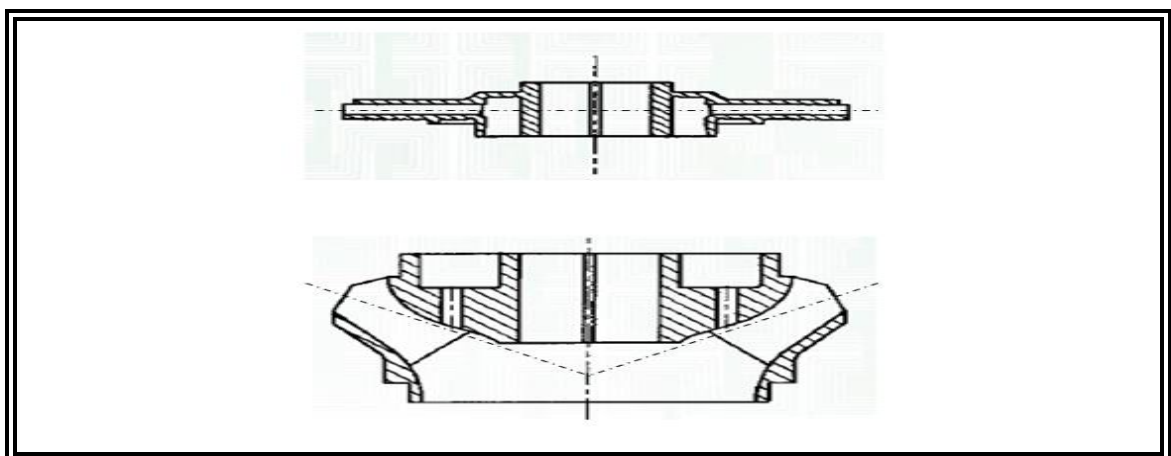
Figura 17. Difusor e impulsor



Fuente: Peña, 2005, 83

En el caso de los impulsores existen dos tipos que determinan la cantidad de fluido a manejar durante la producción de hidrocarburos estos son; el tipo flujo radial (90°) y flujo mixto (45°), en el caso del tipo radial manejan caudales bajos caso contrario realiza el tipo mixto que es usado para manejar altos caudales. Respecto a la construcción de los impulsores la diferencia se encuentra en el ángulo por donde pasa el fluido respecto a la vertical, esto se puede apreciar en la **figura 18**.

Figura 18. Tipo de impulsores

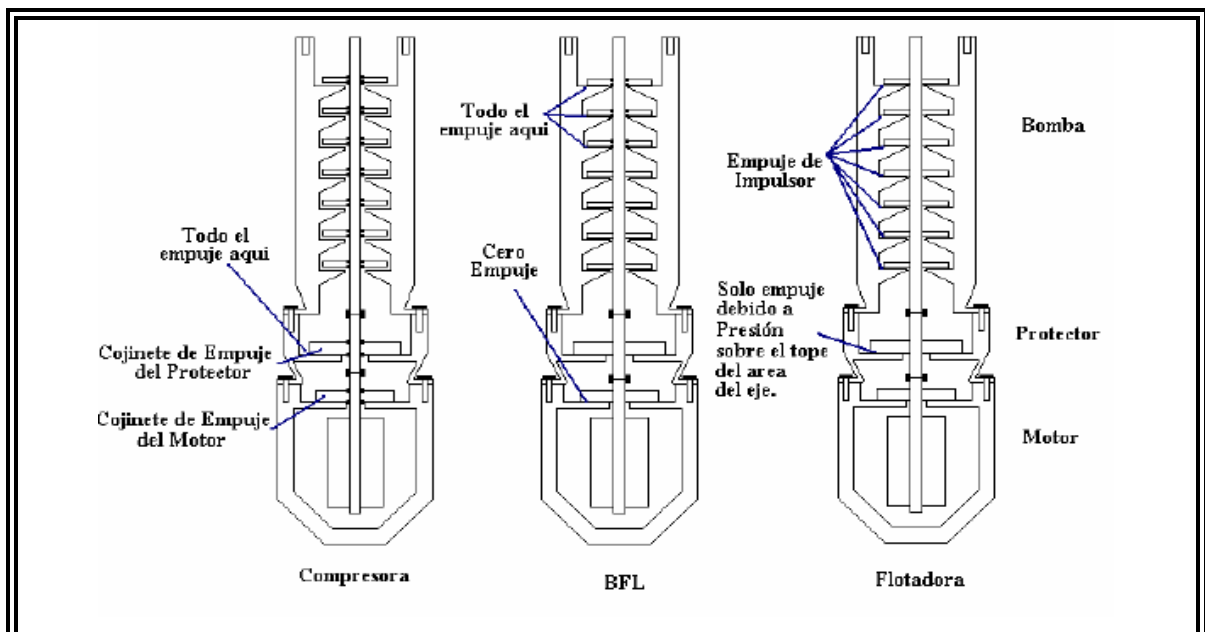


Fuente: Pinto, 2013

Debido al empuje que se maneja durante la operación de las bombas electrosumergibles, se debe considerar algunos apuntes importantes al momento de la construcción de la bomba, lo que facilitaría su desempeño bajo diferentes condiciones de operación (**ver figura 19**):

- ✓ Construcción tipo flotante “FL”, donde cada impulsor tiene la capacidad de moverse hacia arriba o abajo del eje de la bomba.
- ✓ Construcción tipo compresión “CR”, en este caso los impulsores se encuentran sujetos al eje sin la posibilidad de moverse libremente. Lo que plantea que todos los impulsores se encuentran fijos como un solo cuerpo rígido y cualquier intento de mover el eje repercute en el movimiento como conjunto en los impulsores.
- ✓ Construcción tipo “BFL”, es una combinación entre los tipo flotante y compresión, dividiendo en 2 sectores el conjunto de impulsores. Es decir, la parte inferior del montaje de impulsores son de tipo flotante, mientras tanto las superiores corresponden al tipo compresión, permitiendo eliminar el empuje descendente transmitido al protector.

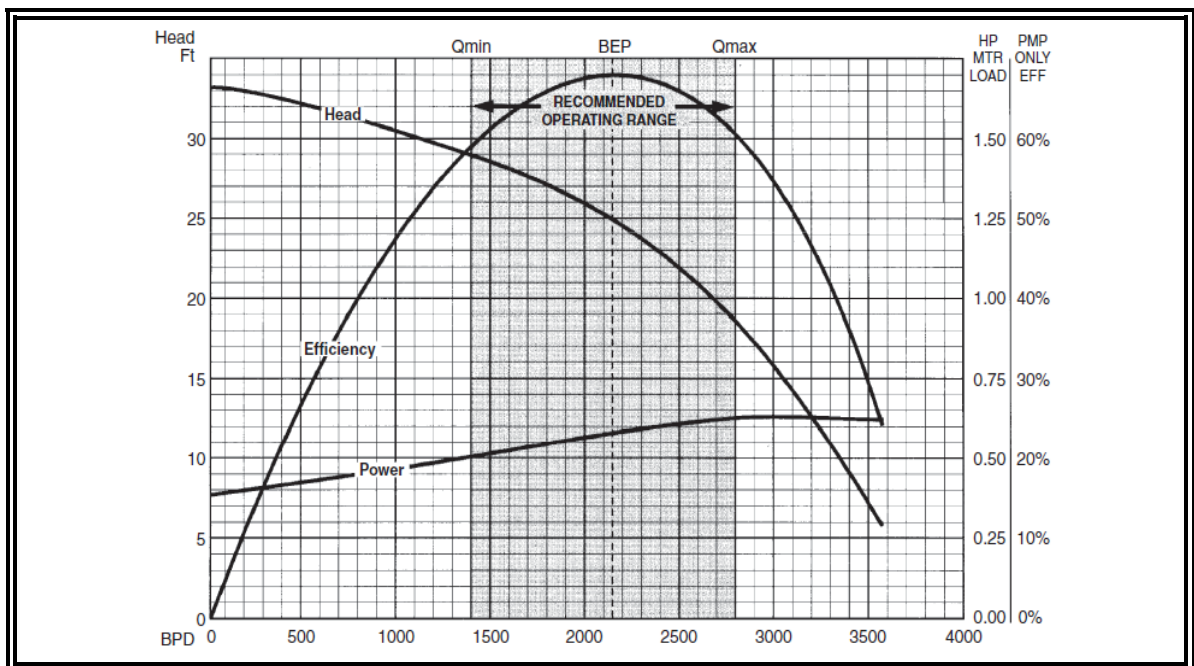
Figura 19. Construcción de la bomba (FL, CR, BFL)



Fuente: Peña, 2005,87

El comportamiento de una etapa bajo flujo monofásico se puede ver representada en la **curva de la bomba**, grafico que muestra; cabeza de la bomba, eficiencia y potencia requerida en función del caudal de operación apreciadas en la **figura 20**. Sin embargo, estas curvas son determinadas experimentalmente usando agua como fluido de trabajo. Dando vía libre a su implementación levantando otros fluidos de baja viscosidad y en una sola fase, pero son significativamente afectadas por la presencia de gas libre o fluidos con alta viscosidad, dichas situaciones se ampliarán en la **sección 2.2.3**.

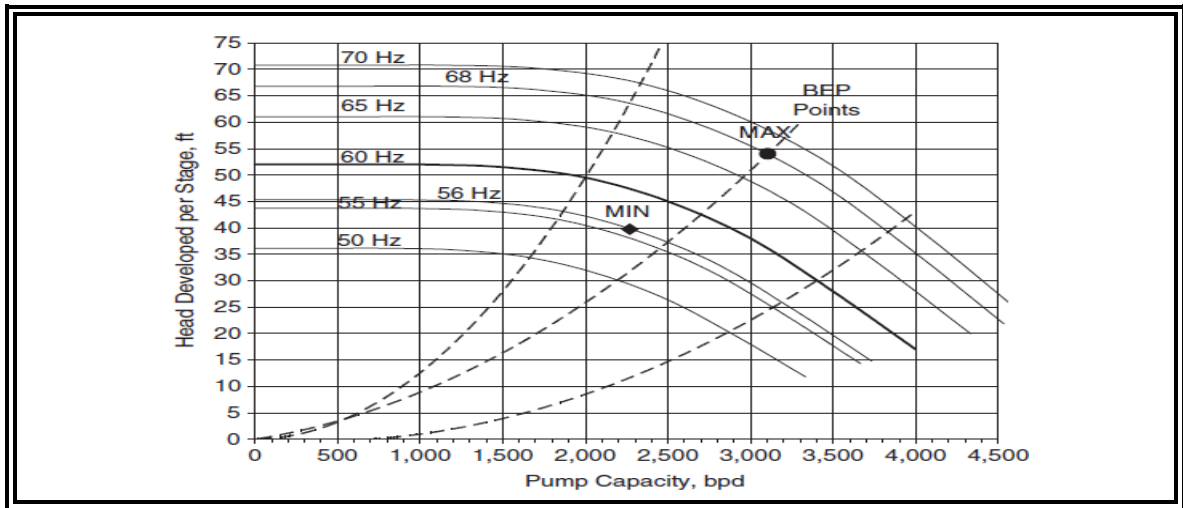
Figura 20. Curva de la bomba (Flujo monofásico)



Fuente: Takács, 2009,56

Por otro lado, usando las leyes de afinidad se pueden obtener diferentes curvas de la bomba para un rango de velocidad variable partiendo de una de referencia (e.g. 60Hz), lo que nos arrojaría un conjunto de curvas a diferentes velocidades en relación al caudal de producción, este conjunto de curvas también es llamado "Tornado" y puede apreciarse un ejemplo en la **figura 21**.

Figura 21. Tornado de la bomba



Fuente: Takács, 2009,244

Todos diseños de bombas electrosumergibles son ideales para el bombeo de líquidos que es donde la BES obtiene su máxima eficiencia operativa (BEP) Bagci (2010), sin embargo Monte Verde (2013) plantea que bajo condiciones de flujo multifásico (líquido-gas) su funcionamiento puede verse afectado drásticamente, debido a la presencia de gas libre (fracción de volumen de gas a la entrada de la bomba), gas disuelto proveniente del líquido, y por generación de vapor en zonas donde la presión cae a la presión de vapor (proceso conocido como “cavitación”) Gülich (2008) , colocando en riesgo la operación de levantamiento.

- **Válvula de cheque y drenaje**

Su función es mantener la columna de fluido por encima de la bomba, evitando su escurrimiento en el tubing hacia la bomba, causando una rotación en reversa de la unidad de bombeo electrosumergible cuando el motor está apagado, ocasionando rotura del eje, quemado del motor y su cable de poder. Este dispositivo se ubica 2 o 3 tubos sobre la cabeza de descarga de la bomba, para casos de instalaciones que no cuenten con la válvula se recomiendan esperar un tiempos iguales a 30 minutos para que el fluido drene hacia la bomba antes que el motor sea reiniciado. Sin embargo, cuando se usa este tipo de válvula es recomendable instalar una **válvula de drenaje** seguidamente para prevenir que el tubing esté lleno cuando se saque el equipo y así obtener la evacuación de todo el fluido que pueda estar en la tubing al momento de sacar las instalaciones del pozo, Peña (2005).

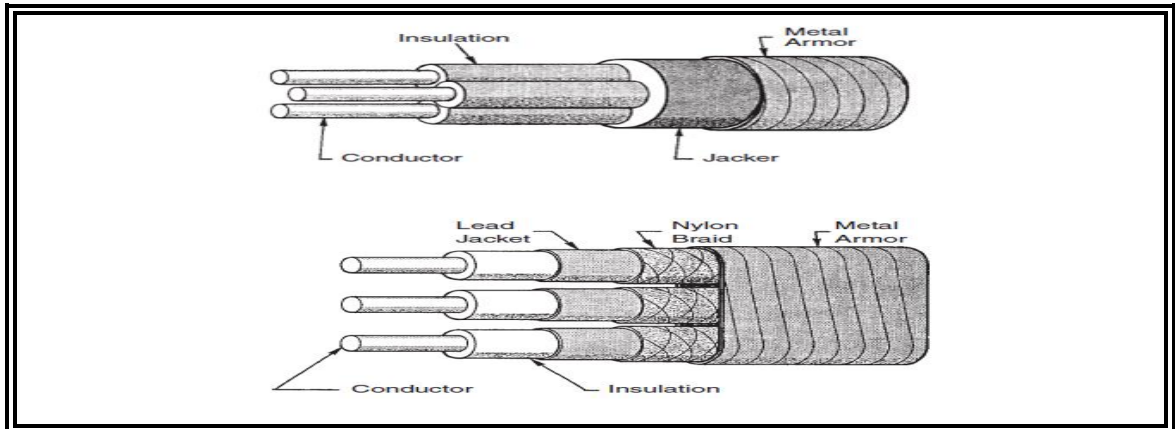
- **Cable de potencia**

Para que una instalación BES funcione es necesario transmitir desde superficie la corriente eléctrica hacia el motor, esto se hace por medio de un cable capaz de resistir las condiciones difíciles (altas temperaturas, fluidos agresivos del ambiente, presencia de hidrocarburos y/o gases) al interior del pozo sin deteriorar sus propiedades dieléctricas rápidamente, Takács (2009). Para cumplir con tal fin, el cable está formado por 3 conductores aislados y enchaquetados dentro de una armadura metálica que evitaría daños. Vale destacar, que una buena selección del tipo y tamaño de cable tiene un impacto directo sobre la instalación de la BES, que podría reducir o alargar su vida operacional. Por lo que se refiere a los componentes y materiales que conforman los cables podríamos organizarlos de la siguiente forma;

- ✓ **Conductores**, su función principal es llevar la corriente alterna para hacer funcionar el motor, estos pueden ser construidos de “aluminio” o “cobre”, siendo este último el más utilizado por su alta conductividad sobre el aluminio que tan solo es del 61% respecto al cobre. Otro factor que podría analizarse es que el aluminio es más económico, sin embargo es mucho más difícil para realizar empalmes complicando su aplicación en las instalaciones BES.
- ✓ **Aislamiento**, recubre cada uno de los 3 conductores para prevenir corto circuitos y fugas de corrientes entre ellos, su construcción se basa en la utilización de *Polipropileno*, *EPDM (Etileno Propileno Dieno Tipo M ASTM)* y *Nitrilo*; materiales termoplásticos que proveen buena resistencia a temperaturas alrededor de los 200 °F y 400 °F, además suministran resistencia química.
- ✓ **Chaqueta**, es una capa protectora que cubre los tres conductores dando una estructura rígida y protección mecánica al cable, previniendo cualquier contacto de los conductores con el exterior. Respecto a su construcción son realizados de *Nitrilo* y *EPDM*, para temperaturas límites de operación de 284 °F y 400 °F, respectivamente.
- ✓ **Armadura**, cubierta externa del cable que suministra una protección mecánica, además ayuda a contener la expansión de los materiales aislantes cuando ellos son expuestos a los fluidos del pozo. Estas armaduras son hechas por lo general de galvanizado, acero inoxidable o monel (aleaciones comerciales de níquel-cobre con proporciones de peso 2:1).

La construcción de los cables se presentan en forma redonda o plana, estas podrían apreciarse en la **figura 22**. Donde, la implementación de uno u otro depende de factores económicos y técnicos como; voltaje, área disponible y condiciones de fondo.

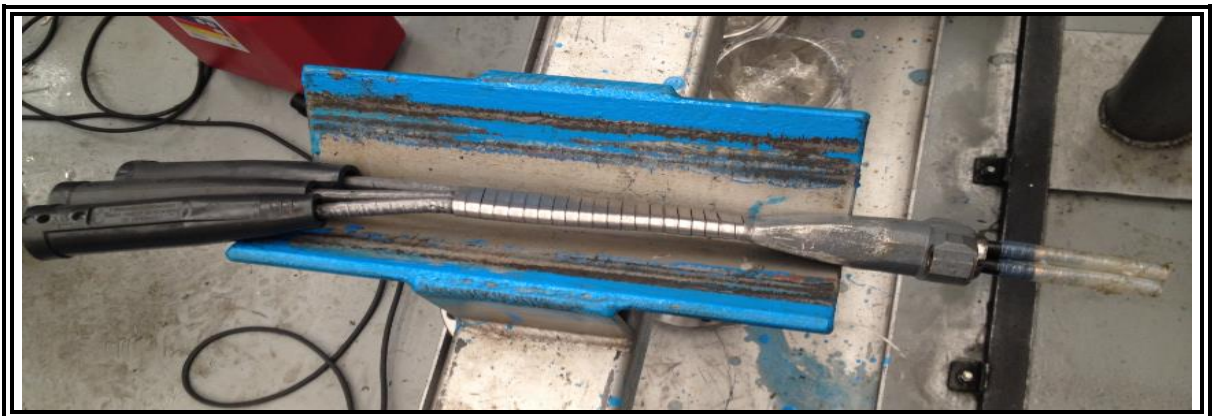
Figura 22. Tipo de cable



Fuente: Takács, 2009,105

Respecto, a la conexión del cable de potencia con el motor se realiza mediante un **Cable de extensión**, este tipo de cable es mucho más delgado garantizando mejor acomodación dentro del pozo. Este cable de extensión va conectado por un extremo al cable de potencia y por otro al cabezal del motor mediante una conexión especial llamada “Pot head” (**ver figura 23**), por otro lado tanto el cable como sus uniones se encuentran protegidos y no permiten el ingreso del fluido del pozo a los conductores ni al cabezal del motor.

Figura 23. Pot Head



2.2.2 Componentes de superficie

- **Transformador**

Su función es reducir (transformador reductor) o aumentar (transformador elevador) el voltaje de la línea de alta tensión al voltaje requerido en la entrada y posteriormente salida del variador de frecuencia o del switchboard.

- **Controlador de frecuencia variable**

Se encarga de controlar o variar la frecuencia de entrada de 60Hz o 50Hz, a un rango más amplio entre 30 - 90Hz. Esta variación la recibe el motor que luego es transmitida por la bomba permitiendo variar la velocidad de operación manteniendo una eficiencia alta del sistema. La capacidad del equipo viene dada en KVA (Relación Kilovoltio-Amperio), indicando la relación máxima que soporta cada equipo, Peña (2005).

- **Caja de venteo**

Es una caja de conexiones que se instala cerca al cabezal del pozo, que se conecta al cable de potencia que brinda energía al motor. La función principal de la caja es ventilar el gas que potencialmente se aloja al interior del cable evitando posibles incidentes (explosiones) en cabeza pozo.

2.3 OPERACIÓN BAJO CONDICIONES ESPECIALES

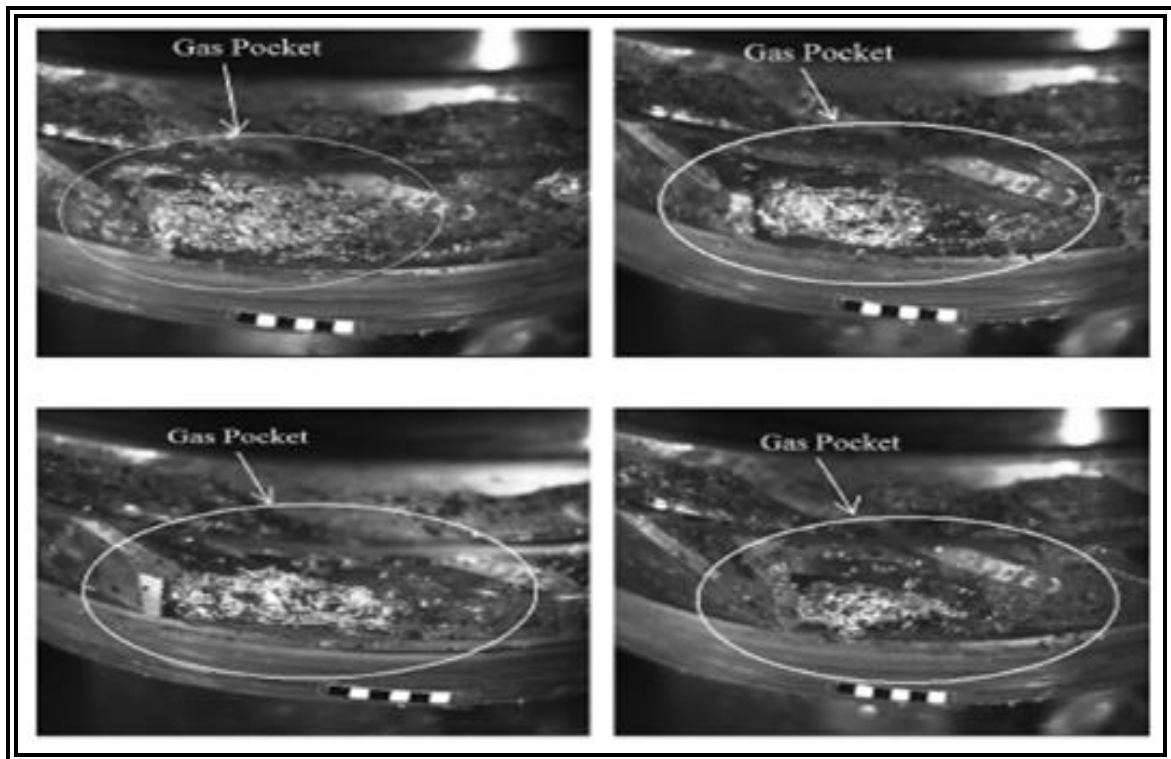
Debido a su diseño compacto y alta eficiencia las bombas electrosumergible son muy utilizadas en gran variedad de aplicaciones en la actualidad, Gamboa (2010). Respecto a la producción o inyección de fluidos bajo condiciones especiales (flujo multifásico, altas temperaturas, fluidos con alta viscosidad), estos factores podrían repercutir negativamente disminuyendo el rendimiento y desempeño del sistema de bombeo electrosumergible por lo que es importante entender su funcionamiento bajo dichas condiciones. A continuación, desarrollamos algunos de los ambientes que se consideran como trabajos bajo condiciones especiales, los cuales requieren la instalación de equipos adicionales o rediseños del sistema para adaptarlo a dichas condiciones.

2.3.1 Flujo Multifásico (Gas-Líquido), La predicción del comportamiento del flujo multifásico en una bomba centrífuga es una tarea difícil debido a la complejidad que encierra un modelamiento de flujo dentro de la bomba, asimismo no existen modelos disponibles que expliquen dicho fenómeno. No obstante, existen correlaciones empíricas que se encuentran en la literatura pero son válidas para las bombas probadas en los rangos experimentales y utilizados para desarrollarlas, Gamboa (2012).

Según Monte Verde (2013), el comportamiento de la BES es afectado por la presencia de gas libre sufriendo una degradación en su comportamiento, por otra parte Duran (2003) explica que este efecto se puede simplificar haciendo un análisis de fuerzas que actúan sobre las burbujas de gas dispersas en una fase continua de líquido rotando alrededor de un eje, las cuales básicamente sufren el efecto de las fuerzas debido al gradiente de presión en la dirección radial, y la fuerza de arrastre que es una función de la diferencia entre la velocidad radial del gas y líquido. Entonces, las burbujas bajo este campo de presión tendrían la tendencia de avanzar hacia la región de menor presión cerca al eje de rotación, haciendo que la velocidad del gas se haga menor que la velocidad del líquido hasta un punto donde se establece el equilibrio entre las fuerzas debido al gradiente de presión y velocidad del deslizamiento del gas.

Para altos valores de deslizamiento, la coalescencia de las burbujas pequeñas a la entrada del impulsor se hace manejable, pero en el caso de burbujas grandes son más difíciles de ser transportadas por la fase líquida debido a que la coalescencia de estas es inducida principalmente a la formación de burbujas estacionarias alargadas, siendo en este punto donde se experimenta la degradación en la bomba que puede ser explicada como el producto del cambio de patrón de flujo, relacionado con una estratificación del flujo o por la formación de burbujas alargadas.

Figura 24. Impulsor en flujo multifásico

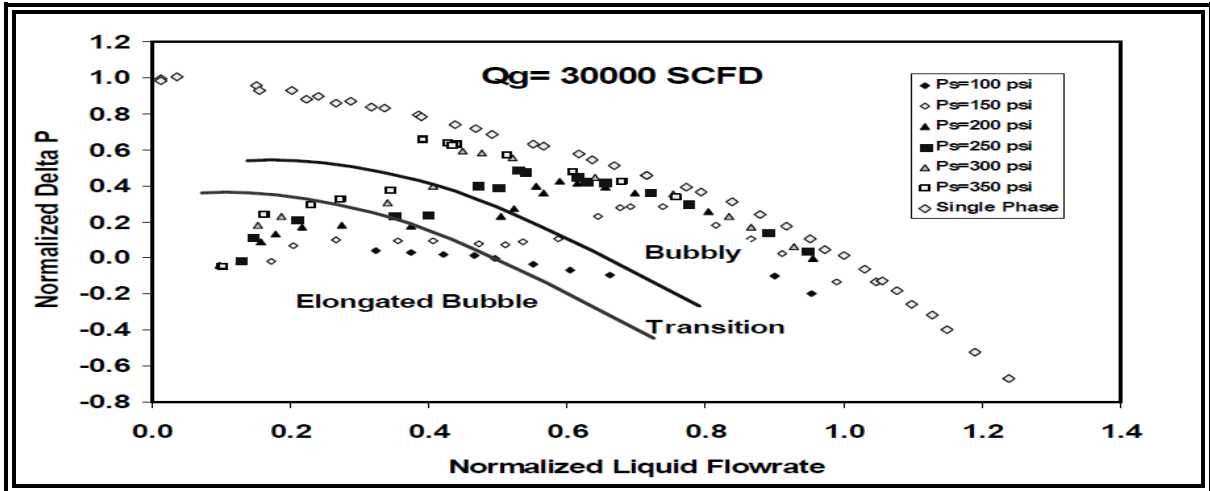


Fuente: Gamboa, 2010,12

En la **figura 24**, muestra al impulsor bajo condiciones de flujo multifásico para diferentes saturaciones de aire (a) 0.2, (b) 0.4, (c) 0.6 (d) 0.8, donde se aprecia la formación de bolsas de gas durante la simulación de flujo multifásico, que darían como resultado una disminución en la cabeza (**ver figura 25**) y posteriormente el bloqueo de la unidad electrosumergible por el fenómeno conocido como “Bloqueo por Gas” que representa el máximo porcentaje de gas que una bomba puede tolerar antes de dejar de producir hidrocarburos hacia superficie, lo que ameritaría la instalación de dispositivos adicionales como el “manejador gas” o “separador de gas” que controlan el gas al interior de la bomba.

Bagci et al (2010) plantea que las bombas electrosumergibles pueden manejar hasta un 20% de gas libre sin necesidad de instalar ningún dispositivo para el control del gas, pero para porcentajes superiores es necesario realizar la inclusión de los sistemas de control de gas para minimizar los efectos sobre las BES.

Figura 25. Curva de la bomba bajo flujo multifásico



Fuente: Duran, 2003,10

2.3.2 Altas Temperaturas, La implementación de los sistema de bombeo electrosumergible en pozos que promedien temperaturas altas, podría ser un desafío debido a que la mayor parte de los componentes del sistema son muy sensibles a temperaturas altas viéndose drásticamente afectados. Takács (2009), plantea que los equipos estándar utilizados en las BES pueden soportar un máximo de temperatura ambiente de 240 °F.

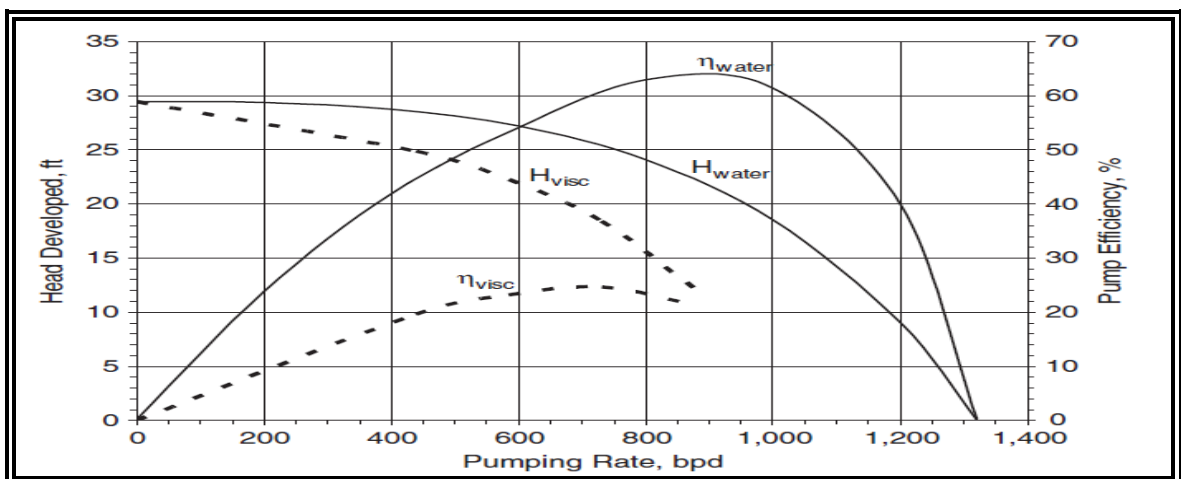
Sin embargo, Tetzlaff (2007) hace referencia que existen algunos avances en términos de equipos podrían mejorar el nivel operacional en ambientes que tenga una temperatura de entre (392 °F – 428 °F) debido al incremento de la profundidad de los pozos en la actualidad. A continuación, se brinda algunos efectos producto de las altas temperaturas en los equipos de bombeo electrosumergible:

- ✓ El uso de elastómero en el sello, implica el debilitamiento y reducción de la vida útil del mismo.
- ✓ Las propiedades dieléctricas de los materiales son deterioradas causando corto circuitos.
- ✓ La resistencia eléctrica del conductor (cable) se incrementa causando un incremento en la pérdida de poder en el cable.
- ✓ La viscosidad del aceite del motor decrece y la capacidad de transporte de carga (Thrust bearing).
- ✓ Fallas en los mecanismos metálicos de la maquinaria de rotación debido a la diferencia de expansión térmica.
- ✓ Formación de incrustaciones dentro y fuera de la superficie del equipo electrosumergible haciéndose más pronunciada.

En el caso del motor resulta ser el componente más sensible a las altas temperaturas, debido a que éste no solo opera bajo condiciones de temperatura ambiente sino que adicionalmente se involucra con el aumento de la temperatura por la transferencia de calor hacia los fluidos levantados generada durante su operación, esto dejaría al motor expuesto al sobrecalentamiento en algunos casos tales como; sobre carga del motor, enfriamiento de insuficiente (velocidad de flujo mínima 1ft/s y velocidad máxima 12 ft/s, para flujo con sólidos abrasivos se recomienda una Velocidad flujo mínima 7ft/s) que pasa en el exterior del motor, la producción de un fluido con un inesperado bajo calor específico dando un enfriamiento insuficiente, incrustaciones en la cara externa del motor que reducen severamente la cantidad de calor disipado por el fluido proveniente del pozo, y la presencia de armónicos en la entrada de voltaje que usualmente son asociados con los VSD (Variable Speed Drive) provenientes de las ondas.

2.3.4 Altas Viscosidades, En el caso del bombeo de emulsiones con altas viscosidades o crudo pesado, se genera una caída en la capacidad de la bomba e incremento de las pérdidas al interior de las etapas, provocando un decrecimiento de la cabeza, eficiencia y aumento de los requerimientos energéticos en la bomba, Takács (2009). En casos donde no se tiene en cuenta el tamaño de la bomba para bombear este tipo de fluidos puede presentarse una sobre carga en el motor y una baja producción de los fluidos provenientes del yacimiento, Monte Verde (2013).

Figura 26. Curva de la bomba bajo fluido viscoso



Fuente: Takács, 2009,125

En la **figura 26**, se expone la comparación entre las curvas que relacionan la cabeza y eficiencia para una bomba, en donde claramente se observa una variación en las curvas debido a la presencia de un fluido viscoso (línea punteada). Hoy en día, existen varios modelos para obtener dichas curvas en función de las encontradas en laboratorio para el agua permitiendo predecir el comportamiento de la cabeza bomba, eficiencia y requerimiento energético.

2.4 DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE⁷

Por lo que se refiere al dimensionamiento de las unidades de bombeo electrosumergible, el conocimiento y confiabilidad de los datos obtenidos en campo es fundamental. Sin embargo, más allá del conocimiento de algunos datos complementarios debe establecerse claramente el flujo volumétrico que se quiere obtener al implementar el sistema, ya que esta sería el punto de partida para la escogencia de cada uno de los componentes y sus posibles configuraciones del sistema. Con el fin de establecer el procedimiento de diseño de la unidad BES se debe tener en cuenta algunas anotaciones o limitaciones al momento de proponer un diseño de este tipo:

- ✓ El pozo produce dos fases líquido-vapor, en donde el líquido podría ser crudo limpio (sin agua libre ni emulsionada), una mezcla de crudo-agua o agua completamente.
- ✓ No existe deterioro de la unidad de bombeo por altas relaciones de flujo volumétrico de gas, siendo este separado una parte naturalmente y otra por medio de un separador de gas de reversa o rotatorio.
- ✓ La viscosidad de los fluidos producidos es muy baja, por lo tanto no es necesario realizar correcciones por efectos viscosos en las curvas de desempeño.
- ✓ La unidad BES es alimentada por medio de corriente alterna con una frecuencia constante.

Una vez se tiene en cuenta las anotaciones anteriores, se hace necesario conocer en lo posible la mayor información del pozo con el fin de realizar en detalle el dimensionamiento de la unidad, a continuación se despliega la información requerida para alcanzar nuestro objetivo:

⁷ Basado en el libro de Takács, G. Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operation, and Maintenance. USA: Elsevier 2009)

A. Estado mecánico

- ✓ Diámetro de los revestimientos.
- ✓ Características de la tubería de producción.
- ✓ Intervalos de las perforaciones y sus espesores.

B. Datos de Producción

Actuales

- Presión estática del pozo a nivel de referencia.
- Presión en cabeza del pozo.
- Presión en el revestimiento (CHP).
- Tasa de producción.
- Profundidad del punto medio de las perforaciones.
- Temperatura del fondo de pozo (BHT).
- Relación gas-aceite (GOR).
- Corte de agua.

Proyección

- Presión estática del pozo a nivel de referencia.
- Presión en cabeza del pozo.
- Tasa de producción (deseada).
- Nivel de sumergencia de la bomba.
- Temperatura del fondo de pozo (BHT).
- Relación gas-aceite (GOR).
- Corte de agua.

C. Propiedades de los fluidos a producir

- ✓ Gravedad específica del agua.
- ✓ Gravedad API del aceite.
- ✓ Gravedad específica del gas.
- ✓ Presión de burbuja del aceite (P_b).
- ✓ Viscosidad del aceite (μ_0).

D. Fuentes de energía

- ✓ Voltaje disponible en superficie.
- ✓ Frecuencia en superficie.

E. Aspectos potenciales de falla

- ✓ Altas temperaturas de los pozos.
- ✓ Producción de arena.
- ✓ Formación de escamas o incrustaciones.
- ✓ Formación de emulsiones.
- ✓ Depósito de parafinas.
- ✓ Numerosas zonas productoras.
- ✓ Corrosión.

Recolectada la información necesaria para el diseño se procede a realizar los cálculos del dimensionamiento el cual será presentado en tres partes fundamentales:

2.4.1 Dinámica (TDH), Halle la gravedad específica del líquido a extraer (mezcla de agua libre, agua emulsionada y crudo) por medio de la **ecuación 13**:

$$\gamma_l = (1 - WOR) * \gamma_o + WOR * \gamma_w \dots \dots \dots \text{(Ecuación 13)}$$

$$\gamma_o = \frac{141.5}{\text{°API} + 131.5} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 14)}$$

Dónde:

WOR = Corte de agua o relación agua libre-crudo

γ_o = Gravedad específica del crudo

γ_w = Gravedad específica del agua libre producida

API = Gravedad API del crudo

Por medio de la **ecuación 15**, obtenga la presión del reservorio:

$$P_R = 0.433 * (L_{perf} - L_{stat}) * \gamma_l \dots \dots \dots (\text{Ecuación 15})$$

Dónde:

- L_{perf} = Profundidad media o total de las perforaciones (ft)
- L_{stat} = Profundidad o nivel estático del fluido en el anular (ft)
- γ_l = Gravedad específica del fluido a producir

A través de la P_R calcule la presión de fondo fluyente (P_{wf}), con la tasa de producción y el índice de productividad proporcionados por una prueba.

$$P_{wf} = P_R - (q_{probe}/IP) \dots \dots \dots (\text{Ecuación 16})$$

Dónde:

- P_R = Presión del reservorio o yacimiento, psia
- q_{probe} = Tasa volumétrica de líquido producido durante una prueba, STB/d
- IP = Índice de productividad, STB/d/(psi.d)

Calcule la presión en el Intake de la bomba (**PIP**):

$$PIP = P_{wf} - 0.433 * (L_{perf} - L_{pump}) * \gamma_l \dots (\text{Ecuación 17})$$

Dónde:

- P_{wf} = Presión de fondo fluyente (psia)
- L_{perf} = Profundidad media o total de las perforaciones (ft)
- L_{pump} = Profundidad a la cual se ubicará la BES (ft)
- γ_l = Gravedad específica del fluido a producir

Encuentre el nivel dinámico de fluido a producir (L_{dyn}), que corresponde al nivel que tendrá el fluido en el espacio anular una vez la bomba electrosumergible estabiliza su tasa de producción:

$$L_{dyn} = \frac{L_{set}grad_o + CHP - PIP}{grad_o - grad_g} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 18)}$$

Dónde:

- L_{pump} = Profundidad a la cual se ubicará la BES (ft)
- CHP = Presión en la cabeza del casing o revestimiento (psia)
- PIP = Presión en el intake o punto de succión de fluidos (psia)
- $grad_o, grad_g$ = Gradientes de presión crudo y gas en espacio anular (psi/ft)

Obtenga la cantidad de gas disuelto en el líquido producido en el punto de succión (R_s) por medio de la correlación de Standing para la presión por debajo del punto de burbuja:

$$y = 0.00091 * T (^{\circ}F) - 0.0125 * (^{\circ}API) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 19)}$$

$$R_s = \gamma_g * \left(\frac{PIP}{18 \times 10^y} \right)^{1.205} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 20)}$$

Dónde:

- T = Temperatura de los fluidos en el punto de succión ($^{\circ}F$)
- API = Gravedad API del crudo
- y = Variable dependiente de la temperatura de los fluidos en la succión y $^{\circ}API$
- PIP = Presión en el intake o punto de succión de fluidos (psia)
- γ_g = Gravedad específica del gas

Posteriormente halle el factor volumétrico del crudo a la presión de intake por medio de la correlación de Standing:

$$F = R_s \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0,5} + 1.25 * T (^{\circ}F) \dots \text{(Ecuación 21)}$$

$$B_o = 0.972 + (1.47 \times 10^{-4}) * F^{1.175} \dots \text{(Ecuación 22)}$$

Dónde:

R_s = Relación gas disuelto-crudo (SCF/STB)

T = Temperatura de los fluidos en el punto de succión ($^{\circ}F$)

γ_o = Gravedad específica del crudo

γ_g = Gravedad específica del gas

F = Factor dependiente de T , R_s , γ_g y γ_o

El cálculo de la tasa de producción de líquido en el intake de la bomba se obtiene por medio de la **ecuación 23**.

$$q'_l = q_o B_o + q_w B_w \dots \text{(Ecuación 23)}$$

Dónde:

B_o = Factor volumétrico de aceite en el punto de succión (bbl/STB)

B_w = Factor volumétrico de agua en el punto de succión (bbl/STB)

q_o = Tasa de producción de crudo o emulsión (STB/d)

q_w = Tasa de producción de agua libre (STB/d)

Encuentre la TDH para las condiciones dadas, conociendo inicialmente la caída de presión desarrollada en la sarta de producción ΔH_{fr} por medio de una correlación.

$$\Delta H_{fr} = \Delta h_{fr} \times L_{pump} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 24)}$$

Dónde:

Δh_{fr} = Perdida o caída de presión relativa (psi/ft)

L_{pump} = Profundidad a la cual se ubicará la BES (ft)

Para el diseño se plantea la correlación **Hazen – Williams** para el cálculo de la caída de presión a través de la tubería, siendo aplicable para diversos materiales de tubería con flujo monofásico principalmente y con un buen grado de exactitud cuando el fluido transportado tiene similitud con el agua, siendo este la sustancia por defecto para la probar las BES. A continuación se presenta la correlación Hazen-Williams:

$$\Delta H_{fr HW} = 0.015 \left(\frac{q'_i}{C} \right)^{1.85} \frac{L_{pump}}{ID_t^{4.86}} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 25)}$$

Dónde:

ID_t = Diámetro interno de la tubería de producción (pulg)

L_{pump} = Profundidad a la cual se ubicará la BES (ft)

q'_i = Flujo volumétrico de líquidos que ingresa a la BES (STB/d)

Constante (C), depende del material de fabricación de la tubería y la longitud total de la sarta de producción, por otro lado no considera el efecto de la viscosidad promedio del fluido ni la rugosidad específica del material.

Tabla 5. Selección de constante Hazen – Williams

Material, Clase y Estado del tubo	C
Tuberías de plástico nuevas	150
Tuberías muy pulidas (fibrocemento)	140
Tuberías de hierro nuevas y pulidas	130
Tuberías de hormigón armado	128
Tuberías de acero nuevas	120
Tuberías de palastro roblonado nuevas	114
Tuberías de acero usadas	110
Tuberías de fundición nuevas	100
Tuberías de palastro roblonado usadas	97
Tuberías de fundición usadas	90-80

Fuente: Takács, 2009

Finalmente se procede a hallar la cabeza dinámica total (TDH):

$$h_o = \frac{2.31(WHP-CHP)}{\gamma_l} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 26)}$$

$$TDH = L_{dyn} + \Delta H_{fr HW} + h_o \dots\dots\dots \text{(Ecuación 27)}$$

Dónde:

- CHP* = Presión en la cabeza del casing o revestimiento (psia)
- h_o* = Diferencial de presión en cabeza entre el pozo y el revestimiento (ft)
- L_{dyn}* = Nivel dinámico de fluido (ft)
- ΔH_{fr HW}* = Pérdida de presión a lo largo de la tubería de producción (ft)
- WHP* = Presión en cabeza de pozo (psia)
- γ_l* = Gravedad específica del fluido a producir

2.4.2 Presencia de Gases, se tratará lo concerniente a la colocación de la instalación de separadores o tratadores de gas acoplados entre el sello y las etapas de la BES, ya que estos representan un factor potencial en el deterioro o desgaste de las unidades.

Con el fin de obtener la cantidad de gas que fluye a través de las etapas en la bomba electrosumergible se utiliza la **ecuación 28**, criterio importante para decidir la implementación del uso de un separador o manejador de gas.

$$q'_g = q_o(GOR - R_s)B_g \dots \dots \dots \text{(Ecuación 28)}$$

Dónde:

q_o = Tasa de producción de crudo o emulsión (STB/d)

GOR = Relación de producción gas-crudo (SCF/ STB)

R_s = Relación gas disuelto-crudo (SCF/ STB)

B_g = Factor volumétrico de gas (CF/SCF)

En el caso de que se decida no incluir separadores o manejadores de gas dentro del sistema de levantamiento, es posible calcular la eficiencia de separación natural del gas a través de la región anular utilizando el modelo propuesto por Alhanati (1993):

$$\eta_n = 100 \left[\frac{v_b}{v_b + v_{sl}} \right] \dots \dots \dots \text{(Ecuación 29)}$$

Donde la eficiencia de la separación que ocurre dentro del anular del pozo y depende de la velocidad superficial del líquido (v_{sl}) y de la velocidad terminal de ascenso de las burbujas de gas (v_b) medidas en unidades ft/seg.

- Velocidad superficial del líquido, v_{sl}

$$A = 0.055(ID_c^2 - OD_t^2) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 30)}$$

$$v_{sl} = 6.5 \times 10^{-5} \frac{q_l}{A} \left[\frac{B_o}{1+WOR} + B_w \frac{WOR}{1+WOR} \right] \dots \dots \dots \text{(Ecuación 31)}$$

Dónde:

- A = Área anular entre el revestimiento y la tubería de producción (ft²)
- B_o = Factor volumétrico de aceite en el punto de succión (bbl/STB)
- B_w = Factor volumétrico de agua en el punto de succión (bbl/STB)
- ID_c = Diámetro interno del revestimiento (pulg)
- OD_t = Diámetro exterior o nominal de la tubería de producción (pulg)
- q_l = Tasa de producción de líquidos (STB/d)
- WOR = Corte de agua o relación agua libre-crudo

- Velocidad terminal de ascenso de las burbujas de gas, v_b

$$v_b = \sqrt{2} \sqrt[4]{\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2}} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 32)}$$

Dónde:

- σ = Tensión interfacial (lb/seg²)
- g = Aceleración de la gravedad (ft/seg²)
- ρ_l = Densidad del líquido (lb/ft³)
- ρ_g = Densidad del gas (lb/ft³)

Para el cálculo de la densidad de la fase gaseosa se realiza por medio de las siguientes fórmulas.

$$B_g = 0.0283 \frac{ZT_a}{PIP} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 33)}$$

$$\rho_g = \frac{0.0764\gamma_g}{B_g} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 34)}$$

Dónde:

- B_g = Factor volumétrico de gas (CF/SCF)
- PIP = Presión en el intake o punto de succión de fluidos (psia)
- T_a = Temperatura de los fluidos en el punto de succión (°R)
- γ_g = Gravedad específica del gas
- Z = Factor de compresibilidad del gas

Por medio de la correlación **Hankinson-Thomas-Phillips**, se obtiene el factor de compresibilidad del gas por medio de las propiedades pseudo-reducidas.

$$P_{pc} = 709.6 - 58.7\gamma_g \dots\dots\dots \text{(Ecuación 35)}$$

$$P_{pr} = \frac{PIP}{P_{pc}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 36)}$$

$$T_{pc} = 170.5 + 307.3\gamma_g \dots\dots\dots \text{(Ecuación 37)}$$

$$T_{pr} = \frac{T_a}{T_{pc}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 38)}$$

$$Z = 1 - \frac{3.52P_{pr}}{10^{0.9813T_{pr}}} + \frac{0.274P_{pr}^2}{10^{0.8157T_{pr}}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 39)}$$

Dónde:

- P_{pc} = Presión pseudo-crítica del gas (psia)
- P_{pr} = Presión pseudo-reducida del gas
- T_{pc} = Temperatura pseudo-crítica del gas (°R)
- T_{pr} = Temperatura pseudo-reducida del gas
- γ_g = Gravedad específica del gas

Utilizando la **ecuación 40**, obtenemos la densidad de la fase líquida.

$$\rho_l = 62.4 \left[\frac{\gamma_o}{B_o} \left(\frac{1}{1+WOR} \right) + \frac{\gamma_w}{B_w} \left(\frac{WOR}{1+WOR} \right) \right] \dots \dots \dots \text{(Ecuación 40)}$$

Dónde:

B_o = Factor volumétrico de aceite en el punto de succión (bbl/STB)

B_w = Factor volumétrico de agua en el punto de succión (bbl/STB)

γ_o = Gravedad específica del crudo

γ_w = Gravedad específica del agua libre producida

WOR = Corte de agua o relación agua libre-crudo

Posterior al cálculo de la eficiencia del proceso de separación natural del gas presente en el fluido producido, se obtiene la tasa volumétrica efectiva de gas que ingresa en el punto de succión de la bomba en unidades compatibles con las que se reportan normalmente el flujo de líquidos en campo, es decir en STB/d.

$$q'_{ing} = \frac{q'_g}{5.615} \left(1 - \frac{\eta_n}{100} \right) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 41)}$$

Dónde:

η_n = Eficiencia del proceso de separación natural del gas (%)

q'_g = Flujo volumétrico de gas que ingresa a la BES (SCF/d)

Una vez se obtiene la tasa volumétrica o caudal total que ingresa a la bomba electrosumergible se sigue el procedimiento calculando el flujo volumétrico total de los fluidos que ingresan al sistema de levantamiento por medio de la siguiente relación.

$$q_l' = q_o (B_o + B_w WOR) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 42)}$$

$$q'_t = q'_l + q'_{ing} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 43)}$$

Dónde:

B_o = Factor volumétrico de aceite en el punto de succión (bbl/STB)

B_w = Factor volumétrico de agua en el punto de succión (bbl/STB)

q'_{ing} = Flujo volumétrico de gas que ingresa a la BES (STB/d)

q'_l = Flujo volumétrico de líquidos que ingresa a la BES (STB/d)

Finalmente se usa el criterio de la correlación de Turpin para evaluar la necesidad de usar un separador de gas.

$$\Phi = \frac{2000 \frac{q'_g}{q'_l}}{3PIP} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 44)}$$

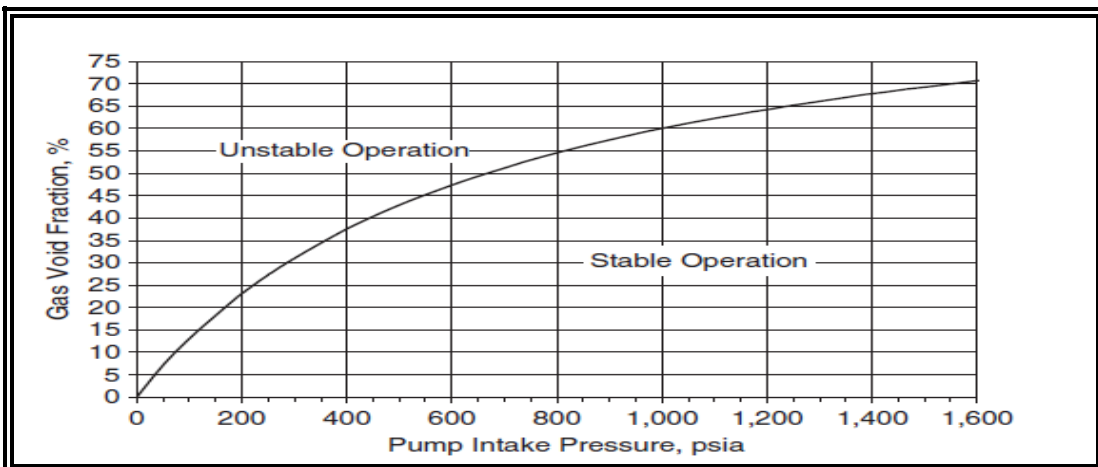
Dónde:

PIP = Presión en el intake o punto de succión de fluidos (psia)

q'_g = Flujo volumétrico de gas que ingresa a la BES (SCF/d)

q'_l = Flujo volumétrico de líquidos que ingresa a la BES (STB/d)

Figura 26. Correlación de Turpin



Fuente: Takács, 2009,139

Para el caso de $\phi < 1$ no es necesario el uso de un separador de gas mientras que si $\phi > 1$ se hace obligatoria su instalación. En la implementación de separadores de gas se deberá recalcular la tasa de volumétrica de gas que pasa por la succión de la bomba incluyendo un término correspondiente a la eficiencia alcanzada por el separador elegido η_{sep} y evaluar nuevamente el criterio de Turpin.

$$q'_{ing} = \frac{q'_g}{5.615} \left(1 - \frac{\eta_n}{100}\right) \left(1 - \frac{\eta_{sep}}{100}\right) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 45)}$$

Dónde:

η_n = Eficiencia del proceso de separación natural del gas (%)

η_{sep} = Eficiencia del proceso de separación alcanzada por un separador (%)

q'_g = Flujo volumétrico de gas que ingresa a la BES (SCF/d)

En el caso de producción de gas a la presión donde se ubica la succión en las unidades de bombeo electrosumergible, Bearden (1986) establece un procedimiento a partir de ciertos parámetros determinar la presión correcta de succión a la cual los fluidos deben ser introducidos dentro de la unidad sin deterioro o desgaste alguno de los componentes.

2.4.3 Bomba Electrosumergible, En esta sección se exponen los criterios y cálculos relacionados directamente con la bomba electrosumergible en cuanto a capacidad y requerimientos, asimismo se establecen criterios para selección teniendo en cuenta los caudales óptimos de operación, eficiencia y consumo energético, para alcanzar tal fin es importante tener en cuenta lo siguiente :

Diámetro de la bomba, uno de los criterios principales que debe considerarse en la bomba es su diámetro nominal, ya que éste permitirá identificar si es posible bajarla hasta la profundidad deseada en un diámetro interno del revestimiento o casing determinado ($OD < ID_c$). Al momento de seleccionar varias bombas del mismo o distinto proveedor, las consideraciones económicas adquieren una importancia significativa debido a que teniendo una selección de bombas y motores con parámetros similares respecto a caudal de operación, cabeza y potencia requerida, los componentes de las bombas de menor diámetros implican una inversión mayor lo que inclinaría la decisión hacia las bombas electrosumergible de diámetros grandes.

Tipo de bomba, Las bombas electrosumergible difieren entre si principalmente en el diseño de sus etapas, refiriéndose a la forma, altura, ángulo (empuje axial o radial), longitud y numero de paletas. Siendo este diseño muy sensible a la presencia de gas, taponamiento por sólidos abrasivos, corrosión, pérdidas o intermitencia en la calidad del suministro energético. Sin embargo, al momento de seleccionar una bomba se requiere que la tasa de producción deseada se encuentre dentro del rango de operación óptimo de operación.

En el caso que se dispongan de varios tipos de bombas que cumplen con los requerimientos de producción o inyección, se puede seguir las siguientes recomendaciones para facilitar su elección:

- ✓ Comparar el caballaje o potencia requerida y escoja la bomba que requiera el motor de menor capacidad.
- ✓ Si no existe precisión o confiabilidad en los datos de aporte del pozo puede escoger la bomba que tenga la curva de levantamiento o cabeza ($Q - H$ ó $q - H$) más pronunciada ya que le permitirá tener un levantamiento adicional para el flujo volumétrico deseado incluso si la cabeza dinámica total difiere de la obtenida en pasos anteriores.
- ✓ Cuando se bombean fluidos con concentraciones de gas significativas, escoger una bomba con curva de desempeño empinada ($Q - H$ ó $q - H$) puede ser ventajoso ya que disminuirá el efecto de la producción de gas sobre la capacidad de la bomba.
- ✓ Si los fluidos producidos son crudos pesados se deberá escoger una bomba con un desempeño superior al escogido idealmente ya que por efectos viscosos el levantamiento de estos requerirá de un mayor esfuerzo o desempeño de la instalación.

Posterior a la evaluación de estos criterios se deben evaluar otros dos criterios adicionales para la selección del equipo o configuración a implementar: (1) número de etapas totales requeridas para lograr llevar los fluidos hasta la superficie, (2) revisión del estrés o resistencia mecánica que desarrolla la bomba con la instalación propuesta.

Número de etapas requeridas:

$$Stages = \frac{TDH}{H/stg} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 46)}$$

Dónde:

TDH = Cabeza dinámica total, ft

H/stg = Levantamiento unitario de la BES relativa al caudal deseado, ft/etapa

Potencia requerida por la bomba:

$$BHP_{pump} = Stages \times BHP/stg \times \gamma_l \dots \dots \dots \text{(Ecuación 47)}$$

Dónde:

BHP/stg = Potencia al freno unitaria requerida por la BES (HP/etapa)

$Stages$ = Número de etapas requeridas

γ_l = Gravedad específica del fluido a producir

Por otro lado, la potencia al freno requerida por la BES calculada anteriormente debe ser menor a la potencia requerida por el eje de la misma. En algunos casos las curvas de potencia al freno requeridas incluyen las necesidades energéticas de los sellos o separadores de gas.

Resistencia mecánica de la bomba o máxima presión interna por medio de:

$$P_{max} = \left(\frac{Head}{stage} \right)_{max} Stages \times grad_l \dots \dots \dots \text{(Ecuación 48)}$$

Dónde:

$\left(\frac{Head}{stage} \right)_{max}$ = Levantamiento unitario de la BES relativo a 0 STB/d (ft/etapa)

$Stages$ = Número de etapas requeridas

$grad_l$ = Gradiente de presión específico del fluido a producir (psi/ft)

Se debe tener en cuenta que las bombas electrosumergibles son fabricadas en chaquetas o revestimientos (housing) capaces de albergar un número discreto de etapas, por tal razón la bomba que menor número de etapas requiera deberá ser la seleccionada.

2.4.4 Motor, en la *Selección del protector* para bombas electrosumergible que pertenecen a la categoría de etapas flotantes las fuerzas axiales que se producen son absorbidas por las arandelas de las etapas. Por otro lado también se produce un empuje hacia abajo (downthrust) en el eje de la bomba debido al exponerse a grandes presiones diferenciales, en este tipo de bombas se calcula la carga o fuerza que recibe el cojinete de empuje del motor por medio de la siguiente fórmula:

$$F_{TB} = 0.785P_{max}d_{shaft}^2 \dots\dots\dots(\text{Ecuación 49})$$

Dónde:

d_{shaft} = Diámetro del eje de la bomba (pulg)

P_{max} = Máxima presión interna permitida por la BES (psi)

Por otro lado, están las bombas de etapas fijadas (compresión) al eje donde fuerzas axiales que se producen son significativas, estas son transferidas y absorbidas finalmente por el cojinete de empuje del motor a través del eje, normalmente los proveedores de ésta clase de bombas proporcionan dichos datos para apagados repentinos en unidades de libras por etapa para incrementar la seguridad en ellas.

El consumo de potencia requerido por el protector usualmente es incluido en las curvas de potencia, sin embargo en algunos casos no es incluido y deberá seleccionarse un motor que cumpla con los requerimientos de potencia totales del sistema, de igual forma para instalaciones en las que se manejen cantidades considerables de gas se deberá incluirse el consumo de potencia requerido por el separador de gas. Asimismo, se puede obtener la potencia total requerida del sistema mediante la **ecuación 50**:

$$BHP_{system} = BHP_{pump} + BHP_{seal} + BHP_{Sep Gas} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 50)}$$

Dónde:

BHP_{pump} = Potencia al freno requerida por la BES (HP)

BHP_{seal} = Potencia al freno requerida por el sello o protector del motor (HP)

$BHP_{Sep Gas}$ = Potencia al freno requerida por el separador de gas (HP)

Diámetro nominal de motor, la selección del motor en cuanto al diámetro nominal acarrea consigo implicaciones técnicas (disipación de calor) y económicas (tamaño), respecto a lo técnico es necesario disipar el calor generado al interior del motor a través del paso del fluido de producción sobre el housing del motor, haciéndose necesario calcular la velocidad superficial de flujo que circulan en el espacio anular en unidades de campo (ft/seg):

$$v_l = 0.0119 \left[\frac{q_l'}{ID_c^2 - OD_m^2} \right] \dots \dots \dots \text{(Ecuación 51)}$$

Dónde:

ID_c = Diámetro interno del revestimiento (pulg)

OD_m = Diámetro externo del motor a implementar (pulg)

q_l' = Flujo volumétrico de líquidos que ingresa a la BES (STB/d)

Seleccionar un motor respecto a su diámetro nominal implicaría dificultades en la etapa de instalación, ya que al bajar el equipo se puede desgastar el cable de potencia al generarse fricción con el revestimiento del pozo que provocaría daños en los elementos que conforman el sistema que representaría servicios posteriores de workover.

Eficiencia del motor, en cuanto a la eficiencia del motor debe seleccionar aquel motor que posea la mejor eficiencia posible, ya que no toda la potencia transferida al motor se traducirá en trabajo o energía transferida a la bomba, sello, separador de gas y demás componentes dentro del sistema; en consecuencia una parte de la potencia transferida al motor se verá reflejada en calor generado hacia el exterior la cual puede ser removido como se mencionó anteriormente por el flujo ascendente de los fluidos producidos por el espacio anular.

Combinación voltaje-amperaje del motor, el criterio principal para escoger el voltaje del motor es la profundidad de instalación de la unidad de bombeo debido a que incide en la determinación de la caída de voltaje que se desarrolla en el cable eléctrico. Para profundidades significativas implican longitudes de cable superiores y elevadas pérdidas de voltaje, lo que desencadena en grandes proporciones de energía eléctrica desperdiciada y bajas eficiencias del sistema. En dichas condiciones, seleccionar un motor con alto voltaje de placa puede ser beneficioso pues permitirá reducir las pérdidas de energía, asimismo el uso de altos voltajes es benéfico para manejar fluidos con altas temperaturas en el pozo debido a que los motores de alto voltaje necesitan una menor intensidad de corriente permitiendo generar el mismo caballaje, reducir la temperatura de operación del cable e incrementar su vida útil.

$$I = I_{np} \frac{BHP_{system}}{HP_{np}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 52)}$$

Dónde:

BHP_{system} = Potencia al freno requerida por el sistema (HP)

HP_{np} = Potencia de placa del motor (HP)

I_{np} = Intensidad de corriente o amperaje de placa del motor (Amperio)

Selección del cable de potencia, para el diseño e instalación de unidades de bombeo electrosumergible la selección del cable de potencia debe determinarse conociéndose los aspectos principales del mismo:

- **Longitud del Cable**, la longitud del cable se determina conociéndose la profundidad a la cual se bajará la unidad BES, usualmente se adiciona una longitud mayor a la determinada con el fin de garantizar una conexión segura entre el equipo de superficie y el motor de la unidad.
- **Tamaño del Cable**, respecto al tamaño es importante considerar el diámetro y la caída de voltaje desarrollado a través del cable. El tamaño debe ser escogido de tal manera que éste encaje dentro del espacio anular entre el revestimiento y la unidad BES. Asimismo, la caída de voltaje que ocurre en el cable es una función entre el tamaño del material conductor e intensidad de corriente del motor, además es un indicador directo de las pérdidas de energía que ocurren a lo largo del cable.

Para el cálculo de la resistencia total del cable de potencia corregido a la temperatura promedio del pozo, se usa la siguiente ecuación:

$$R_T = \frac{L_c r}{1000} [1 + 0.00214(BHT - 77)] \dots \dots \dots \text{(Ecuación 53)}$$

$$\Delta U_{cable} = 1.732 R_T I \dots \dots \dots \text{(Ecuación 54)}$$

Dónde:

- BHT = Temperatura a fondo de pozo (°F)
- L_c = Longitud del cable (ft)
- r = Resistencia del conductor a 77°F (ohm/1000 ft)
- I = Intensidad de corriente requerida por el motor (Amperio)
- R_T = Resistencia total del cable (ohm)

Posterior a la determinación de la resistencia total y la caída de voltaje alrededor del cable debe obtenerse la pérdida de poder conociendo la intensidad de corriente requerida por el motor y la resistencia total del cable de potencia:

$$\Delta P_c = \frac{3I^2 R_T}{1000} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 55)}$$

Dónde:

- I = Intensidad de corriente requerida por el motor, Amperio
- R_T = Resistencia total del cable, ohm

Revisión del arranque del motor, en el arranque del motor la unidad BES desarrolla una alta intensidad de corriente cercana a cinco veces la intensidad de corriente nominal o de placa. Así la relación de voltaje para arranque en los motores normalmente se encuentra alrededor de 50%, esta se puede evaluar la **ecuación 56**; permitiendo conocer el desempeño del motor y su respectivo cable de potencia.

$$\frac{U_{start}}{U_{np}} = \frac{U_{np} - 4IR_T}{U_{np}} \dots\dots\dots (\text{Ecuación 56})$$

Dónde:

- I = Intensidad de corriente requerida por el motor (Amperio)
- R_T = Resistencia total del cable (ohm)
- U_{np} = Voltaje de placa del motor (voltio)

La selección del cable será la adecuada si la relación de voltaje para arranque supera ampliamente el 50% de tal manera que la mayoría del voltaje de placa logre alcanzar las terminales del motor.

Selección del tablero de control y sus transformadores, al momento de seleccionar los tableros de control y sus transformadores, se requiere conocer la potencia máxima requerida por la unidad de bombeo en superficie, donde este valor es una función del voltaje requerido en superficie y de la intensidad de corriente actual para el motor.

A su vez el voltaje en superficie será una función del voltaje de placa presentado en el motor y de la pérdida de voltaje que se experimenta en el cable de potencia mediante la obtención de la resistencia total del cable y la intensidad de corriente actual requerida por el motor. De acuerdo a lo anterior se presentamos las ecuaciones para los cálculos respectivos:

$$U_{surf} = U_{np} + \Delta U_{cable} \dots\dots\dots (\text{Ecuación 57})$$

$$P_{surf} = 0.001732 U_{surf} I \dots\dots\dots (\text{Ecuación 58})$$

Dónde:

- I = Intensidad de corriente requerida por el motor (Amperio)
- ΔU_{cable} = Caída de voltaje a lo largo del cable (voltio)
- U_{np} = Voltaje de placa del motor (voltio)
- U_{surf} = Voltaje requerido desde superficie (voltio)
- P_{surf} = Potencia requerida en superficie (kVA)

3. CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se presenta toda una descripción general del campo y de los componentes que conforman el sistema de bombeo electrosumergible que son objeto de estudio, pasando por una identificación de las fallas a raíz de las intervenciones realizadas a los sistemas instalados en los pozos. Posteriormente, se muestra una identificación de las posibles soluciones al problema, los cuales darán como resultado la proposición del rediseño. Asimismo, se realiza un análisis comparativo que involucra componentes del sistema (Bombas y motores).

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CAMPO

El campo colombiano objeto de estudio del rediseño de los sistemas de bombeo electrosumergible, hace parte de la Asociación Nare y se encuentra ubicado en la cuenca del Valle Medio del Magdalena en el Municipio de Puerto Boyacá, dentro de la unidad hidrológica de la Formación Zorro. En la actualidad, este campo cuenta con una producción de hidrocarburos promedio de 12.700 BPD con una gravedad °API de 13.5, distribuida en 474 pozos productores correspondiente a; 448 pozos con bombeo mecánico y 26 con sistemas PCP, a profundidades promedio de entre 2000-3000 ft. En relación a la extracción de agua, estos se realizan por medio de bombas electrosumergibles tipo “GRUNDFOS SP 125 – 5” y motores “Franklin Electric” de 100 HP- 460 V, instaladas en 4 pozos con profundidades promedio de 1108 ft donde la tasa máxima de agua producida permitida bajo regulaciones ambientales por pozo es 25 L/seg equivalente a 13.600 BPD (**ver anexo I**) (**ver figura 27**).

Figura 27. Instalación de bomba y motor



Fuente: Compañía operadora

El agua producida en el campo tiene como fin ser implementada para solucionar las necesidades hídricas del campo que comprenden: campamentos y operaciones de producción de hidrocarburos, en el caso de los campamentos; se utilizada para uso doméstico no apta para consumo humano y en la producción en forma de vapor de agua por medio de la implementación de generadores de vapor estáticos o portátiles (**ver figura 28**), donde posteriormente el vapor es inyectado en 31 pozos en el campo por mes con el fin de disminuir la viscosidad del crudo y favorecer su extracción hacia superficie.

Figura 28. Generadores estáticos



Fuente: Compañía operadora

Previo pasó del agua al generador, se realizan procesos para la disminución de dureza del agua extraída con el fin de que esta no afecte los generadores y calderas, debido a que el agua extraída presenta patrones de incrustaciones (**ver sección 3.3**).

3.2 SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BES – COMPONENTES

Para describir cada uno de los elementos que conforman el sistema de bombeo electrosumergible, en la sección **3.2.1** y **3.2.2** se presenta algunos de los componentes tanto de subsuelo y superficie que se encontraron instalados en los pozos de agua.

3.2.1 Equipos de Subsuelo

- **Motores**, estos son de tipo trifásicos marca “*Franklin Electric*” de modelo 2396238621 (ver figura 29).

Figura 29. Motor Franklin Electric



Fuente: Compañía operadora

- **Bombas**, modelo “*GRUNDFOS SP 125 – 5*” (ver figura 30)

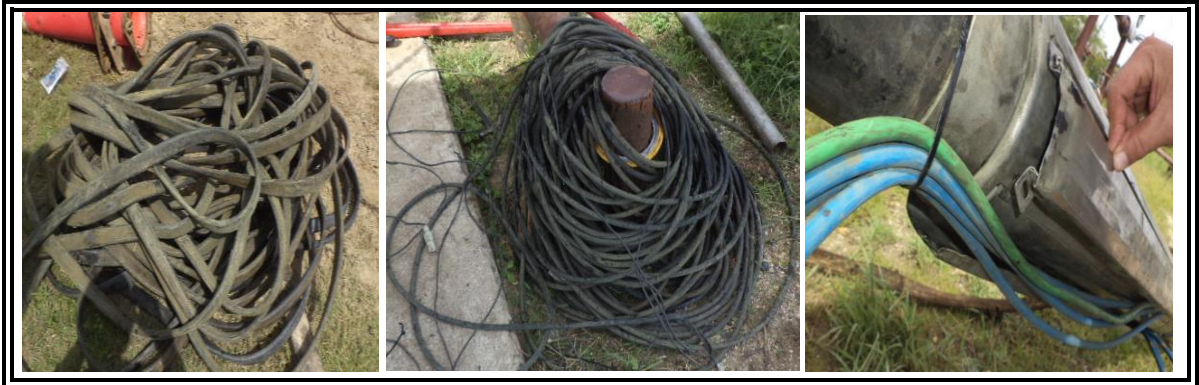
Figura 30. Bomba GRUNDFOS SP 125 – 5



Fuente: Compañía operadora

- **Cable de potencia**, Cable encauchetado 3x4, 2x12 plano y cable electrodo (ver figura 31).

Figura 31. Cable de potencia



Fuente: Compañía operadora

- **Sensores de nivel**, modelo 409 “Time Mark corporation” (ver figura 32)

Figura 32. Sensor de nivel modelo 409



Fuente: Compañía operadora

3.2.2 Equipos de Superficie

Los equipos en superficie se encuentran protegidos por casetas que garantizan su funcionamiento condiciones climáticas difícil (**ver figura 33**).

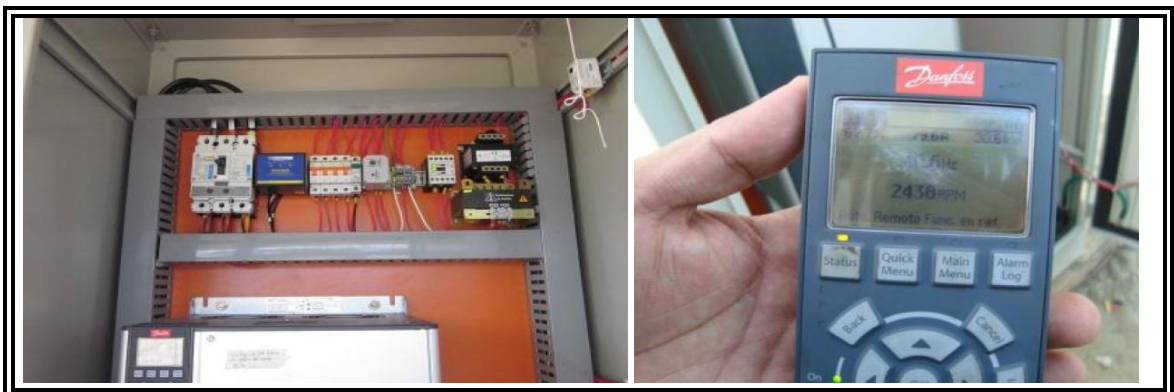
Figura 33. Construcción de caseta



Fuente: Compañía operadora

- **Tablero de control**

Figura 34. Variador Danfoss



Fuente: Compañía operadora

3.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para conocer las condiciones actuales de operación en el campo que están relacionadas a las bombas electrosumergibles, se presenta la **tabla 7** que contiene datos de las pruebas iniciales realizadas en los pozos de agua (AA, H, B), donde estas pruebas brindaron el margen de operación y potencial basado en el abatimiento de cada uno de los pozos.

Tabla 6. Prueba inicial de los pozos de agua

Pozo profundo de agua	L	AA	H	B
Fecha apertura a servicio	-	Nov/2011	May/2012	Jul/2012
Nivel Estático (m)	-	6.30	8.38	9.14
Nivel Dinámico (m)	-	19.14	35.57	39.16
Caudal (L/s)	-	43	42.9	38.65
Capacidad Especifica (L/s.m)	-	3.35	1.57	1.28
Duración (min)	-	2075	2160	2880
Método de Aforo	-	Macromedidor		
Control de Niveles	-	Sonda Eléctrica		

Fuente: Compañía operadora

Cabe resaltar que los reportes de información del pozo “L”, no fueron entregados a la operadora actual por parte de la compañía que anteriormente se encontraba a cargo del campo, sin embargo se tiene información de la tubería de producción correspondiente a 3,5” EUE y de profundidad de la instalación de la BES, debido a intervenciones realizadas por la operadora que se encuentra a cargo actualmente.

Posterior a las pruebas se instalaron las bombas “GRUNDFOS SP 125 – 5” y motores “FRANKLIN ELECTRIC”, a una profundidad 80m (262ft) con un caudal máximo de producción de 45 L/s para los pozos “H” y “L”. En el caso del pozo “B”, la instalación final de bombas y motores se realizó a una profundidad de 76,70m (251ft) con un caudal máximo de explotación recomendado de 40 L/s. Asimismo para el pozo “AA”, la instalación de equipos se dio a una profundidad de 85m (280ft) con caudal máximo de operación de 50 L/s.

En la actualidad, la producción diaria de agua en el campo es de 54.400 BPD dando un promedio por pozos de 13.600 BPD a través de la implementación de las bombas y motores descritos anteriormente, sin embargo los sistemas necesitan un rediseño debido a los problemas encontrados durante intervenciones realizadas en cada uno de ellos, y los cuales pueden estar asociados desde mal diseño de las BES hasta malos procedimientos realizados por parte de los operarios que afectan directamente el funcionamiento de las bombas electrosumergibles.

Lo expuesto anteriormente puede traducirse en una detención del equipo y obliga a compensar la producción de agua con los pozos restantes en operación, lo que representaría de pasar de 13.600 BPD a 18.100 BPD en el caso de presentarse la detención de un equipo de bombeo electrosumergible ocasionando una sobrecarga al resto de las BES. En la **tabla 7**, se presenta un resumen de las intervenciones realizadas que comprenden únicamente cambios en el componente instalado debido a una falla en el mismo.

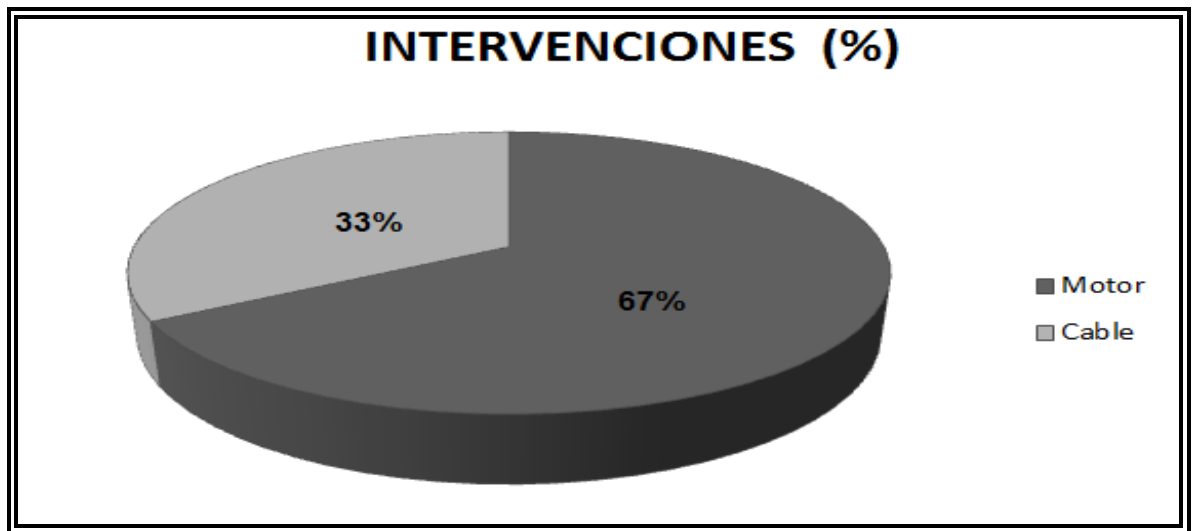
Tabla 7. Resumen de intervenciones por falla

Pozos	Apertura a servicio	Tipo de servicio	Intervención por falla
L	-----	Cambio de motor y cable	Septiembre 12/2013
H	May/2012	Cambio de motor y cable	Junio 9/2013
		Cambio de motor	Septiembre 12/2013
		Cambio de motor	Octubre 13/2013
AA	Nov/2011	Cambio de motor	Noviembre 19/2013
B	Jul/2012	Cambio de motor	Julio 26/2014

Fuente: Compañía operadora

De acuerdo a la tabla anterior, se aprecia con claridad el tipo de servicio más requerido por parte de la compañía operadora es el cambio de motor con un 66% y cable con un 33% desde la apertura a servicio (**ver figura 35**). Asimismo se reportó que durante el cambio de motor al pozo AA en noviembre 19/2013, se detectó una fuga por etapa o impeler de la bomba.

Figura 35. Porcentaje de intervenciones



Es posible generar un índice de falla general que relaciona el número de intervenciones totales con la cantidad de pozos intervenidos, la relación descrita anteriormente se define por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de fallas (anual)} = \frac{\text{Numero de intervenciones totales}}{\text{pozos intervenidos}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 59)}$$

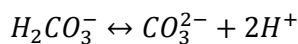
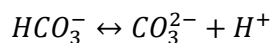
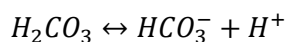
En 2013, la cantidad de intervenciones fue del orden cinco en el campo para tres pozos productores de agua (L, H, AA), obteniéndose un índice de falla anual de 1.6 intervenciones a pozo/año, lo cual representa un valor muy superior por el recomendado en la norma API RP59 (índice de falla > 1.2 pozo/año) del instituto americano del petróleo. Para el 2014, solo se presentó una intervención al pozo (B) presentándose un índice de falla igual a 1 pozo/año, valor inferior al recomendado por la norma anteriormente mencionada. Adicionalmente, se obtuvieron los parámetros fisicoquímicos del agua producida en cada una de los pozos que arrojo lo siguiente:

Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos medidos al agua (Diciembre 2014)

Parámetro	Unidad de medición	Técnica (S.M.)	L	AA	H	B
pH	Unidad	4500 H+B	9.0	9.2	9.0	9.4
Temperatura	°C	2550-B	30.8	32.1	33	32.9
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	2320-B	192.0	171.1	180.6	181.2
Calcio ICP	mg/L Ca	3120-B	2.609	3.967	8.277	3.263
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	2340-C	10.6	17.4	31.2	72.4
Conductividad eléctrica	µS/cm	2510-B	482	624	588	513
Sólidos totales	mg/L	2540-G	338	438	412	360

Fuente: Compañía operadora

Con los parámetros obtenidos en la **tabla 8**, es posible identificar si el agua producida en los cuatro pozos es de carácter corrosivo o incrustante. Por lo que se plantea calcular el **Índice de Saturación de Langelier** (ISL), el cual es un modelo de equilibrio derivado de las reacciones de disociación del Carbonato de Calcio o Acido Carbónico hacia sus respectivos aniones carbonato y bicarbonato. El esquema de la reacción de disociación se expresa por medio de la siguiente secuencia:



Para calcular el ISL, es necesario conocer la alcalinidad (mg/L o ppm CaCO₃), la dureza cálcica o total (mg/L o ppm Ca²⁺ como CaCO₃), los sólidos disueltos totales (mg/L TDS), el pH actual y la temperatura de la muestra. En este caso se ha usado el método S.M. 2330⁸ por considerar variables termodinámicas, fisicoquímicas, entre otras (**ver ecuación 60**).

$$ISL = pH - pH_{sat} \dots \dots \dots (\text{Ecuación 60})$$

Dónde:

pH = Potencial de Hidrogeno del agua producida, und

pH_{sat} = Potencial de Hidrogeno del agua en condiciones de equilibrio S.M. 2330, und

Una vez obtenido el ISL se procede a identificar la condición o naturaleza en la que se encuentra el fluido producido evaluando el siguiente criterio:

$$-1,5 \leq ISL < -0,5 \quad \text{Agua corrosiva}$$

$$-0,5 \leq ISL \leq 0,5 \quad \text{Agua en condiciones de equilibrio}$$

$$0,5 < ISL \leq 1,5 \quad \text{Agua incrustante}$$

Tabla 9. Índice de saturación de Langelier

Parámetro	L	AA	H	B
pH	9.0	9.2	9.0	9.4
pH_{sat}	8.57	8.44	8.08	8.47
ISL	0.43	0.76	0.92	0.93

⁸ Hernández M. Guideline for the Remineralisation of Desalinated Water. Second edition. 2010

De acuerdo con la **tabla 9**, se puede inferir que los pozos AA, H y B presentan agua de naturaleza incrustante que puede desencadenar en bloqueos o taponamiento en las etapas de la bomba, adicionalmente se puede adherir a las paredes externas de la bomba y motor causando efectos calóricos considerables. En la **sección 3.4.1**, se analiza todas las consideraciones descritas anteriormente que ayudaran a la presentación de los síntomas que identifiquen las causas, y que posteriormente dará a una solución al problema por medio de la presentación de los rediseños del sistema de bombeo electrosumergible que hoy en día se encuentran operando en el campo.

3.4 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO

El objetivo principal de llevar a cabo la metodología para el rediseño es identificar las causas centrales de la falla en el sistema de bombeo electrosumergible a través de los síntomas, y que afectan directamente la producción de hidrocarburos en el campo. Una vez se identifiquen las causas se procede a presentar e implementar las medidas de prevención que eliminen o minimicen su recurrencia. A continuación, se presenta los tres puntos necesarios para alcanzar nuestro objetivo:

- ✓ Diagnóstico y Análisis de Fallas
- ✓ Desarrollo de la solución
- ✓ Presentación de rediseños

3.4.1 Diagnóstico y Análisis de Fallas, En esta etapa se busca principalmente una identificación detallada y profunda del problema que incluye; equipos (componente), tipo de fallas (síntomas), causas y ubicación. Estos puntos proporcionan un diagnóstico acertado para lograr una solución al problema que puede estar ligado al desgaste y/o medio ambiente propios de la operación.

Para el diagnóstico y análisis de fallas que se presentan en las bombas electrosumergibles, se propone la **tabla 10** basados en las intervenciones a los pozos presentadas anteriormente y recopilación de datos en campo, con el fin de conocer los síntomas que afectan a las BES en el campo.

Tabla 10. Diagnóstico y análisis de fallas en bombas electrosumergibles

Componentes	Tipo de falla (síntomas)	Causas	Ubicación
Motor	Quema de motor	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mala de ubicación o desempeño del sensor de nivel. ✓ Potencial desgaste de la cara externa del motor (housing), por velocidades superiores a 10 ft/seg del agua. 	Subsuelo
Bomba	Desgaste y taponamiento en las etapas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Producción de arenas y agua incrustante. 	Subsuelo
Cable	Deformación y Corto circuitos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sobre tensión y enroscamiento del cable por mal manejo. ✓ Empalmes mal realizados, que pueden desencadenar en una quema del motor. 	Subsuelo

3.4.2 Desarrollo de la Solución, En este punto se establece la solución a los síntomas, con el fin de generar una solución al problema basado en las intervenciones realizadas y experiencias recolectadas en cada uno de los pozos:

A. Motor

Síntomas

Quema del motor.

Solución

Se sugiere una reposición del sensor del nivel y rediseño de los componentes que integran el sistema de bombeo electrosumergible instalados en cada uno de los pozos, con el fin de garantizar el espacio requerido para el enfriamiento del motor o evitar erosión producto de altas velocidades del agua que contiene sólidos.

B. Bomba

Síntomas

Desgaste y taponamiento.

Solución

Se sugiere realizar seguimientos periódicos a los pozos, que incluyan control al caudal y al nivel de bombeo. Igualmente establecer un programa de mantenimiento con intervalos máximo de 2 años debido a las características del agua encontrada en los pozos AA, H, B.

C. Cable

Síntomas

Deformación y corto circuito.

Solución

Se recomienda que al momento de instalación se verifique la integridad del cable y los empalmes realizados en las conexiones por parte del técnico a cargo, además no excederse en la velocidad de descenso de los componentes del bombeo electrosumergible que podría generar deformación y desconexión del cable debido a la tensión.

Basados en la recopilación general de las soluciones sugeridas para eliminar los síntomas es evidente un diseño, el cual cumpla con los requerimiento hídricos del campo y que garantice el funcionamiento óptimo e interrumpido de las bombas electrosumergibles, las cuales son responsables de mantener la producción de hidrocarburos alrededor de los 12.700 BPD.

3.4.3 Presentación de Diseños y Análisis comparativo, Para la etapa de diseño se realizó una búsqueda de bombas electrosumergibles de distintos proveedores entre los cuales se encuentran BAKER HUGHES, BORETS, SCHLUMBERGER y GRUNDFOS con sus respectivas marcas considerando principalmente el caudal de diseño, diámetro o serie de fabricación.

Por lo que se refiere al caso de estudio, el criterio principal para la búsqueda y selección de cada uno de los componentes del bombeo electrosumergible, se realizó de acuerdo a la solución de los problemas presentados en la sección anterior. Adicionalmente, el diseño a implementar en cada pozo se realizó bajo ciertas consideraciones, las cuales incluyen brindar un solo diseño que abarcara los requerimientos de todos pozos en el campo, seleccionar la TDH mas alta obtenida para en cada uno de los pozos para realizar el diseño a la profundidad de instalación de la bomba (350ft) y tubería de producción (3 ½ pulg), dando como resultado que el pozo “B” cuenta con la TDH mas alta garantizando el levantamiento de fluido en los demás pozos (**ver anexo II**), seguidamente se aprecia todo el desarrollo del diseño:

- ***Estados mecánicos***

- Diámetro del revestimiento : 7” y 9 5/8”
- Punto medio de la perforaciones : 1137,32 ft
- Profundidad de perforaciones : 1128,32 – 1146,50 ft

Actuales

- Diámetro de la tubería de producción (Actual): 5 ½ pulg (ID 4,892 pulg).

Diseño

- Diámetro de la tubería de producción (Diseño): 3 ½ pulg (ID 3,476 pulg).

- ***Datos de producción***

- Presión estática (Pr) : 536,79 psi
- Presión en cabeza (WHP): 120 psi
- Corte de agua : 100%
- Gravedad específica del fluido: 1,08
- Gradiente hidrostático del fluido: 0,468 psi/ft
- Temperatura del fondo de pozo (BHT) : 115 °F
- Presión de prueba (PwfTest) : 490,60 psi
- Caudal de la prueba (QTest): 21004 BPD
- Presión en el revestimiento : 20 psi
- Índice de productividad (Test) : 5080 BPD

Actuales

- Profundidad de la bomba (Actual) : 251 ft
- TDH (Actual) : 306,77 ft

Diseño

- Profundidad de la bomba (diseño): 350 ft
- Caudal de producción deseada: 13600 BPD

Respecto a los datos de Pr y Pwf (Test), que se presentaron en los datos de producción correspondiente al pozo "B", estos fueron obtenidos mediante la **ecuación 61**, en donde se utilizaron datos suministrados por la operadora en cuanto a nivel estático, dinámico, flujo volumétrico y tiempo provenientes de la prueba de drawdown realizada para arranque del pozo (**ver tabla 7**).

$$P_R = P_{Atm} + 0.433\gamma_l(L_{perf} - L_{stat\ probe}) \dots\dots\dots(\text{Ecuación 61})$$

Dónde:

P_{Atm} = Presión atmosférica del lugar, psia

L_{perf} = Profundidad media de las perforaciones, ft

$L_{stat\ probe}$ = Profundidad o nivel estático del pozo medido por sonda, ft

De igual forma se plantea la expresión para el cálculo de la presión de fondo fluyendo:

$$P_{wf} = P_{Atm} + 0.433\gamma_l(L_{perf} - L_{dyn\ probe}) \dots\dots\dots(\text{Ecuación 62})$$

Dónde:

P_{Atm} = Presión atmosférica del lugar, psia

L_{perf} = Profundidad media de las perforaciones, ft

$L_{dyn\ probe}$ = Profundidad o nivel dinámico medido por sonda del pozo con BES instalada, ft

Se asume que la presión del casing o revestimiento en la cabeza del pozo es igual a la atmosférica ($P_{Atm} = 0 \text{ psig} = 14,7 \text{ psia}$) y la gravedad específica del líquido producido es igual a 1,08. Posterior a la obtención de las presiones se calcula el índice de productividad de cada pozo con la siguiente expresión y considerando que el aporte del pozo es una tendencia lineal:

$$IP = \frac{q_{probe}}{P_R - P_{wf}} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 63)}$$

Dónde:

q_{probe} = Caudal o flujo volumétrico de la prueba realizada, STB/d

P_R = Presión de reservorio, psia

P_{wf} = Presión de fondo fluyendo, psia

La **tabla11**, muestra los cálculos obtenidos a partir de las pruebas de pozo, la presión de reservorio, presión de fondo fluyendo, caudal de prueba e índice de productividad para los pozos AA, H, B.

Tabla 11. Presiones de reservorio, fondo fluyendo e índices de productividad para los pozos de agua en estudio

Pozo profundo de agua	AA	H	B
Presión de Reservorio (psia)	393,85	421,60	536,79
Presión de fondo fluyendo (psia)	374,10	379,76	490,60
Caudal de prueba (BPD)	23368	23314	21004
Índice de Productividad (BPD/psi)	1183,20	557,22	454,73

Fuente: Compañía operadora

- **Fuentes de energía**
- Voltaje disponible en superficie : 13.7 KV
- Frecuencia en superficie :60 Hz
- **Cabeza dinámica total (TDH) para el pozo “B”:**

Las **ecuaciones 13-16** no se evalúan debido a que ya se tienen los datos por los cuales se hace necesaria la implementación de ellas.

$$\gamma_l = 1,08$$

$$P_R = 536,79 \text{ psi}$$

$$P_{wf} = 490,60 \text{ psi}$$

$$q_{probe} = 21004 \text{ BPD}$$

$$L_{pump} = 350 \text{ ft}$$

$$q'_l = 13600 \text{ BPD}$$

$$WHP = 120 \text{ psi}$$

$$CHP = 20 \text{ psi}$$

$$ID_t = 4,892 \text{ in}$$

Posteriormente se procede a calcular la presión en el punto de admisión de fluidos de la bomba por medio de la **ecuación 17 (PIP)**:

$$PIP = 490,60 \text{ psi} - 0,433 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} (1146,50 \text{ ft} - 350 \text{ ft}) \times 1,08$$

$$PIP = 118,13 \text{ psi}$$

Se debe hallar el nivel dinámico de fluido (L_{dyn}) por medio de la **ecuación 18** sin considerar el aporte del gradiente de presión hidrostática del gas en el casing:

$$L_{dyn} = \frac{350 \text{ ft} \times 0,433 \text{ psi/ft} \times 1,08 + 20 \text{ psi} - 118,13 \text{ psi}}{0,433 \text{ psi/ft} \times 1,08}$$

$$L_{dyn} = 140,16 \text{ ft}$$

Las **ecuaciones 19-24** no se consideran por cuanto se descarta la presencia de gases en el pozo y se procede a evaluar las perdidas por fricción con el modelo Hazen Williams desarrolladas en el flujo de la tubería de producción implementada:

$$\Delta H_{fr HW} = 0,015 \left[\frac{13600 \text{ BPD}}{94} \right]^{1,85} \frac{350 \text{ ft}}{(4,892 \text{ in})^{4,86}}$$

$$\Delta H_{fr HW} = 23,23 \text{ ft}$$

Con los resultados anteriores se puede evaluar entonces la cabeza dinámica de presión total requerida (TDH) por medio de las **ecuaciones 26 y 27**:

$$h_o = \frac{2,31(120 \text{ psi} - 20 \text{ psi})}{1,08}$$

$$h_o = 213,9 \text{ ft}$$

$$TDH = 140,30 \text{ ft} + 23,23 \text{ ft} + 213,9 \text{ ft}$$

$$TDH = 377,29 \text{ ft}$$

Debido a que se asume que no existe presencia de gas por la naturaleza del fluido producido y su composición, no se hace necesario implementar las **ecuaciones 28 a la 45**.

Ahora para una BES referencia BORETS 675 – 16000 se hallará el número de etapas, su eficiencia y potencia al freno requerida partiendo de los siguientes datos obtenidos de la curva de desempeño para una tasa de producción de 13600 BPD y una frecuencia de 60 Hz / 3500 RPM:

$$H/stg_{@ 60 \text{ Hz}, 13600 \text{ BPD}} = 84,13 \text{ ft/stg}$$

$$BHP/stg_{@ 60 \text{ Hz}, 13600 \text{ BPD}} = 10,70 \text{ HP/stg}$$

$$\eta_P @ 13600 \text{ BPD} = 79,6\%$$

Numero de etapas requeridas

$$\text{Stages} = \frac{377,29 \text{ ft}}{84,13 \text{ ft/stg}} = 3,70 \text{ stg}$$

$$\text{Stages} = 5 \text{ stg @ } 350 \text{ ft y } 60 \text{ Hz}$$

Potencia al freno requerida por la BES

$$\text{BHP}_{\text{pump}} = 5 \text{ stg} \times 10,70 \text{ HP/stg} \times 1,08$$

$$\text{BHP}_{\text{pump}} = 57,78 \text{ HP}$$

La **tabla 12**, presenta la TDH actual del pozo (Verde) con tubería de producción de 5 ½ y la TDH obtenida (Azul) al modificar la profundidad y diámetro de tubería de producción a 3 ½.

Tabla 12. Calculo de la TDH pozo "B"

TDH (ft)		DIAMETRO NOMINAL DE LA TUBERIA DE PRODUCCION (DIAMETRO INTERNO)		
		5 ½ (ID 4,892 in)	3 ½ (ID 3,476 in)	2 7/8 (ID 2,441 in)
PROFUNDIDAD DE LA SARTA BES (ft)	260	371,31	444,88	860,17
	350	377,29	476,32	1035,36
	420	381,94	450,73	1171,63

- **Selección de bomba para el pozo “B”:**

En relación al caudal volumétrico de la bomba a seleccionar, este debe garantizar el intervalo o rango óptimo de operación la tasa de diseño permitida por la licencia ambiental para el desarrollo de los pozos (25 L/seg ó 13600 BPD), y a su vez trabajar a tasas más elevadas para garantizar una producción estable en caso que otros pozos tenga que ser intervenidos por mantenimiento correctivo o preventivo.

En la medida de lo posible, el caudal de diseño debe encontrarse hacia la derecha del punto máximo de eficiencia en la curva de desempeño y lo suficientemente alejado de los extremos del intervalo para prevenir la presencia de efectos como downthrust y upthrust en las etapas de la bomba. La **tabla 13**, muestra una breve descripción de los proveedores considerados junto con las referencias seleccionadas, sin embargo las características de operación de cada una se puede apreciar en el **anexo III**.

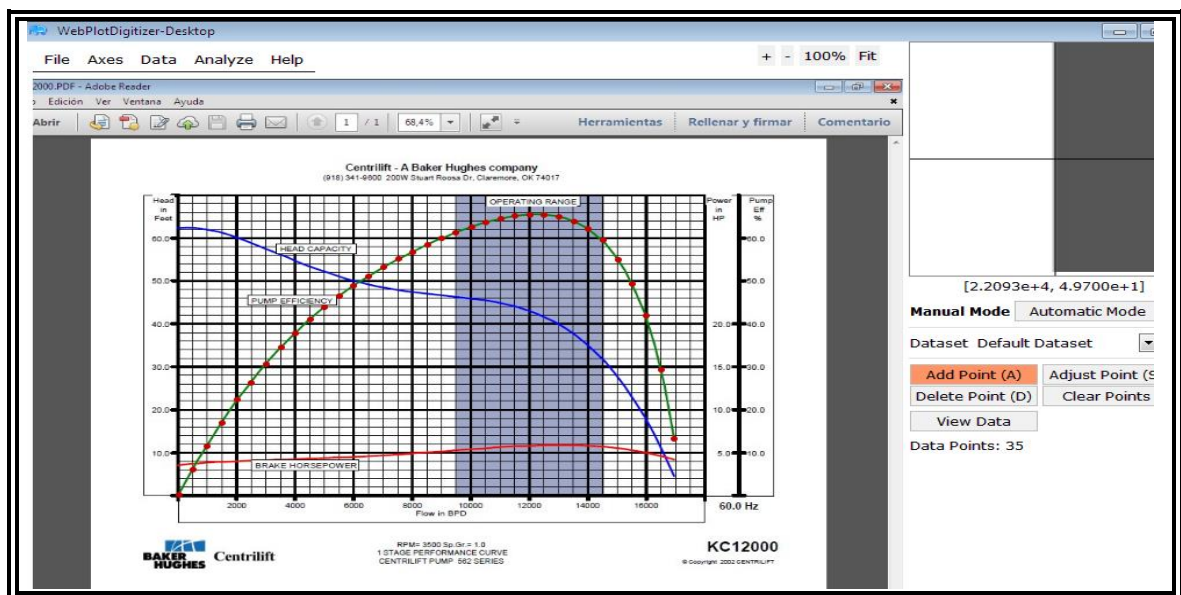
Tabla 13. Proveedores y referencias de bombas electrosumergibles

Proveedor	Año de fundación	Marca	País de Origen	Referencias Seleccionadas
BAKER HUGHES	1887	CENTRILIFT	Estados Unidos	KC 12000 HC 12500
BORETS	1897	SERIE-CAUDAL	Rusia	675 - 12000 675 – 16000
GRUNDFOS	1945	SP	Dinamarca	SP 77 – 7 SP 95 – 6
SCHLUMBERGER	1926	REDA	Estados Unidos	HN 13500 J12000N

Posterior a la selección de las referencias, se presenta la información específica de las bombas seleccionadas y las curva de desempeño, cabe anotar que no todas las bombas seleccionadas poseen la misma cantidad de parámetros (información) puesto que algunos proveedores protegen sus productos y limitan su exposición en la web. Se realizaron regresiones polinomiales de las curvas para obtener los coeficientes de las correlaciones realizadas para cada una de ellas, por medio el software libre **WebPlotDigitizer**. Esto se realizó con el fin de proporcionar rapidez y precisión en los cálculos debido a que las curvas de los proveedores provienen de catálogos formato (.pdf) o (.jpeg) (ver figura 36). Seguidamente se proporciona una breve explicación del proceso para obtención de las curvas de desempeño:

- Una vez cargada la imagen en **WebPlotDigitizer**, se seleccionan los puntos de referencia en los ejes coordenados de la gráfica y se adicionan los puntos siguiendo la trayectoria de la curvas (H/stg, Eff y BHP vs. Q)
- Las parejas ordenadas obtenidas se transcriben manualmente o por medio de un archivo .csv a un archivo .xls en Microsoft Excel
- La obtención de los coeficientes se realizó por medio de la función estimación lineal y se verifica por primera vez la precisión de los coeficientes mediante una interpolación alrededor del caudal de diseño para posteriormente comparar con los datos originales punto a punto.

Figura 36. Centrilift KC 12000 en WebPlotDigitizer



En el caso de GRUNDFOS las curvas de cabeza, eficiencia y potencia se implementaron polinomios grado cuatro, cinco y cuatro respectivamente. Adicionalmente, no se tuvo en cuenta ningún tipo de corrección de las curvas de desempeño por viscosidad o por desgaste de la bomba por producción de gases debido a que el fluido producido es agua:

$$\eta_p = A_5Q^5 + A_4Q^4 + A_3Q^3 + A_2Q^2 + A_1Q + A_0 \dots \dots \text{(Ecuación 65)}$$

$$H/stg = B_4Q^4 + B_3Q^3 + B_2Q^2 + B_1Q + B_0 \dots \dots \dots \text{(Ecuación 66)}$$

$$BHP/stg = C_4Q^4 + C_3Q^3 + C_2Q^2 + C_1Q + C_0 \dots \dots \dots \text{(Ecuación 67)}$$

- **Calculo de número de etapas de las bombas pozo “B”:**

Este punto se procede a calcular el número de etapas necesarias para cumplir con la producción de 13.600 BPD, mediante la relación de la TDH con el levantamiento por etapa del fluido a producir obtenido de las curvas de la bomba de cada proveedor (ver tabla 14).

$$Etapas = \frac{TDH (ft)}{Cabeza (ft/etapa)}$$

Tabla 14. Etapas requeridas y eficiencia desarrollada

Marca	Referencia	H/stg	Etapas	TDH	$\eta_p(\%)$
GRUNDFOS	SP 125-5	581,0	5	476,32	76,4
CENTRILIFT	KC 12000	36,37	14		64,5
CENTRILIFT	HC 12500	79,33	7		76,0
GRUNDFOS	SP 77-7	361,6	7		70,0
GRUNDFOS	SP 95-6	316,9	6		76,7
REDA	HN 13500	38,89	13		60,1
REDA	J 12000 N	80,81	6		76,3
BORETS	675-12500	81,66	6		79,9
BORETS	675-16000	84,13	6		79,6

En el caso de las bombas “GRUNDFOS” estas presentan un levantamiento total por número total de etapas, a diferencias de las demás referencias presentadas que relacionan la TDH con la cabeza realizada por etapa.

- **Análisis comparativo pozo “B”:**

Para evidenciar la incidencia de cada una de las bombas electrosumergible seleccionadas y proceder a decidir cuál de las referencias brinda más ventajas para el caso de estudio se plantea lo siguiente:

- Mantener la profundidad constantes variando la frecuencia de trabajo y el diámetro de la tubería de producción.

Para éste método se evaluó el levantamiento total de la bomba (H) como el producto del levantamiento unitario (curva de desempeño para 13.600 BPD) y el número de etapas seleccionado anteriormente para cada una de las bombas. Asimismo, la potencia total requerida por medio de la potencia relativa, número de etapas y la gravedad específica del fluido a producir.

Tabla 15. Pozo de agua “B” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 5 ½ pulg

Referencia	60 Hz / 3500 RPM		50 Hz / 2900 RPM		TDH (ft)
	H (ft)	BHP (HP)	H (ft)	BHP (HP)	
SP 125-5	581,0	96,1	403,5	55,6	377,29
KC 12000	509,2	69,2	277,8	40,0	
HC 12500	555,3	67,9	330,5	39,3	
SP 77-7	316,9	54,0	220,1	31,2	
SP 95-6	361,6	56,5	251,1	32,7	
HN 13500	505,6	75,5	297,1	43,7	
J 12000 N	484,9	67,0	336,7	38,8	
675-12500	489,9	66,2	340,2	38,3	
675-16000	504,8	69,3	350,5	40,1	

Se observa en la **tabla 15**, los datos obtenidos para el análisis del pozo “B” para todas las BES seleccionadas e instaladas a una profundidad de 350,04 ft (100 m) con tubería de producción de 5 ½ pulgadas y una frecuencia de 60 Hz / 3500 RPM logran cumplir con el levantamiento mínimo requerido fijado por la cabeza dinámica total, excepto las referencias SP 77–7 (GRUNDFOS) y SP 95 – 6 (GRUNDFOS). Por otro lado, para una frecuencia de 50 Hz / 2900 RPM, la bomba electrosumergible de referencia SP 125 – 5 (GRUNDFOS), es la única que logra con el levantamiento requerido. En cuanto a la potencia requerida por las bombas se observa que todos los valores son aproximadamente cercanos, aunque en el caso de la referencia SP 125 – 5 (GRUNDFOS) para una frecuencia de trabajo de 60 Hz / 3500 RPM, se logra evidenciar un consumo elevado y cercano a la capacidad nominal de los motores Franklin Electric instalados por la compañía operadora en la actualidad.

Tabla 16. Pozo de agua “B” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 3 ½ pulg

Referencia	60 Hz / 3500 RPM		50 Hz / 2900 RPM		TDH (ft)
	H (ft)	BHP (HP)	H (ft)	BHP (HP)	
SP 125-5	581,0	96,1	403,5	55,6	476,32
KC 12000	400,1	69,2	277,8	40,0	
HC 12500	476,0	67,9	330,5	39,3	
SP 77-7	316,9	54,0	220,1	31,2	
SP 95-6	361,6	56,5	251,1	32,7	
HN 13500	427,8	75,5	297,1	43,7	
J 12000 N	484,9	67,0	336,7	38,8	
675-12500	489,9	66,2	340,2	38,3	
675-16000	504,8	69,3	350,5	40,1	

De acuerdo a la **tabla 16**, se obtiene los datos para el análisis del pozo “B” en donde vemos que todas las BES seleccionadas e instaladas a una profundidad de 350,04 ft (100 m) con tubería de producción de 3 ½ pulgadas y una frecuencia de 60 Hz / 3500 rpm logran cumplir con el levantamiento mínimo requerido fijado por la cabeza dinámica total excepto las referencias KC 12000 (CENTRILIFT), SP 77–7 (GRUNDFOS), SP 95 – 6 (GRUNDFOS) y HN 13500 (REDA). Mientras que a una frecuencia de 50 Hz / 2900 rpm, ninguna de las referencias cumple con el levantamiento mínimo requerido.

Adicionalmente se presenta la **tabla 17**, la cual contiene los datos para el análisis del pozo “B” en donde vemos que todas las BES seleccionadas e instaladas a una profundidad de 350,04 ft (100 m) con tubería de producción de 2 7/8 pulg pulgadas y una frecuencia de 60 / 50 Hz, no logran cumplir con el levantamiento mínimo requerido de trabajo por la TDH.

Tabla 17. Pozo de agua “B” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 2 7/8 pulg

Referencia	60 Hz / 3500 RPM		50 Hz / 2900 RPM		TDH (ft)
	H (ft)	BHP (HP)	H (ft)	BHP (HP)	
SP 125-5	581,0	96,1	403,5	55,6	996,5
KC 12000	400,1	69,2	277,8	40,0	
HC 12500	476,0	67,9	330,5	39,3	
SP 77-7	316,9	54,0	220,1	31,2	
SP 95-6	361,6	56,5	251,1	32,7	
HN 13500	427,8	75,5	297,1	43,7	
J 12000 N	484,9	67,0	336,7	38,8	
675-12500	489,9	66,2	340,2	38,3	
675-16000	504,8	69,3	350,5	40,1	

- Mantener la frecuencia de trabajo constante cambiando la profundidad de instalación de la bomba electrosumergible y el diámetro de la tubería de producción.

Para esta sección del desarrollo de los diseños se ha evaluado como criterio principal la relación entre el levantamiento total y la cabeza dinámica total (TDH) sabiendo que para que sea factible la implementación de una bomba seleccionada esta debe tener una relación H/TDH mayor o igual a uno, para casos en que esta relación sea menor deberá hacerse ajustes someros o significativos de la profundidad dependiendo del resultado obtenido. La **tabla 18**, proporciona la máxima profundidad a la cual se puede bajar la BES según el diseño de los pozos disponible.

Tabla 18. Profundidad máxima la cual se pueden ubicar los sistemas BES

Pozo	AA	B	H
Profundidad máxima de las sarta BES (ft)	690	560	576

De acuerdo a lo anterior se presenta la **tabla 19**, en donde se observa que para una frecuencia de 60 Hz, la TDH aumenta conforme se incrementa la profundidad de instalación de la BES, lo que provoca que la mayoría de las bombas cumplan con el levantamiento requerido excepto la referencia SP 77 – 7 (GRUNDFOS) y SP 95 – 6 (GRUNDFOS).

Tabla 19. Pozo de agua “B” @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 5 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	371,31	581,0	1,56	377,29	581,0	1,54	381,94	581,0	1,52
KC 12000		400,1	1,08		400,1	1,06		400,1	1,05
HC 12500		476,0	1,28		476,0	1,26		476,0	1,25
SP 77-7		316,9	0,85		316,9	0,84		316,9	0,83
SP 95-6		361,6	0,97		361,6	0,96		361,6	0,95
HN 13500		427,8	1,15		427,8	1,13		427,8	1,12
J 12000 N		484,9	1,31		484,9	1,29		484,9	1,27
675-12500		489,9	1,32		489,9	1,30		489,9	1,28
675-16000		504,8	1,36		504,8	1,34		504,8	1,32

Para el caso de 50 Hz a profundidad de 260 ft, 350 ft y 420 ft, la única referencia que cumplió el levantamiento requerido es la SP 125-5 (GRUNDFOS) (**ver tabla 20**).

Tabla 20. Pozo de agua “B” @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 5 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	371,31	403,5	1,09	377,29	403,5	1,07	381,94	403,5	1,06
KC 12000		277,8	0,75		277,8	0,74		277,8	0,73
HC 12500		330,5	0,89		330,5	0,88		330,5	0,87
SP 77-7		220,1	0,59		220,1	0,58		220,1	0,58
SP 95-6		251,1	0,68		251,1	0,67		251,1	0,66
HN 13500		297,1	0,80		297,1	0,79		297,1	0,78
J 12000 N		336,7	0,91		336,7	0,89		336,7	0,88
675-12500		340,2	0,92		340,2	0,90		340,2	0,89
675-16000		350,5	0,94		350,5	0,93		350,5	0,92

Ahora bien se procede a realizar los cálculos anteriormente descritos pero para un diámetro de tubería de producción de 3 ½ pulgadas se encuentra lo siguiente:

Tabla 21. Pozo de agua “B” @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 3 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	444,88	581,0	1,31	476,32	581,0	1,22	500,78	581,0	1,16
KC 12000		400,1	0,90		400,1	0,84		400,1	0,80
HC 12500		476,0	1,07		476,0	1,00		476,0	0,95
SP 77-7		316,9	0,71		316,9	0,67		316,9	0,63
SP 95-6		361,6	0,81		361,6	0,76		361,6	0,72
HN 13500		427,8	0,96		427,8	0,90		427,8	0,85
J 12000 N		484,9	1,09		484,9	1,02		484,9	0,97
675-12500		489,9	1,10		489,9	1,03		489,9	0,98
675-16000		504,8	1,13		504,8	1,06		504,8	1,01

De acuerdo a la **tabla 21**, las referencias KC 12000 (CENTRILIFT), SP 77-7 (GRUNDFOS), SP 95 – 6 (GRUNDFOS) y HN 13500 (REDA), no cumplen para una profundidad de 260 ft y 350 ft. Mientras tanto para la profundidad de 420 ft las referencias SP 125-5 (GRUNDFOS) y 675-16000 (BORETS) cumple con el levantamiento.

Tabla 22. Pozo de agua “B” @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 3 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	444,88	403,5	0,91	476,32	403,5	0,85	500,78	403,5	0,81
KC 12000		277,8	0,62		277,8	0,58		277,8	0,55
HC 12500		330,5	0,74		330,5	0,69		330,5	0,66
SP 77-7		220,1	0,49		220,1	0,46		220,1	0,44
SP 95-6		251,1	0,56		251,1	0,53		251,1	0,50
HN 13500		297,1	0,67		297,1	0,62		297,1	0,59
J 12000 N		336,7	0,76		336,7	0,71		336,7	0,67
675-12500		340,2	0,76		340,2	0,71		340,2	0,68
675-16000		350,5	0,79		350,5	0,74		350,5	0,70

En la **tabla 22**, se plantea con una frecuencia de trabajo de 50 Hz y una profundidad de 260ft, 350 ft y 420 ft; ninguna de las referencias seleccionadas cumple con el levantamiento.

Los resultados obtenidos para las frecuencias de trabajo de 60 Hz / 50 Hz a las profundidades indicadas anteriormente mencionadas con tubería de producción de 2 7/8 pulgadas ninguna de las referencias seleccionadas logra cumplir con el levantamiento requerido al poseer relaciones H/TDH menores a uno, en la **tabla 23** y **24** se puede apreciarlos cálculos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en cada una de las tablas presentadas anteriormente, se propone implementar las bombas de referencia J 12000 N (REDA), 675-12500 (BORETS) y 675-16000 (BORETS) que cumplen con el levantamiento requerido a la profundidad (350 ft) de diseño y tubería de producción (3 ½ pulg; 5 ½ pulg) operadas a una frecuencia de 60Hz. Los **anexos IV** y **V**, que contienen los análisis comparativos realizados para los pozos “H” y “AA” en donde se logra evidenciar que las bombas seleccionadas también cumplen con los requerimientos de levantamiento para cada uno de los pozos.

Tabla 23. Pozo de agua "B" @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 2 7/8 pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	860,17	581,0	0,68	1035,36	581,0	0,56	1171,63	581,0	0,50
KC 12000		400,1	0,47		400,1	0,39		400,1	0,34
HC 12500		476,0	0,55		476,0	0,46		476,0	0,41
SP 77-7		316,9	0,37		316,9	0,31		316,9	0,27
SP 95-6		361,6	0,42		361,6	0,35		361,6	0,31
HN 13500		427,8	0,50		427,8	0,41		427,8	0,37
J 12000 N		484,9	0,56		484,9	0,47		484,9	0,41
675-12500		489,9	0,57		489,9	0,47		489,9	0,42
675-16000		504,8	0,59		504,8	0,49		504,8	0,43

Tabla 24. Pozo de agua "AA" @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 2 7/8 pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	860,17	403,5	0,47	1035,36	403,5	0,39	1171,63	403,5	0,34
KC 12000		277,8	0,32		277,8	0,27		277,8	0,24
HC 12500		330,5	0,38		330,5	0,32		330,5	0,28
SP 77-7		220,1	0,26		220,1	0,21		220,1	0,19
SP 95-6		251,1	0,29		251,1	0,24		251,1	0,21
HN 13500		297,1	0,35		297,1	0,29		297,1	0,25
J 12000 N		336,7	0,39		336,7	0,33		336,7	0,29
675-12500		340,2	0,40		340,2	0,33		340,2	0,29
675-16000		350,5	0,41		350,5	0,34		350,5	0,30

- **Selección de motor y cable para el pozo “B”:**

Respecto a las consideraciones en la selección del motor este debe cumplir con los requerimientos de potencia calculados para cada una de las bombas seleccionadas (ver tabla 16). Adicionalmente, considerar instalar el motor de mayor diámetro que pueda ser ubicado dentro del casing sin problemas, y que la temperatura de operación dada por el fabricante no sea excedida durante la operación. Por otro lado, el voltaje del motor puede basarse en consideraciones de carácter económico que facilitarían la selección del mismo: los motores de voltajes altos (baja corriente) experimentan más pérdidas de voltajes por ende requieren cables de menor tamaño. Sin embargo, mientras más alto sea el voltaje del motor, mayor será el costo del controlador en superficie.

Para completar el diseño se propone instalar 4 tipos de motores de diferentes marcas (Franklin Electrics, Global Production Solution, Weatherford-Borets, Reda) que satisfacen la potencia requerida por la bomba, la **tabla 25** muestra los parámetros de operación para cada uno de los motores seleccionado:

Tabla 25. Características de motores seleccionados

Parámetro	FE	GPS	WTF-BRTS	REDA
Diámetro (in)	8	5,62	5,62	5,62
Potencia de Placa (HP)	100	90	80	90
Voltaje de Placa (V)	460	850	1020	850
Amperaje de Placa (Amp)	126	64	48	64
Factor de Servicio	1,15	1	1	1
Diámetro del Eje (in)	1,5	1,375	-	1,375
Longitud (ft)	4,6	9,8	9,7	9,8
Empuje axial nominal (lb)	10000	-	-	-
Temperatura máxima de operación (°F)	86 (Ambiente)	356 (High Temp)	302	-

Se ha decidido implementar una BES del proveedor BORETS con la referencia 675-16000 de seis (6) etapas a una profundidad de 350 ft con un motor Franklin Electrics de ocho pulgadas de diámetro y 100 HP de potencia de placa trabajando a una frecuencia de 60 Hz (**ver tabla 26**), con esta configuración evaluará la pertinencia sobre el uso de éste motor conociéndose los siguientes datos:

Tabla 26. Parámetros de la bomba BORETS 675-16000

Parámetro	Valores
H/stg (ft/stg)	84,13
$(Head/stage)_{max}$ (ft/stg)	102,79
BHP/stg (HP/stg)	10,70
η_p (%)	79,6
Etapas	6

Teniendo en cuenta las condiciones de operación descritas inicialmente para el diseño, el cable a implementar será un AWG 4, con resistencia 0,263 Ohmios por cada mil pies de cable y una longitud total de 450 pies, no obstante este valor puede variar más adelante en caso de requerirse al evaluar la pertinencia del cable a usar.

Se inicia con el cálculo de la potencia requerida por la bomba por medio de la **ecuación 47**:

$$BHP_{system} = BHP_{pump} = 10,70 \text{ HP/stg} \times 6 \text{ stg} \times 1,08 = 69,34 \text{ HP}$$

Con la potencia total requerida por el sistema se calcula el porcentaje de carga del motor para lo cual se necesita la potencia nominal o de placa que proporciona el motor:

$$\% Load_m = \frac{BHP_{system}}{HP_{np}} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 68)}$$

Dónde:

BHP_{system} = Potencia al freno requerida por el sistema (HP)

HP_{np} = Potencia nominal o de placa del motor (HP)

$$\% Load_m = \frac{BHP_{system}}{HP_{np}} = \frac{69,34 \text{ HP}}{100 \text{ HP}}$$

$$\% Load_m = 69,34\%$$

Se obtiene la corriente o amperaje de operación por medio de la **ecuación 52**:

$$I = 126 \text{ Amp} \left[\frac{69,34 \text{ HP}}{100 \text{ HP}} \right]$$

$$I = 87,36 \text{ Amp}$$

Con datos como la temperatura en el fondo de pozo, el calibre, resistencia y longitud del cable a usar encontramos la resistencia total del mismo por medio de la **ecuación 53**:

$$R_T = \frac{450 \text{ ft} \times 0,263 \Omega}{1000 \text{ ft}} [1 + 0,00214(115^\circ\text{F} - 77^\circ\text{F})]$$

$$R_T = 0,128 \Omega$$

Con la resistencia total ofrecida por el cable se procede a hallar las pérdidas de voltaje que se desarrollan en la trayectoria del cable en el pozo por medio de la **ecuación 54**:

$$\Delta U_{\text{cable}} = 1,732 \times 0,128 \Omega \times 87,36 \text{ Amp}$$

$$\Delta U_{\text{cable}} = 19,36 \text{ V}$$

Ahora se debe hallar la pérdida de poder en el cable (kW) conociéndose el amperaje de operación y la resistencia total del cable, **ecuación 55**:

$$\Delta P_c = \frac{3 \times (87,36 \text{ Amp})^2 \times 0,128 \Omega}{1000}$$

$$\Delta P_c = 2,93 \text{ kW}$$

A continuación se obtiene la relación de voltaje para arranque del motor por medio de la **ecuación 56**:

$$\frac{U_{\text{start}}}{U_{\text{np}}} = \frac{460 \text{ V} - 4 \times 87,36 \text{ Amp} \times 0,128 \Omega}{460 \text{ V}}$$

$$\frac{U_{\text{start}}}{U_{\text{np}}} = 0,903$$

La relación obtenida en este caso es buena puesto que se acerca significativamente a la unidad y se aleja del valor frontera ($U_{\text{start}}/U_{\text{np}} = 0,5$)

Finalmente se procede a hallar la tensión y potencia en superficie por medio de la **ecuación 57 y 58**:

$$U_{\text{surf}} = 460 \text{ V} + 19,36 \text{ V}$$

$$U_{\text{surf}} = 479,36 \text{ V}$$

$$P_{surf} = 0,001732 \times 479,36 V \times 87,36 Amp$$

$$P_{surf} = 72,53 kVA$$

De igual forma se realizó el procedimiento para las otras referencias de motores manejando las mismas propiedades del cable a implementar AWG 4 obteniéndose la siguiente tabla:

Tabla 27. Desempeño de los motores electrosumergibles en los pozos de agua usando un cable AWG 4.

Parámetro	FE	GPS	WTF-BRTS	REDA
$\% Load_m$	69,34	77,04	86,67	77,04
F_{TB}	509,41	428,04	-	-
I	87,36	49,31	41,60	49,31
R_T	0,1280	0,1280	0,1280	0,1280
ΔU_{cable}	19,36	10,93	9,22	10,93
ΔP_c	2,93	0,93	0,66	0,93
$\frac{U_{start}}{U_{np}}$	0,903	0,970	0,979	0,970
U_{surf}	479,36	860,93	1029,22	860,93
P_{surf}	72,53	73,52	74,16	73,52
T_s	156	153	151	153

Dónde:

T_s , es la temperatura del recubrimiento o housing del motor adyacente al fluido producido (°F)

Con los resultados obtenidos se puede evidenciar que bajo la intención de reemplazar los motores existentes todas las referencias en mención cumplen con un desempeño adecuado mejorando así la relación del voltaje para arranque del sistema y con mayores requerimientos de tensión en superficie con una proporción en comparación con los motores usados actualmente cercana al doble para las referencias GPS y REDA mientras que para WTF-BRTS la proporción es mayor.

Por otro lado, las referencias usadas en la corrida de desempeño satisfacen los requerimientos aunque al poseer menor diámetro que los usados actualmente suponen de un mayor precio lo que repercute en una mayor inversión y de igual forma sucede si se considera el voltaje de placa ya que al aumentarse éste el costo del equipo también incrementa. Evaluando ahora como parámetro de diseño el calibre del cable que se usa se arrojan los siguientes resultados:

Tabla 28. Relaciones de pérdida de voltaje para los distintos calibres de cable seleccionados @ BHT=115°F

AWG	$\Omega/1000 \text{ ft}$	Ω	Relación de Pérdida de Voltaje (%)			
			FE	GPS	WTF-BRTS	REDA
1	0,134	0,065	2,14	1,16	0,46	0,66
2	0,169	0,082	2,71	1,46	0,58	0,83
4	0,263	0,128	4,21	2,28	0,90	1,29
6	0,419	0,204	6,71	3,63	1,44	2,05

Observando los resultados obtenidos se concluye que el cable AWG 6 para acoplarlo a un motor Franklin Electrics de 100 HP (460 V) no es aconsejable pues representa su caída de voltaje una relación de 6,17% con respecto a la tensión nominal del motor. En el resto de los casos todos los calibres de cable citados cumplen con la relación de pérdida de voltaje por cuanto su uso con los motores citados sería viable.

De acuerdo a lo anterior se propone usar un cable redondo de calibre (AWG) 4 para transportar la potencia requerida por el sistema de bombeo electrosumergible apoyados además que las referencias que proveen cable plano son significativamente altas en comparación con los convencionales.

Tabla 29. Cable de conducción de poder para los sistemas BES ubicados en los pozos de agua

AWG	Tipo de Conductor	Diámetro del Conductor (pulg)	Diámetro Global (in)	Resistencia @ 400°F $\Omega/10^3 \text{ft}$	Reactancia @ 60 Hz $\Omega/10^3 \text{ft}$	Peso del cable $\text{lb}/10^3 \text{ft}$
4	Sólido	0,204	1,16	0,441	0,037	1,135

Con el diámetro interno del revestimiento y los diámetros externos de la bomba electrosumergible y su respectivo cable a implementar se halla el espacio disponible o libre en el anular de la siguiente forma, ecuación 68:

$$\textit{Clearance} = ID_c - OD_{pump} - OD_{cable} \dots \dots \dots (\text{Ecuación 69})$$

Dónde:

ID_c = Diámetro interno o drift del revestimiento (pulg)

OD_{pump} = Diámetro externo de la BES (pulg)

OD_{cable} = Diámetro externo del cable a implementar (pulg)

De acuerdo a la ecuación tenemos que:

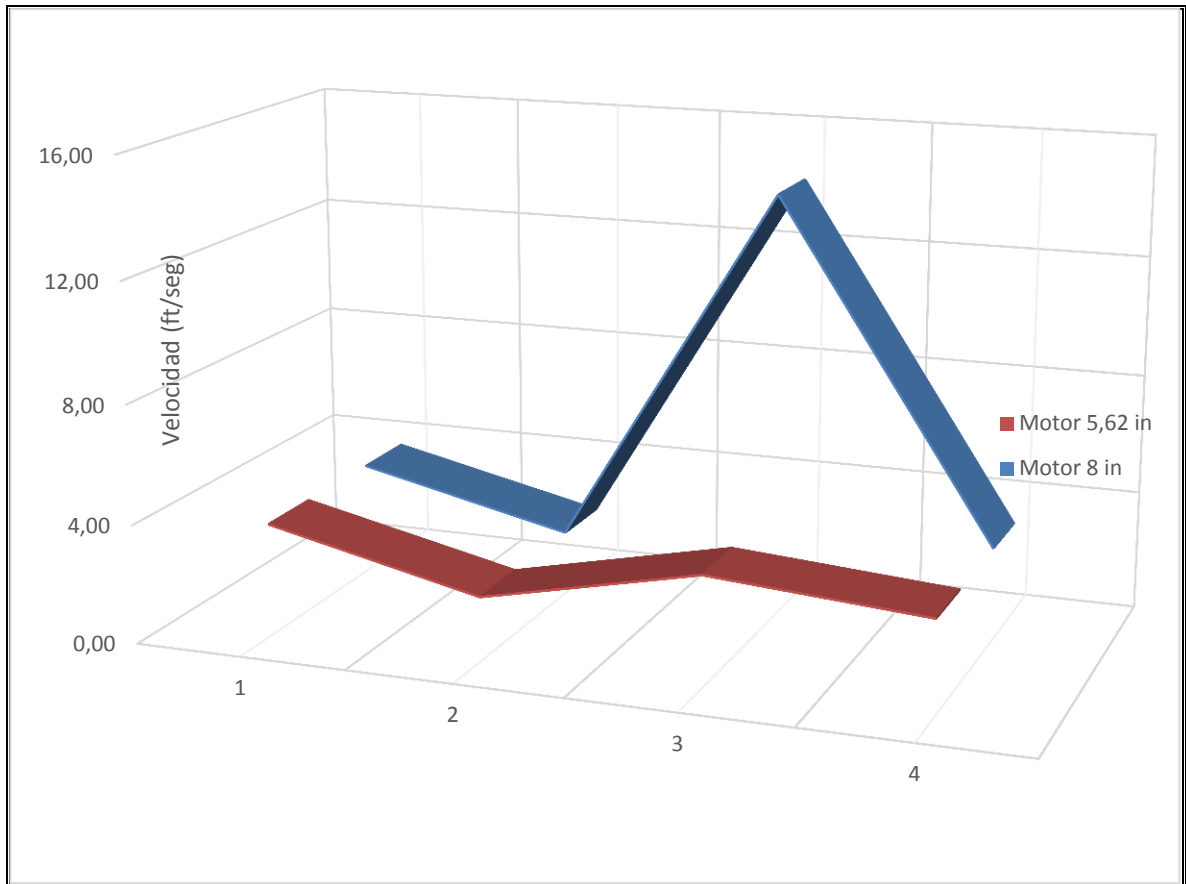
$$\textit{Clearance} = 8,525 \textit{ pulg} - 6,75 \textit{ pulg} - 1,16 \textit{ pulg} = 0,615 \textit{ pulg}$$

Considerando el valor obtenido se puede concluir que no existe inconveniente con la implementación del cable seleccionado.

También se propone el perfil de velocidad del fluido a través del revestimiento durante la operación de las bombas (**ver ecuación 51**), que nos brindará un criterio más detallado de evaluación y selección de la tubería de producción que se deberá implementar finalmente para los rediseños.

En base al perfil de velocidades que desarrolla el fluido durante su ascenso a través del pozo implementando un motor electrosumergible de 5.62 y 8 pulgadas. Se presenta la **figura 37** que explica el comportamiento de la velocidad de ascenso del fluido a través de las secciones del revestimiento para los diámetros de tubería 7 y 9 5/8 pulgada instalados en cada uno de los pozos. En el caso de la tubería de 7 pulgadas se obtuvo una velocidad de ascenso de 3,79 ft/seg, apreciable en la sección 1 del perfil de velocidades para ambos casos. Por otro lado, en la sección 2 para una tubería de 9 5/8 pulgadas en donde no se instala la bomba el perfil de velocidad es de 2,15 ft/seg para ambos casos de estudio.

Figura 37. Perfil de Velocidades del fluido a través del revestimiento del pozo



En la sección 3, se muestra el perfil de velocidad formado entre el revestimiento de $9 \frac{5}{8}$ y el diámetro externo del motor obteniéndose valores de 3,70 y 14,25 ft/seg para motores de 5.62 y 8 pulgadas respectivamente. La sección 4, hace referencia al lugar de ubicación de la bomba y tubería de producción de diseño $3 \frac{1}{2}$ pulgada en donde se presenta velocidades de 2,56 ft/seg, también se consideró para una tubería de producción de $5 \frac{1}{2}$ pulgada que dieron como resultado una velocidad de 3,14 ft/seg. Para la sección entre la tubería de producción y revestimiento se propone la **tabla 30**, que muestra el perfil de velocidad obtenido para cada uno de los distintos diámetros de tubería.

Tabla 30. Perfil de Velocidades entre tubería de producción y revestimiento

OD (in)	ID (in)	Vel (ft/seg)
5 1/2	4,892	6,8
3 1/2	3,476	13,4
2 7/8	2,441	27,2

De lo anterior, se podría concluir que lo más conveniente para cada uno de los pozos es realizar una instalación de motores de diámetro de 5.62 pulgadas con una tubería de producción 5 ½ a una profundidad de 350 ft @ 60hz, descartando así la tubería de producción 3 ½ propuesta inicialmente para el diseño del bombeo electrosumergible debido a los problemas encontrados que relacionan el comportamiento del fluido dentro de la tubería de revestimiento evitando problema de erosión y enfriamiento del motor.

4. CONCLUSIONES

- El fluido extraído de los pozos (AA, B, H) es rico en minerales que se incrustan en los filtros de acero inoxidable y componentes del bombeo electrosumergible dañándolos y aumentando el costo del bombeo, por lo que se recomienda un mantenimiento de lavado y redesarrollo del pozo cada 3 años.
- No es viable realizar el levantamiento del fluido producido implementando tubería de 2 7/8" EUE primordialmente por las elevadas caídas de presión desarrolladas en el ducto lo que podría ocasionar eventualmente efectos erosión-corrosión en la tubería y en caso extremo rotura y pérdida de la sarta BES para lo cual se necesitaría realizar una operación de pesca mientras que para las tuberías de 3 1/2 y 5 1/2 pulgadas las pérdidas de carga por fricción son moderadas.
- Las bombas seleccionadas de referencia J 12000 N (REDA), 675-12500 (BORETS) y 675-16000 (BORETS) cumplen con el levantamiento requerido para satisfacer las necesidades hídricas del campo en concepto de uso doméstico y producción de hidrocarburos. Asimismo, éstas pueden ser instaladas en cualquiera de los 4 pozos (AA, H, B, L) debido a que su diámetro no supera el del revestimiento a 350 ft. por otro lado, se recomienda un mantenimiento cada dos años de las bombas por potenciales desgaste de las partes móviles y que deben ser reemplazadas para mantener la eficiencia del bombeo y disminuir costos.

5. RECOMENDACIONES

- Se aconseja instalar un sistema de seguimiento de desempeño de las bombas por medio de cartas amperimétricas ya que esto permitirá determinar de forma anticipada y muy económica los problemas que sufren los sistemas de bombeo sin necesidad de recurrir a servicios de well service, Los problemas que esto permitiría identificar serían: presencia de gas en el pozo, sumergencia inadecuada (profundidad) de la instalación de la bomba, variabilidad del aporte volumétrico del pozo (abatimiento), fisuras en la tubería de producción o en la misma bomba, entre otros (**ver anexo VI**).
- Mejorar la calidad de los reportes diligenciados para evidenciar los problemas que realmente suceden en el sistema de bombeo (se evidencian cambios de motores cuando lo que se reporta es cambio de bomba) detallando las profundidades a las que ubican la sarta BES y así mismo capacitar al personal para que conozca a plenitud los componentes del sistema y su funcionamiento.
- Los motores seleccionados de referencia FRANKLIN ELECTRICS, GLOBAL PRODUCTION SOLUTION, WEATHERFORD-BORETS y REDA cumplen con los requerimientos de potencia dados por la bombas para garantizar el bombeo hacia superficie del agua, sin embargo los motores FE presentan inconveniente de altas velocidades del fluido en la cara del housing debido a su diámetro, por lo que no se hacen recomendables para nuestro caso y optando por instalar los motores GPS o REDA debido a que tienen el menor voltaje de placa suponiendo menor precio en nuestro caso en comparación con el motor WTF-BRTS. Asimismo, se recomienda el mantenimiento del motor cada dos años para garantizar el funcionamiento del mismo.
- Se sugiere instalar sensores de nivel de mayor confiabilidad en los pozos que cumplan las funciones de activar el sistema (sensor de alta normalmente apagado) y apagar el sistema (sensor de baja inverso y normalmente apagado) lo que permitirá alargar la vida útil principalmente del motor al presentarse menos operaciones en seco.
- Se descarta que los motores que actualmente se encuentran instalados (Franklin Electric 8" 100 HP) sufran de problemas por elevadas temperaturas ya que el fluido producido tiene excelentes propiedades para la disipación del calor generado por el motor, lo anterior se complementa con el régimen de flujo turbulento en la región donde el motor es ubicado.

- De forma periódica (cada 3 meses) realizar la medición de los niveles estáticos y dinámicos de los pozos para identificar efectos estacionales de bajo aporte lo que permitiría prolongar la vida útil de los sistemas de bombeo (esto podría complementar lo de las cartas amperimétricas).
- La configuración que cumplió con los requerimientos del levantamiento para los pozos “AA”, “B”, “H”, “L” de objeto de estudio fueron: motores (GPS o Reda), bomba (J 12000 N REDA, 675-12500 BORETS y 675-16000 BORETS) @60Hz, tubería de producción 5 ½ pulgadas y cable (AWG 4); lo anterior garantizaría la producción interrumpida y garantizando los 13.600 BPD de agua hacia superficie por pozo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alhanati, F. Bottomhole Gas Separation Efficiency in Electrical Submersible Pump Installations. PhD Dissertation, University of Tulsa, 1993.
- Banjar, H. M.; Gamboa, J. and H.-Q. Zhang. Experimental Study of Liquid Viscosity Effect on Two-Phase Stage Performance of Electrical Submersible Pumps. SPE 166374, 2013.
- Bagci, S.; Kece, M. and Nava, J. Challenges of Using Electrical Submersible Pump (ESP) in High Free Gas applications. SPE 131760, 2010.
- Bearden J.; Lea J.; Turpin J. Gas-liquid flow through centrifugal pumps-Correlation of data. Proceeding of the third international pump symposium, 1986.
- Christensen P.; Pedersen K. Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids. Taylor & Francis Group, LLC. 2007
- Duran J.; Padro M. ESP Stage Air-Water Two-Phase Performance-Modeling and Experimental Data. SPE 87627, 2003.
- Gamboa J.; Padro M. Experimental Study of Two-Phase Performance of an Electric-Submersible-Pump Stage. SPE-163048-PA, 2012.
- Gamboa J.; Padro M. Visualization Study of Performance Breakdown in Two-Phase Performance of an Electrical Sumersible Pump. (Proceedings of the Twenty-Sixt International Pump Users Symposium-2010), Disponible en: http://turbolab.tamu.edu/proc/pumpproc/P26/ch01_Gamboa.pdf
- Gülich, J. Centrifugal Pumps. Second edition. USA: Springer 2008.
- Hernández M.; Guideline for the Remineralisation of Desalinated Water (Guía para la Remineralización de las Aguas Desaladas). Second edition. 2010
- Kearey, P.; Brooks, M.; Hill L. The Principles and Limitations of Geophysical Exploration Methods. Third edition. Blackwell Science Ltd 2002.
- McCain W. Properties of Petroleum. PennWell Publishing Company 1990.
- Monte Verde, W.; Biazussi, J.; Bannwart, A.; Arrifano Sassim, N.; Estevam, V. Gas and Viscous Effect on the ESPs Performance. SPE 165072, 2013.
- Paris de Ferrer, M. Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos. Venezuela. 2009.

Peña, F. Bombeo Electrosumergible (Descripción, Diseño y Monitoreo) 2005.

Pinto C. Modulo Bombeo Electrosumergible.UIS.2013

Selley, R.; Sonnenberg, S. Elements of Petroleum Geology. Third edition. Elsevier 2015.

Sun, D.; Prado, M. Single-Phase Model for ESP's Head Performance.

Takács, G. Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operation, and Maintenance. USA: Elsevier 2009.

Tiab, D.; Donaldson E. Petrophysic (Theory and Practice Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties). Thrid edition. Elsevier 2012

Tetzlaff, S.; Wonitoy, K.; Ward, B.; Burleigh, L.; Dodds, A. Extreme Temperature ESP Development. ESP 110701, 2007.

ANEXOS

ANEXO NO. I

DISEÑO POZOS DE AGUA (AA, H, B)

Diseño pozo de agua "AA"

Desde (m)	Hasta (m)	Total (m)	Descripción	Diámetro (Pulg)
+1.5	215	216.5	Casing de 9 5/8"	9 5/8"
215	215.5	0.5	Reducción 9 5/8" X 7"	
215.5	247	31.5	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
247	260	13	Casing de 7"	7"
260	290	30	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
290	291	1	Casing de 7" Puntera	7"

Fuente: Compañía operadora

Diseño pozo de agua "H"

Desde (m)	Hasta (m)	Total (m)	Descripción	Diámetro (Pulg)
+0.5	180.45	180.95	Casing de 9 5/8"	9 5/8"
180.45	180.95	0.5	Reducción 9 5/8" X 7"	
180.95	225.73	44.78	Casing de 7"	7"
225.73	320	30	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
320	324	1	Casing de 7" Puntera	7"

Fuente: Compañía operadora

Diseño pozo de agua "B"

Desde (m)	Hasta (m)	Total (m)	Descripción	Diámetro (Pulg)
(+)0.5	180	180.5	Casing de 9 5/8"	9 5/8"
180	180.5	0.5	Reducción 9 5/8" X 7"	
180.5	301.5	121	Casing de 7"	7"
301.5	310.5	9	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
310.5	316	5.5	Casing de 7"	7"
316	322	6	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
322	326	4	Casing de 7"	7"
326	329	3	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
329	330	1	Casing de 7"	7"
330	336	6	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
336	337	1	Casing de 7"	7"
337	343	6	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
343	344	1	Casing de 7"	7"
344	350	6	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
350	354	4	Casing de 7"	7"
354	360	6	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
360	375	15	Casing de 7"	7"
375	387	12	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
387	389.5	2.5	Casing de 7"	7"
389.5	395.5	6	Filtro Acero Inoxidable RC	7"
395.5	399	3.5	Casing de 7" Puntera	7"

Fuente: Compañía operadora

ANEXO NO. II

CALCULO DE LA TDH

- Cabeza dinámica total (TDH) para el pozo “H”:

TDH (ft)		DIAMETRO NOMINAL DE LA TUBERIA DE PRODUCCION (DIAMETRO INTERNO)		
		5 ½ (ID 4,892 in)	3 ½ (ID 3,476 in)	2 7/8 (ID 2,441 in)
PROFUNDIDAD DE LA SARTA BES (ft)	260	359,51	433,08	848,37
	350	365,49	464,52	1023,56
	420	370,14	488,98	1159,83

- Cabeza dinámica total (TDH) para el pozo “AA”:

TDH (ft)		DIÁMETRO NOMINAL DE LA TUBERÍA DE PRODUCCIÓN (DIÁMETRO INTERNO)		
		5 ½ (ID 4,892 in)	3 ½ (ID 3,476 in)	2 7/8 (ID 2,441 in)
PROFUNDIDAD DE INSTALACIÓN BES (ft)	280	306,77	386	833,23
	350	311,43	410,46	969,50
	420	334,06	434,90	1105,75

ANEXO NO. III

DATOS DE OPERACIÓN DE BOMBAS ELECTROSUMERGIBLES

- **CENTRILIFT KC 12000**

Rango de operación optimo 9500 – 14500 BPD

Frecuencia 60 Hz / 3500 RPM

Diámetro de las etapas: 5.62 pulg

Diámetro nominal del Housing 5.63 pulg

- **CENTRILIFT HC 12500**

Rango de operación optimo 9000 – 16000 BPD

Frecuencia 60 Hz / 3500 RPM

Diámetro de las etapas: 6.75 pulg

Diámetro nominal del Housing 6.75 pulg

- **GRUNDFOS SP 77 – 7**

Rango de operación optimo 7850 – 13890 BPD

Frecuencia 50 Hz / 2917 RPM

Diámetro de las etapas: 7.87 pulg

Diámetro nominal del Housing 8 pulg

Numero de etapas: 7

- **GRUNDFOS SP 95 – 6**

Rango de operación optimo 9100 – 16600 BPD

Frecuencia 50 Hz / 2917 RPM

Diámetro de las etapas: 7.87 pulg

Diámetro nominal del Housing 8 pulg

Numero de etapas: 6

- **REDA HN13500**

Rango de operación óptimo 5000 – 18000 BPD
Frecuencia 60 Hz / 3500 RPM
Diámetro de las etapas: 5.62 pulg
Diámetro nominal del Housing 5.63 pulg
Diámetro del eje: 1.00 pulg
Área transversal del eje: 0,785 pulg²
Diámetro mínimo del revestimiento: 7.00 pulg
Límite de potencia al freno requerida por el eje: Standard 375 HP, Alta fuerza 600 HP
Límite de presión de rotura del Housing: Standard 3000 psi Buttress N/A Soldado 3600 psi

- **REDA J12000N**

Rango de operación óptimo 8000 – 18500 BPD
Frecuencia 60 Hz / 3500 RPM
Diámetro de las etapas: 6.75 pulg
Diámetro nominal del Housing 6.75 pulg
Diámetro del eje: 1.118 pulg
Área transversal del eje: 1.108 pulg²
Diámetro mínimo del revestimiento: 8.625 pulg
Límite de potencia al freno requerida por el eje: Standard 637 HP, Alta fuerza 1019 HP
Límite de presión de rotura del Housing: Standard N/A Buttress/Soldado 3060 psi

- **BORETS 675-12000**

Rango de operación óptimo 7500 – 16000 BPD
Frecuencia 60 Hz / 3500 RPM
Tipo de flujo: Mixto
Diámetro de las etapas: 6.75 pulg
Diámetro nominal del Housing 6.75 pulg
Diámetro del eje: 1.187 pulg
Área transversal del eje: 1.107 pulg²
Diámetro mínimo del revestimiento: 8.625 pulg
Límite de potencia al freno requerida por el eje: Standard 645 HP, Alta fuerza 1230 HP
Límite de presión de rotura del Housing: Buttress 3600 psi

- **BORETS 675-16000**

Rango de operación optimo 11000 – 17000 BPD

Frecuencia 60 Hz / 3500 RPM

Tipo de flujo: Mixto

Diámetro de las etapas: 6.75 pulg

Diámetro nominal del Housing 6.75 pulg

Diámetro del eje: 1.187 pulg

Área transversal del eje: 1.107 pulg²

Diámetro mínimo del revestimiento: 8.625 pulg

Límite de potencia al freno requerida por el eje: Standard 645 HP, Alta fuerza 1230 HP

Límite de presión de rotura del Housing: Buttress 3600 psi

ANEXO NO. IV

ANÁLISIS COMPARATIVO POZO “H”

En este análisis comparativo se propone implementar el mismo número de etapas calculado para el pozo “B” con la TDH (476,32 ft) de diseño, ya que con ese número de etapas también se garantizaría el levantamiento para el pozo “H” a la profundidad y tubería de diseño (ver tabla A).

Tabla A. Numero de etapas

Marca	Referencia	Etapas
GRUNDFOS	SP 125-5	5
CENTRILIFT	KC 12000	14
CENTRILIFT	HC 12500	7
GRUNDFOS	SP 77-7	7
GRUNDFOS	SP 95-6	6
REDA	HN 13500	13
REDA	J 12000 N	6
BORETS	675-12500	6
BORETS	675-16000	6

Para evidenciar la incidencia de cada una de las bombas electrosumergible seleccionadas y proceder a decidir cuál de las referencias brinda más ventajas para el caso de estudio se plantea los pasos realizados anteriormente en la sección 3.4.3:

- Mantener la profundidad constantes variando la frecuencia de trabajo y el diámetro de la tubería de producción.

Tabla B. Pozo de agua “H” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 5 ½ pulg

Referencia	60 Hz / 3500 RPM		50 Hz / 2900 RPM		TDH (ft)
	H (ft)	BHP (HP)	H (ft)	BHP (HP)	
SP 125-5	581,0	96,1	403,5	55,6	365,49
KC 12000	509,2	69,2	277,8	40,0	
HC 12500	555,3	67,9	330,5	39,3	
SP 77-7	316,9	54,0	220,1	31,2	
SP 95-6	361,6	56,5	251,1	32,7	
HN 13500	505,6	75,5	297,1	43,7	
J 12000 N	484,9	67,0	336,7	38,8	
675-12500	489,9	66,2	340,2	38,3	
675-16000	504,8	69,3	350,5	40,1	

Se observa en la tabla B, los datos obtenidos para el análisis del pozo “H” para todas las BES seleccionadas e instaladas a una profundidad de 350,04 ft (100 m) con tubería de producción de 5 ½ pulgadas y una frecuencia de 60 Hz / 3500 RPM las bombas de referencia SP 77–7 (GRUNDFOS) y SP 95 – 6 (GRUNDFOS), no logran cumplir con el levantamiento mínimo requerido fijado por la cabeza dinámica total. Por otro lado, para una frecuencia de 50 Hz / 2900 RPM, la única referencia que logra cumplir con el levantamiento es SP 125 – 5 (GRUNDFOS).

Tabla C. Pozo de agua “H” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 3 ½ pulg

Referencia	60 Hz / 3500 RPM		50 Hz / 2900 RPM		TDH (ft)
	H (ft)	BHP (HP)	H (ft)	BHP (HP)	
SP 125-5	581,0	96,1	403,5	55,6	464,52
KC 12000	400,1	69,2	277,8	40,0	
HC 12500	476,0	67,9	330,5	39,3	
SP 77-7	316,9	54,0	220,1	31,2	
SP 95-6	361,6	56,5	251,1	32,7	
HN 13500	427,8	75,5	297,1	43,7	
J 12000 N	484,9	67,0	336,7	38,8	
675-12500	489,9	66,2	340,2	38,3	
675-16000	504,8	69,3	350,5	40,1	

De acuerdo a la tabla C, se obtiene los datos para el análisis del pozo “H” en donde vemos que las referencias SP 125 – 5 (GRUNDFOS), HC 12500 (CENTRILIFT), J 12000 N (REDA), 675-12500 (BORETS) y 675-16000 (BORETS) a una profundidad de 350,04 ft (100 m) con tubería de producción de 3 ½ pulgadas y una frecuencia de 60 Hz / 3500 rpm logran cumplir con el levantamiento mínimo requerido fijado por la cabeza dinámica total. Mientras que a una frecuencia de 50 Hz / 2900 rpm, ninguna referencias cumple con el levantamiento mínimo requerido.

Tabla D. Pozo de agua “H” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 2 7/8 pulg

Referencia	60 Hz / 3500 RPM		50 Hz / 2900 RPM		TDH (ft)
	H (ft)	BHP (HP)	H (ft)	BHP (HP)	
SP 125-5	581,0	96,1	403,5	55,6	1023,56
KC 12000	400,1	69,2	277,8	40,0	
HC 12500	476,0	67,9	330,5	39,3	
SP 77-7	316,9	54,0	220,1	31,2	
SP 95-6	361,6	56,5	251,1	32,7	
HN 13500	427,8	75,5	297,1	43,7	
J 12000 N	484,9	67,0	336,7	38,8	
675-12500	489,9	66,2	340,2	38,3	
675-16000	504,8	69,3	350,5	40,1	

Adicionalmente se presenta la tabla D, la cual contiene los datos para el análisis del pozo “H” en donde vemos que todas las BES seleccionadas e instaladas a una profundidad de 350,04 ft (100 m) con tubería de producción de 2 7/8 pulg pulgadas y una frecuencia de 60 / 50 Hz, no logran cumplir con el levantamiento mínimo requerido de trabajo por la TDH.

- Mantener la frecuencia de trabajo constante cambiando la profundidad de instalación de la bomba electrosumergible y el diámetro de la tubería de producción.

De acuerdo a lo anterior se presenta la tabla E, en donde se observa que para una frecuencia de 60 Hz, la TDH aumenta conforme se incrementa la profundidad de instalación de la BES, lo que provoca que la mayoría de las referencias cumplan con el levantamiento requerido excepto SP 77 – 7 (GRUNDFOS).

Tabla E. Pozo de agua “H” @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 5 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	359,51	581,0	1,62	365,49	581,0	1,59	370,14	581,0	1,57
KC 12000		400,1	1,11		400,1	1,09		400,1	1,08
HC 12500		476,0	1,32		476,0	1,30		476,0	1,29
SP 77-7		316,9	0,88		316,9	0,87		316,9	0,86
SP 95-6		361,6	1,01		361,6	0,99		361,6	0,98
HN 13500		427,8	1,19		427,8	1,17		427,8	1,16
J 12000 N		484,9	1,35		484,9	1,33		484,9	1,31
675-12500		489,9	1,36		489,9	1,34		489,9	1,32
675-16000		504,8	1,40		504,8	1,38		504,8	1,36

Para el caso de 50 Hz a profundidad de 260 ft, 350 ft y 420 ft. La única referencias que cumplió el levantamiento requerido la SP 125-5 (GRUNDFOS (ver tabla F).

Tabla F. Pozo de agua “H” @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 5 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	359,51	403,5	1,12	365,49	403,5	1,10	370,14	403,5	1,09
KC 12000		277,8	0,77		277,8	0,76		277,8	0,75
HC 12500		330,5	0,92		330,5	0,90		330,5	0,89
SP 77-7		220,1	0,61		220,1	0,60		220,1	0,59
SP 95-6		251,1	0,70		251,1	0,69		251,1	0,68
HN 13500		297,1	0,83		297,1	0,81		297,1	0,80
J 12000 N		336,7	0,94		336,7	0,92		336,7	0,91
675-12500		340,2	0,95		340,2	0,93		340,2	0,92
675-16000		350,5	0,98		350,5	0,96		350,5	0,95

Ahora bien se procede a realizar los cálculos anteriormente descritos pero para un diámetro de tubería de producción de 3 ½ pulgadas se encuentra lo siguiente:

Tabla G. Pozo de agua “H” @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 3 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	433,08	581,0	1,34	464,52	581,0	1,25	488,98	581,0	1,19
KC 12000		400,1	0,92		400,1	0,86		400,1	0,82
HC 12500		476,0	1,10		476,0	1,02		476,0	0,97
SP 77-7		316,9	0,73		316,9	0,68		316,9	0,65
SP 95-6		361,6	0,83		361,6	0,78		361,6	0,74
HN 13500		427,8	0,99		427,8	0,92		427,8	0,87
J 12000 N		484,9	1,12		484,9	1,04		484,9	0,99
675-12500		489,9	1,13		489,9	1,05		489,9	1,00
675-16000		504,8	1,17		504,8	1,09		504,8	1,03

De acuerdo a la tabla G, las referencias SP 77 – 7 (GRUNDFOS), SP 95 – 6 (GRUNDFOS) y KC 12000 (CENTRILIFT), no cumplen para profundidades de 260 ft y 350ft. Asimismo, lo hacen a una profundidad de 350 ft. Mientras tanto para la profundidad de 420 ft las referencias SP 125-5 (GRUNDFOS), 675-12500 (BORETS) y 675-16000 (BORETS) cumple con el levantamiento.

Tabla H. Pozo de agua “H” @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 3 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	433,08	403,5	0,93	464,52	403,5	0,87	488,98	403,5	0,83
KC 12000		277,8	0,64		277,8	0,60		277,8	0,57
HC 12500		330,5	0,76		330,5	0,71		330,5	0,68
SP 77-7		220,1	0,51		220,1	0,47		220,1	0,45
SP 95-6		251,1	0,58		251,1	0,54		251,1	0,51
HN 13500		297,1	0,69		297,1	0,64		297,1	0,61
J 12000 N		336,7	0,78		336,7	0,72		336,7	0,69
675-12500		340,2	0,79		340,2	0,73		340,2	0,70
675-16000		350,5	0,81		350,5	0,75		350,5	0,72

En la tabla H, se plantea con una frecuencia de trabajo de 50 Hz para profundidades de 260ft, 350ft y 420ft. En donde se ve que no cumplen ninguna las referencias seleccionadas.

Los resultados obtenidos para las frecuencias de trabajo de 60 Hz / 50 Hz a las profundidades indicadas anteriormente mencionadas con tubería de producción de 2 7/8 pulgadas ninguna de las referencias seleccionadas logra cumplir con el levantamiento requerido al poseer relaciones H/TDH menores a uno, en la tabla I y J se puede apreciarlos cálculos.

Tabla I. Pozo de agua "H" @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 2 7/8 pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	848,37	581,0	0,68	1023,56	581,0	0,57	1159,83	581,0	0,50
KC 12000		400,1	0,47		400,1	0,39		400,1	0,34
HC 12500		476,0	0,56		476,0	0,47		476,0	0,41
SP 77-7		316,9	0,37		316,9	0,31		316,9	0,27
SP 95-6		361,6	0,43		361,6	0,35		361,6	0,31
HN 13500		427,8	0,50		427,8	0,42		427,8	0,37
J 12000 N		484,9	0,57		484,9	0,47		484,9	0,42
675-12500		489,9	0,58		489,9	0,48		489,9	0,42
675-16000		504,8	0,59		504,8	0,49		504,8	0,44

Tabla J. Pozo de agua "H" @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 2 7/8 pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	848,37	403,5	0,48	1023,56	403,5	0,39	1159,83	403,5	0,35
KC 12000		277,8	0,33		277,8	0,27		277,8	0,24
HC 12500		330,5	0,39		330,5	0,32		330,5	0,28
SP 77-7		220,1	0,26		220,1	0,22		220,1	0,19
SP 95-6		251,1	0,30		251,1	0,25		251,1	0,22
HN 13500		297,1	0,35		297,1	0,29		297,1	0,26
J 12000 N		336,7	0,40		336,7	0,33		336,7	0,29
675-12500		340,2	0,40		340,2	0,33		340,2	0,29
675-16000		350,5	0,41		350,5	0,34		350,5	0,30

ANEXO NO. V

ANÁLISIS COMPARATIVO POZO “AA”

En este análisis comparativo se propone implementar el mismo número de etapas calculado para el pozo “B” con la TDH (476,32 ft) de diseño, ya que con ese número de etapas también se garantizaría el levantamiento para el pozo “AA” a la profundidad y tubería de diseño (ver tabla A1).

Tabla A1. Numero de etapas

Marca	Referencia	Etapas
GRUNDFOS	SP 125-5	5
CENTRILIFT	KC 12000	14
CENTRILIFT	HC 12500	7
GRUNDFOS	SP 77-7	7
GRUNDFOS	SP 95-6	6
REDA	HN 13500	13
REDA	J 12000 N	6
BORETS	675-12500	6
BORETS	675-16000	6

Para evidenciar la incidencia de cada una de las bombas electrosomergible seleccionadas y proceder a decidir cuál de las referencias brinda más ventajas para el caso de estudio se plantea los pasos realizados anteriormente en la sección 3.4.3:

- Mantener la profundidad constantes variando la frecuencia de trabajo y el diámetro de la tubería de producción.

Tabla B2. Pozo de agua “AA” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 5 ½ pulg

Referencia	60 Hz / 3500 RPM		50 Hz / 2900 RPM		TDH (ft)
	H (ft)	BHP (HP)	H (ft)	BHP (HP)	
SP 125-5	581,0	96,1	403,5	55,6	311,43
KC 12000	509,2	69,2	277,8	40,0	
HC 12500	555,3	67,9	330,5	39,3	
SP 77-7	316,9	54,0	220,1	31,2	
SP 95-6	361,6	56,5	251,1	32,7	
HN 13500	505,6	75,5	297,1	43,7	
J 12000 N	484,9	67,0	336,7	38,8	
675-12500	489,9	66,2	340,2	38,3	
675-16000	504,8	69,3	350,5	40,1	

Se observa en la tabla B2, los datos obtenidos para el análisis del pozo “AA” para todas las BES seleccionadas e instaladas a una profundidad de 350,04 ft (100 m) con tubería de producción de 5 ½ pulgadas y una frecuencia de 60 Hz / 3500 RPM las bombas de referencia SP 77–7 (GRUNDFOS) y SP 95 – 6 (GRUNDFOS), no logran cumplir con el levantamiento mínimo requerido fijado por la cabeza dinámica total. Por otro lado, para una frecuencia de 50 Hz / 2900 RPM, las únicas referencias que no logra cumplir con el levantamiento son SP 77–7 (GRUNDFOS), SP 95 – 6 (GRUNDFOS), KC 12000 (CENTRILIFT) y HN 13500 (REDA).

De acuerdo a la tabla C3, se obtiene los datos para el análisis del pozo “AA” en donde vemos que las referencias SP 125 – 5 (GRUNDFOS), HC 12500 (CENTRILIFT), J 12000 N (REDA), 675-12500 (BORETS) y 675-16000 (BORETS) a una profundidad de 350,04 ft (100 m) con tubería de producción de 3 ½ pulgadas y una frecuencia de 60 Hz / 3500 rpm logran cumplir con el levantamiento mínimo requerido fijado por la cabeza dinámica total. Mientras que a una frecuencia de 50 Hz / 2900 rpm, ninguna referencias cumple con el levantamiento mínimo requerido.

Tabla C3. Pozo de agua “AA” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 3 ½ pulg

Referencia	60 Hz / 3500 RPM		50 Hz / 2900 RPM		TDH (ft)
	H (ft)	BHP (HP)	H (ft)	BHP (HP)	
SP 125-5	581,0	96,1	403,5	55,6	410,46
KC 12000	400,1	69,2	277,8	40,0	
HC 12500	476,0	67,9	330,5	39,3	
SP 77-7	316,9	54,0	220,1	31,2	
SP 95-6	361,6	56,5	251,1	32,7	
HN 13500	427,8	75,5	297,1	43,7	
J 12000 N	484,9	67,0	336,7	38,8	
675-12500	489,9	66,2	340,2	38,3	
675-16000	504,8	69,3	350,5	40,1	

Adicionalmente se presenta la tabla D, la cual contiene los datos para el análisis del pozo “H” en donde vemos que todas las BES seleccionadas e instaladas a una profundidad de 350,04 ft (100 m) con tubería de producción de 2 7/8 pulg pulgadas y una frecuencia de 60 / 50 Hz, no logran cumplir con el levantamiento mínimo requerido de trabajo por la TDH.

Tabla D4. Pozo de agua “AA” @ 60 Hz / 50 Hz, 350,04 ft y 2 7/8 pulg

Referencia	60 Hz / 3500 RPM		50 Hz / 2900 RPM		TDH (ft)
	H (ft)	BHP (HP)	H (ft)	BHP (HP)	
SP 125-5	581,0	96,1	403,5	55,6	969,5
KC 12000	400,1	69,2	277,8	40,0	
HC 12500	476,0	67,9	330,5	39,3	
SP 77-7	316,9	54,0	220,1	31,2	
SP 95-6	361,6	56,5	251,1	32,7	
HN 13500	427,8	75,5	297,1	43,7	
J 12000 N	484,9	67,0	336,7	38,8	
675-12500	489,9	66,2	340,2	38,3	
675-16000	504,8	69,3	350,5	40,1	

- Mantener la frecuencia de trabajo constante cambiando la profundidad de instalación de la bomba electrosumergible y el diámetro de la tubería de producción.

De acuerdo a lo anterior se presenta la tabla E5, en donde se observa que para una frecuencia de 60 Hz, la TDH aumenta conforme se incrementa la profundidad de instalación de la BES, lo que provoca que la mayoría de las referencias cumplan con el levantamiento requerido excepto SP 77 – 7 (GRUNDFOS) a una profundidad de 420 ft.

Tabla E5. Pozo de agua “AA” @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 5 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	305,67	581,0	1,90	311,43	581,0	1,87	334,06	581,0	1,74
KC 12000		400,1	1,31		400,1	1,28		400,1	1,20
HC 12500		476,0	1,56		476,0	1,53		476,0	1,42
SP 77-7		316,9	1,04		316,9	1,02		316,9	0,95
SP 95-6		361,6	1,18		361,6	1,16		361,6	1,08
HN 13500		427,8	1,40		427,8	1,37		427,8	1,28
J 12000 N		484,9	1,59		484,9	1,56		484,9	1,45
675-12500		489,9	1,60		489,9	1,57		489,9	1,47
675-16000		504,8	1,65		504,8	1,62		504,8	1,51

Para el caso de 50 Hz a profundidad de 260 ft, 350 ft y 420 ft. La única referencias que cumplieron con el levantamiento requerido a las tres profundidades propuestas fueron la SP 125-5 (GRUNDFOS), J 12000 N (REDA), 675-12500 (BORETS) y 675-16000 (BORETS) como se puede apreciar en la tabla F6.

Tabla F6. Pozo de agua "AA" @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 5 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	305,67	403,5	1,32	311,43	403,5	1,30	334,06	403,5	1,21
KC 12000		277,8	0,91		277,8	0,89		277,8	0,83
HC 12500		330,5	1,08		330,5	1,06		330,5	0,99
SP 77-7		220,1	0,72		220,1	0,71		220,1	0,66
SP 95-6		251,1	0,82		251,1	0,81		251,1	0,75
HN 13500		297,1	0,97		297,1	0,95		297,1	0,89
J 12000 N		336,7	1,10		336,7	1,08		336,7	1,01
675-12500		340,2	1,11		340,2	1,09		340,2	1,02
675-16000		350,5	1,15		350,5	1,13		350,5	1,05

Ahora bien se procede a realizar los cálculos anteriormente descritos pero para un diámetro de tubería de producción de 3 ½ pulgadas se encuentra lo siguiente:

Tabla G7. Pozo de agua "AA" @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 3 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	379,24	581,0	1,53	410,46	581,0	1,42	434,9	581,0	1,34
KC 12000		400,1	1,05		400,1	0,97		400,1	0,92
HC 12500		476,0	1,26		476,0	1,16		476,0	1,09
SP 77-7		316,9	0,84		316,9	0,77		316,9	0,73
SP 95-6		361,6	0,95		361,6	0,88		361,6	0,83
HN 13500		427,8	1,13		427,8	1,04		427,8	0,98
J 12000 N		484,9	1,28		484,9	1,18		484,9	1,11
675-12500		489,9	1,29		489,9	1,19		489,9	1,13
675-16000		504,8	1,33		504,8	1,23		504,8	1,16

De acuerdo a la tabla G7, las referencias SP 77 – 7 (GRUNDFOS), SP 95 – 6 (GRUNDFOS), no cumplen para profundidades de 260 ft, 350f y 420t. Asimismo, lo hace a la bomba KC 12000 (CENTRILIFT) a una profundidad de 350ft y 420 ft. La referencia HN 13500 no cumple con el levantamiento requerido a una profundidad de 420 ft.

Tabla H8. Pozo de agua "AA" @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 3 ½ pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	379,24	403,5	1,06	410,46	403,5	0,98	434,9	403,5	0,93
KC 12000		277,8	0,73		277,8	0,68		277,8	0,64
HC 12500		330,5	0,87		330,5	0,81		330,5	0,76
SP 77-7		220,1	0,58		220,1	0,54		220,1	0,51
SP 95-6		251,1	0,66		251,1	0,61		251,1	0,58
HN 13500		297,1	0,78		297,1	0,72		297,1	0,68
J 12000 N		336,7	0,89		336,7	0,82		336,7	0,77
675-12500		340,2	0,90		340,2	0,83		340,2	0,78
675-16000		350,5	0,92		350,5	0,85		350,5	0,81

En la tabla H8, se plantea con una frecuencia de trabajo de 50 Hz para profundidades de 260ft, 350ft y 420ft. En donde se ve que no cumplen ninguna las referencias seleccionadas excepto la SP 125-5 (GRUNDFOS) a 260 ft.

Los resultados obtenidos para las frecuencias de trabajo de 60 Hz / 50 Hz a las profundidades indicadas anteriormente mencionadas con tubería de producción de 2 7/8 pulgadas ninguna de las referencias seleccionadas logra cumplir con el levantamiento requerido al poseer relaciones H/TDH menores a uno, en la tabla I9 y J10 se puede apreciarlos cálculos.

Tabla I9. Pozo de agua "AA" @ 60 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 2 7/8 pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	794,53	581,0	0,73	969,50	581,0	0,60	1105,75	581,0	0,53
KC 12000		400,1	0,50		400,1	0,41		400,1	0,36
HC 12500		476,0	0,60		476,0	0,49		476,0	0,43
SP 77-7		316,9	0,40		316,9	0,33		316,9	0,29
SP 95-6		361,6	0,46		361,6	0,37		361,6	0,33
HN 13500		427,8	0,54		427,8	0,44		427,8	0,39
J 12000 N		484,9	0,61		484,9	0,50		484,9	0,44
675-12500		489,9	0,62		489,9	0,51		489,9	0,44
675-16000		504,8	0,64		504,8	0,52		504,8	0,46

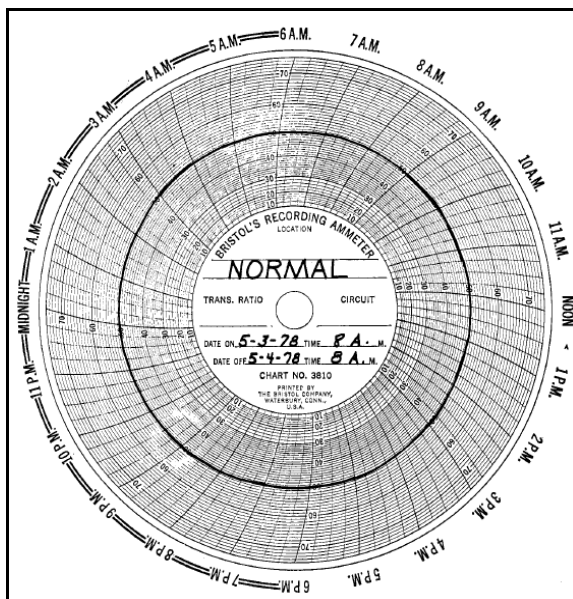
Tabla J10. Pozo de agua "AA" @ 50 Hz, 260, 350 y 420 ft de profundidad y 2 7/8 pulg

Referencia	TDH @ 260 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 350 ft	H (ft)	H/TDH	TDH @ 420 ft	H (ft)	H/TDH
SP 125-5	794,53	403,5	0,51	969,50	403,5	0,42	1105,75	403,5	0,36
KC 12000		277,8	0,35		277,8	0,29		277,8	0,25
HC 12500		330,5	0,42		330,5	0,34		330,5	0,30
SP 77-7		220,1	0,28		220,1	0,23		220,1	0,20
SP 95-6		251,1	0,32		251,1	0,26		251,1	0,23
HN 13500		297,1	0,37		297,1	0,31		297,1	0,27
J 12000 N		336,7	0,42		336,7	0,35		336,7	0,30
675-12500		340,2	0,43		340,2	0,35		340,2	0,31
675-16000		350,5	0,44		350,5	0,36		350,5	0,32

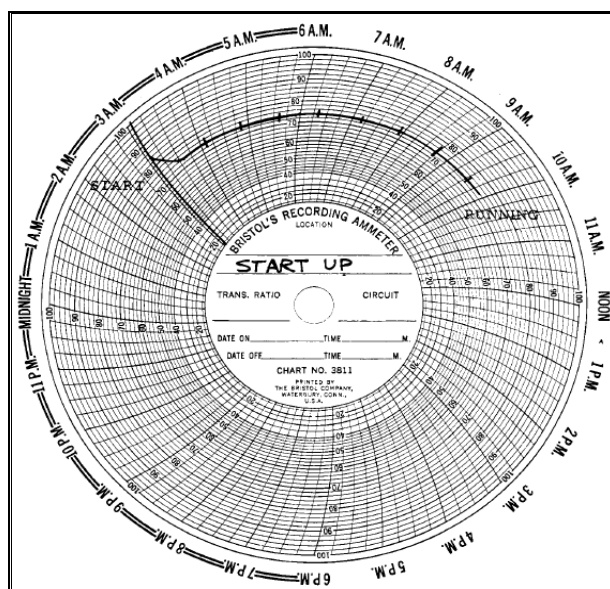
ANEXO NO. VI

CARTAS AMPERIMÉTRICAS

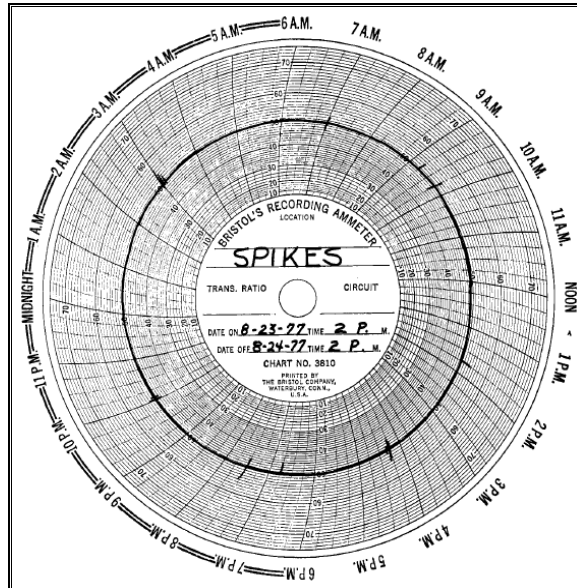
- Operación normal



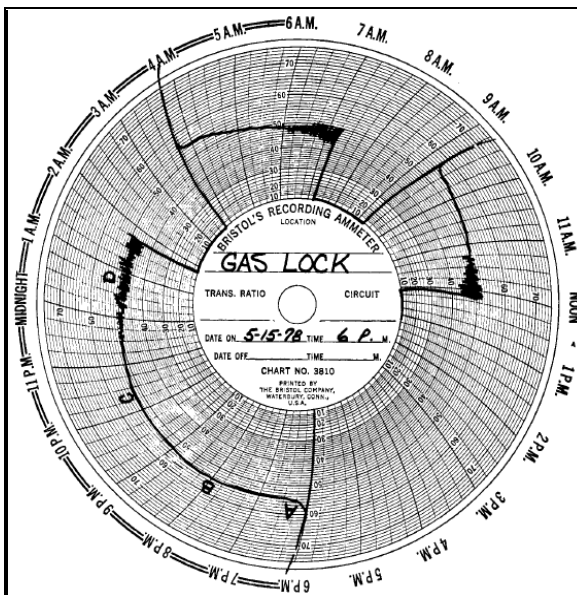
- Arranque normal



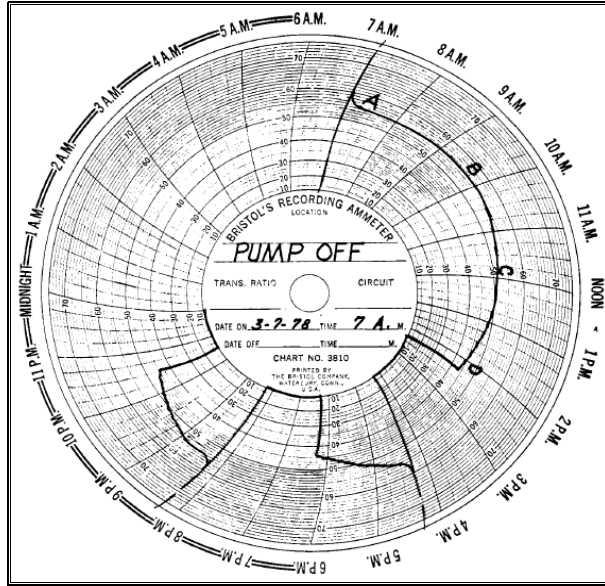
- Fluctuaciones en la alimentación



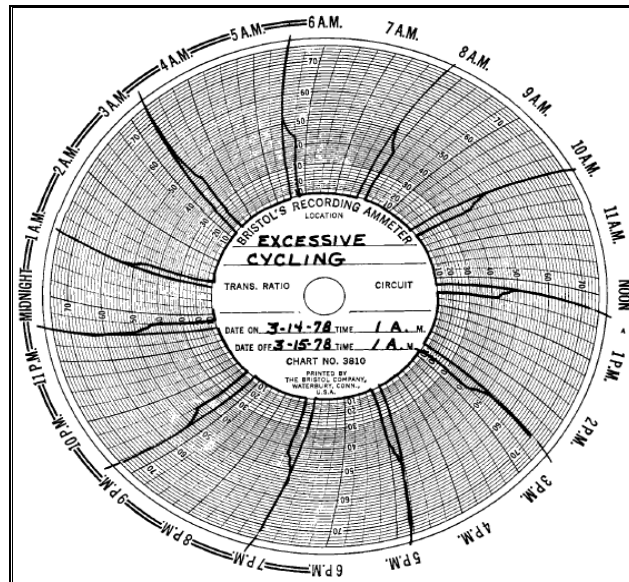
- Bloqueo por gas



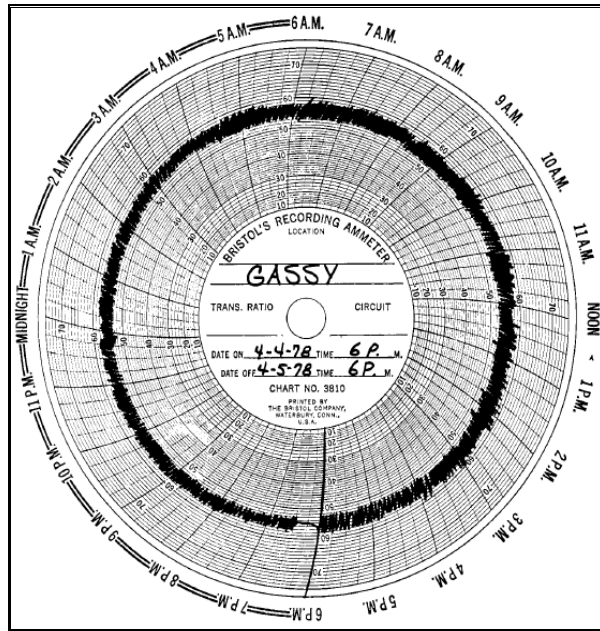
- BES muy larga para capacidad de aporte del pozo



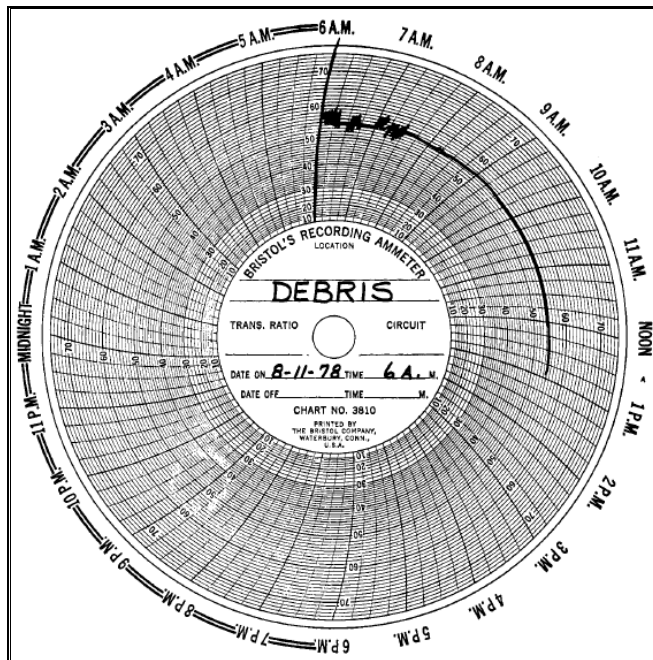
- Exceso ciclos



- Gassy



- Debris



- Sobrecarga

