



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

**“ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN
LA UTILIZACIÓN DEL CABLE DE POTENCIA DE
CONFIGURACIÓN REDONDA Y PLANA UTILIZADO EN EL
SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO
ELECTROSUMERGIBLE EN LA EMPRESA ANDES PETROLEUM
ECUADOR LTD.”**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO DE PETRÓLEOS**

ALEJANDRO GABRIEL URQUIZO SOLÓRZANO

DIRECTOR: ING. BENJAMÍN HINCAPIÉ

Quito, Diciembre 2015

© Universidad Tecnológica Equinoccial. 2015

Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo **ALEJANDRO GABRIEL URQUIZO SOLÓRZANO**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Alejandro Gabriel Urquizo Solórzano

C.I. 172330812-6

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título “**Análisis técnico de las ventajas y desventajas en la utilización del cable de potencia de configuración redonda y plana utilizado en el sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible en la empresa Andes Petroleum Ecuador Ltd.**”, que, para aspirar al título de **Ingeniero en Petróleos** fue desarrollado por **Alejandro Gabriel Urquizo Solórzano**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 18 y 25.

Ing. Benjamín Hincapié

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 0800852758

CARTA DE LA INSTITUCIÓN



ANDES PETROLEUM ECUADOR LTD.

Quito, 19 de junio de 2015
ANDPE-76434/2015

Doctora
Yvonne Fabara Arias
Secretaria de Hidrocarburos
En su despacho.-

De mi consideración:

Por la presente certifico que el Señor Alejandro Gabriel Urquizo Solórzano portador de la cédula número 172330812-6 desarrollará su tesis con el tema de "Análisis técnico de las ventajas y desventajas en la utilización del cable de potencia de configuración redondo y plano utilizado en el método de levantamiento artificial de bombeo electrosumergible auspiciado por la empresa Andes Petroleum Ecuador Ltd." la misma que desarrollará desde el 22 de Junio del 2015.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,
Andes Petroleum Ecuador Ltd.


Claudio Pinto
GERENTE DE RECURSOS HUMANOS



Naciones Unidas ETO-44
y Republica de El Salvador
Edif. CITIPLAZA
PBX: (593-2) 298 8500
Fax: (593-2) 297 0271
www.andespetro.com
Quito - Ecuador

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de titulación a Dios y a mis padres. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que he dado, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora. Los amo con mi vida.

También dedico este proyecto a mi novia, Gabriela Saltos, compañera inseparable de cada jornada. Ella ha sido mi fortaleza que me ha ayudado a tener constancia en momentos de decline y cansancio.

A ellos este proyecto, que sin ellos, no hubiese podido ser.

Alejandro Urquizo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por darme la oportunidad de vivir y por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el período de mis estudios.

A mis padres Galo Urquizo y Carmen Solórzano quienes han sido el pilar fundamental para terminar este importante logro en mi vida. A mi hermana Nataly Urquizo quien con su apoyo incondicional y palabras de aliento siempre estuvo presente en el transcurso de mi vida estudiantil.

A mi familia por su colaboración en momentos difíciles, en especial a mis tíos Marco Urquizo, Cielo Solórzano y María Angélica Urquizo, por siempre estar prestos a brindarme su mano cuando más los necesite son pedir nada a cambio. A mis abuelitas Antonieta Álvarez y Mariana Minaya quienes con su amor incondicional me supieron orientar de la mejor manera para lograr culminar con éxito una etapa más en mi vida.

A mi novia Gabriela Saltos por estar siempre presente en cada paso que he dado, ayudándome a culminar este logro en mi vida, dedicándome minutos valiosos de su tiempo para este de este sueño una realidad.

A mi director de tesis Ing. Benjamín Hincapié por la orientación y consejos brindados que me sirvieron para culminar este proyecto.

Al personal de Andes Petroleum Ecuador Ing. Max Morocho, Ing. Juan Córdova e Ing. Alexander Albuja, quienes con su colaboración y paciencia me brindaron todo su conocimiento y ayuda para culminar el presente proyecto.

Finalmente un eterno agradecimiento a mi prestigiosa Universidad la cual me abrió sus puertas, preparándome para un futuro competitivo y formándome como persona de bien.

Alejandro Urquizo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PROBLEMA.....	2
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPITULO II.....	4
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE.....	4
2.1.1. COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	7
2.1.1.1. Componentes de superficie	7
2.1.1.1.1. Banco de Transformación Eléctrica.....	7
2.1.1.1.2. Tablero de control o Switchboard	9
2.1.1.1.3. Variador de Frecuencia	9
2.1.1.1.4. Caja de venteo	11
2.1.1.1.5. Cabezal del pozo.....	12
2.1.1.2. Componentes de subsuelo	14
2.1.1.2.1. Sensor de Fondo.....	15
2.1.1.2.2. Motor eléctrico.....	15

2.1.1.2.3.	Protector.....	18
2.1.1.2.4.	Separador de Gas	19
2.1.1.2.5.	Bomba Centrífuga Sumergible	22
2.1.1.2.6.	Cable de Potencia	24
2.1.1.2.7.	Cable de extensión del motor (MLE - Motor Lead Extension)	25
2.1.1.2.8.	Pothead.....	27
2.1.1.2.9.	Flejes.....	27
2.1.1.2.10.	Centralizador	28
2.2.	FUNDAMENTOS ELÉCTRICOS	29
2.2.1.	CORRIENTE (I).....	29
2.2.2.	VOLTAJE (V)	29
2.2.3.	FRECUENCIA (F)	29
2.2.4.	LEY DE OHM	29
2.2.5.	RESISTENCIA (R)	30
2.2.6.	ENERGÍA	31
2.2.7.	POTENCIA (P)	31
2.2.8.	CAPACITANCIA (C).....	31
2.2.9.	INDUCTANCIA (L)	32
2.2.10.	REACTANCIA (X).....	32
2.2.11.	IMPEDANCIA (Z).....	32
2.2.12.	AMPLITUD DE LA ONDA	33
2.3.	OTRAS DEFINICIONES.....	33
2.3.1.	CORROSIÓN	33

2.3.2.	DUREZA Y SUAVIDAD.....	33
2.3.3.	ELASTICIDAD.....	34
2.3.4.	RESISTENCIA A LA TEMPERATURA.....	34
2.3.5.	CARGA DE ROTURA	34
2.3.6.	ALARGAMIENTO.....	34
2.3.7.	MÓDULO	35
2.3.8.	FUERZA DE DESGARRO	35
2.3.9.	RESISTENCIA A FLUIDOS	35
2.3.10.	RESISTENCIA QUÍMICA.....	35
2.3.11.	ELASTICIDAD DE REBOTE / RESILIENCIA	35
2.3.12.	RESISTENCIA A LA ABRASIÓN.....	36
CAPITULO III.....		37
3.	METODOLOGÍA.....	37
3.1.	CABLE DE POTENCIA ELÉCTRICO	37
3.1.1.	COMPONENTES DEL CABLE	39
3.1.1.1.	Armadura.....	40
3.1.1.2.	Chaqueta	40
3.1.1.3.	Barrera.....	41
3.1.1.4.	Aislamiento	41
3.1.1.4.1.	Características principales de los aislamientos	42
3.1.1.5.	Conductor	42
3.1.1.5.1.	Sólido	43
3.1.1.5.2.	Trenzado o redondo	43
3.1.1.5.3.	Compacto	43

3.1.2.	TIPOS DE CABLES DE POTENCIA	43
3.1.3.	PARAMETROS PARA SELECCIONAR EL CABLE DE POTENCIA.	45
3.1.3.1.	Tamaño del cable	45
3.1.3.2.	Tipo de cable	48
3.1.3.3.	Longitud del cable.....	49
3.1.4.	PARÁMETROS PARA DIMENSIONAR EL CABLE DE POTENCIA.	49
3.1.4.1.	Sección del conductor	49
3.1.4.2.	La temperatura	50
3.1.4.3.	Caída de tensión.....	51
3.1.5.	INSTALACIÓN DEL CABLE DE POTENCIA	52
3.1.5.1.	Identificación de fases	53
3.1.5.1.1.	Si el Cable es plano.....	53
3.1.5.1.2.	Si el Cable es redondo	53
3.1.5.2.	Prueba de aislamiento fase a fase.....	54
3.1.5.3.	Prueba de aislamiento fase a tierra	54
3.1.6.	FALLAS Y DAÑOS DIRECTOS O INDIRECTOS QUE PUEDEN PRESENTARSE	54
3.1.6.1.	Cortocircuito en el empalme	54
3.1.6.2.	Cable de potencia con bajo aislamiento	55
3.1.6.3.	Cortocircuito en el conector de superficie	56
3.1.6.4.	Pérdida de voltaje de control	57
3.1.6.5.	Cortocircuito a lo largo del cable de potencia	57
3.1.6.6.	Mala instalación durante la bajada del equipo BES.....	58

3.1.6.7. Cable de potencia golpeado durante la bajada del equipo BES con las cuñas del taladro.....	60
3.1.7. FENÓMENOS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ..	61
3.1.7.1. Armónicos.....	61
3.1.7.1.1. Espectro de Fourier	64
3.1.7.1.2. Efectos sobre los cables.....	64
3.1.7.2. Campo electromagnético.....	65
3.1.7.2.1. Regla de la mano derecha para campo Magnético (β).....	65
3.1.7.2.2. Efectos sobre el cable plano de BES	66
3.1.7.2.3. Efectos sobre el cable redondo de BES	68
3.1.7.3. Desbalance de corriente.....	68
3.1.7.3.1. Efectos que produce el desbalance de voltaje en el motor eléctrico.	69
3.1.7.3.2. Procedimiento recomendado para evaluar la alimentación de un motor.	70
CAPITULO IV.....	71
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
4.1 ANÁLISIS DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS CABLES DE POTENCIA.....	71
4.2. VARIABLES QUE AFECTAN A LOS CABLES DE POTENCIA	74
4.2.1. LOS DAÑOS MECÁNICOS.....	74
4.2.2. LA CORROSIÓN.....	74
4.2.3. DESCOMPRESIÓN	74
4.2.3.1. En el cable redondo.....	75
4.2.3.2. En cable plano.....	75

4.3. CUADROS COMPARATIVOS ENTRE LOS MATERIALES USUALMENTE USADOS PARA FABRICAR CABLES REDONDOS Y PLANOS.....	76
4.4. CUADROS COMPARATIVOS DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES MÁS COMUNES DE LOS QUE ESTÁN ELABORADOS LOS CABLES DE POTENCIA.....	82
4.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS ENTRE CABLE REDONDO Y PLANO .	90
4.5.1. CABLE REDONDO (CEBER)	90
4.5.1.1. Ventajas.....	90
4.5.1.2. Desventajas.....	91
4.5.2. CABLE PLANO (CELF).....	91
4.5.2.1. Ventajas.....	91
4.5.2.2. Desventajas	92
4.6. EJEMPLO PRÁCTICO DEL USO DE CABLE EN LA COMPLETACIÓN DE UN POZO CON BOMBEO ELECTROSUMERGILE	94
4.6.1. POZO X1.....	95
4.6.1.1. Análisis de la selección del tipo cable en el Pozo X1 respecto a las propiedades y características de sus componentes.	99
CAPITULO V.....	103
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
5.1. CONCLUSIONES.....	103
5.2. RECOMENDACIONES.....	104
BIBLIOGRAFÍA.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 AWG Medidas y propiedades	48
Tabla 2 Características del conductor	76
Tabla 3 Características del conductor de cobre	77
Tabla 4 Características del aislante.....	78
Tabla 5 Características de la barrera	79
Tabla 6 Características de la envoltura de la barrera	79
Tabla 7 Características de la chaqueta	80
Tabla 8 Características de la armadura.....	81
Tabla 9 Propiedades del conductor	82
Tabla 10 Propiedades del aislante	84
Tabla 11 Propiedades de la barrera	86
Tabla 12 Propiedades de la chaqueta	88
Tabla 13 Propiedades de la armadura	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Componentes de subsuelo del sistema BES	7
Figura 2 Transformador	8
Figura 3 Switchboard	9
Figura 4 Variador de frecuencia	11
Figura 5 Caja de venteo	12
Figura 6 Cabezal de pozo	13
Figura 7 Componentes de subsuelo del sistema BES	14
Figura 8 Sensor de fondo.....	15
Figura 9 Motor.....	18
Figura 10 Protector	19
Figura 11 Separador de gas	21
Figura 12 Bomba centrífuga sumergible	24
Figura 13 Cable de potencia con capilar.....	25
Figura 14 Cable extensión del motor – partes.....	26
Figura 15 Cable de extensión del motor	26
Figura 16 Pothead.....	27
Figura 17 Centralizador.....	28
Figura 18 Cable de configuración redonda – partes	39
Figura 19 Cable de configuración plana - partes.....	39
Figura 20 Cable de potencia de configuración plana y redonda	44
Figura 21 Caída de voltaje cada 1 000 pies.....	46
Figura 22 Caída de voltaje por tipo de cable y factor de corrección según temperatura.....	47
Figura 23 Cable de potencia golpeado	56
Figura 24 Cable de potencia atascado por mal ajuste con los flejes.....	59
Figura 25 Onda sin contenido de armónicos.....	62
Figura 26 Forma de onda fundamental y sus componentes armónicos: 2 ^a , 3 ^a , 4 ^a	63

Figura 27	Regla de la mano derecha	66
Figura 28	Campo magnético en conductores paralelos	66
Figura 29	Empalmes cruzados en cable plano	67
Figura 30	Factor de corrección de potencia	69
Figura 31	Partes del cable de potencia de configuración redonda.....	73
Figura 32	Partes del cable de potencia de configuración plana.....	74
Figura 33	Parámetros del pozo X1	95
Figura 34	Datos del pozo y diagrama ESP	96
Figura 35	Completación del pozo X1	97

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ley de Ohm	30
Ecuación 2 Potencia	31
Ecuación 3 Impedancia	32

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el análisis técnico de las ventajas y desventajas en la utilización del cable de potencia de configuración redonda y plana utilizado en el levantamiento artificial por bombeo electrosumergible, para lo cual se hizo una investigación acerca de los componentes del cable de potencia, la forma como éstos protegen al mismo y los parámetros que afectan al trabajo óptimo de los cables de potencia.

En el primer capítulo se detalla una breve introducción sobre el bombeo electrosumergible, el problema respecto a los cables de potencia con su debida justificación además de los objetivos planteados para la realización del presente proyecto.

En el segundo capítulo se describe el estado del arte del sistema de bombeo electrosumergible y las principales características de los equipos de fondo y de superficie, además de ciertas definiciones que ayudaran a una mejor comprensión del presente trabajo.

En el tercer capítulo se describe los componentes del cable de potencia, los tipos de cables que se usan en la industria petrolera, además de ciertos parámetros que sirven para seleccionar el cable óptimo y dimensionarlo de acuerdo a las características del pozo en el cual va a ser utilizado. También en este capítulo se detalla la forma de instalar el cable de potencia, las fallas o daños que pueden presentarse debido a ciertos factores externos del cable, además de algunos fenómenos que afectan la calidad de la energía que proporciona el cable de potencia desde superficie hacia el motor de fondo del sistema de bombeo electrosumergible.

En el cuarto capítulo se analiza las características del cable de potencia de acuerdo a ciertas variables que lo afectan, cuadros comparativos de los materiales y sus diversas propiedades, para con ellos destacar las ventajas y

desventajas que presentan el uso de los cables de potencia de configuración redonda y plana. Además de se describió con un pozo real el procedimiento para seleccionar el cable de potencia óptimo a ser usado de acuerdo a las condiciones y características del pozo.

Finalmente, en el quinto capítulo se presenta algunas conclusiones y recomendaciones referentes al proyecto realizado.

ABSTRACT

This project consist the technical analysis of the advantages and disadvantages of the power cable round and flat configuration used by the artificial lift electrical submersible pump, for which I do an investigation about the components of the power cable is made, how they protect it and the parameters that affect the optimum work of the power cables.

The first chapter, I details a little introduction about the electrical submersible pump, the problem regarding the power cables with due justification in addition to the objectives for the implementation of this project.

In the second chapter, I describe the state of the art of the electrical submersible pump system and the main features of downhole and surface equipment, with some definitions to help us a better understanding of this project.

In the third chapter, I describe the components of the power cable, the types of cables used in the oil industry, and certain parameters that are used to select the optimum cable and size it according to the characteristics of the well in which it will be use. Also in this chapter describes how to install the power cable, faults or damage that may arise due to external factors of the cable, plus some phenomenons that affect the quality of the electricity that the power cable transfer from surface to power unit to the electrical submersible pump system.

In the fourth chapter, I analyze the characteristics of the power cable according to certain variables that affect it, comparative tables of some materials and their properties to know the advantages and disadvantages of the use of power cables round and flat configuration. Besides I described with real well the procedure for selecting the optimum cable to be used according to the conditions and characteristics of the well.

Finally, in the fifth chapter is about some conclusions and recommendations regards the done project.

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

Con el descubrimiento del gran potencial del Ecuador como país productor de petróleo, han surgido una serie de necesidades por cubrir, las mismas que se traducen en la formación y constitución de compañías que consigan producir el crudo de la forma más óptima posible, seleccionando el sistema de levantamiento artificial más apropiado y con la mejor alternativa de operación.

El sistema de bombeo electrosumergible es uno de los sistemas de levantamiento artificial más eficientes en la industria hidrocarburífera, además este tipo de bombeo se distingue debido a que su mecanismo de impulso está directamente articulada con la bomba en el fondo del pozo, la cual es una bomba centrífuga multi-etapa que transforma el movimiento rotatorio provisto por un motor eléctrico en energía de presión, en la actualidad este sistema ha cobrado mayor importancia debido a la variedad de casos en los que es ampliamente aceptado.

En este sistema, la potencia se transmite al motor sumergible por un cable de alimentación eléctrica trifásica especialmente construido, que va pegado a la tubería de producción. El cable debe ser de construcción resistente para evitar daños mecánicos, y capaz de conservar sus propiedades físicas y eléctricas cuando se expone a líquidos calientes y gases en pozos de petróleo.

Las características del pozo, la historia de la producción y las condiciones del yacimiento son datos muy importantes para el diseño de un sistema de levantamiento artificial como este, con el fin de que el equipo instalado sea económico, libre de problemas y rentable con el pasar del tiempo, con lo cual regularmente más que nada por características del pozo se utiliza el cable de

potencia de configuración plano para alimentar de energía al sistema desde superficie hacia el fondo del pozo.

1.1. PROBLEMA

El cable de potencia es uno de los componentes más importantes en la instalación del sistema de levantamiento artificial de bombeo electrosumergible, por lo que resulta necesario el análisis de factores que ocasionan exceso de calentamiento en el cable de potencia, como podría ser el desbalance de corriente, en especial al cable de configuración plano, lo que podría causar un cortocircuito o daño físico del cable. Además hay que analizar otros problema como daños en los cables por factores mecánicos y químicos como el caso de la corrosión, además de problemas en cuanto a manejar fluidos con altos porcentajes de gas.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Para resolver esta problemática, el presente trabajo está enfocado en hacer una análisis técnico comparativo entre el cable de potencia de configuración redondo y plano usados en el bombeo electrosumergible, para establecer todos los factores que interfieren con el óptimo desempeño del cable de potencia y de esa manera lograr la correcta selección del mismo al momento de diseñar este sistema de levantamiento artificial teniendo en cuenta todas las variables que afectan a las capacidades operativas y vida útil del cable de potencia usado al implementar este método de levantamiento artificial.

Junto con esto el presente trabajo está orientado a cuantificar sobre el ahorro en energía y por ende los gastos de la empresa en cuanto a la utilización de cable de potencia de configuración redondo o plano.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnicamente las ventajas y desventajas de los cables de potencia de configuración redonda y plana usados en el sistema de bombeo electrosumergible.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Detallar las características de los cables de potencia de configuración plana y redonda usados en la industria petrolera para sistema BES (Bombeo Electrosumergible)
- Cuantificar los efectos que producen los fluidos y las condiciones del pozo sobre los cables de potencia de configuración tanto planos como redondos.
- Definir el tipo de cable de potencia óptimo al usar el método de levantamiento de bombeo electrosumergible en un pozo determinado.

MARCO TEÓRICO

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

Antes de detallar las características de los cables de potencia de configuración plana y redonda, y sus partes, es preciso tener en cuenta las partes principales que conforman el sistema de bombeo electrosumergible, tanto en superficie como en el fondo del pozo, además de algunos conceptos fundamentales, tanto de electricidad como ciertos parámetros que intervienen en las propiedades de los materiales de los cuales están fabricados los cables de potencia.

2.1. BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

Se considera un método de levantamiento artificial que utiliza una bomba centrífuga ubicada en el subsuelo para levantar los fluidos aportados por el yacimiento desde el fondo del pozo hasta la estación de flujo.

La técnica para diseñar las instalaciones de bombeo electrosumergible consiste en: seleccionar una bomba que cumpla los requerimientos de la producción deseada, de asegurar el incremento de presión para levantar los fluidos, desde el pozo hasta la estación, y escoger un motor capaz de mantener la capacidad de levantamiento y la eficiencia del bombeo.

Este es un método de levantamiento artificial altamente eficiente para la producción de crudos livianos y medianos; sin embargo, es uno de los métodos de extracción de crudo que exige mayor requerimiento de supervisión, análisis y control, a fin de garantizar el adecuado comportamiento del sistema.

Este método es aplicado generalmente cuando se presentan los siguientes casos:

- Alto índice de productividad.
- Baja presión de fondo.
- Alta relación agua – petróleo.
- Baja relación gas – líquido.

El BES tiene un rango de capacidades que va desde 200 a 9 000 bpd, trabaja a profundidades entre los 12 000 y 15 000 pies, el rango de eficiencia está entre 18% y 68% y puede ser usado en pozos tanto verticales como desviados o inclinados.

Sus ventajas son:

- Puede levantar altos volúmenes de fluidos
- Maneja altos cortes de agua(aplicables en costa a fuera)
- Puede usarse para inyectar fluidos a la formación.
- Su vida útil puede ser muy larga.
- Trabaja bien en pozos desviados
- No causan destrucciones en ambientes urbanos
- Fácil aplicación de tratamientos contra la corrosión y formaciones de escamas.
- No tiene casi instalaciones de superficie a excepción de un control de velocidad del motor.
- La motorización es eléctrica exclusivamente y el motor se encuentra en la bomba misma al fondo del pozo.
- Su tecnología es la más complicada y cara pero son preferidas en caso de tener que elevar grandes caudales.

Sus desventajas son:

- Inversión inicial muy alta.
- Alto consumo de potencia.
- No es rentable en pozos de baja producción.

- Los cables se deterioran al estar expuestos a temperaturas elevadas.
- Susceptible a la producción de gas y arena.
- Su diseño es complejo.
- Las bombas y motor son susceptibles a fallas.
- Es un sistema difícil de instalar y su energización no siempre es altamente confiable.
- En cuanto al costo de instalación, es el más alto, pero el mantenimiento de superficie es mínimo y limitado a los componentes electrónicos de los variadores de velocidad y protecciones eléctricas.

Existen diversos parámetros para la aplicación de este sistema, los cuales son:

- Temperatura: limitado por $> 350^{\circ}\text{F}$ para motores y cables especiales.
- Presencia de gas: saturación de gas libre $< 10\%$
- Presencia de arena: < 200 ppm (preferiblemente 0)
- Viscosidad: limite cercano a los 200 cP.
- Profundidad: 6 000 – 8 000 pies
- Tipo de completación: Tanto en pozos verticales, como desviados.
- Volumen de fluido: hasta 4 000 bpd.

2.1.1. COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

2.1.1.1. Componentes de superficie

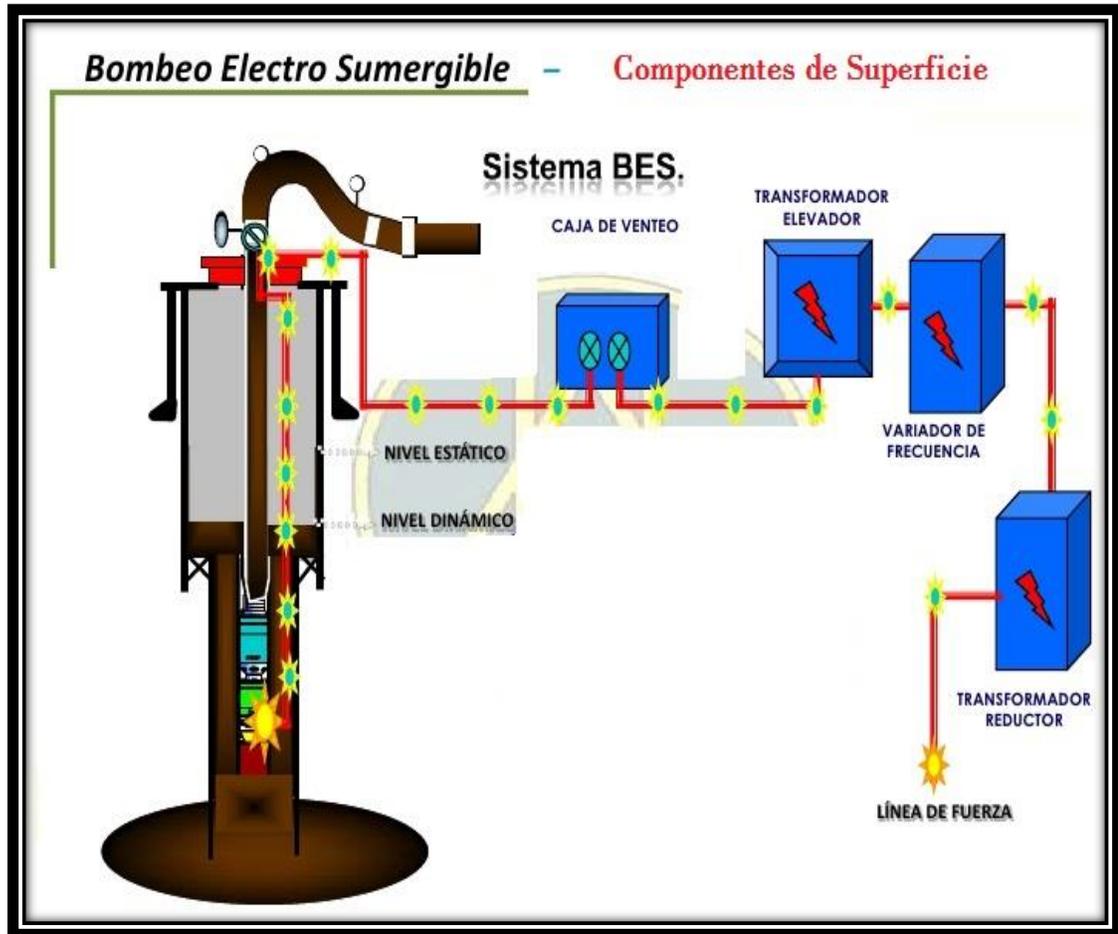


Figura 1 Componentes de subsuelo del sistema BES

(ESP OIL Engineering Consultants, 2004)

2.1.1.1.1. Banco de Transformación Eléctrica

Un transformador es empleado para convertir el voltaje que ingresa al sistema a uno que se requerido por los equipos de bombeo electrosumergible, para ellos

existen dos tipos de transformadores, el transformador reductor y el transformador elevador, cada uno de ellos diseñado para cumplir ciertas funciones.

El transformador reductor es el que está diseñado para reducir el voltaje de las líneas de distribución de alta tensión que están en el orden de 13.8 kilovoltios y 34.5 kilovoltios y bajan ese voltaje al requerido por el variador de frecuencia que oscila entre 380 voltios y 460 voltios. Mientras que el transformador elevador está diseñado para aumentar el voltaje que sale del variador de frecuencia al voltaje requerido por el motor el cual se encuentra entre 1 000 voltios y 3 760 voltios.

Todo esto se lo puede lograr mediante las diversas disposiciones internas del bobinado primario y secundario para cada uno de los transformadores mencionados.



Figura 2 Transformador

(ESP OIL Engineering Consultants, 2004)

2.1.1.1.2. Tablero de control o Switchboard

Los tableros de control son muy simples en lo que respecta a su diseño, que está fabricado para la operación del motor a una frecuencia fija. La selección de un tipo de tablero de control comparado con otro depende básicamente de la aplicación, la economía y el método preferido de control.



Figura 3 Switchboard

(Schlumberger, 2007)

2.1.1.1.3. Variador de Frecuencia

El variador de frecuencia o VSD (Variable Speed Driver) se lo instala entre los transformadores reductor y elevador, y está diseñado para controlar y monitorear la frecuencia de trabajo del motor de la bomba, lo que se traduce en

una variación de la velocidad y potencia del motor, lo cual repercute en el cambio de flujo en el fondo del pozo.

El variador recibe corriente alterna a 480 voltios de forma sinusoidal y la convierte a corriente continua para poder abastecer el sistema de control y el cambio de frecuencias, luego es de nuevo convertida a corriente alterna de salida (sin picos). La capacidad del variador viene dada en KVA (Kilovoltio-Amperio).

Cuando se incrementa la velocidad de la bomba genera un aumento en el caudal de los fluidos del pozo, sin embargo esto puede cambiar en función del potencial del pozo, el cambio de frecuencia se lo puede realizar de forma manual o automática con la finalidad de mantener lo más constante posible ciertos parámetros como potencial de flujo, presión, corriente, entre otros.

El uso de un variador de frecuencia permite:

- Maximizar la producción de los pozos
- Provee un arranque con voltaje reducido
- Aislamiento de los equipos de fondo
- Mejorar la eficiencia del sistema



Figura 4 Variador de frecuencia

(Schlumberger, 2007)

2.1.1.1.4. Caja de venteo

La caja de venteo básicamente fue diseñada para realizar 3 tareas:

- Es un medio de conexión entre el cable de superficie proveniente del Switchboard o VSD con el cable de potencia que viene del pozo del pozo.
- Ventea a la atmosfera cualquier gas que se encuentre migrando en la armadura del cable de potencia eléctrico proveniente del fondo del pozo.
- Sirve como punto estratégicos de fácil acceso para medir y controlar los parámetros eléctricos del equipo de fondo.



Figura 5 Caja de venteo

(Schlumberger, 2007)

2.1.1.1.5. Cabezal del pozo

El cabezal del pozo está diseñado cerrar mecánicamente el pozo en superficie, es el que resiste el peso del equipo y además es utilizado para mantener el control sobre el espacio anular entre el casing y la tubería de producción del pozo.

El paso del cable a través de la cabeza del pozo debe realizarse usando sistema de sello alrededor del cable y las válvulas deben garantizar la máxima presión posible de descarga de la bomba por motivos de seguridad.

La conexión del cable de potencia que viene de la caja de venteo, se realiza mediante un conector llamado “Quick Conector”, donde se realiza el empalme de los cables eléctricos de superficie y de fondo.



Figura 6 Cabezal de pozo

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

2.1.1.2. Componentes de subsuelo

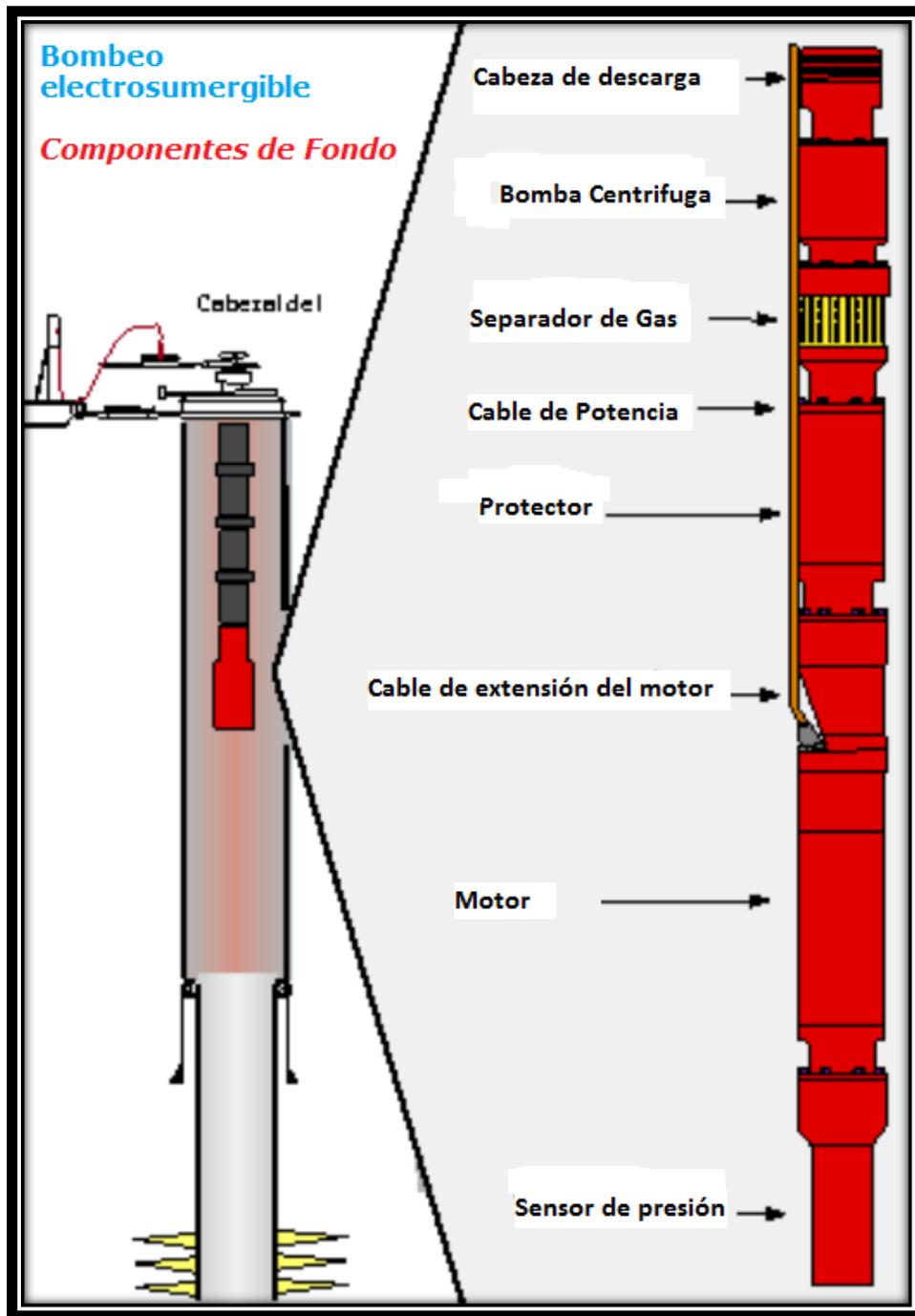


Figura 7 Componentes de subsuelo del sistema BES

(ESP OIL Engineering Consultants, 2004)

2.1.1.2.1. Sensor de Fondo

Es un dispositivo que nos permite cuantificar los parámetros del fondo del pozo, éste se encuentra instalado en la base del motor electrosumergible, está diseñado para soportar altas presiones y temperaturas.

El sensor se encarga de enviar señales a superficie a través del cable eléctrico, las cuales llevan información sobre presión de succión, presión de descarga, temperatura del aceite dieléctrico del motor, vibración del equipo, entre otros.

Al correlacionar los datos de presión del yacimiento con los datos de rata de flujo, un operador puede determinar cuándo se debe cambiar el diseño de la bomba o considerar un workover en el pozo.



Figura 8 Sensor de fondo

(Novomet, 2012)

2.1.1.2.2. Motor eléctrico

El motor es usado para operar las bombas, el diseño es básicamente un motor eléctrico con estatos bobinado de inducción bipolar trifásica y rotor tipo jaula de

ardilla el cual opera a una velocidad de 3 600 revoluciones por minuto (rpm) a una frecuencia de 60 Hz.

Puesto que el motor debe ser instalado en el interior del revestimiento, debe tener una geometría adecuada, y además debido a las condiciones en las que va a operar debe ser completamente resistente a trabajar bajo condiciones extremas especialmente de presión y temperatura.

El motor convierte la energía eléctrica en movimiento que gira el eje, es decir, que gira los impulsores de la bomba, y de esa forma el motor suministra la energía necesaria para rotar los fluidos que están siendo producidos hacia superficie.

Internamente el motor está lleno con aceite dieléctrico el cual lubrica las partes giratorias del motor y transfiere el calor generado hacia la carcasa donde es disipado por el fluido de producción, y debido a esto es de vital importancia que el fluido de producción pase por la carcasa del motor a una baja velocidad para esta garantice una buena refrigeración al motor.

Entre los principales componente del motor se puede nombrar:

- ✓ **Estator:** Es el bobinado del motor electrosumergible, está diseñado para trabajar a diferentes temperaturas y esta encapsulado.
- ✓ **Rotor:** Es el elemento que crea un campo electromagnético mediante su rotación que a su vez permite generar los HO del motor, es el que genera los HP del motor. Por ejemplo: un motor de 150 Hp que consta de 10 rotores, cada uno de ellos aporta 15 Hp.
- ✓ **Cojinetes:** son elementos estáticos que se encuentran entre rotor y rotor, su función principal es fijar y centralizar el conjunto de rotores, Los cojinetes de motor tienen una ranura mecanizada que permite alojar al T Ring (anillo en forma de T).

- ✓ **Eje:** es el encargado de hacer girar al sistema; es hueco y por él circula el aceite dieléctrico a lo largo del motor para poder enfriar y lubricarlo, por medio de éste llega aceite a todos los cojinetes del motor, como así también su función es la de soportar los esfuerzos del torque.
- ✓ **Zapata:** es denominada también cojinete de empuje (thrust bearing), se encuentra instalado en la parte superior del motor, su función principal es soportar toda la carga axial del conjunto de rotores y su configuración puede ser direccional o bidireccional.
La zapata posee una serie de radios y canales mecanizados los cuales permiten formar una película de aceite y de esa manera evitar el desgaste mecánico prematuro en el funcionamiento.
- ✓ **Bujes:** generalmente son fabricados de bronce y se los encuentra ubicados entre el eje y el cojinete, es el elemento dinámico que gira junto con el rotor.
- ✓ **Carcasa:** es aquella que cubre a todos los elementos del motor, está fabricado de diferentes materiales y su elección debe hacerse de acuerdo a las condiciones de producción en las que se va a operar el pozo.
- ✓ **Aceite Dieléctrico:** es el encargado de suministrar lubricación y enfriamiento a los componentes internos del motor, es un aceite sintético, diseñado para trabajar bajo diferentes condiciones de temperatura.
- ✓ **Bloque aislante:** en este componente se encuentra instalado el pothead a donde se conecta el (Motor Lead Extension) MLE, se encuentra ubicado en la parte superior del motor. La conexión durante la instalación del equipo BEC, es muy delicada debido a que una mala instalación del cable de extensión o alguna migración de alguna suciedad o fluido al motor superior puede ocasionar cortocircuito en el bloque aislante o en la mufa (Pothead).

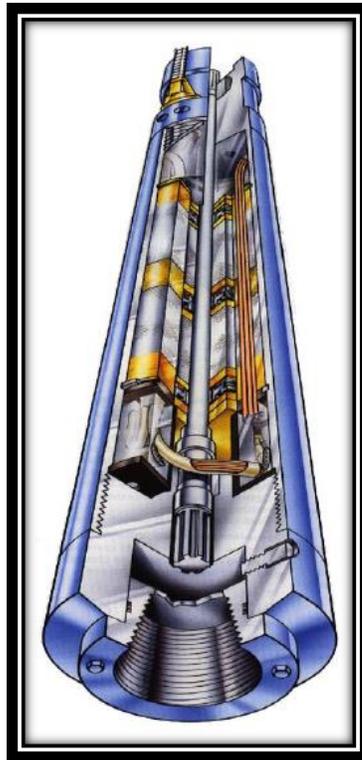


Figura 9 Motor

(Schlumberger, 2007)

2.1.1.2.3. Protector

El sello o sección sellante está ubicada entre la parte superior del motor y la parte inferior de la bomba, está diseñado principalmente para igualar la presión del fluido del motor y la presión externa del fluido del pozo a la profundidad de colocación del aparejo, puede ser instalado como una unidad sencilla o como una unidad tándem.

El sello cumple algunas funciones específicas entre las que destacamos:

- Provee el volumen necesario para permitir la expansión del aceite dieléctrico contenido en el motor.
- Proteja al motor de la contaminación de los fluidos del pozo.

- Absorbe el empuje axial descendente de la bomba.

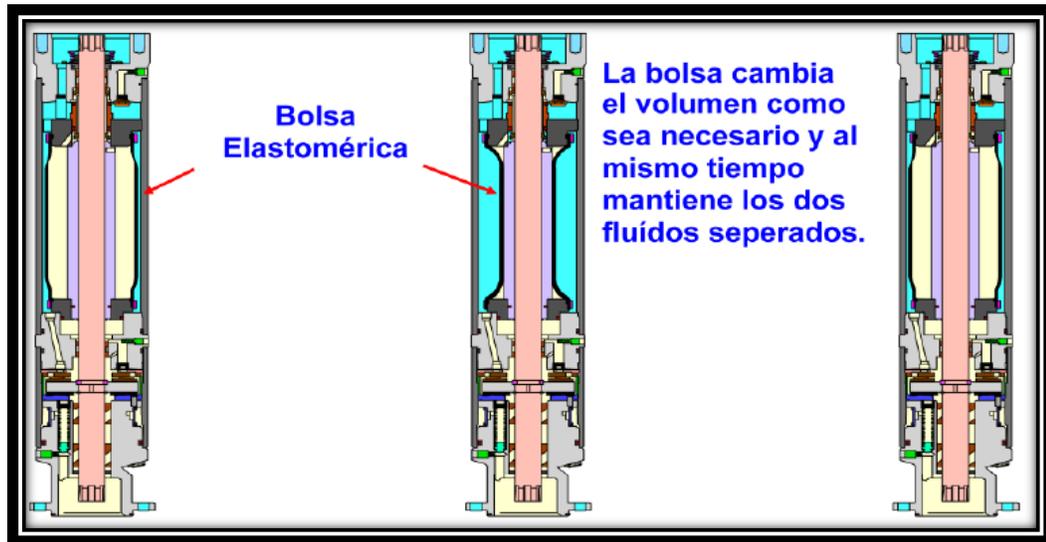


Figura 10 Protector

(Schlumberger, 2007)

2.1.1.2.4. Separador de Gas

La capacidad de la bomba centrífuga para manejar el gas, es limitada, es ahí que para pozos con elevada relación gas - petróleo, se emplea el uso de separadores de gas para evitar que el gas libre dentro de la bomba no supere el 10%, sirve como succión o entrada de fluidos a la bomba y desvía el gas libre de la succión al espacio anular ya que esto puede producir los fenómenos de cavitación o bloque por gas en la bomba si el gas llegase a pasar a la bomba.

Los factores que causan la presencia de gas libre en el interior de la bomba son por ejemplo que el comportamiento de la bomba se aparta del señalado en sus curvas características, reducción de eficiencia, fluctuación de carga en el motor, posible efecto de cavitación, entre otras.

La eficiencia de estos separadores de gas está en el rango del 80% al 95%, sin embargo esta eficiencia se ve afectada por los volúmenes manejados, composición y propiedades del fluido. A volúmenes menores de producción la eficiencia es mayor, de allí que se debe tener en cuenta el manejo de altos volúmenes de producción para establecer el porcentaje de eficiencia del diseño.

Entre los principales componentes del separador de gas tenemos:

- ✓ **Base:** La Base permite que el fluido del pozo y del gas, ingresen directamente al separador de gas, por medio de los orificios.
- ✓ **Inductor y Alabes Guía:** Luego que el fluido de pozo y gas ingresa por los orificios de la base entra directamente al inductor, pasa a través de los alabes guía para canalizarlos al rotor separador.
- ✓ **Rotor Separador:** El rotor separador se encarga de ejercer una fuerza centrífuga al rotar desplazando al fluido del pozo hacia las paredes y al gas hacia el centro del rotor.
- ✓ **Difusor Crossover y Cabezal:** El fluido de pozo y gas separado ingresan al difusor crossover, en esta parte el gas es expulsado al exterior por los agujeros del cabezal y el fluido de pozo es encaminado hacia la bomba en forma axial al eje.

Se emplean dos tipos de separadores el convencional y el centrífugo:

- ✓ **El separador convencional:** consiste en invertir el sentido de flujo del líquido, lo que permite que el gas libre continúe su trayectoria ascendente hacia el espacio anular. Es recomendable en pozos donde las cantidades de gas libre presente en el fluido no son muy grandes.
- ✓ **El Separador Centrífugo:** el cual recibe la mezcla de líquido y gas libre en sus orificios de entrada que pasa a través de una etapa de succión neta positiva, la cual le da fuerza centrífuga a los fluidos, y por la diferencia de densidades el líquido va hacia las paredes internas del separador y el gas permanece en el centro. Unas aletas guías

transforman la dirección tangencial del flujo, en dirección axial; y es ahí que el líquido y el gas se mueven hacia arriba, pasan a través de un difusor que conduce a los líquidos hacia la succión de la bomba y desvía el gas hacia los orificios de ventilación los cuales van directo al espacio anular entre la tubería de producción y el casing.



Figura 11 Separador de gas

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

2.1.1.2.5. Bomba Centrífuga Sumergible

El corazón del Sistema de Bombeo Electrosumergible (BES) es la bomba, es una bomba de tipo multi-etapa, y el número de éstas depende de cada aplicación específica, es decir, del volumen de fluidos que se desea producir, cada etapa tiene un impulsor (rotativo) y un difusor (estacionario). El impulsor da al fluido energía cinética mientras que el difusor cambia esta energía cinética en energía potencial.

Los principales componentes de la Bomba Electrosumergible son:

- ✓ **Base:** La base de la bomba es un elemento que permite acoplarse con otra bomba, con un separador de gas o con la succión del sistema de Bombeo Electrosumergible.
- ✓ **Cabeza:** el cabezal o cabeza de bomba permite acoplarse a la descarga o hacia otra bomba en el caso de conexión entre bomba superior e inferior.
- ✓ **Descarga:** La descarga de la bomba no es más que una adaptación que sostiene todo el conjunto de fondo, su función principal es facilitar el acoplamiento con la tubería de producción, para lo cual tienen varios diámetros de rosca interna que facilitan su acoplamiento.
- ✓ **Housing (Carcaza):** El Housing (Carcaza), no es más que el recubrimiento externo de la bomba Electrosumergible, cubre y protege a los componentes internos de los daños que puedan producir los fluidos externos u otros sólidos.
- ✓ **Eje de la bomba:** Es aquel en el cual se aloja los componentes de la bomba, pueden tener diferentes valores de resistencia a la tracción, dependiendo de su material y diámetro, está conectado al eje del motor a través del separador de gas y el sello y gira con la rpm (revoluciones por minuto) del motor.

- ✓ **Impulsor:** El impulsor es la parte rotativa del sistema, generalmente está fabricado de aleaciones con altos porcentajes de níquel, y puede ser de tipo radial o mixto, el impulsor genera fuerzas centrífugas que aumentan la velocidad del fluido, el fluido entra al impulsor por medio de un orificio interno, cercano al eje y sale por el diámetro exterior dirigiendo el fluido hacia el siguiente impulsor.
- ✓ **Difusor:** Considerada la parte estacionaria, y al igual que los impulsores generalmente estos son fabricados con aleaciones que contengan altos porcentajes de níquel, la función de éste es dirigir el fluido de la forma adecuada al siguiente impulsor y transforma parte de la energía cinética en energía potencial o presión.
- ✓ **Etapas de la Bomba:** Una etapa de la bomba se forma mediante la combinación de un impulsor y un difusor. El número de etapas de la bomba va a estar determinado por la presión requerida en la cabeza del pozo, la profundidad de levantamiento y el volumen de fluido a ser producido.



Figura 12 Bomba centrífuga sumergible

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

2.1.1.2.6. Cable de Potencia

Es un conductor eléctrico que permite transmitir energía eléctrica hacia el motor electrosumergible, éste va fijo a la tubería de producción por medio de flejes o protectores para cable. Este cable debe ser lo más resistente al deterioro, por lo que sus características físicas y eléctricas deben mantenerse intactas aún en las peores condiciones de operación, más adelante explicare más a detalle sobre el cable de potencia.

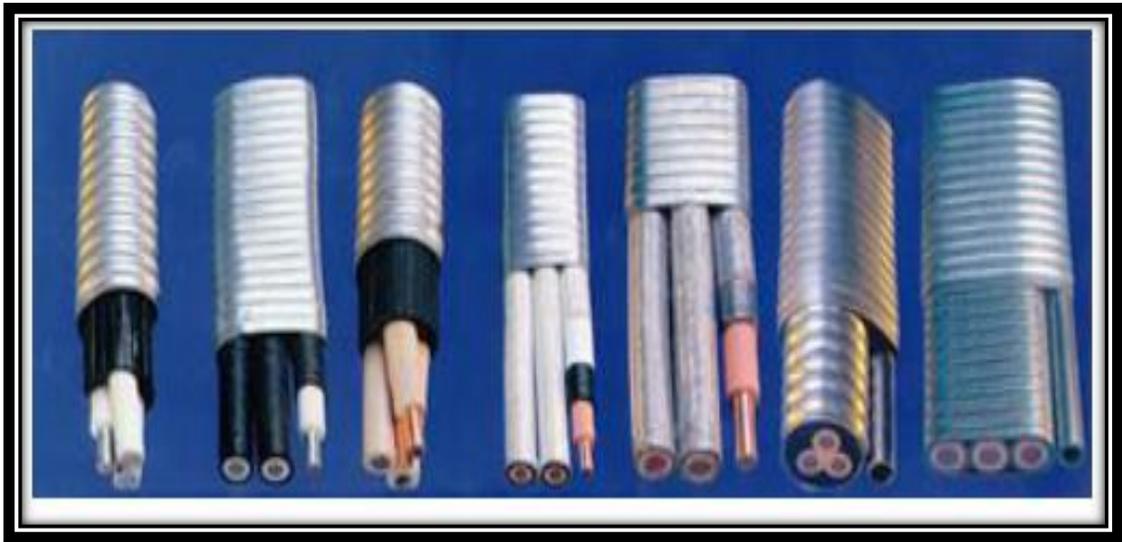


Figura 13 Cable de potencia con capilar

(ESP OIL Engineering Consultants, 2004)

2.1.1.2.7. Cable de extensión del motor (MLE - Motor Lead Extension)

Es un cable que se instala en toda la longitud del equipo de fondo, uno de sus extremos va conectado al motor eléctrico en el Pothead y por el otro extremo se une al cable de potencia a través de un empalme, el cual conecta, protege y aísla los conductores.

El diámetro exterior del MLE es más pequeño en comparación con el cable de potencia lo que representaría en una disminución del diámetro exterior del conjunto lo cual justifica su presencia en el interior del pozo.

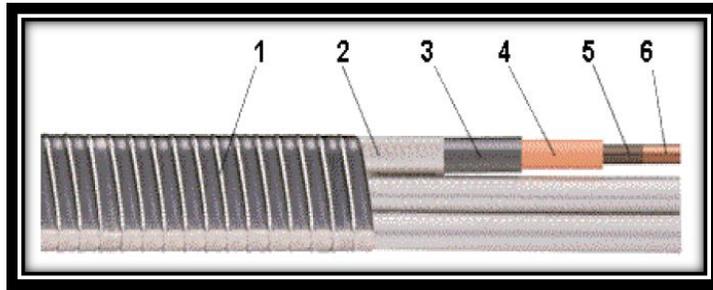


Figura 14 Cable extensión del motor – partes
(ESP OIL Engineering Consultants, 2004)

Donde:

- 1 - Armadura de acero galvanizado
- 2 - Malla sintética de retención para descomposición
- 3 - Capa de plomo protectora en imprevistos de fluido o gas
- 4 - Goma aislante de alta rigidez dieléctrica
- 5 - Película de poliamida para mejorar propiedades eléctricas
- 6 – Conductor sólido de cobre

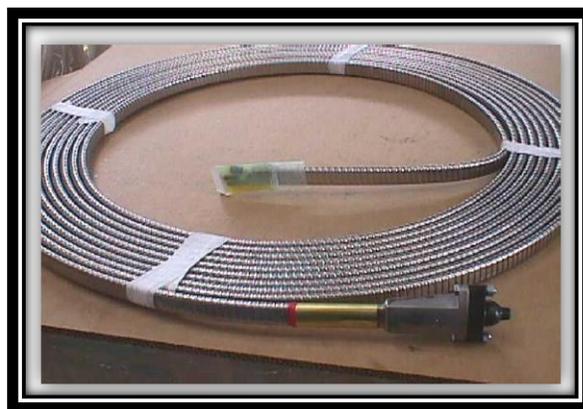


Figura 15 Cable de extensión del motor
(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

2.1.1.2.8. Pothead

El cuerpo del Pothead tiene inyectado goma EPDM (El caucho de etileno propileno dienometileno es un termopolímero elastómero que tiene buena resistencia a la abrasión y al desgaste) que no permite el ingreso del fluido del pozo a través de los conductores y terminales fijados, también realiza un perfecto sellado en el cabezal de motor.



Figura 16 Pothead

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

2.1.1.2.9. Flejes

Son bandas metálicas que se emplean para poder fijar el cable de extensión y el de potencia hacia la tubería de producción, los flejes son usados en intervalos de cada 15 pies.

Los flejes también permiten fijar a los guarda cables que se utiliza para proteger al cable de extensión a lo largo del equipo de fondo. Generalmente son construidos de acero al carbón, acero inoxidable o monel y se colocan con equipo neumático para asegurar la ubicación y la tensión adecuada.

2.1.1.2.10. Centralizador

Los centralizadores son frecuentemente utilizados en aplicaciones del sistema BES para ubicar el equipo en el centro del pozo y son especialmente útiles en pozos desviados, para eliminar el daño externo y para asegurar la refrigeración uniforme del equipo. Hay varios tipos de centralizadores disponibles en la industria diseñados para proteger al cable y el equipo electrosumergible evitando la fricción con las tuberías del pozo.



Figura 17 Centralizador

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

2.2. FUNDAMENTOS ELÉCTRICOS

2.2.1. CORRIENTE (I)

Representa la cantidad de electricidad que pasa por un conducto en una unidad de tiempo, la unidad de medida es el Amperio.

La corriente está presente en dos tipos:

- Corriente continua que es el flujo de electrones siempre en la misma dirección.
- Corriente alterna que es el flujo de electrones primero en un sentido y luego en sentido contrario con una cierta frecuencia periódica.

2.2.2. VOLTAJE (V)

Llamado también como diferencial de potencial o tensión, es la presión que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz (f.e.m.) sobre los electrones de un circuito cerrado. La unidad de medida es el Voltio.

2.2.3. FRECUENCIA (F)

Se la define como el número de ciclos ejecutados en una unidad de tiempo (segundo). La unidad de medida es el Hertz (o también conocido como ciclos por segundo).

2.2.4. LEY DE OHM

La unidad que mide la resistencia que oponen los materiales al paso de la corriente eléctrica es conocido como ohmio (también ohm) el cual se lo

representa con el símbolo o letra griega Ω (omega), el cual se define como la resistencia que ofrece al paso de la corriente eléctrica una columna de mercurio (Hg) de 106,3 cm de alto, con una sección transversal de 1 mm², a una temperatura de 0° Celsius.

La ley de ohm postula que la intensidad de la corriente en amperios (A) que circula por un circuito eléctrico cerrado, es directamente proporcional a la tensión o voltaje aplicado en voltios (V), e inversamente proporcional a la resistencia (ohm) del mismo, es decir que un voltaje de un voltio hará que un amperio fluya a través de una resistencia de un ohm. La cual se formula de la siguiente manera.

$$I = \frac{V}{R} \qquad \text{Ec [1]}$$

Donde:

I = Corriente [A]

V = Voltaje [V]

R = Resistencia [Ohm]

2.2.5. RESISTENCIA (R)

Se la define como la oposición de un cuerpo al paso de corriente. Todos los elementos ejercen una cierta resistencia al paso de la corriente eléctrica, con lo que podemos concluir que un elemento con alta resistencia (resistores) causará una caída considerable en voltaje lo cual generará calor y un elemento con baja resistencia dejará a la electricidad fluir con una pérdida de voltaje muy pequeña. Su unidad de medida es el ohmio (Ω).

2.2.6. ENERGÍA

Está definida como la capacidad que tiene un cuerpo o un dispositivo eléctrico para ejecutar un trabajo, la unidad de medida es el Joule (J).

2.2.7. POTENCIA (P)

Representa la cantidad de energía que fluye por unidad de tiempo. Se la mide en J/seg lo que equivale a 1 Watt (W), aunque es más habitual usar el término kilovatio (KW) que representa mil vatios. Cabe recalcar que 746 vatios equivalen a un caballo de fuerza.

$$P=V \times I$$

Ec [2]

Donde:

P = Potencia en watts

V = Voltaje en voltios

I = Corriente en amperios

2.2.8. CAPACITANCIA (C)

Es una medida de la propiedad de un dispositivo de almacenar energía en forma de cargas separadas o de un campo eléctrico y devolverla al mismo circuito. La capacitancia se opone a cualquier variación en el voltaje y su efecto en la corriente hace que esta se adelante al voltaje. La unidad de medida son los columbios por voltios que son los faradios.

2.2.9. INDUCTANCIA (L)

Es la resistencia a un cambio de corriente de un inductor o bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético, la unidad de medida es el henrio (H), con lo que podemos concluir que la corriente presente en un circuito con gran inductancia no aumentara de manera inmediata después de que un voltaje sea aplicado, no obstante, después de que la corriente comienza a circular en el circuito inductivo, no será fácil detenerla. De hecho, la inductancia tenderá a mantener la corriente aun cuando el voltaje sea retirado. Lo que se conoce como una inercia eléctrica.

2.2.10. REACTANCIA (X)

La reactancia es la medida de la oposición al paso de la corriente alterna (AC) que tienen los condensadores (capacitores) y las bobinas (inductores). Su unidad de medida es el ohmio (Ω).

2.2.11. IMPEDANCIA (Z)

Es la oposición al flujo de corriente en un circuito de corriente alterna (AC). Su unidad de medida es el ohmio (Ω).

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{Ec [3]}$$

Donde:

Z: impedancia en Ω .

R: resistencia en Ω .

X: reactancia en Ω .

2.2.12. AMPLITUD DE LA ONDA

Es el valor máximo, tanto positivo como negativo, que puede logra alcanzar la onda sinusoidal. El valor máximo positivo toma el nombre de "pico o cresta". El valor máximo negativo, "vientre o valle". El punto donde el valor de la onda se anula al pasar del valor positivo al negativo, o viceversa, se conoce como "nodo", "cero" o "punto de equilibrio".

2.3. OTRAS DEFINICIONES

2.3.1. CORROSIÓN

La corrosión está definida como la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica por el medio ambiente que lo rodea.

Entre los fluidos corrosivos más comunes podemos mencionar:

- El CO₂ (Dióxido de Carbono) causa corrosión en el housing, cabeza, base del equipo de fondo, armadura de acero galvanizado del cable, conectores y motor lead
- El H₂S (Sulfuro de Hidrógeno) reacciona con el cobre del cable ocasionando que este se desintegre, además este produce corrosión en ciertos tipos de aceros.

2.3.2. DUREZA Y SUAVIDAD

Es una propiedad que cualquiera puede notar simplemente tocando el material, ésta se refiere a la resistencia a la penetración de un determinado punzón bajo una carga concreta., pero para determinar exactamente el nivel de dureza, se necesitan unos instrumentos específicos así como unos estándares de referencia, normalmente, se utilizan 3 escalas: IRDH (grado internacional de

dureza del caucho). SHORE A (desde 20 a 90° Sh A), SHORE D (para materiales con dureza > 90° Sh A). El instrumento de medición es el durómetro.

2.3.3. ELASTICIDAD

Es la capacidad para deformarse y volver rápidamente a su estado inicial, lo cual provee una fuerza constante ya sea bajo tensión o bajo compresión.

2.3.4. RESISTENCIA A LA TEMPERATURA

La temperatura de aplicación indica el rango dentro del cual las propiedades de un material permanecen más o menos inalteradas. El material se daña cuando es sometido a temperaturas extremadamente bajas puede causar la ruptura del mismo. El material se destruirá, a temperaturas por encima del máximo estipulado. La temperatura exacta de funcionamiento debe ser establecida de forma que se elija el material más adecuado para trabajar en esas condiciones.

2.3.5. CARGA DE ROTURA

Es la fuerza por unidad de superficie necesaria para romper el material por tracción. El instrumento de medición es el tensiómetro.

2.3.6. ALARGAMIENTO

Es la longitud hasta el punto de rotura expresado como un porcentaje de la longitud original. El instrumento de medición es el tensiómetro.

2.3.7. MÓDULO

Es la fuerza por unidad de superficie necesaria para alargar un material a un porcentaje de su longitud original. El instrumento de medición es el tensiómetro.

2.3.8. FUERZA DE DESGARRO

Es la fuerza requerida para desgarrar un material. El instrumento de medición es el tensiómetro.

2.3.9. RESISTENCIA A FLUIDOS

Es la variación en volumen debido al efecto del contacto del material con los fluidos en estudio. La variación de volumen se mide calculando el peso de la muestra de en aire y agua antes y después de que sea expuesta al líquido en estudio por un tiempo dado y a una temperatura dada. Los instrumentos de medición son el baño maría, el tensiómetro, el comparador y el densímetro.

2.3.10. RESISTENCIA QUÍMICA

Es la variación de las propiedades (dureza, carga de rotura, alargamiento) causadas por el contacto del material con sustancias químicas bajo ciertas condiciones. Los instrumentos de medición son los hornos y todos aquellos mencionados anteriormente.

2.3.11. ELASTICIDAD DE REBOTE / RESILIENCIA

Se refiere al rebote expresado como un porcentaje de un cuerpo bien definido (normalmente una especie de martillo) que va lanzado contra un material definido. El instrumento de medición es el rebote.

2.3.12. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

Referido a la pérdida de masa de un material sometido a condiciones particulares de desgaste por abrasión. El instrumento de medición es el medidor de abrasión.

METODOLOGÍA

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. CABLE DE POTENCIA ELÉCTRICO

En el sistema de bombeo electrosumergible la energía eléctrica es transmitida al motor electrosumergible a través de un Cable de Potencia trifásico que va desde la caja de venteo en superficie hacia el fondo del pozo, el cual se fija a la tubería de producción por medio de flejes o con protectores sujetadores especiales.

Este cable debe ser pequeño en diámetro, bien protegido de golpes mecánicos y resistente al deterioro de sus características físicas y eléctricas por efecto de los ambientes calientes y agresivos de los pozos.

El cable de potencia consiste de tres conductores de cobre que se extienden desde el tope del cable plano del motor hasta el cabezal del pozo, el conductor eléctrico está formada por una serie de hilos conductores o alambres de baja sección, que le otorga una gran flexibilidad. El metal usualmente empleado como conductor en cables de potencia eléctricos para baja tensión es el cobre, por su gran conductividad y excelentes características mecánicas y ductilidad.

Teniendo en cuenta la longitud de un conductor para la aplicación de un voltaje transmitido, los volts por pie disminuyen acorde el alambre es más extenso, por lo que la velocidad del electrón disminuye, lo que produce en una disminución de la corriente, es decir, la resistencia es directamente proporcional a la longitud del conductor.

En cambio cuando el diámetro del alambre es mayor, tiene un efecto inverso sobre la resistencia, puesto que el número de electrones libres por unidad de

longitud se incrementa con el área. Teniendo en cuenta esta condición la corriente se incrementa para una fuerza electromotriz (fem) dada, ya que se movilizan más electrones por cada unidad de tiempo, lo que se traduce en que la resistencia es inversamente proporcional al área de la sección transversal del conductor.

Actualmente en la industria se tiene la opción de instalar el cable de potencia con uno o dos tubos capilares, lo cual facilita la inyección desde la superficie de productos químicos tales como anticorrosivos, diluyentes, antiespumantes, antiescalas (incrustaciones) etc., lo que facilita la operación bombeo electrosumergible, especialmente cuando hay formación de asfáltenos, parafinas, formación de incrustaciones, producción de petróleo con alto corte de agua, petróleos pesados, entre otros.

El cable es elegido de tal manera que satisfaga los requerimientos de voltaje y amperaje del motor, además del aislamiento requerido por las propiedades del fluido a producir. Por ende el cable es uno de los componentes más importantes en la instalación del bombeo electrosumergible, el éxito o fracaso de la aplicación depende en gran parte de la buena selección e instalación del cable de potencia, en ciertos casos este puede llegar a ser el componente más costoso de la unidad.

3.1.1. COMPONENTES DEL CABLE

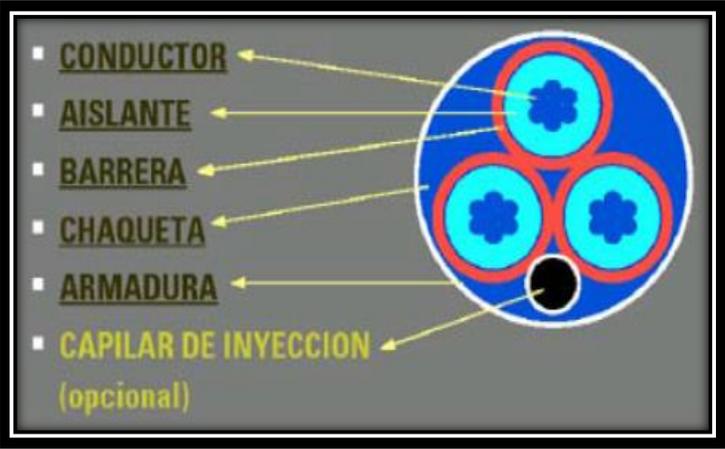


Figura 18 Cable de configuración redonda – partes
(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

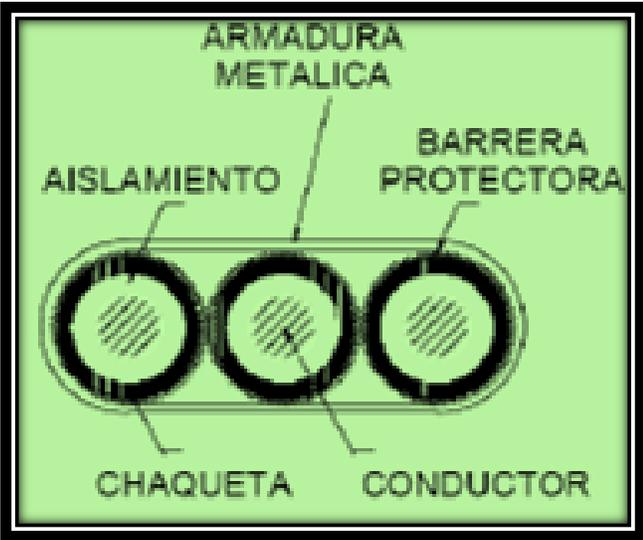


Figura 19 Cable de configuración plana - partes
(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

3.1.1.1. Armadura

La armadura protectora del cable de potencia está localizado sobre la chaqueta y sirve como protección mecánica del conjunto de componentes del cable, se encuentro elaborado de:

- FP: Perfil de armadura plano
- HG: Acero galvanizado de película gruesa
- GG: Doble galvanizado (dos películas)
- SS: Acero Inoxidable
- M: Monel
- G: Acero galvanizado

El espesor de la armadura puede variar desde 0,015 pulgadas hasta 0,034 pulgadas, es decir, 0,38 mm a 0,86 mm, se lo escoge de acuerdo a características como resistencia al daño, resistencia a la corrosión y además ésta es la que contiene la descompresión.

3.1.1.2. Chaqueta

La chaqueta de protección de la barrera en el cable de potencia se encuentra encima de la barrera la cual sostiene a las tres fases juntas y provee de una protección química a la barrera, se la elabora de:

- PE: Polietileno de alta densidad (HDPE)
- O: Nitrilo (compuesto de goma de nitrilo resistente al petróleo)
- E: EPDM (Compuesto de goma de EPDM)

Se la escoge bajo ciertos parámetros como temperatura, ambiente químico, gas, condiciones de manejo.

3.1.1.3. Barrera

La barrera protectora del conductor interno del cable de potencia sirve como protección mecánica del aislamiento del conductor, se encuentra fabricado de:

- TB-300: Cinta Trenzada de fluoruro de Polivinil (PVF o Tedlar)
- TB-400: Cinta trenzada de alta temperatura
- F: Fluoro polímero extruido (FEP)
- S: Fluoruro de Polivinilideno extruido (PVDF o Solef)
- L: Plomo

Se lo escoge de acuerdo a criterios como temperatura, ambiente químico, gas, manejo de fluidos corrosivos.

3.1.1.4. Aislamiento

El aislamiento individual de cada cable de conductores internos adherido mecánicamente al conductor, está fabricado de:

- PPE ó P: Polipropileno/etileno
- E: EPDM (Etileno propileno dienemetinelo)
- K: Poliamida (Kaptom)
- T: Cinta semi-conductora
- S: Especial

El aislamiento se elige de acuerdo a características como la temperatura, cambios de presión, relación gas petróleo (GOR), ataque por dióxido de carbono, ataque por petróleo.

3.1.1.4.1. Características principales de los aislamientos

- **Rigidez dieléctrica:** Representa el número de volts requerido para perforarlo, en un aislamiento cuya sección no cambie a través de su espesor, está dada por la relación entre la tensión (volts) aplicada y el espesor del aislamiento (kV/mm).
- **Constante dieléctrica:** La constante dieléctrica de un aislamiento en un cable determina la corriente de carga capacitiva que se produce en el cable y que se traduce en pérdidas dieléctricas.
- **Factor de potencia:** representa la relación entre la potencia activa disipada en el dieléctrico (W_a) y la potencia reactiva (W_r).
- **Resistencia de aislamiento:** es la resistencia media entre el conductor y un electrodo que se encuentra envolviendo la superficie exterior de aislamiento.

3.1.1.5. Conductor

El conductor interno del cable de potencia, se lo elabora de tres tipos: sólido, trenzado y compacto. El conductor del cable está en el rango de tamaños de cable van del #1 al #6 según al AWG (American Wire Gauge), aunque regularmente para la alimentación de potencia se utiliza el #2 y para conexión al motor habitualmente es de #4, #5 y #6. El conductor se lo elige de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- Tamaño
- Resistencia
- Flexibilidad
- Costo

3.1.1.5.1. Sólido

Es un cable conductor de diámetro pequeño y de bajo costo tiene un pequeño estrés interfacial eléctrico.



3.1.1.5.2. Trenzado o redondo

Este cable conductor posee mucha flexibilidad y además tiene mayor resistencia a daños.



3.1.1.5.3. Compacto

Este cable tiene una reducción hasta del 10% en diámetro con respecto al cable conductor trenzado redondo.



3.1.2. TIPOS DE CABLES DE POTENCIA

Existen dos tipos de configuración para cable de potencia: el redondo y el plano, los cuales tienen armaduras de acero galvanizado, acero inoxidable o monel, cinta protectora contra daños mecánicos, capa de plomo para protección contra imprevistos de fluidos o gas y una capa de goma con alta rigidez dieléctrica, factores que aseguran una alta vida operativa del cable de potencia.

La configuración redonda es utilizada cuando el espacio anular entre la tubería de producción y tubería de revestimiento no sea tan pequeño, en cambio el cable plano es usado más en situaciones de secciones limitadas. La protección mecánica es provista por una armadura hecha de acero galvanizado o en ambientes extremadamente corrosivos se usa el monel.

El grosor y la composición del aislante y el revestimiento son determinados por la resistencia del conductor a la filtración de la corriente, su capacidad de temperatura máxima y su resistencia a la penetración por los fluidos del pozo y gas.

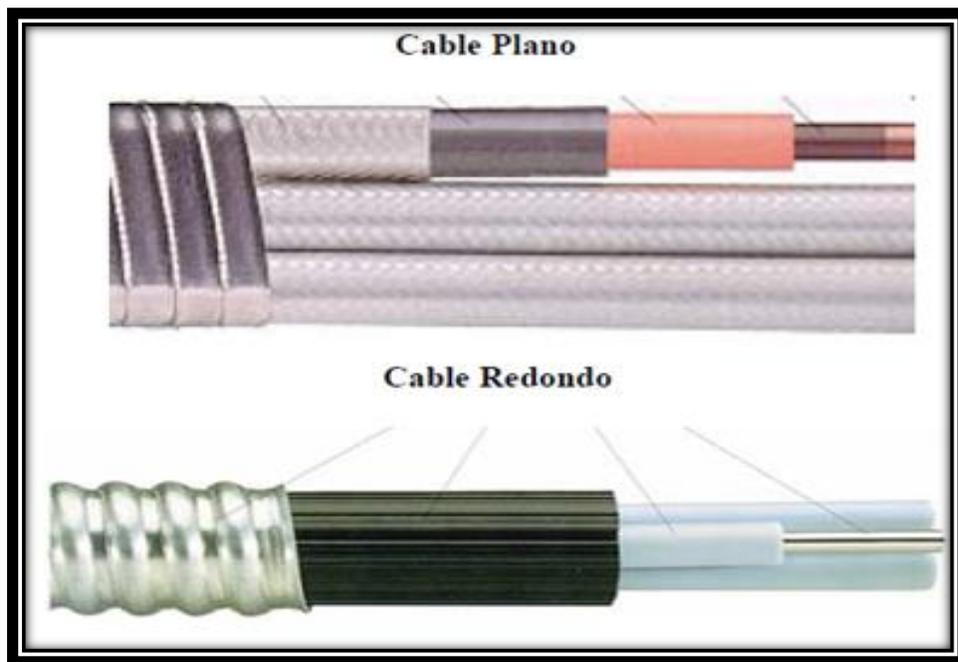


Figura 20 Cable de potencia de configuración plana y redonda

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

3.1.3. PARAMETROS PARA SELECCIONAR EL CABLE DE POTENCIA

La correcta selección del cable de potencia no solo es una tarea técnica, sino que además de eso se debe considerar aspectos económicos. La selección del cable involucra la determinación de:

3.1.3.1. Tamaño del cable

El tamaño propio del cable se lo establece básicamente por el amperaje, la caída de voltaje y el espacio anular disponible entre el tubing y el casing. Para lo cual utilizamos la figura siguiente. El mejor tipo de cable está basado en datos cruciales como son la temperatura de fondo y los fluidos que vamos a producir.

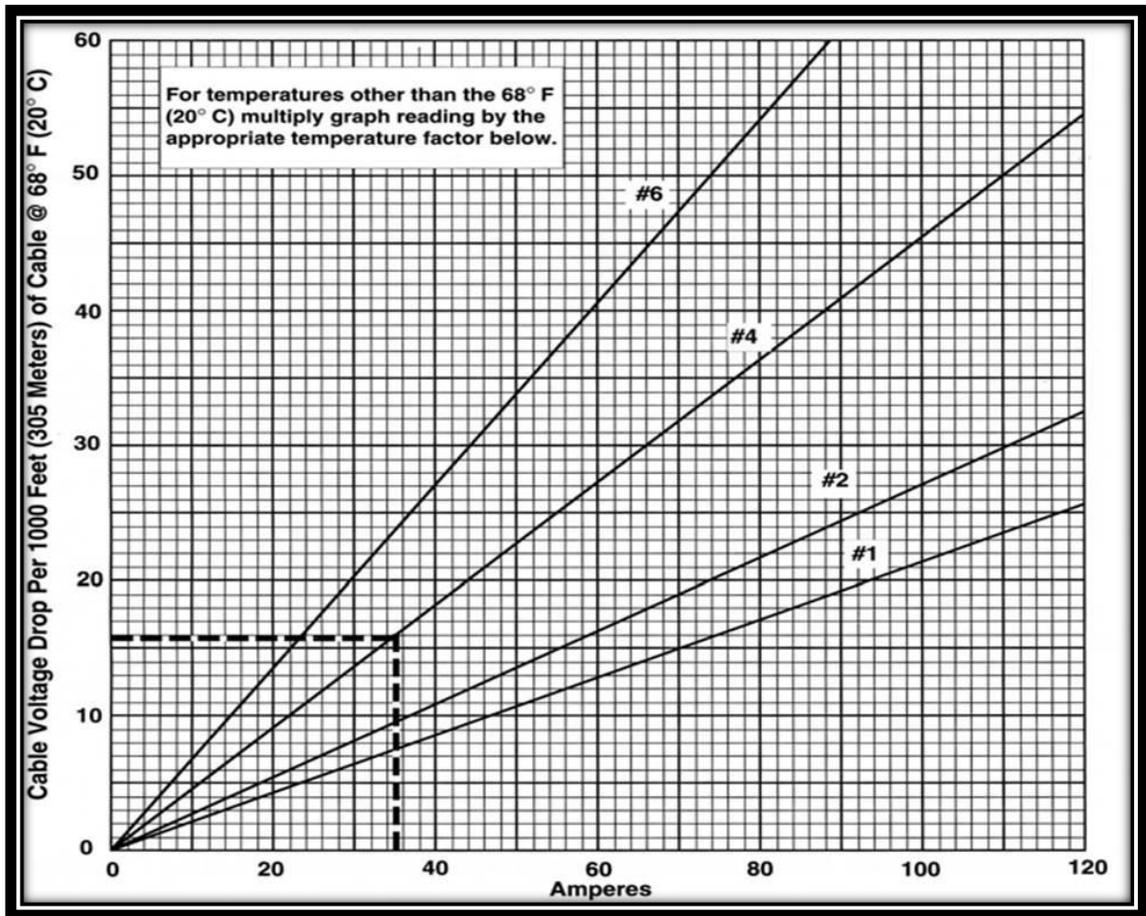


Figura 21 Caída de voltaje cada 1 000 pies

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

La figura anterior nos ayuda a conocer la caída de voltaje que tendrá un cable de potencia específico que será usado en el pozo, para lo cual ingresamos con el dato del amperaje que se va a usar (en este caso es 35 amperios), hasta cortar con la recta que señala el tamaño del cable (en este caso es #4) y nos dirigimos hacia la izquierda y obtenemos el valor de caída de voltaje que nos da en este caso es 16 voltios por cada 1 000 pies, y para saber la caída total a lo largo del cable de potencia tenemos:

Resulta importante revisar todos los datos referentes a las condiciones del pozo y estudiar cada factor, para asegurar que el cable que elegido es compatible

con el ambiente al que será expuesto en el fondo del pozo, para ellos usamos la siguiente figura.

Caída de Voltaje cada mil pies según el tipo de cable					
Cable #1: Corriente de motor * 0.22					
Cable #2: Corriente del motor * 0.28					
Cable #4: Corriente del motor * 0.45					
Cable # 6: Corriente del motor * 0.68					
Factor de multiplicación según la temperatura de fondo:					
Temp. °F (°C)	Multiplying Factor	Temp. °F (°C)	Multiplying Factor	Temp. °F (°C)	Multiplying Factor
100 (38)	1.070	170 (77)	1.223	240 (116)	1.376
110 (43)	1.092	180 (82)	1.245	250 (121)	1.398
120 (49)	1.114	190 (88)	1.267	260 (127)	1.420
130 (54)	1.136	200 (93)	1.288	270 (132)	1.441
140 (60)	1.157	210 (99)	1.310	280 (138)	1.463
150 (66)	1.179	220 (104)	1.332	290 (143)	1.485
160 (71)	1.201	230 (110)	1.354	300 (159)	1.507



Figura 22 Caída de voltaje por tipo de cable y factor de corrección según temperatura

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

El número del cable está establecido de acuerdo a la AWG (American Wire Gauge) que es una referencia de clasificación de diámetros. Cuanto más alto es este número, más delgado es el alambre. El alambre de mayor grosor (AWG más bajo) es menos susceptible a la interferencia, posee menos resistencia interna y, por lo tanto, soporta mayores corrientes a distancias más grandes. El diámetro más delgado es el número 40 y el más grueso es el 4/0 (0000).

Para el presente trabajo solo se presentaran algunos diámetros con las características los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1 AWG Medidas y propiedades

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz

(American Wire Gauge , 2005)

3.1.3.2. Tipo de cable

Tenemos que tener en cuenta que en lugares donde no hay espacio suficiente para correr un cable redondo, usamos uno de configuración plana. Varios son los factores que están inmersos en el diseño y selección de los cables entre los que se puede nombrar:

- Propiedades eléctricas
- Dimensiones físicas
- Resistencia al ambiente
- Resistencia mecánica

- Temperatura
- Condiciones de manejo

3.1.3.3. Longitud del cable

La longitud total del cable de potencia debe tener por lo menos tener 100 pies más de longitud respecto a la profundidad real de asentamiento de la bomba, para asegurar la correcta conexión de superficie a una distancia segura del cabezal.

3.1.4. PARÁMETROS PARA DIMENSIONAR EL CABLE DE POTENCIA

3.1.4.1. Sección del conductor

Escoger de una forma errónea el calibre del conductor provoca efectos dañinos y funcionamiento irregular en los equipos eléctricos, ocasiona pérdida de energía en el conductor y disminuye su vida útil. Entre los problemas que se pueden presentar tenemos:

- Variaciones de voltaje
- Cortes de suministro
- Pérdida de energía
- Corto circuito
- Sobrecalentamiento de líneas
- Riesgo de incendio

Los factores importantes que se deben considerar al calcular el tamaño mínimo para un conductor eléctrico son:

- Que la sección del conductor pueda transportar la corriente necesaria
- Que la temperatura de operación del conductor no dañe su aislamiento

- Que la caída de tensión esté dentro de los parámetros de funcionamiento del equipo eléctrico (norma eléctrica)

Si no se consideran estos tres aspectos se producirían los siguientes problemas si la sección de cobre es menor a la requerida:

- El conductor mayor temperatura de operación y con ella una mayor resistencia eléctrica, aumentando las pérdidas de energía y deteriorando el aislamiento.
- La caída de tensión en la línea será mayor a la permitida, lo cual puede afectar la operación en el punto de carga y dañar los equipos.

Es muy normal que la corriente eléctrica provoque calentamiento en los conductores por el “Efecto Joule”, pero un exceso en la temperatura originado por un conductor subdimensionado puede causar efectos dañinos en su aislamiento, como por ejemplo:

- Disminución de la resistencia de aislamiento
- Disminución de la resistencia mecánica
- Disminución de su vida media esperada
- Resquebrajamiento del aislante

3.1.4.2. La temperatura

La temperatura del conductor del cable trabajando a plena carga y permanentemente, no debe superar la temperatura máxima admisible asignada de los materiales que componen el aislamiento del cable, ya que la temperatura es un factor que afecta a la conducción, porque la resistencia de un material aumenta a medida que este se calienta; es decir que mientras más frío esté el material menor será la resistencia lo que dará mejor flujo de la corriente eléctrica. Este hecho se da porque en los átomos de un material, al calentar los electrones de la capa externa modifican su facilidad para convertirse en

electrones libres; a mayor temperatura más unidos se encuentran al átomo, resultando más difícil hacerlos saltar de sus órbitas.

La potencia perdida en un conductor produce calor que, al acumularse, eleva su temperatura, pudiendo llegar a fundir el aislante del conductor, esto puede llegar a ser muy peligroso ya que los aislantes al estar sometidos a estas temperaturas, pierden parte de su capacidad para aislar y envejecen con rapidez, lo que los hace quebradizos y prácticamente inservibles, o hasta producir cortocircuitos. Con lo que se puede concluir que el exceso de temperatura genera dos efectos negativos en los aislantes:

- Disminución de la resistencia de aislación.
- Disminución de la resistencia mecánica.

El servicio operativo de la energía eléctrica y su seguridad dependen directamente de la calidad e integridad de las aislaciones de los conductores.

3.1.4.3. Caída de tensión

La circulación de corriente que cruza por los conductores, ocasiona una cierta pérdida de potencia transportada por el cable, es decir, una diferencia de potencia entre el punto de cabecera de la instalación (desde superficie) y el punto de conexión de un receptor (cable de extensión del motor - MLE).

Esta caída de tensión debe estar por debajo de los límites establecidos, lo cual garantizara un buen funcionamiento del sistema eléctrico produciendo en consecuencia en un ahorro económico de la energía. Esta caída de tensión se ve afectada en su mayor parte cuando las líneas de cable son de una gran longitud además de otros factores como el calibre del conductor y de la corriente que lo atraviesa.

Para cumplir con esto se necesita la siguiente información:

- Nivel de tensión.
- Sistema de tensión: monofásico o trifásico.
- Corriente nominal (también llamada corriente de placa o FLA por sus siglas en inglés).
- Factor de potencia nominal.
- Corriente de arranque.
- Factor de potencia de arranque (normalmente se usa 0,2).
- Distancia entre el punto de alimentación y el motor (lo más aproximada posible).
- Tipo de conductor por utilizar: material (Cobre o Aluminio), forma, tipo, aislamiento, multiconductor, entre otros.
- Tipo de instalación: subterráneo, en ducto, temperatura ambiente, agrupamiento, entre otros.

3.1.5. INSTALACIÓN DEL CABLE DE POTENCIA

La instalación del cables se realiza fijándolo en la parte externa de la tubería de producción con flejes, usualmente se colocan de 3 a 4 flejes por lingada (sección de tubería). En la sección que corresponde a los componentes del aparejo de producción se recomienda colocar flejes por metro debido a que esta sección es de mayor diámetro y el cable puede dañarse durante las operaciones de introducción del conjunto de herramientas, debido a esto, en esta sección se instalan los protectores llamados guarda cables. A lo largo de esta sección la configuración del cable es plana y se la llama extensión del motor, la cual constituye el contacto con el motor.

La unión de la extensión del motor y el cable conductor se denomina empate; su elaboración se realiza cuidadosamente en la localización del pozo, ya que constituye una de las partes débiles de la instalación. Un empate también puede ser necesario en cualquier punto a lo largo del cable, donde se detecte

una falla del mismo o donde la longitud del cable sea insuficiente para llegar a la superficie.

Después de hacer el empate respectivo los cables deben ser revisados para comprobar su aislamiento y conductividad según los siguientes métodos:

3.1.5.1. Identificación de fases

Se debe identificar los extremos de los conductores del Cable de Potencia.

3.1.5.1.1. Si el Cable es plano

Tome el conductor del centro y marque la letra A, el conductor del centro a la izquierda con B y el otro conductor extremo derecho con la letra C. Con un cable puente coloque a tierra al cable B.

Tome el multímetro y seleccione la escala de resistencia, conecte la punta de prueba de color negro a tierra, luego conecte la punta de prueba color rojo a cada uno de los extremos de los conductores no identificados en el otro lado del rollo de cable y marque con la letra B el conductor que muestre continuidad en el Multímetro. Luego se repite el paso anterior para identificar el cable C.

3.1.5.1.2. Si el Cable es redondo

Identifique arbitrariamente uno de los conductores con la letra A, luego siguiendo el sentido de las agujas del reloj (sentido horario) identifique el conductor B y el C, como los pasos anteriores que se describen en el cable plano.

3.1.5.2. Prueba de aislamiento fase a fase

Se toma el Megómetro y se conecta la punta de prueba positiva (+) al extremo del conductor A y la punta de prueba negativa (-) al extremo del conductor B. Luego se toma la lectura que muestra el Megómetro (lectura A-B). Se repite el paso anterior para medir A-C y B-C. La medición debe ser superior 2 000 megaohms. Luego de eso se desconecta y se descarga el instrumento.

3.1.5.3. Prueba de aislamiento fase a tierra

Se toma el Megómetro y se conecta la punta de prueba positiva (+) al extremo del conductor A y la punta de prueba negativa (-) a la armadura del Cable de potencia. Se debe tomar la lectura que muestra el Megómetro (lectura A) y se la registra en el Reporte de Inspección. Se repite el paso anterior para medir B y C. La medición debe ser superior a 2 000 megaohms. Luego se debe desconectar y descargar el instrumento.

3.1.6. FALLAS Y DAÑOS DIRECTOS O INDIRECTOS QUE PUEDEN PRESENTARSE

3.1.6.1. Cortocircuito en el empalme

Un empalme desempeña la función de conectar, proteger y aislar los conductores; no obstante, la presencia de un cortocircuito en un empalme constituye una falla eléctrica cuyos efectos son graves para el sistema de bombeo electrosumergible.

Inadecuadas conexiones en los empalmes o cuando se instalan los penetradores, pigtails. Si no hay una buena conexión de los nicopress, lo que ocurre es que cuando entra en operación el equipo BES, justo en esa zona mal conectada y apretada se está generando un arco y por consiguiente hay

incremento de temperatura, ocasionando recalentamiento y produciendo los cortocircuitos. El correcto estudio de los potenciales orígenes de esta falla, debe ser considerablemente meticuloso, ya que actúan errores de fabricación del cable, errores durante la instalación, entre otras.

De esta forma se puede prevenir problemas con el empalme garantizando una correcta conexión eléctrica además de un excelente funcionamiento normal y permanente de los equipos del sistema de bombeo electrosumergible.

3.1.6.2. Cable de potencia con bajo aislamiento

El inconveniente de bajo aislamiento en el cable es directamente eléctrico, inducido la mayoría de veces cuando el cable ha sido reparado; es decir, cuando éste ha sido utilizado y se lo ha vuelto a reacondicionar para volverlo a usar, lo que ocasiona que el aislamiento del cable se vea afectado tan solo por el transcurso del tiempo y las circunstancias en las que estuvo operando, lo cual deja al cable de potencia carente de protección, logrando sencillamente irse a tierra o resultar sensible a cortocircuitos.

Este tipo de falla debe ser controlada a tiempo para que no se produzcan problemas o fallas secundarias cuyos efectos sean más difíciles de solucionar.

Existen ocasiones cuando se presenta un debilitamiento del aislamiento cuando se han producido golpes en el cable al momento de bajarlo junto con la tubería hacia el pozo, lo que también puede ocasionar un corto circuito y por ende un fallo en el sistema de bombeo electrosumergible.

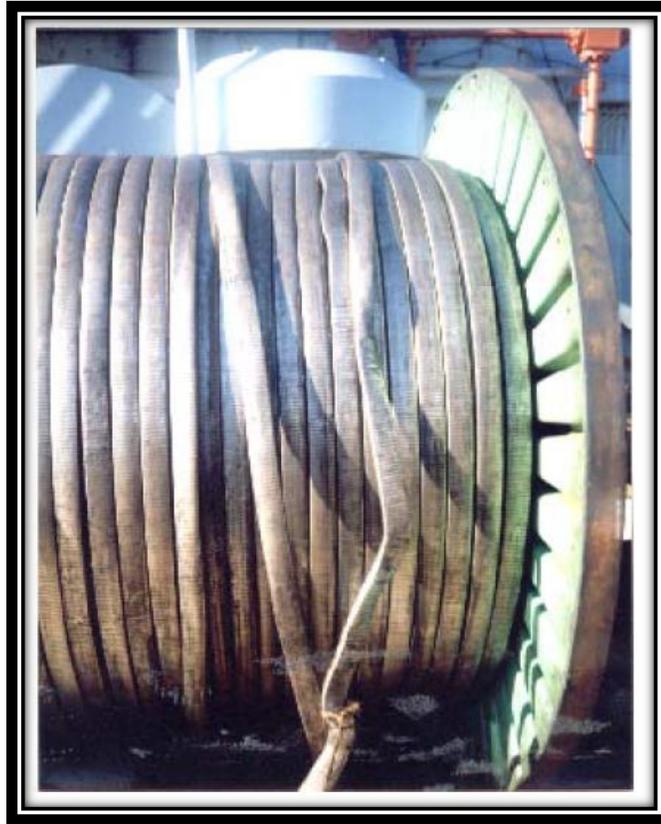


Figura 23 Cable de potencia golpeado

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

3.1.6.3. Cortocircuito en el conector de superficie

Este tipo de falla no está directamente ligada con el cable de potencia pero cuando se suscita ocasiona daños en las características eléctricas del cable de potencia, éste inconveniente usualmente es provocada por fallas cometidas en la instalación o problemas de fabricación del conector, lo cual afecta directamente al trabajo normal del equipo de fondo, por lo que el proceso de instalación debe ser lo más cauteloso y eficiente posible, con el fin de garantizar el arranque y operación adecuado del sistema, ya que éste conector es el que permite la conexión eléctrica del equipo de superficie con el de fondo.

3.1.6.4. Pérdida de voltaje de control

Es la fluctuación o pérdida total de la potencia necesaria para el funcionamiento de los circuitos de control del variador. Este tipo de falla puede provocar la reducción del aislamiento del cable, de los bobinados del motor y se prevé la parada del sistema de bombeo.

Las posibles causas pueden ser:

- Problemas de estabilidad en la fuente de potencia (Power Supply),
Ruptura de fusibles en la salida del transformador
- Descargas atmosféricas
- Daño en el transformador de control.

Para combatir este problema es necesario tomar ciertas acciones correctivas, que permitan despejar la falla, como:

- Inspeccionar el variador a fin de determinar que tarjeta presenta pérdida de voltaje de control.
- Revisar fusibles y conductores que conectan la tarjeta electrónica con la fuente de potencia.
- Intentar un re-arranque, para descartar que la falla haya sido provocada por un transitorio que afectó la estabilidad de la fuente.
- Verificar continuidad en los fusibles y en las fases del transformador de control.

3.1.6.5. Cortocircuito a lo largo del cable de potencia

Mientras que el equipo BES está en operación hay diferentes factores que influyen en que se ocasione los cortocircuitos, tales como:

- Operar un equipo con continuos paros por sobrecarga, debido a presencia de sólidos o atascamientos.

- Operar un equipo con cables golpeados durante la introducción del equipo BES. En este punto es muy importante notar que una cosa es tomar mediciones de continuidad y aislamiento con el megaóhmetro sin haber energizado los cables y otra cosa es que el cable trabaje golpeado y debilitado en su aislamiento y a las condiciones de presión y temperatura, es justamente en donde ocurren los cortocircuitos de los cables.

3.1.6.6. Mala instalación durante la bajada del equipo BES

En cuanto a la protección del cable de potencia se usan flejes o protectores metálicos, o ambos. Estos deben de ser instalados con el suficiente torque para que cumplan la función de fijar el cable a la tubería de producción y no permita que el cable baje mal fijado, ya que el cable de potencia es muy pesado.

La operación de ajuste de este tipo de accesorios como los flejes o los protectores se realiza con equipos manuales o con equipos neumáticos que facilitan más rápido la operación, teniendo sus rangos de operación de tal manera que se realice un ajuste apropiado al cable sin debilitar la parte interna del cable de potencia. Así mismo existen cajas neumáticas en los taladros de perforación para regular la presión del compresor de aire del taladro y la presión que se regula en la caja neumática para los equipos neumáticos que se usan la operación de la bajada del equipo BES.

Los problemas que se han presentado durante la bajada del equipo BES en algunas operaciones, es que por falta de instalar y ajustar apropiadamente los flejes o los protectores, el cable por su mismo peso va cediendo y se va descolgando, a medida que se va introduciendo más y con más peso, el cable se cuelga más y va originando unos senos si el espacio lo permite como es el caso del casing de 9 5/8 pulgadas.

El problema se agrava cuando este mismo equipo tiene que pasar por la boca de liner y hay cambio en la geometría del pozo por ejemplo de 9 5/8 pulgadas pasa a casing de 7 pulgadas y dependiendo del peso del casing de 7 pulgadas los problemas se complican más.

Cuando ocurre esto hay dos alternativas:

- Con seguridad que el cable se va atascar en el liner, el cable se va a tierra y tiene que ser sacado todo el equipo BES de fondo.
- El caso más grave que puede ocurrir es que el equipo con todo el cable enrollado se atasque originando un trabajo de pesca, que en algunos casos se recupera y en otros casos se pierde el pozo.

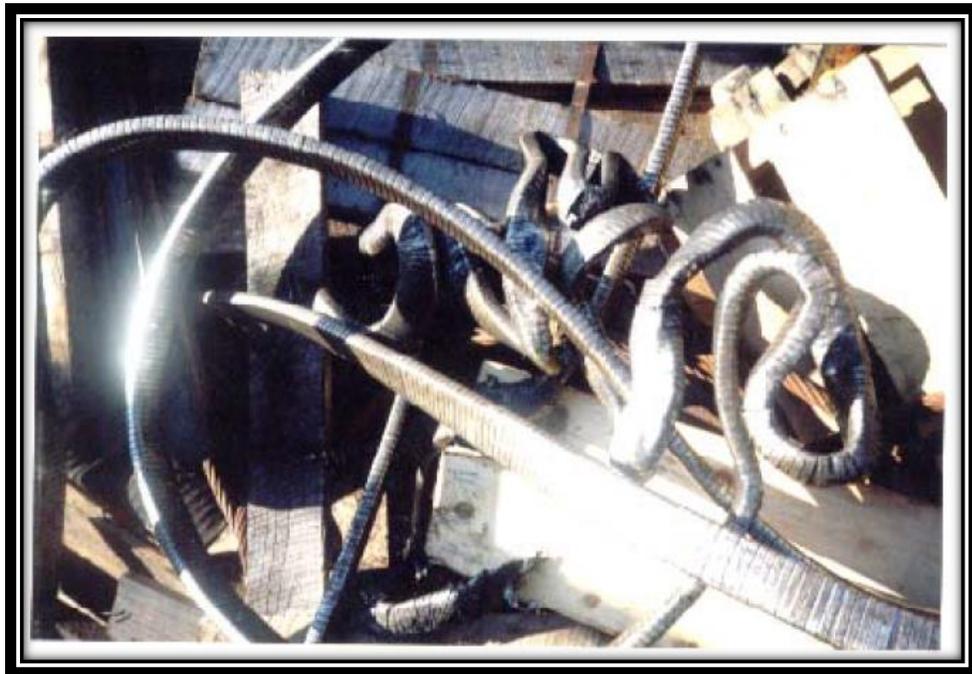


Figura 24 Cable de potencia atascado por mal ajuste con los flejes

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

En ambas alternativas la repercusión económica es cuantiosa ya que incrementa los costos en el proyecto y en este caso es falla exclusivamente

operativa (humana) en no aplicar los procedimientos correctos durante la fase de instalación de los accesorios.

3.1.6.7. Cable de potencia golpeado durante la bajada del equipo BES con las cuñas del taladro

Durante la operación de la bajada del equipo BES con el cable de potencia, se usan equipos en la mesa rotaria del taladro de perforación o de reparación tales como las tenazas manuales, tenazas hidráulicas, cuñas de diferente medida, entre otros.

La operación de sentar la tubería de producción en la cuña correspondiente, realizar las conexiones entre tubo y tubo debe de ser bien coordinadas entre el perforador del taladro y el personal que está en la mesa rotaria, ya que siempre debe de haber una persona vigilando la posición del cable para que en ningún momento haya problemas de aplastamiento ya sea por las cuñas o por tubería conductora del taladro de perforación o reparación.

Este tipo de problemas que el cable es golpeado por la acción de la cuñas, o por las tenazas o por la conductora siempre sucede en las operaciones de bajada del equipo BES. En algunas oportunidades cuando sucede el problema es reportado, en otras ocasiones el problema es escondido y es allí donde comienza la incertidumbre del tiempo de vida útil del equipo BES de fondo.

La repercusión que tiene este problema en el proyecto es muy negativo, debido a los elementos subsecuentes como son:

- Si el problema se resuelve con reparación o con empalme, se está introduciendo innecesariamente otro punto de riesgo para el sistema BES.
- Costos de taladro se incrementa, ya que la verificación, análisis, pruebas, reparación o empalmes pueden llevar horas, un día o varios días.

- Problemas de logística, agravándose este punto cuando el problema ocurre de noche, condiciones climatológicas o es en operaciones costa afuera (offshore).

Para realizar el diagnóstico cuando sucede un problema de golpe o aplastamiento del cable de potencia por acción de las cuñas, tenazas o conductora, se recomienda:

- ✓ Revisar la armadura de la parte afectada y quitar esa sección.
- ✓ Revisar la parte interna del cable: plomo, fibra, aislamiento, conductor, tubo capilar, etc...
- ✓ Tomar las medidas eléctricas. Fase a tierra y fase a fase.
- ✓ En caso de que la parte afectada sea solo una fase, la alternativa es hacer la reparación en esa sección.
- ✓ En caso de que dos fases sean las afectadas, se recomienda cortar el cable y realizar un empalme.

3.1.7. FENÓMENOS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Se puede señalar que existe un problema de calidad de la energía eléctrica cuando se presenta cualquier desviación de la tensión, la corriente o la frecuencia que ocasione la mala operación de los equipos o perjudique la economía del proyecto; de la misma forma cuando ocurre alguna perturbación del flujo de energía eléctrica, entre los cuales se puede nombrar:

3.1.7.1. Armónicos

Antes de definir este concepto es importante precisar primero sobre la calidad de la onda de tensión la cual debe poseer amplitud de 1pu y frecuencia de 60Hz al igual que una forma sinusoidal igual a la gráfica de la función trigonométrica “seno” como se puede observar en la figura siguiente:

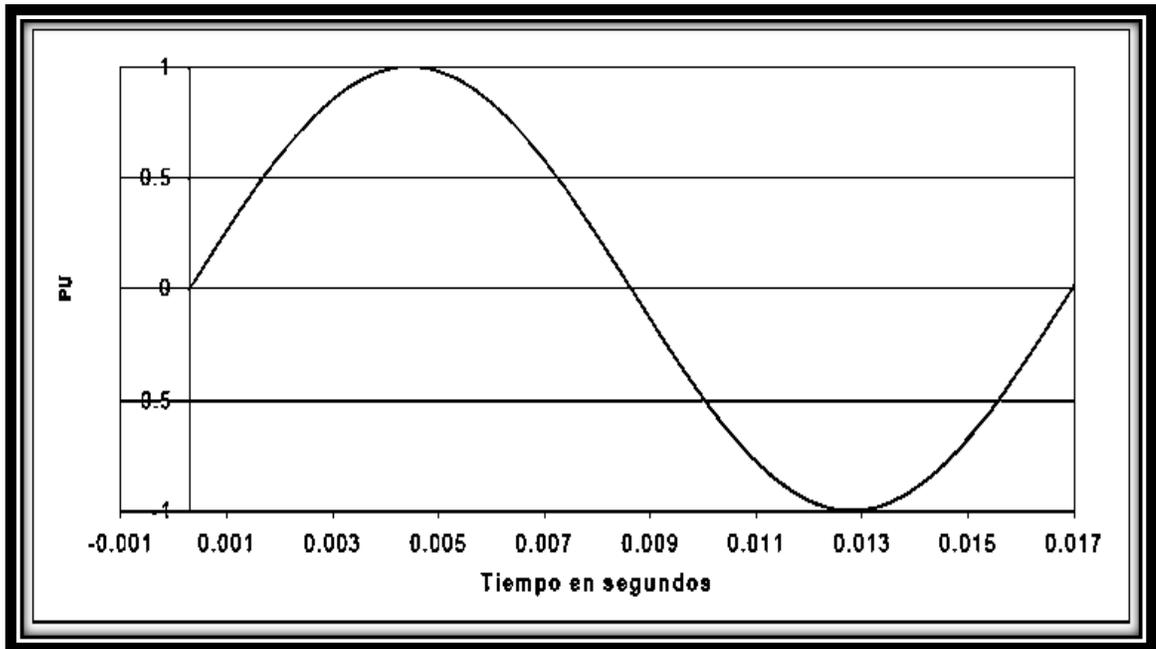


Figura 25 Onda sin contenido de armónicos

(Arcila, 2010)

Cuando una onda periódica no tiene esta forma sinusoidal se concluye que tiene contenido armónico, en la cual se define que son tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. La más popular de todas es la 3ra armónica, pero hay 5ta armónica, 7ma, 9na, etc. Por lo general las más importantes son la 3ra y la 5ta. La “fundamental” es la componente armónica que tiene la misma frecuencia que la onda original, la 5ta armónica tiene una frecuencia que es cinco veces mayor a la frecuencia fundamental, la 3ra tres veces y así sucesivamente.

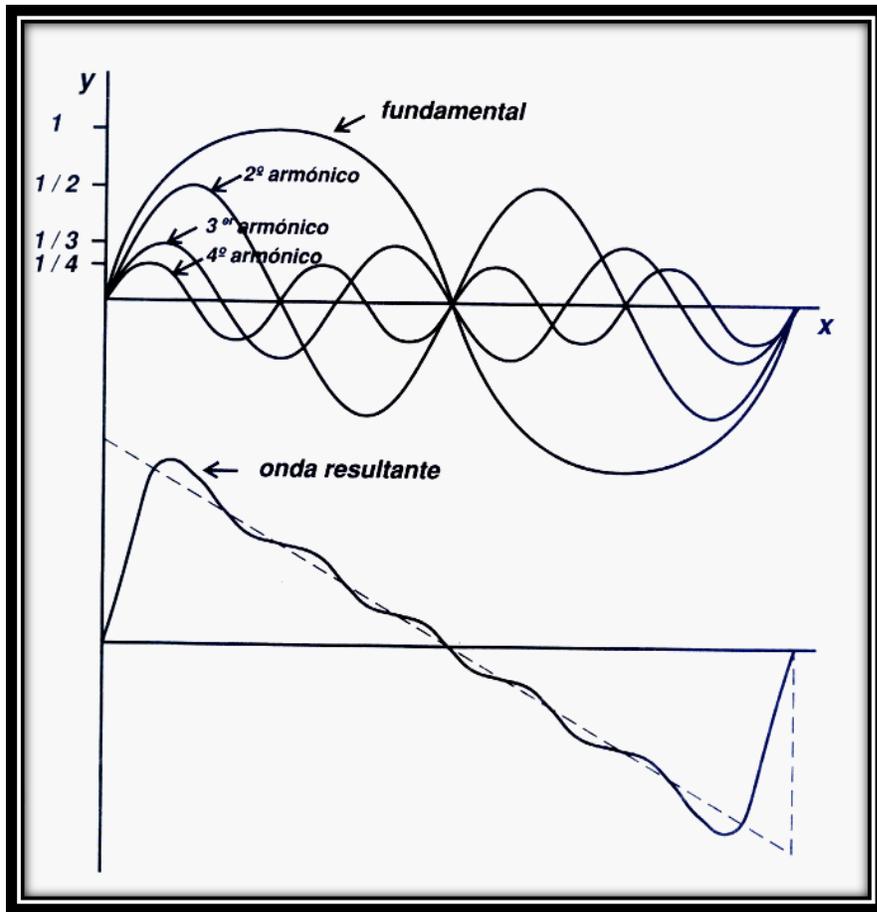


Figura 26 Forma de onda fundamental y sus componentes armónicos: 2ª ,3ª, 4ª

(Téllez Ramírez, 2012)

Esta distorsión en la forma de la onda, provoca un efecto de “rebote” de la señal eléctrica en la carga, como si la carga en vez de absorber toda la energía que se le entrega, devuelve parte de esta al generador. Esta energía retorna a través del neutro de los sistemas trifásicos y puede ser de tal magnitud que el dimensionamiento de los conductores eléctricos deba hacerse considerando la corriente que circula por el cable neutro en vez de hacerse por la corriente de fases. O sea, en algunos casos puede suceder que la corriente en el neutro debida a las armónicas sea mayor que la corriente de fase. Por eso hay que tener cuidado con el contenido de armónicas de un sistema eléctrico ya que si

no se tienen en cuenta pueden causar recalentamiento en los conductores y provocar incendios.

3.1.7.1.1. Espectro de Fourier

El teorema de Fourier dice que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de ondas sinusoidales, mediante la aplicación de la serie de Fourier, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

3.1.7.1.2. Efectos sobre los cables

La distribución de la corriente a través de la sección transversal de un conductor solo es uniforme cuando se trata de corriente directa. En corriente alterna, a medida que la frecuencia aumenta, la no uniformidad de la distribución de corriente es más pronunciada.

En conductores circulares la densidad de corriente aumenta del centro a la superficie. Las capas externas son menos ligadas por el flujo magnético que las internas, esto significa que con corriente alterna es inducido más voltaje longitudinalmente en el interior del conductor que en la superficie, por lo tanto la densidad de corriente va en aumento del interior a las capas externas del conductor, este fenómeno es denominado efecto skin.

3.1.7.2. Campo electromagnético

Cuando se aplica corriente eléctrica directa (cd) a un alambre (conductor), el flujo de corriente o el movimiento de cargas eléctricas, crea un campo electromagnético (que es un tipo de energía como la luz solar, ultravioleta, rayos x, ondas de radio etc.) alrededor del alambre, propagando una onda en las tres dimensiones hacia el exterior de este. Es decir, cuando una corriente viaja por un conductor (cable), genera a su alrededor un efecto no visible llamado campo electromagnético

Existen dos tipos de campos que generan electromagnetismo:

- Los campos eléctricos se producen por cargas eléctricas que crean un voltaje o tensión, de manera que su magnitud crece cuando el voltaje aumenta. Podemos estar hablando de una simple lámpara apagada conectada a la corriente. Las unidades del campo eléctrico son voltios por metro.
- Los campos magnéticos son el resultado del flujo de corriente a través de los conductores o los dispositivos eléctricos y es directamente proporcional a esa corriente; a más corriente más campo magnético. Las unidades del campo magnético son gauss (G) o tesla (T).

3.1.7.2.1. Regla de la mano derecha para campo Magnético (β)

La aplicación de la regla de la mano derecha nos dice lo siguiente, ponemos los dedos alrededor del conductor lo cual indica el sentido del campo magnético, por consiguiente el dedo índice muestra el sentido de la corriente, como se puede apreciar en la siguiente figura:

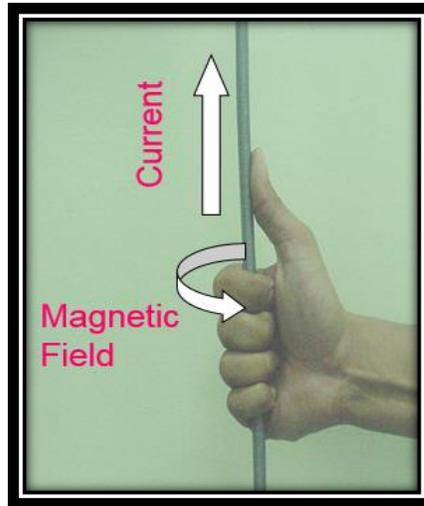


Figura 27 Regla de la mano derecha

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

3.1.7.2.2. Efectos sobre el cable plano de BES

Los campos magnéticos producidos por corrientes eléctricas en conductores paralelos causan atracciones o repulsiones dependientes de la dirección en que fluya la corriente en cada conductor. En la siguiente ilustración y de la forma como se usa la energía en la industria petrolera se puede observar el efecto de dos corrientes paralelas que fluyen en la misma dirección.

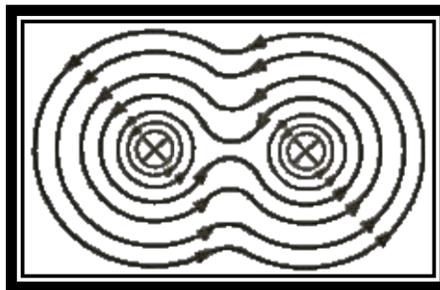


Figura 28 Campo magnético en conductores paralelos

(Gil, 2013)

Las corrientes paralelas directas producen campos electromagnéticos que se atraen, en la zona entre los conductores, las líneas de fuerza se oponen, causando la debilitación del campo. En la zona de afuera de los conductores, el campo se refuerza. A causa de la debilitación del campo, las líneas de fuerza tienden a abrazar a ambos conductores y éstos se atraen uno al otro. Por lo tanto, se puede establecer que las corrientes paralelas fluyendo en la misma dirección producen campos electromagnéticos que se atraen. Por tal motivo es que en los cables planos usados en la industria petrolera al haber tres conductores, el conductor de la mitad tiende a sobrecalentarse cuando el cable está transportando corriente eléctrica a través del mismo.

Para evitar que el efecto del campo electromagnético aumente con la longitud del cable se debe hacer empalmes cruzados cada cierta longitud del cable, por lo general, se lo hace cada 1 000 pies de profundidad y se lo hace de la siguiente manera como lo explica el gráfico:

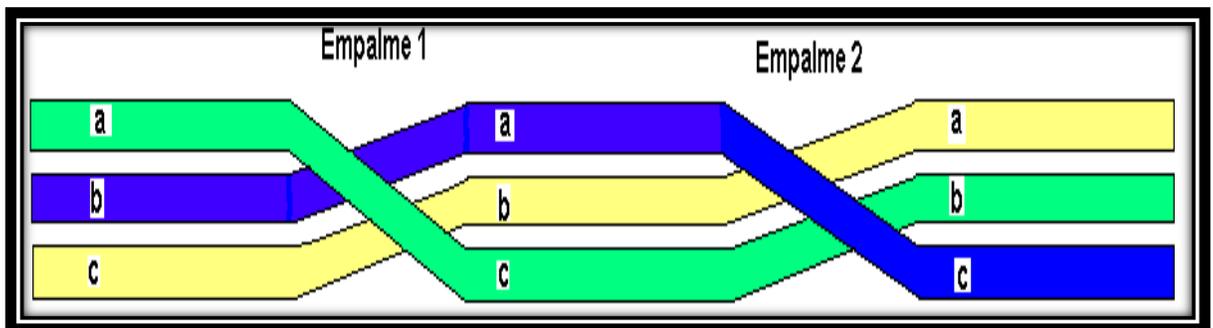


Figura 29 Empalmes cruzados en cable plano

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

Con lo que el campo magnético de cada conductor es rotado en todas las posiciones. Por lo que es muy importante que los empalmes de transposición se hagan como se muestra en la imagen para mitigar de una manera eficaz el efecto del campo magnético en los cables de potencia de configuración plana.

3.1.7.2.3. Efectos sobre el cable redondo de BES

En lo que respecta a cable redondo al estar configurado con conductores trenzados, se reduce la distancia entre conductores y lo que esta configuración produce es la cancelación de sus campos magnéticos, por lo que no existen problemas de sobrecalentamiento en los conductores por efecto del campo magnético.

3.1.7.3. Desbalance de corriente

Es un indicador de lo diferentes que son las tensiones de un sistema trifásico entre cada uno de ellos. El desbalance de voltaje se expresa en porcentajes, lo ideal es que sea de 0% pero, un desbalance de 3% aún en ciertos casos es aceptable.

El desbalance de corriente afecta principalmente al motor, incrementando su temperatura, reduciendo su vida útil y haciéndolo más susceptibles a fallas de otra naturaleza.

Los desbalances que ocurren durante la operación del equipo BES, se deben a varios factores, tales como:

- Tipo de cable que se usa en la completación del pozo y la profundidad que se instala. De acuerdo a la configuración de los cables de potencia, el cable que genera menos desbalance es el tipo redondo por su geometría helicoidal.
- Defectuosa conexión eléctrica
- Condiciones de humedad en el momento de hacer conexiones o hacer empalmes.

3.1.7.3.1. Efectos que produce el desbalance de voltaje en el motor eléctrico.

- Vibraciones mecánicas.
- Pérdida de potencia. En estos casos se debe modificar la potencia con el Factor de Corrección según el nivel de desbalance.
- Temperatura adicional en el motor (Sobrecalentamiento).

Se recomienda no superar un desbalance de 5%, según lo muestra la figura siguiente eso implicaría disminuir la potencia en 25%. Sin embargo, es aconsejable no llegar al 3%, ya que esto produce disminuir la potencia en 10%, ya que puede significar un aumento de temperatura igualmente del 10%.



Figura 30 Factor de corrección de potencia

(ESP OIL Engineering Consultants, 2004)

3.1.7.3.2. Procedimiento recomendado para evaluar la alimentación de un motor.

- Apagar el motor y medir los niveles de voltaje en las tres líneas a la salida del Arrancador.
- Seguir aguas arriba (Del Arrancador hacia el Tablero de Alimentación), y medir los niveles de tensión.
- Hacer los cálculos correspondientes y tomar las decisiones.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS CABLES DE POTENCIA

La empresa Andes Petroleum Ecuador Ltd. usa una serie de combinaciones de cables de potencia fabricados en diferentes materiales, entre las principales combinaciones tenemos los siguientes:

- CPE
- CTT
- CPN
- CPL
- CEN
- CEE
- CEBN
- CEBE
- CEBE-HT
- CEL

Cada uno de ellos está fabricado de diferentes materiales para acoplarse a las características del pozo y del fluido que vamos a producir, para diferenciar uno de otro se les ha dado nombre a cada una de las siglas, aunque éstas no son un estándar en la industria hidrocarburífera, podemos diferenciar un cable de otro de acuerdo a los siguientes criterios:

- E = EPDM
- P or PP = Polypropylene
- PE = Polyethylene
- or N = Nitrile
- T = Tape
- B = Barrier (Centriline only)
- K = Kaptom
- L = Lead
- R = Round
- F = Flat
- HT = High Temperature
- LT = Low Temperature
- PVDF or FB = LT Fluorobarrier™

▪ **C = Copper**

▪ **FEP or HTFB = HT
Fluorobarrier™**

Como se puede observar podemos combinar de muchas maneras los materiales para que el cable se adapte a las condiciones y configuración de cada pozo, de ahí podemos deducir a manera de ejemplo que el cable CPN quiere decir:

C= Cooper, P= Polypropylene, N= Nitrile

Las principales consideraciones en la selección adecuada de las partes individuales del cable se pueden resumir de la siguiente manera:

- El material más usado para conductores de cable de potencia es el cobre, especialmente en pozos más profundos ya que el aluminio tiene una conductividad inferior, el cobre puede ser sólido, trenzado o compacto
- Los materiales más frecuentes usados para el aislamiento de cada conductor son de polipropileno y EPDM (etileno propileno dieno).
- En las barreras comúnmente se utiliza materiales como el Plomo y el Fluorobarrier que puede ser el PVDF (Fluoruro de Polivinildeno extruido) y el FEP (Fluoro polímero extruido)
- El usar trenzas o cintas proporcionan una resistencia adicional y protección a las barreras del cable.
- Las chaquetas están elaborados de nitrilo o materiales de EPDM.
- La armadura metálica presenta las siguientes opciones que son acero galvanizado, acero inoxidable y monel.

El presente trabajo está enfocado en dos tipos de cables los cuales son:

- ❖ En cable de potencia de configuración redondo se usa el CEBER fabricado para operar bajo temperaturas de -40°F hasta 300°F

C= Cooper, E= EPDM (DL90), B= Barrier (PVDF), E= EPDM (CL185),
R= Round

- Conductor: Cobre desnudo sólido
- Aislante: EPDM – DL90
- Barrera: PVDF
- Chaqueta: EPDM – CL185
- Armadura: Acero galvanizado

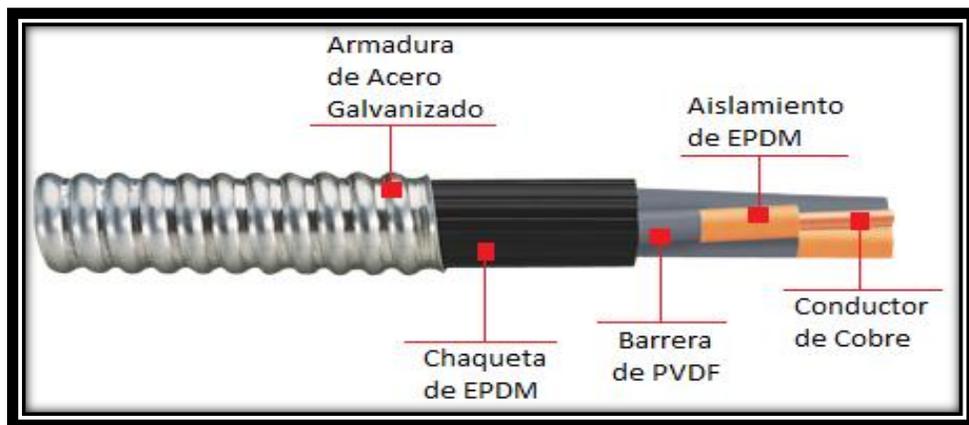


Figura 31 Partes del cable de potencia de configuración redonda

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

- ❖ En cable de potencia de configuración plano se usa el CELF fabricado para operar bajo temperaturas de -40°F hasta 450°F
 - C= Cooper, E= EPDM (DL90), L= Lead, F= Flat
 - Conductor: Cobre desnudo sólido
 - Aislante: EPDM – DL90
 - Barrera: Plomo recubierto de cinta trenzada
 - Armadura: Acero galvanizado

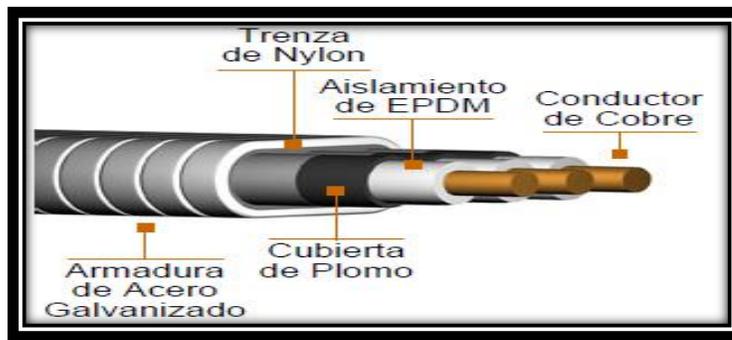


Figura 32 Partes del cable de potencia de configuración plana

(Centrilift - Baker Hughes, 2012)

4.2. VARIABLES QUE AFECTAN A LOS CABLES DE POTENCIA

4.2.1. LOS DAÑOS MECÁNICOS

Los daños mecánicos que se puedan dar en el cable de potencia son el resultado de la geometría del pozo y del transporte del mismo hasta ser instalado en el pozo.

4.2.2. LA CORROSIÓN

La gravedad de la corrosión depende del ambiente al que está expuesto el cable de potencia desde el fondo de pozo hasta la superficie, ya que con el tiempo éste se comenzará a desgastar de acuerdo a la naturaleza del entorno del agujero.

4.2.3. DESCOMPRESIÓN

Es conocido como el asesino silencioso de cable, las propiedades químicas de los materiales del cable de potencia lo hace susceptible a la descompresión.

Esto es debido a que algunos fluidos se disuelven de forma natural en el material de protección del cable y al haber cambios de presión en el pozo cada vez que se inicia la bomba, el gas disuelto en el interior de los elastómeros del cable se expande y si este elastómero no tuviera la capacidad de expandirse también, este podría explotar, pero esta expansión ocasiona que el material que protege el cable se rasgue a un nivel molecular, lo que con el transcurrir del tiempo esto ocasiona que el cable se corte haciendo que el equipo del fondo deje de funcionar.

4.2.3.1. En el cable redondo

Existen dos formas de prevenir el efecto de la descompresión:

- El método de la contención, en el cual la armadura es fabricada para contener herméticamente los componentes internos del cable de manera que no se expandan debido a las fuerzas de descompresión y estos no se destruyan.
- Usar una capa Fluoro polímero extruido, que debe ser colocada sobre cada conductor aislado, la función de dicha capa es minimizar la velocidad a la que los gases disueltos entran y salen del aislamiento de tal forma que no se pueda producir ningún daño de descompresión.

4.2.3.2. En cable plano

En el caso del cable plano se utiliza una capa impermeable de plomo sobre cada conductor para así evitar que los gases entren en contacto con el aislamiento, por lo que al no haber gases que pueden ingresar, no existirán gases que se expandan durante los cambios de presión y por lo tanto no ocurrirá ningún daño de descompresión.

4.3. CUADROS COMPARATIVOS ENTRE LOS MATERIALES USUALMENTE USADOS PARA FABRICAR CABLES REDONDOS Y PLANOS.

Tabla 2 Características del conductor

CONDUCTOR		
COBRE DESNUDO	RECUBIERTO DE ESTAÑO	ALUMINIO
Se requiere usar aislamiento EPDM	Es necesario cuando se utiliza el aislamiento de polipropileno.	fácil de forjar, hilar, estirar debido a que es muy dúctil
Se debe limpiar súper bien antes de aplicar el aislamiento	El revestimiento es demasiado delgado para evitar el ataque de H ₂ S al cobre	es un material más laxo (carece de rigidez o tensión) que el cobre aunque la resistencia de éste sea superior
Presenta menor resistencia eléctrica	Tiene gran resistencia eléctrica	mayor resistencia eléctrica
Ventajas: - Alta conductividad eléctrica - Alta conductividad térmica - Permite optimización en volumen - Fácil de trabajar - Buena resistencia a la corrosión	No promueve una mayor unión entre EPDM y cobre, al contrario, actúa como un agente de liberación.	Ventajas: - Bajo peso específico - Bajo costo - Permite optimización en peso
Desventajas: - Baja resistencia a la tracción - Baja resistencia a la oxidación		Desventajas: - Baja resistencia a la tracción

(Baker Hughes, 2004)

Tabla 3 Características del conductor de cobre

CONDUCTOR (cobre)		
SOLID (SÓLIDO)	STRANDED (TRENZADO)	COMPACTO
Diámetro menor de 0.289 pulgadas	Diámetro: - Trenzado de 0.328 pulgadas - Trenzado comprimido 0.322 pulgadas - Compacto de 0.302 pulgadas	Bajas pérdidas dieléctricas
Proporcionan bloqueo absoluto al gas y al líquido	Puede actuar como canales para los fluidos del pozo y gases, que pueden recoger o moverse a lo largo del cable	sea más liviano que otros
Propiedades eléctricas superiores, ya que tienen menor resistencia eléctrica	Pesará aproximadamente 16 libras más por 1 000 pies	
Más fácil de empalmar	Más difícil de empalmar	
CAPEX es mucho menor	En presencia de gases corrosivos, estos conductores se dañan más rápidamente	
OPEX reducido a través de un menor número de pérdidas eléctricas	Demuestran más pérdidas de potencia	se pueda aprovechar de forma más eficiente el espacio
Mayor resistencia a la rotura		

(Baker Hughes, 2004)

Tabla 4 Características del aislante

INSULATION (Aislante)	
THERMOPLASTIC (Polipropileno)	THERMOSET (EPDM)
Material rentable para el aislamiento de cable o revestimiento en ambientes de pozos de petróleo de baja temperatura <205°F	Normalmente se utiliza como material de aislamiento del cable donde las temperaturas extremas existen (Alta temperatura de hasta 300°F (149°C) y Baja temperatura de hasta -50°F (-46°C))
Excelentes propiedades dieléctricas, físicas y alto peso molecular	Compuesto por excelentes propiedades de aislación eléctrica hasta 30.000 V., mejor polímero en el mercado.
Resistentes a la migración/deformación, bajo coeficiente de absorción de humedad	Especialmente para compuestos de Petróleo, Gas, Calor y Resistencia
Resistencia química de petróleo, aunque es susceptible a la degradación por hidrocarburos ligeros, CO2 y gases de hidrocarburos	Resistente a la mayoría de los químicos
Dureza excepcional y vida flexible	Propiedades de baja elasticidad
	Alto módulo contra las fuerzas de descompresión
	Al ser calentada por encima de su punto de fusión, mantiene su estructura que en casos extremos llega a ser carbón
	Permite que el gas salga más rápidamente sin dañar EPDM

(Baker Hughes, 2004)

Tabla 5 Características de la barrera

BARRIERS (Barreras)	
Fluoruro de polivinilideno (PVDF)	Fluoro polímero extruido (FEP)
Protege el aislamiento de los productos químicos y líquidos	Protege el aislamiento de los productos químicos y líquidos
Aumenta la rigidez dieléctrica del sistema de aislamiento	Aumenta la rigidez dieléctrica del sistema de aislamiento
Temperatura máxima de 300°F (150°C)	Temperatura máxima de 400°F (204 °C) y baja temperatura a -50°F (-46°C)
	Proporciona protección de descompresión del aislamiento

(Baker Hughes, 2004)

Tabla 6 Características de la envoltura de la barrera

SHEATH (Envoltura de la barrera)	
Braid	Lead (plomo)
Material patentado que proporciona un rendimiento superior de toda la vida	Alta Calidad de plomo que cumpla o exceda ASTM B29
Añade resistencia tangencial para mejorar la resistencia de descompresión	Protege al cobre del ataque de H2S
Resistencia química a ácidos, álcalis, disolventes, hidrocarburos y agua	La cubierta de plomo es impermeable al gas y el líquido
Propiedades físicas excepcionales, la retención del 90% después de la exposición a 400°F (204°C)	La envoltura de Plomo tiene una clasificación de temperatura de -40°F a 450°F (-40°C a 232°C)

(Baker Hughes, 2004)

Tabla 7 Características de la chaqueta

JACKET (Chaqueta)	
EPDM (Caucho Etileno Propileno)	Nitrile (nitrilo)
Mayor rendimiento hasta la temperatura de 300°F (149°C)	Resistente, reduce el daño mecánico
Resistente a los compuestos de petróleo	Resistente a la mayoría de los productos tratamiento de químicos
Alto módulo, agregando fuerza contra las fuerzas de descompresión	Alto módulo agregando fuerza contra las fuerzas de descompresión
Permite que el gas salga más rápidamente sin dañar EPDM	Permite que el gas pueda salir más rápidamente
Resistente al gas	Resistente al gas, mantiene su integridad en ambientes gaseosos
	Mejor elastómero en el mercado para la resistencia de aceite
	Excelentes propiedades físicas
	CH17 (fibra de relleno) para cable plano, CH42 usado en cable redondo

(Baker Hughes, 2004)

Tabla 8 Características de la armadura

ARMOR (Armadura)		
Galvanized Steel (Acero galvanizado)	Stainless Steel (Acero inoxidable)	Monel
Protege el cable de daños mecánicos	Protege el cable de daños mecánicos	Proporcionará protección mecánica
Ayuda a contener al cable para que no se rompa bajo fuerzas de descompresión	Contiene cable bajo fuerzas de descompresión	Proporciona contención bajo fuerzas de descompresión
Se le da un tratamiento térmico en los cuatro lados para una máxima protección	Mejora de la resistencia a la corrosión sobre la armadura galvanizada; Excelente para ambientes con CO2	Ofrece la mejor protección para los pozos corrosivos
La aleación de zinc le da una resistencia extra para evitar la corrosión	Tiene un rendimiento aceptable hacia la corrosión	Su aleación es muy superior para resistir ambientes muy corrosivos
Espesor: - Plano : 0,02 pulgadas estándar 0,025 pulgadas de servicio pesado - Redondo : 0,025 pulgadas estándar 0,034 pulgadas de servicio pesado	Espesor: 0,02 pulgadas de acero es oferta estándar	Espesor: - Plano: 0,15 pulgadas estándar 0,02 pulgadas de servicio pesado - Redondo : 0,15 pulgadas estándar

(Baker Hughes, 2004)

4.4. CUADROS COMPARATIVOS DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES MÁS COMUNES DE LOS QUE ESTÁN ELABORADOS LOS CABLES DE POTENCIA.

Tabla 9 Propiedades del conductor

CONDUCTOR		
Propiedades	COBRE	Aluminio
Propiedades Eléctricas		
Conductividad eléctrica @20 °C (IACS)	100	61,5
Resistencia eléctrica (Ohmio/mm ²)	0,0172	0,028
Propiedades Mecánicas		
Densidad (g/cm ³)	8,96	2,7
Resistencia a la tracción (Mpa)	262	82,7
Resistencia al corte (kg/cm ²)	1750	665
Resistencia límite de fluencia (kg/cm ²)	560	350
Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	1200000	702000
Alargamiento a la rotura (%)	15 a 35	10 a 30
Dureza Vickers	50	15
Propiedades Térmicas		
Calor Específico (cal/g°C)	0,093	0,022
Coeficiente de dilatación lineal (°C-1)	1,7*10 ⁻⁵	2,3*10 ⁻⁵
Coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura (1/°C)	0,00397	0,00406
Conductividad Térmica a 23C (W/m•K)	400	204.22
Calor latente de ebullición (J/kg)	5410*10 ³	-
Calor latente de fusión (J/kg)	214*10 ³	-
Temperatura de fusión (°C)	1083	660
Punto de ebullición (°C)	2595	

Punto de fusión (°C)	1083	658
Propiedades varias		
Para la misma caída de tensión:		
Relación diámetro	1	1,27
Relación sección	1	1,63
Relación peso	1	0,50
Para la misma intensidad:		
Relación diámetro	1	1,19
Relación sección	1	1,42
Relación peso	1	0,40

(Sivasa - Ingemecánica, 2015)

Tabla 10 Propiedades del aislante

INSULATION (Aislante)		
Propiedades	POLIPROPILENO	EPDM
Propiedades Eléctricas		
Constante Dieléctrica @1MHz	2,38	-
Factor de Disipación a 1 MHz	0,00300	-
Resistencia Dieléctrica (kV/mm)	140	Excelente
Resistividad Superficial (Ohm/sq)	1.00E+15	-
Resistividad eléctrica (Ohmcm)	1.00E+18	-
Propiedades Mecánicas		
Absorción de Agua - Equilibrio (%)	0,03	-
Densidad (g/cm3)	0,9	0,860
Índice Refractivo	1,49	-
Índice de Oxígeno Límite (%)	18	-
Inflamabilidad	Combustible	-
Resistencia a los Ultra-violetas	Aceptable	-
Alargamiento a la Rotura (%)	900	600
Coefficiente de Fricción	0,250	-
Carga de rotura (Kg/cm2)	-	40
Dureza - Shore A	83	90
Módulo de Tracción (GPa)	0,9-1,5	-
Resistencia a la tensión (Mpa)	80	17,0

Resist. a la Abrasión ASTM D1044	13-16	Buena
Resistencia a la Tracción (MPa)	25-40	≥ 5
Propiedades Térmicas		
Calor Específico (J / K*kg)	1700 - 1900	-
Coefficiente de Expansión Térmica (µm/m°C)	185	576
Conductividad Térmica a 23C (W /m K)	0,1-0,22	-
Temperatura Máxima de Utilización (°C)	125	150
Temperatura Mínima de Utilización (°C)	-30	-54
Punto de fusión (°F)	428	-
Resistencia Química		
Ácidos - concentrados	Buena	Buena
Ácidos - diluidos	Buena	Excelente
Álcalis	Buena	Buena
Alcoholes	Buena	No recomendada
Cetonas	Buena	Buena
Grasas y Aceites	Aceptable	No recomendada
Disolventes orgánicos	-	Moderada
Ozono	-	Excelente
Hidrocarburos Aromáticos	Aceptable	Aceptable

(Polycom, 2010)

Tabla 11 Propiedades de la barrera

BARRIERS (Barreras)			
Propiedades	Fluoruro de polivinilideno (PVDF)	Fluoro polímero extruido (FEP)	Lead (plomo)
Propiedades eléctricas			
Resistividad Eléctrica (Ohmcm)	5.00E+16	1.00E+18	0,000020643
Resistencia dieléctrica (kV/mm)	10,2	2,2	-
Resistividad superficial (ohm/Sq)	>10 ¹³	>10 ¹⁸	-
Propiedades mecánicas			
Resistencia a la tracción (Mpa)	48,3	34,0	-
Gravedad específica (gr/cm ³)	1,78	2,15	11,35
Límite Elástico (MPa)	-	-	5,5
Módulo de Tracción (GPa)	-	-	16,1
Módulo Volumétrico (GPa)	-	-	45,8
Módulo de corte (GPa)	-	-	4,9
Módulo de elasticidad (GPa)	-	-	14
Resistencia a la Tracción (MPa)	-	-	18
Coefficiente de fricción	0,3	0,2	-
Resistencia a la compresión (GPa)	68,9	0,0152	-
Módulo de flexión (GPa)	2,00	0,655	-
Módulo de tensión (GPa)	2,07	60000	-
Dureza Shore D	78	55	42
Alargamiento (%)	100	300	-

Resistencia a la flexión (PSI)	5500	No se quiebra	-
Absorción de agua (%)	0,030	0,01	-
Coefficiente lineal de expansión @ 70-212 °F (in/in/°F)	7,1*10 ⁻⁵	4,5-5,8*10 ⁻⁵	-
Propiedades térmicas			
Coefficiente de Expansión Térmica (µm/m°C)	119	135	29,1
Temperatura de servicio continuo (°F)	235	400	-
Punto de fusión (°F)	340	500	622
Conductividad térmica (BTU/hr/ft ² /°F*in)	1,50	1,4	229
Calor de fusión (BTU/lb)	-	11	10,4
Calor específico @25°C (Cal/g°C)	0,30-0,34	0,26	10,41
Máxima temperatura de servicio (°F)	300	400	400
Punto de ebullición (°C)	-	-	1749
Calor Latente de Evaporación (BTU/lb)	-	-	366
Capacidad calorífica (BTU/lb-°F)	-	-	0,03076
Temperatura de deflexión @66 psi (°F)	235	138	-

(Elaplas, 2012)

Tabla 12 Propiedades de la chaqueta

JACKET (Chaqueta)		
Propiedades	EPDM (Caucho Etileno Propileno)	Nitrile (nitrilo)
Propiedades Mecánicas		
Gravedad específica (gr/cm ³)	0,860	1,15
Dureza Shore D	90	70
Carga de rotura (Mpa)	3.93	6,89 - 24,1
Alargamiento a la rotura (%)	600	400 - 600
Desgarro (N/mm)	-	25
Propiedades Térmicas		
Coefficiente de Expansión Térmica (µm/m°C)	576	702
Temperatura de fragilidad (°C)	-	- 51,1
Temperatura de trabajo (°C)	desde -54 hasta 150	desde -30 hasta 140
Propiedades Químicas		
Resistencia al ozono	Excelente	Moderada
Resistencia a ácidos y bases diluidas	Excelente	Excelente
Resistencia a ácidos y bases concentrados	Buena	Buena
Resistencia a hidrocarburos	Excelente	Excelente
Resistencia a disolventes orgánicos	Moderada	Buena

(Polycom, 2010)

Tabla 13 Propiedades de la armadura

ARMOR (Armadura)			
Propiedades	Galvanized Steel (Acero galvanizado)	Stainless Steel (Acero inoxidable)	Monel
Propiedades Eléctricas			
Resistividad Eléctrica (Ohmcm)	0.000017	0.000072	0,0000547
Propiedades Mecánicas			
Densidad (g /cm ³)	7,85	8,03	8,80
Alargamiento (%)	22	65 - 55	<40
Módulo de elasticidad (GPa)	200	212	185
Dureza Brinell	140	217	125 - 190
Carga de rotura (Mpa)	-	515	550
Límite elástico (Mpa*min)	280-320	-	-
Resistencia a la Tracción (MPa)	500	500 - 900	550 - 950
Propiedades Térmicas			
Coeficiente de Expansión Térmica (µm/m°C)	12	16,6	13,9
Punto de Fusión (°C)	1540	1398 - 1420	1300 - 1350
Coeficiente de Temperatura (1/K)	-	0,72	0,0019
Conductividad Térmica a 23C (W /m K)	52	16	21,7
Capacidad calorífica (BTU/lb °F)	0,112	0,120	0,102

(Trateu, 2008)

4.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS ENTRE CABLE REDONDO Y PLANO

4.5.1. CABLE REDONDO (CEBER)

4.5.1.1. Ventajas

- Es compatible con la física de distribución de la presión y la contención, es decir, que las fuerzas están igualmente distribuidas alrededor de la circunferencia del cable.
- La presencia del campo eléctrico que provoca la resistencia al flujo de corriente en los conductores adyacentes, es afectado de la misma manera en todos los conductores, por lo que la entrega de tensión es equilibrada.
- Genera menos desbalance de corriente debido a su geometría helicoidal.
- El aislamiento protege de los productos químicos y líquidos.
- Regula la velocidad de la descompresión.
- Aumenta la rigidez dieléctrica del sistema de aislamiento, es decir, le da un valor extra al sistema para que no pierda su propiedad aislante y pase a ser conductor.
- La Barrera del cable hecho de Fluorobarrier (PVDF) es muy superior a la cinta y braid que se usa en otros cables de potencia, ya que abarca rangos de temperatura más altos.
- Los conductores están trenzados, esto da al cable buena resistencia axial, los conductores pueden reordenarse cuando un esfuerzo comprime el cable.
- La configuración del cable es simétrico.
- Todos los conductores se calientan por igual, por lo que tienden a mantener una temperatura casi igual a la del entorno que lo rodea.

- Al tener una barrera de PVDF le protege al aislamiento de los productos químicos y líquidos.
- La barrera de PVDF le da una resistencia mecánica mayor al tener un coeficiente de dureza más elevado que el plomo.
- Al tener doble protección con EPDM, es decir, en el aislante y la chaqueta, le permite a este cable dar una resistencia mayor a la presencia de hidrocarburos.
- Su peso aproximado es de 2,67 lb/ft lo que lo hace menos susceptible a descolgarse al ser bajado hacia el fondo del pozo durante la bajada del equipo BES.

4.5.1.2. Desventajas

- Es comúnmente recomendado si el espacio anular del pozo lo permite.
- CEBER soporta desde -40 ° F (-40° C) hasta 300 ° F (150 ° C) y CEBERHT (alta temperatura) soporta hasta 400 ° F (204 ° C).
- En ambientes extremadamente corrosivos la armadura de acero galvanizado se deteriora con facilidad.
- La barrera de PVDF soporta una temperatura máxima de 300 °F (150 °C)

4.5.2. CABLE PLANO (CELF)

4.5.2.1. Ventajas

- Es más recomendable cuando el espacio anular es muy reducido.
- La composición especial propia de la EPDM se traduce en menos hinchazón alrededor de un tercio de lo normal lo que protege al cable de mejor manera contra la descompresión que sucede al estar expuesto a altas temperaturas.

- El EPDM tiene excelentes propiedades eléctricas y es muy resistente a la degradación que produce el fluido al que está expuesto.
- Tiene una armadura de acero galvanizado resistente a la corrosión.
- Posee una cubierta de plomo que mejora la flexibilidad y la vida útil del cable.
- El conductor de cobre sólido minimiza la migración de gas.
- CELF soporta desde -40 ° F (-40° C) hasta 450 ° F (232 ° C).
- Al tener una cinta trenzada le proporciona una resistencia adicional y protección a la barrera del cable.
- Tiene una capa de plomo impermeable (al gas y al líquido) sobre cada conductor para evitar que los gases entren en contacto con el aislamiento y así minimizar el daño por descompresión.
- La capa de plomo le protege al cable del ataque de H₂S.
- La envoltura de plomo trabaja a una temperatura máxima de operación de 450 °F (232 °C)

4.5.2.2. Desventajas

- No es compatible con la física de distribución de la presión y la contención, ya que las fuerzas son mayores en el espesor del cable plano, por lo que el cable tiende a deformarse y toma una en forma de óvalo.
- En el cable plano la entrega de tensión al motor no será equilibrada, aunque el voltaje esté perfectamente balanceado en superficie.
- El conductor del centro tiende a calentarse más que los otros dos, debido a que en sus costados tiene dos calentadores por lo que no puede disipar tanto calor como los otros.
- Otro motivo para que exista sobrecalentamiento es porque entre corrientes paralelas fluyendo en la misma dirección, se produce un campo magnético entre las mismas que hace que los conductores se

atraigan entre sí, lo cual ocasiona que el conductor de la mitad tienda a calentarse más que los conductores de los extremos.

- Ofrece una protección mecánica menor a la del cable de potencia de configuración redonda, por lo que es más susceptible a dañarse durante la instalación del mismo.
- Genera más pérdidas de voltaje lo que repercute en mayores gastos en consumo de energía.
- Hay que hacer empalmes cruzados cada cierta longitud del cable por lo general se lo realiza cada 1 000 pies, para evitar el efecto del campo magnético
- En ambientes extremadamente corrosivos la armadura de acero galvanizado se deteriora con facilidad.
- La configuración de este cable es asimétrico.
- El conductor de la mitad al calentarse más que los otros dos, puede ocasionar que su aislamiento se debilite lo que puede ocasionar una disminución de su capacidad de aislar y una reducción en la resistencia mecánica.
- Es mayormente propenso a sufrir daños al tener más puntos débiles en la instalación debido a los varios empalmes de transposición que se tienen que hacer para mitigar el efecto del campo electromagnético.
- El cable plano tiene un peso aproximado de 3,23 lb/ft lo que le hace más susceptible a irse descolgando mientras se lo introduce hacia el fondo del pozo si es que éste no está ajustado apropiadamente con los protectores.

4.6. EJEMPLO PRÁCTICO DEL USO DE CABLE EN LA COMPLETACIÓN DE UN POZO CON BOMBEO ELECTROSUMERGILE

El siguiente ejemplo muestra el tipo de cable que fue seleccionado según las condiciones de operación y según las características del pozo, pero por motivos de políticas de privacidad de la empresa se optó cambiar el nombre del pozo con una variable, para lo cual se le nombrara como POZO X1.

4.6.1. POZO X1

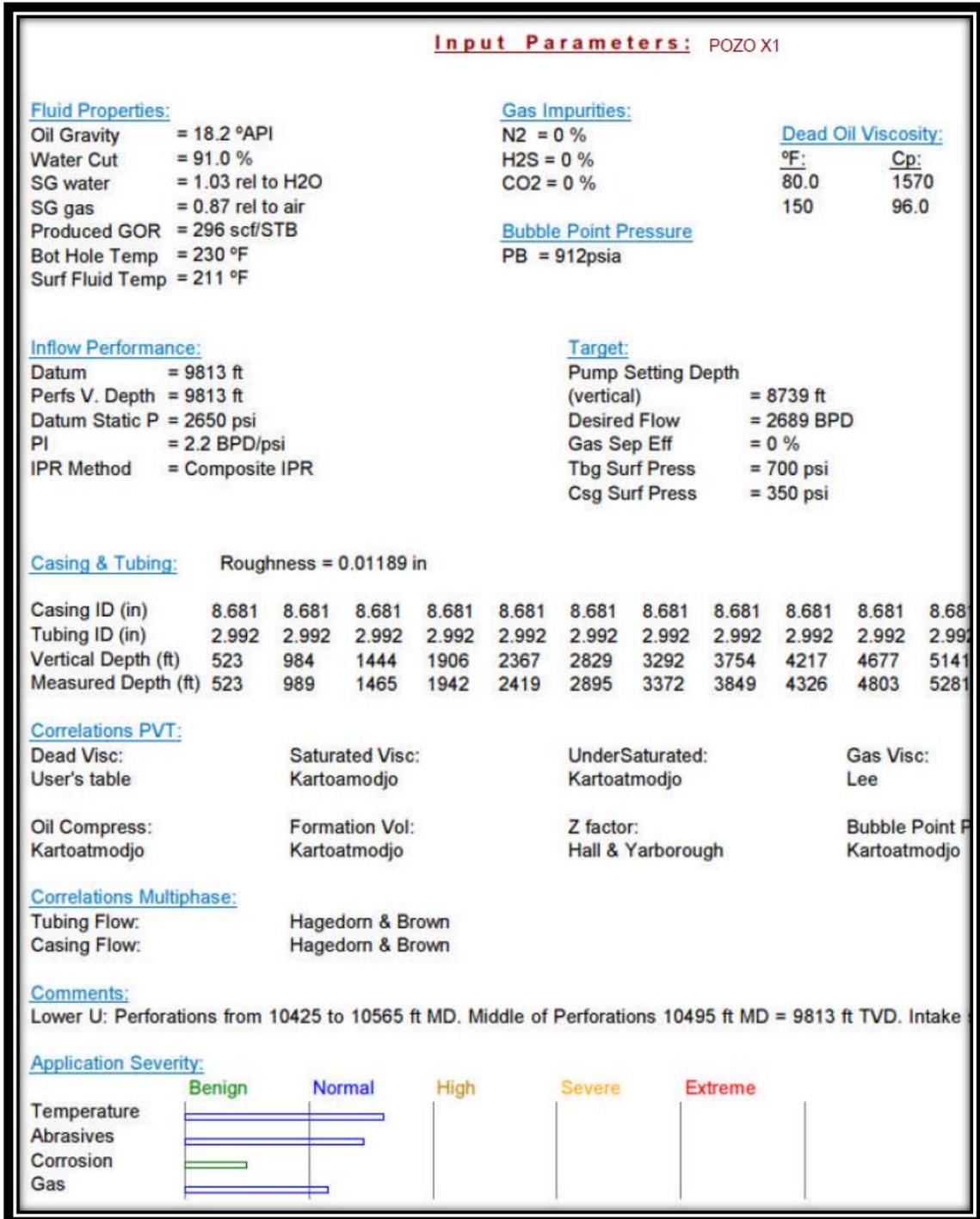


Figura 33 Parámetros del pozo X1

(Baker Hughes, 2012)

WELL DATA AND ESP DIAGRAM

PUMP INTAKE

8739 FT Vertical depth
8900 FT Measured depth

DIELECTRIC OIL CL-6

Maximum Operating Conditions:

Sand: Lower U
PI: 2.20 BFD/psi
Pr: 2650 psi
W.C.: 91.0%
Q@ 60 Hz: 2692 BFD
Frec. Max: 60.0 Hz
Frec. Op: 57.0 Hz

NOTES:

START UP @ 50 Hz.
INCREASE FREQUENCY CHECKING PRODUCTION AND RANGES OF THE ESP.

Expected operating conditions @ Oper. Freq. Hz	
Production	2237 BFPD
WHP	700 psi
Motor Operating Amps @ Freq Op	75 Amps
Motor load % @ Freq Op	71.53%
Motor load % Max Hz	80.2%
Max Motor Amps	81 Amps
VSD drive a max hz	35%
Seal thrust load @ Max Hz	97%
Mx Hz	60.0 Hz

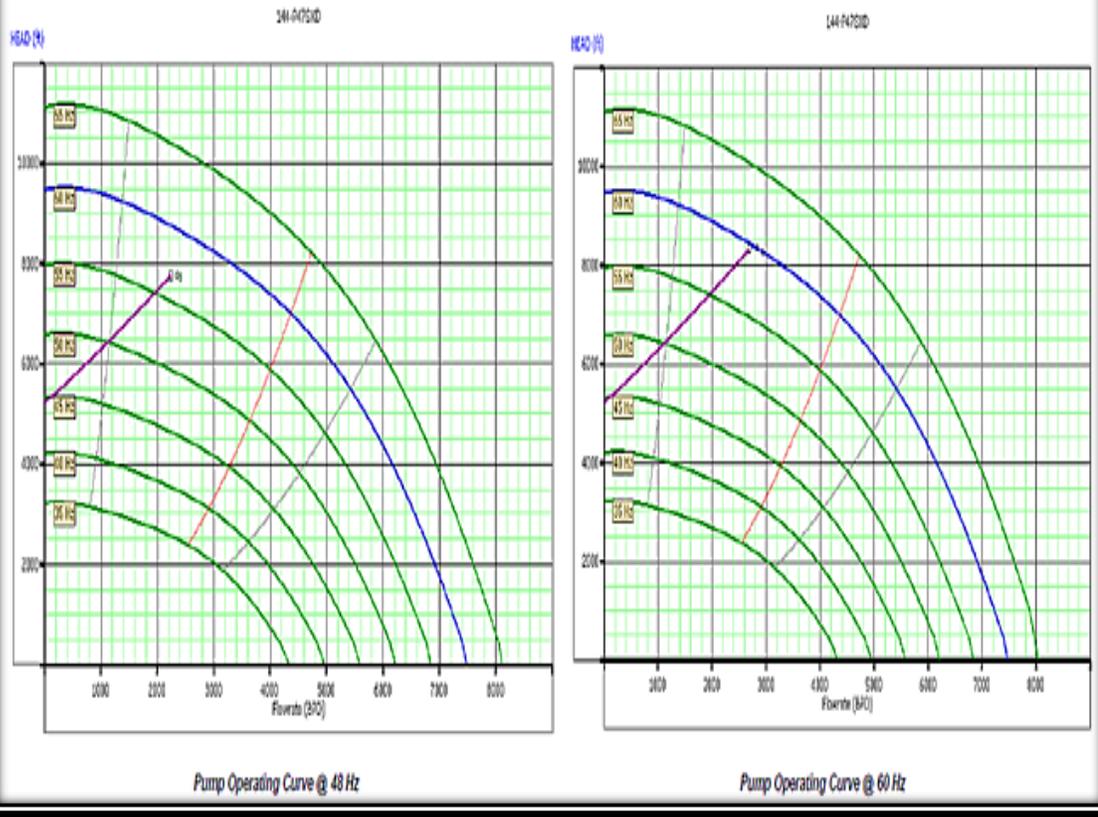


Figura 34 Datos del pozo y diagrama ESP

(Baker Hughes, 2012)

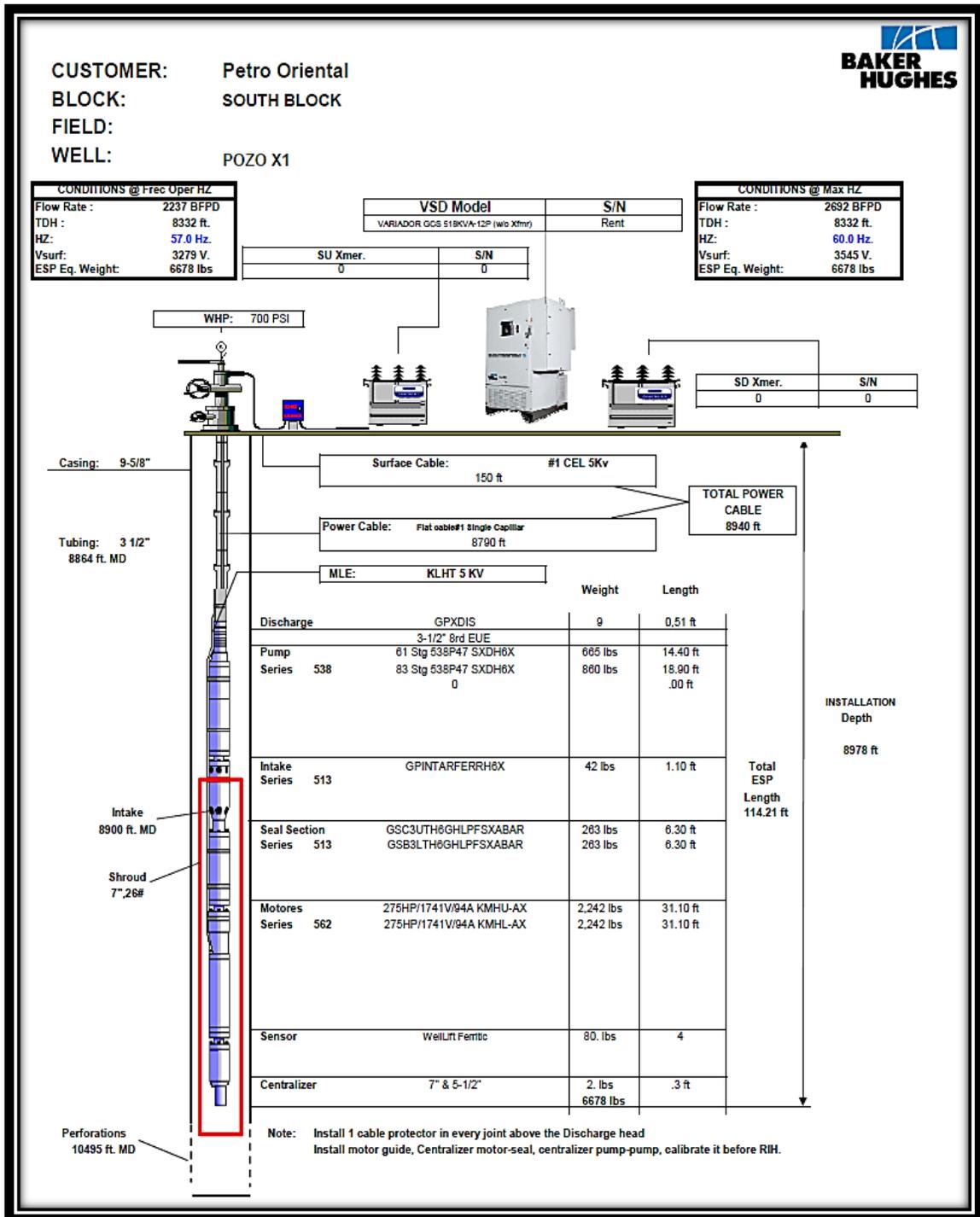


Figura 35 Completación del pozo X1

(Baker Hughes, 2012)

Para seleccionar el tamaño óptimo del cable nos basaremos en datos de amperaje, caída de voltaje y el espacio anular, para lo cual tenemos:

- ✓ De la figura 34 obtenemos el dato de amperaje de operación del motor que es 75 amperios.
- ✓ En la tabla 1 podemos observar que los cables óptimos que soportan el amperaje de 75 es el AWG #1, #2 y #3, pero como siempre es recomendable poner un cable con cierto factor de seguridad de alrededor de un 20% que supere las condiciones de operación esperadas y pueda trabajar sin problema, por lo que el cable AWG #3 se descartaría como opción.
- ✓ Con ese dato nos dirigimos a la figura 21 e ingresamos con el valor de 75 en el eje x hasta la recta de AWG #1 y #2 con lo que nos da una caída de voltaje cada 1 000 pies de 16 para el AWG #1 y de 20,5 para el AWG #2.
- ✓ Por lo que podemos deducir que el cable AWG #1 es el más óptimo para ser utilizado en el pozo X1 ya que tiene una menor caída de voltaje a los largo del cable entre superficie y el fondo del pozo.
- ✓ Además que el espacio anular entre el casing de 9 5/8 pulgadas y el tubing de 3 ½ pulgadas es bueno para que el cable de potencia pase sin problemas por lo que se puede usar el cable plano (que tiene alrededor de 0.657 pulgadas de diámetro) o redondo (que tiene aproximadamente 1,415 pulgadas de diámetro), en este caso se decidió usar cable plano ya que es el cable que comúnmente se usa en la empresa.
- ✓ Como lo muestra la figura 33 el ambiente al que estará expuesto el cable es de temperatura, gas y abrasión normal además de ser bajo en corrosión, las propiedades eléctricas, mecánicas, químicas y térmicas del cable de potencia de configuración plana soporta esas condiciones con facilidad.

Es muy importante tener en cuenta la caída de voltaje que se tiene a lo largo del cable que para este ejemplo se la calcula de la siguiente manera:

- Se multiplica la longitud del cable (figura 35) por la caída de voltaje cada mil pies que obtuvimos de la figura 21
- Luego ese resultado se divide para 1000
- Y así obtenemos la caída de voltaje que tendrá desde superficie hasta el fondo del pozo

$$\text{Caída de voltaje} = (8\,940 * 16) / 1\,000 = 143\text{ V}$$

- Ese valor hay que corregirle a la temperatura de fondo (figura 33) multiplicándole por el factor de corrección que se obtiene de la figura 22 que para este ejemplo es 1,354 @ 230 °F

$$\text{Caída de voltaje corregida} = 143 * 1,354 = 193,7\text{ V}$$

4.6.1.1. Análisis de la selección del tipo cable en el Pozo X1 respecto a las propiedades y características de sus componentes.

Para efectuar este análisis hay que responder ciertas preguntas, las cuales son:

- ¿Qué tan efectivo es el aislamiento a la protección contra la temperatura / cambios de presión / GOR / CO₂?

Para ambos cables de potencia se usa un aislamiento de EPDM por lo cual se puede destacar lo siguiente:

En cuanto a temperatura el EPDM trabaja sin problemas a estas condiciones ya que la temperatura de fondo está por debajo de los límites máximos de temperatura que soporta el aislamiento.

En cuanto a los cambios de presión este compuesto trabaja con normalidad ya que en el ejemplo el pozo tiene una presión moderada y no se han notado cambios notables en la presión a lo largo del tiempo.

El GOR en el pozo está en 296 scf/stb lo que no representa un problema para el EPDM ya que este compuesto tiene muy buena resistencia ante la presencia de hidrocarburos y gases

Como el pozo no presenta presencia de CO₂ en el gas producido, el aislamiento no se ve afectado de ninguna manera por este factor.

- ¿Qué tan efectiva es la barrera en la protección química / temperatura/ gas / fluidos corrosivos?

Aquí hay una diferencia importante entre el cable redondo y el cable plano que se está analizando, ya que el cable CEBER está compuesto por una barrera de PVDF mientras que el plomo está compuesto por una barrera de plomo cubierto con una cinta trenzada.

En protección química no hay datos específicos sobre qué tan efectivo es el plomo en presencia de químicos, pero si se sabe que el PVDF tiene una excelente resistencia a la presencia de químicos en general, lo que le proporciona al cable CEBER una protección grande ante la presencia de químicos desde el fondo del pozo hasta superficie.

En cuanto a temperatura existe una gran diferencia entre ambos componentes ya que el PVDF soporta hasta 300 °F mientras que el plomo soporta hasta 400 °F, pero para el ejemplo en el que la temperatura de fondo es de 230 °F ambos compuestos trabajan con normalidad ante estas condiciones.

La presencia de gas al ser moderada no representa un factor de riesgo para los cables CEBER y CELF aunque hay que destacar el en este caso el cable CELF es superior en cuanto a resistencia ya que la barrera de plomo le da una

cubierta impermeable a los conductores para impedir el paso del gas hacia los mismos.

En este caso al no haber presencia de fluidos corrosivos como el H₂S no hay inconvenientes en cuanto al uso de cable CEBER o CELF ya que ambos trabajan perfectamente en ausencia de fluidos corrosivos.

- ¿Qué tan efectiva es la chaqueta en la protección química / temperatura / gas?

Solo el cable CEBER tiene chaqueta la cual está elaborada de EPDM por lo que ésta le da beneficios adicionales en cuanto a la protección química, de temperatura y gas.

En químicos tiene una resistencia muy buena contra los ácidos, disolventes y presencia de hidrocarburos si es que estos llegan a filtrarse a través de la armadura o los empalmes.

La temperatura máxima que soporta el EPDM está alrededor de unos 300 °F en el ejemplo la temperatura del fondo es de 230 °F por lo que no hay problema de envejecimiento prematura o degradación del EPDM del cable CEBER en estas condiciones.

El pozo presenta una cantidad de gas entre baja y normal por lo que el EPDM no se ve afectado ya que este tiene la propiedad de permitirle salir al gas rápidamente a través de él sin causarle daños, por lo que le hace resistente a la presencia de gas.

De acuerdo a estos parámetros, el cable CEBER funcionaría de una forma eficaz ante estas condiciones del pozo.

- ¿Qué tan resistente es el acero galvanizado de la armadura a la corrosión?

La aleación de la que está fabricado este acero le hace tener un alto grado de resistencia a la corrosión, como el ambiente del pozo tiene un nivel bajo como se puede observar en la figura 33, se puede hacer uso tanto de cable CEBER como del cable CELF.

De acuerdo a este análisis y a las condiciones de operación del pozo en el fondo y en superficie, se puede deducir que bajo estos parámetros se pueden usar tanto el cable de potencia CEBER como el cable de potencia CELF, ya que ambos cables trabajan con normalidad ya que estas condiciones no presentan factores limitantes en cuanto al uso de alguno de estos dos cables de potencia.

Por lo que se puede recomendar mejor el uso del cable CEBER ya que como se puede observar en el desarrollo del presente trabajo, éste presenta menos inconvenientes al momento de usar el sistema de levantamiento artificial BES en pozos con estas condiciones de operación.

Hay que tener en cuenta que cada pozo petrolero trabaja a diferentes condiciones, por lo que no se puede estandarizar el uso de un cable de potencia específico, ya que cada pozo requiere su propio análisis para determinar el tipo de cable de potencia óptimo de acuerdo a las propiedades, características y condiciones de cada uno de ellos, teniendo muy en cuenta las condiciones especialmente de temperatura de fondo del pozo, nivel de corrosión de los fluidos que vamos a producir, tipo de químico que se va a inyectar al pozo, presión del pozo, espacio anular existente desde superficie hasta el fondo del pozo, voltajes que serán transportados a través de los conductores del cable, entre otros.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- ❖ El cable plano es más recomendable para espacios reducidos entre el casing y el tubing.
- ❖ El uso de cable redondo en lugar del cable plano ayuda a reducir a cero los problemas que conlleva la presencia del campo electromagnético.
- ❖ El cable plano al ser más pesado que el redondo es más propenso a irse descolgando si los protectores no están bien ajustados a la tubería, en especial en los casing con más espacio como el de 9 5/8 pulgadas y al pasar hacia un casing de 7 pulgadas puede ocasionar atascamiento del cable o incluso de todo el equipo de fondo.
- ❖ El cable plano es más eficiente cuando los pozos tienen presencia de H₂S debido a la capa de plomo que se le adiciona al aislamiento de cada conductor lo que le hace impermeable al gas y a los líquidos.
- ❖ El cable plano permite trabajar a condiciones de temperatura más altas hasta los 450 °F, mientras que el cable redondo tan solo soporta hasta 300 °F.
- ❖ La configuración del cable redondo es más eficiente a la distribución de presión y contención, lo que no sucede en el cable plano que podría ocasionar una deformación del mismo al estar expuesto a presiones muy grandes.
- ❖ La tensión suministrada al motor es más equilibrada cuando se usa cable de potencia de configuración redonda.
- ❖ El cable plano tiene más puntos críticos por tener varios empalmes a lo largo de su extensión desde superficie hasta el fondo del pozo, por lo

que es más propenso a sufrir daños por golpes o fallas eléctricas por presencia de fluidos.

5.2 RECOMENDACIONES

- ❖ Hay que tener especial cuidado al diseñar el sistema de evitar hacer empalmes a la altura de las conexiones entre tuberías (cuellos) ya que en estos puntos se tiene menor espacio entre el cable de potencia y el casing y pueden ocasionarse daños o fallas en el cable debido a golpes al momento de bajar el equipo BES.
- ❖ En caso de lo flejes ajustar manualmente o con el equipo neumático, sin exceder la presión con el fin de evitar daños al cable de potencia que luego podrían ocasionar que este se dañe completamente o se vaya a tierra.
- ❖ Se debe evitar los estiramientos del cable o tensiones bruscas cuando no hay coordinación entre el perforador y el operador del carrete del cable, ya que esto puede ocasionar pérdidas en el aislamiento del cable.
- ❖ Se debe dar una verificación constante del cable cuando éste se esté bajando al pozo, y cuando ocurra algún daño por golpes o algún otro motivo se lo debe reportar para tomar las medidas correctivas necesarias y evitar futuros inconvenientes en el funcionamiento del sistema BES o trabajos de workover.
- ❖ Las condiciones del pozo del ejemplo como son temperatura, niveles de H₂S, presencia de corrosión, presión, entre otras son buenas para poder usar un cable de potencia de configuración redonda ya que eso ayudaría a minimizar las desventajas que presenta el uso del cable de configuración plana.
- ❖ En pozos con características similares al del ejemplo se puede usar cable de configuración redonda, hay que tener cuidado especialmente con la temperatura de fondo, el nivel de corrosión que se podría

presentar dentro del pozo y el espacio anular para evitar golpes al bajar el cable.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- American Wire Gauge . (2005). *Conductor Size Table*. Illinois: Supplemental Handout.
- Arcila, J. D. (2010). *Armónicos en sistemas eléctricos*. Colombia: Ingeniería especializada S.A.
- Baker Hughes. (2012). *Report well*. Quito.
- Bustamante, D. A. (2007). *Metodología para el desarrollo de un programa de computo para el diseño de bombeo electrosumergible y su aplicación*. Guayaquil - Ecuador.
- Casaravilla, G., & Echinope, V. (2012). *Desbalances - Estudio de alternativas para su estimación*. Uruguay.
- Centrilift - Baker Hughes. (2012). *Cable de Potencia*. Quito, Ecuador.
- ESP OIL Engineering Consultants. (2004). *Bombeo Electrosumergible: Análisis, Diseño, Optimización y Trouble Shooting*. Venezuela: ESP OIL international training group.
- Gil, S. (2013). *Experimentos de Física*. Ley de Ampère y de Biot-Savart.
- Mesa, R., & Henao, A. (2013). *Dimensionamiento de cables de potencia aislados*. Medellin - Colombia.
- Novomet. (2012). *Equipos de Bombeo Electrosumergible*. Quito.
- Nuñez, O. (2010). *Desbalance de Voltaje: Cálculo e Implicaciones*. Costa Rica: Motortico.

- Organización de Servicio SEAT. (2009). *Conceptos Básicos de Electricidad* (1 ed.). Barcelona - España.
- ORTIZ, M. A. (2009). *Selección de una bomba tipo bes para operar petróleos con altos corte de agua en el pozo 178d que se encuentra en el campo sacha*. Quito.
- Peña, F. A. (2005). *Bombeo electrosumergible. Descripción, diseño y monitoreo*. Bucaramanga.
- Schlumberger. (2007). *Manual de Fundamentos del Bombeo Electrosumergible*. Estados Unidos: Training Group.
- Téllez Ramírez, E. (2012). *Distorsion armonica*. Colombia: programa de ahorro de energia.
- Tirado, S. (2009). *Cables eléctricos*. Ciudad de Bolivar - Venezuela.
- Toledo, M., & Guamán, C. (2006). *Determinación de pérdidas de energía por armónicos en contadores de inducción de energía eléctrica*. Cuenca - Ecuador.
- Velasco, J. (2010). *Caída de Tensión*. México.
- VIAKON Conductores Monterrey. (2013). *Manual eléctrico*. Monterrey - México.