

EVALUACIÓN DE LA REUTILIZACIÓN DE CABLE DE POTENCIA DE BOMBAS  
ELECTROSUMERGIBLES EN POZOS DEL CAMPO CPO-09.

CAMILA ANDREA USECHE ALARCÓN  
DANIEL SEBASTIÁN ZAPATA SIERRA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ, D.C  
2020

EVALUACIÓN DE LA REUTILIZACIÓN DE CABLE DE POTENCIA DE BOMBAS  
ELECTROSUMERGIBLES EN POZOS DEL CAMPO CPO-09.

CAMILA ANDREA USECHE ALARCÓN

DANIEL SEBASTIÁN ZAPATA SIERRA

Proyecto integral de grado para optar al título de  
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director

ALBERTO DÍAZ CAMACHO

Ingeniero de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ, D.C

2020

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Ing. Arnúl David Paz

---

Ing. Miguel Alfonso Morales

Bogotá, D.C., Abril de 2020.

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA – PEÑA**

Consejero Institucional

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA – PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARALDA CASTRO**

Secretaria General

**Ing. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN**

Decano de la Facultad de Ingenierías

**Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI**

Director del Programa de Ingeniería de Petróleos

**Ing. JUAN CARLOS RODRÍGUEZ ESPARZA**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, quiero dedicar este proyecto a Dios, por darme la oportunidad de culminar esta importante etapa de mi vida y permitirme explotar todas mis capacidades durante el desarrollo del programa académico.

En segunda instancia, a mis padres Ana y Francisco quienes me han brindado su apoyo para seguir mis sueños y su amor incondicional durante toda mi vida; sin ustedes esto no sería posible.

A mi familia, por su acompañamiento, consejos e inspiración diaria para ser una mejor persona.

Finalmente, a mis amigos, quienes estuvieron a mi lado durante estos años, de los cuales me llevo los mejores recuerdos a su lado. Y por supuesto al coautor del proyecto, Daniel, porque una vez más la vida nos permitió encontrarnos para lograr grandes cosas juntos.

**Camila Andrea Useche Alarcón**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mis papás Myriam y Graciano, que desde el comienzo estaban pendientes de mi proceso para llegar a este gran logro, me han brindado todo su apoyo, sus consejos y fuerza en los momentos más fuertes de la vida.

A mis hermanos que han sido un pilar de apoyo, con su conocimiento en diferentes áreas permitiendo que este proceso sea de mayor agrado.

Camila, la coautora de este proyecto ha sido indispensable en este proceso, gracias a todo el proceso que llevamos juntos en las diferentes áreas, adquirimos destrezas en trabajo en equipo, permitiendo un complemento para la realización de este proyecto.

**Daniel Sebastián Zapata Sierra**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la Fundación Universidad de América – Sede Cerros y a todo su equipo de docentes, quienes son responsables de nuestra formación académica y personal como ingenieros.

Al comité de trabajo de grado, quienes mediante su conocimiento y exigencias guiaron nuestro proceso de investigación por el mejor camino.

A ECOPETROL S.A, y específicamente al equipo de control de producción del Campo CPO – 09, quienes depositaron su confianza en nosotros para el desarrollo de la presente investigación.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>21</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>24</b>
1.1 <i>BLOQUE CPO-09 – AKACÍAS</i>	24
1.2 <i>SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE</i>	25
1.3 <i>CABLE DE POTENCIA DE BOMBA ELECTROSUMERGIBLE</i>	26
1.4 <i>NORMAS EN CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DE CABLES DE POTENCIA</i>	31
1.5 <i>FALLAS Y DAÑOS DIRECTOS O INDIRECTOS QUE SE PUEDEN GENERAR EN EL CABLE DE POTENCIA</i>	32
1.5.1 Cortocircuito en el empalme.	32
1.5.2 Cable de potencia con bajo aislamiento.	32
1.5.3 Pérdida de voltaje de control.	33
1.5.4 Mala instalación durante la bajada del equipo BES.	33
<b>2. METODOLOGÍA Y DATOS</b>	<b>34</b>
2.1 <i>SELECCIÓN DE CABLE</i>	35
2.2 <i>EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL CABLE</i>	42
2.2.1 Evaluación mecánica.	42
2.2.2 Evaluación eléctrica.	43
2.2.2.1 Prueba de continuidad.	46
2.2.2.2 Prueba de aislamiento.	46
2.2.2.3 Prueba de alto potencial.	46
2.3 <i>GENERACIÓN DEL CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN</i>	46
2.4 <i>EVALUACIÓN FINANCIERA</i>	49
2.4.1 VPN.	49
2.4.2 TIR.	49
<b>3. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>51</b>
3.1 <i>SELECCIÓN INICIAL DEL CABLE</i>	51
3.2 <i>PRUEBAS DE INTE GRIDAD</i>	53
3.2.1 Evaluación mecánica.	54

3.2.1.1	Fracturas.	54
3.2.1.2	Deformación	54
3.2.1.3	Deterioro.	54
3.2.1.4	Quemadura.	54
3.2.1.5	Abrasión.	55
3.2.1.6	Ruptura.	55
3.2.2	Evaluación eléctrica.	55
3.2.2.1	Prueba de continuidad.	55
3.2.2.2	Prueba de aislamiento.	57
3.2.2.3	Prueba de alto potencial.	61
3.3	<i>ASIGNACIÓN DE CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN</i>	62
3.4	<i>ANÁLISIS FINANCIERO</i>	68
3.4.1	VPN.	70
3.4.2	TIR.	71
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>73</b>
<b>5.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>75</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>78</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1</b> Características conductoras de los cables de potencia	29
<b>Tabla 2</b> Normas representativas para diseño de cables.	31
<b>Tabla 3</b> Información cables en operación	36
<b>Tabla 4</b> Información cables fallados	39
<b>Tabla 5</b> Continuidad fase a fase cables fallados (Instalación)	44
<b>Tabla 6</b> Aislamiento fase – tierra cables fallados(Instalación)	44
<b>Tabla 7</b> Longitud del cable	52
<b>Tabla 8</b> Continuidad fase a fase cable fallado	55
<b>Tabla 9</b> Aislamiento fase – tierra cables fallados.	57
<b>Tabla 10</b> Alto potencial de cables fallados.	62
<b>Tabla 11</b> Código asignado a los cables activos.	62
<b>Tabla 12</b> Código asignado a los cables no activos	67
<b>Tabla 13</b> Precios promedio cable de potencia	68
<b>Tabla 14</b> Costos asociados al cable sin IVA.	69
<b>Tabla 15</b> Costos asociados al cable con IVA.	69
<b>Tabla 16</b> Escenario favorable (Costo reducido)	69
<b>Tabla 17</b> Escenario desfavorable (Costo reducido)	70
<b>Tabla 18</b> Valor presente neto	70
<b>Tabla 19</b> Valor presente neto (Escenario favorable)	70
<b>Tabla 20</b> Valor presente neto (Escenario desfavorable)	71
<b>Tabla 21:</b> Tasa Interna de Retorno	71
<b>Tabla 22</b> Tasa interna de retorno (Escenario favorable)	71
<b>Tabla 23</b> Tasa interna de retorno (Escenario desfavorable)	72

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1</b> Bloque CPO-9 y Campo Akacías.	24
<b>Figura 2</b> Cables de potencia de bombas electrosumergibles (plano y redondo).	26
<b>Figura 3</b> Partes del cable de potencia (configuración plana).	28
<b>Figura 4</b> Cable de configuración redonda	29
<b>Figura 5</b> Diagrama general del proyecto.	34
<b>Figura 6</b> Técnica de muestreo sistemática para selección de cable a evaluar	40
<b>Figura 7</b> Diagrama aplicación norma ASTM B33	41
<b>Figura 8</b> Diagrama realización de prueba ASTM A459	43
<b>Figura 9</b> Esquema adecuación de cable para pruebas eléctricas	45
<b>Figura 10</b> Código de programación ingreso data cable.	47
<b>Figura 11:</b> Interfaz ingreso data de cables.	47
<b>Figura 12</b> Formato desinstalación.	48
<b>Figura 13</b> Formato back up.	48
<b>Figura 14</b> Cable altamente corroído	51
<b>Figura 15</b> Cable con óptima condición mecánica en su coraza.	52
<b>Figura 16</b> Cable de potencia con sus tres fases descubiertas	53
<b>Figura 17</b> Interfaz cable operativo.	65
<b>Figura 18</b> Interfaz cable fallado.	65
<b>Figura 19</b> Formulario inspección mecánica del cable	66
<b>Figura 20</b> Formato inspección eléctrica del cable.	66
<b>Figura 21</b> Interfaz cable back up.	67
<b>Figura 22</b> Instructivo formato de seguimiento al cable de potencia.	68

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1</b> Run life bomba y cable / Pozo	38
<b>Gráfica 2</b> Comparación de los valores de continuidad de fase pull in vs pull out	56
<b>Gráfica 3</b> Prueba de continuidad entre fases para el cable 44.	57
<b>Gráfica 4</b> Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 43	58
<b>Gráfica 5</b> Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 44	59
<b>Gráfica 6</b> Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 45	59
<b>Gráfica 7</b> Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 46	60
<b>Gráfica 8</b> Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 47	60
<b>Gráfica 9</b> Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 48	61
<b>Gráfica 10</b> Longitudes (ft) de cable instalados en pozo.	64

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1</b> Valor presente neto	49
<b>Ecuación 2</b> Valor actualizado neto	50

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
<b>Anexo A.</b> Designation ASTM B33	79
<b>Anexo B.</b> Designation ASTM A459	80
<b>Anexo C.</b> Designation IEEE Std 1019	81

## ABREVIATURAS

$\Omega$	Ohms / Medida de resistencia eléctrica
°C	Grados centígrados / Unidad de medida de temperatura
ASTM	American Society of Testing Materials
AWG	Calibre de alambre
COP	Peso colombiano
CPO	Crudos Pesados del Oriente
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IN	Pulgadas / Medida de longitud en el sistema inglés
MD	Mesured Depth / Profundidad medida
MLE	Motor Lead Extension
FT	Pies / Medida de longitud en el sistema inglés
TRM	Tasa representativa del mercado

## GLOSARIO

**BACK UP:** soporte, respaldo.

**BLOQUE:** extensión de tierra, limitado por cierto diámetro, longitud y latitud; en la industria petrolera nacional el estado otorga dichas extensiones de tierra a compañías interesadas para la exploración y/o explotación.

**EBIDTA:** indicador financiero que representa las ganancias antes de impuestos, intereses, depreciación y amortización, es decir el beneficio bruto.<sup>1</sup>

**EPDM:** caucho etileno propileno dieno, termopolimero elastómero resistente a la abrasión y al desgaste.

**HIPOT:** instrumento que busca el gradiente de potencial máximo que soporta un material aislante previo a su ruptura,

**MEGÓHMETRO:** instrumento utilizado para medir resistencias de alto rango a partir de un generador de corriente directa.

**MULTÍMETRO:** instrumento eléctrico portátil que mide las magnitudes eléctricas (Resistencias, capacitancias, corrientes, tensiones).

**NICOPRESS:** instrumento de cobre utilizado en los empalmes con el fin de unir los cables de cobre mediante una compresión realizada a cada extremo del nicopress.

**PULL IN:** operación de ingreso de sistema de levantamiento artificial y/o equipos a subsuelo.

**PULL OUT:** operación de extracción de sistema de levantamiento artificial y/o equipos a subsuelo.

**REEL:** dispositivo para embobinar cable de potencia y MLE.

**RUN LIFE:** tiempo de vida operativo de un equipo o herramienta.

**SCRAP:** chatarra.

**TDR:** equipo para estimar la longitud en la cual se puede encontrar una diferencia de resistencia.

**WELL SERVICE:** procedimiento realizado en subsuelo para mantenimiento del estado del pozo.

---

<sup>1</sup> BANCO SANTANDER. ¿Qué es el EBITDA y cómo se calcula?. Recuperado de <https://www.bancosantander.es/es/diccionario-financiero/ebitda>

**WORKOVER:** procedimiento realizado en el pozo para incrementar producción y condiciones adversas.

## RESUMEN

La principal desventaja que presenta el bombeo electrosumergible como sistema de levantamiento artificial es su alto costo, el cual se atribuye principalmente al cable de potencia, instrumento el cual provee de energía al equipo de subsuelo desde superficie. Cuando se presenta una falla a la bomba en el caso particular del Campo CPO-09, se opta por realizar la compra de todos los instrumentos del sistema de levantamiento, incluyendo el cable de potencia, el cual en muchos casos puede llegar a ser reutilizado.

En este trabajo de grado se evalúa la reutilización de cable de potencia de bombas electrosumergibles, mediante un proceso de inspección tanto mecánica como eléctrica, el cual asegura un estado óptimo para operación en subsuelo siguiendo los lineamientos de las normas IEEE 1019, ASTM A459 y ASTM B33, las cuales garantizan el buen funcionamiento del cable de potencia dentro del sistema de levantamiento de bombeo electrosumergible.

A partir del procedimiento de inspección se desarrolló un programa de Excel programado bajo el lenguaje de Visual Basic, en el cual se identifican las diferentes características del cable, las cuales permiten facilitar la selección del cable a utilizar en una nueva intervención a pozo.

Para culminar se determina la viabilidad del proyecto por medio de un análisis financiero, el cual determina mediante los indicadores TIR y VPN el ahorro económico de gran impacto que representa la reutilización del cable de potencia, el cual para el caso específico del Campo CPO – O9 representa aproximadamente 1.9 millones de dólares anualmente.

**Palabras clave:** Bombeo electrosumergible, cable potencia, capilar.

## ABSTRACT

High price is the main disadvantage tied to the electro submersible pumping as the system for artificial lift, which power cable considered as the tool that provides energy to the subsoil equipment from the surface. When the pump presents failures as it has happened in the CPO-09 field, then the decision to purchase the whole tools that belong to the lift system, including the power cable, which in some many cases can be reused.

On this thesis degree, the reuse and repurpose of the electro submersible pump power cable is being evaluated throughout an inspection process both mechanical and electrical that have been used on this industry to assure the optimal state for operations on the subsoil following the guidelines of the policy IEEE 1019, ASTM A459 and ASTM B33, that guarantee the proper functioning of the power cable within the electro submersible pump lift system.

As an output of the inspection procedure, an Excel program was developed under the Visual Basic language which helps to identify the different characteristics of the cable and therefore assuring an accurate selection of the cable to use when intervening the well again.

To conclude, the viability of the project is determined by and through a financial analysis which resolute the economical saving by the TIR and VPN indicators. It also shows the great impact that represents the reuse of the power cable, and on this specific case on the CPO field-09 which out brings 1.9 million dollars per year.

**Key words:** Electro submersible pump - power cable, capillary tubing

## INTRODUCCIÓN

El bombeo electrosumergible se ha convertido en uno de los sistemas de levantamiento artificial más empleado en la industria petrolífera, debido a las ventajas que presenta actualmente, como los grandes caudales que este puede llevar a superficie, su buen funcionamiento en pozos desviados, operatividad en profundidades considerables entre otras.

Dicho sistema se compone de bomba, motor, sistema de monitoreo y cable de potencia, y aunque como se mencionó anteriormente presente muchas ventajas respecto a otros, su principal desventaja radica en el momento de una falla, dado que este sistema presenta un alto costo el cual se atribuye principalmente al cable de potencia, debido a que al distribuir la energía desde superficie hasta subsuelo presenta extensas longitudes que se convierten en costos elevados a la operación.

Se han realizado diversos estudios sobre cómo mejorar el *run life* de los equipos de bombeo electrosumergible, y varios de estos apuntan a la mejora del cable de potencia, ya que como menciona Dennis Harris<sup>2</sup>, en un 26% de los casos se atribuye la falla al cable de potencia debido al desgaste mecánico y eléctrico durante las operaciones de instalación, desinstalación y producción de pozos dado que el cable se somete a contacto con fluidos contaminantes, por lo tanto el autor propone un re-empaqueamiento al cable original para reducir las fallas, aumentar su resistencia a los contaminantes y a la temperatura.

De otro lado Gnanaraj<sup>3</sup> expone en su estudio la importancia de conocer las propiedades que debe cumplir el cable para su óptima operación, como lo son el alargamiento del cable, el punto de tensión, entre otras variables que el autor determina bajo estándares y pruebas de laboratorio; y a su vez establece que los parámetros de operación de este pueden volverse más exigentes dependiendo las propiedades de subsuelo a las que sea sometido en operación; por ende hace énfasis en la correcta selección del cable de potencia.

ECOPETROL S.A presenta un caso particular en su operación del Bloque CPO – 09 (Área comercial Campo Akacías), el cual es uno de los Campos con más proyección para la compañía, pero presenta reiteradas fallas al sistema de levantamiento artificial en mención, las cuales se presentan en un alto índice de falla y altas diferidas asociadas a falla de bomba; aun así cabe resaltar que las fallas

---

<sup>2</sup> Dennis Harris, Chevron ETC; Mark Banman, Total E&P; David Malone, AccessESP. Design and Qualification Testing of ESP Cable to Improve ESP System Run Life. 2019. Paper, Society of Petroleum Engineers (SPE).

<sup>3</sup> Gnanaraj,A.A, Venkatesan, K. Testing of umbilical cable for reliable and safe operation. 2018. Paper, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).

tienen diversas causas raíces más ninguna de estas se asocia directamente con la operatividad del cable de potencia.

Así pues, se evidencia una selección adecuada y ajustada del cable de potencia respecto a los requerimientos del campo, pero se presenta inexistencia de un análisis de integridad durante las intervenciones a pozo, por ende a pesar de su poco desgaste tras un *pull out* este es desechado y guardado en bodegas donde incluso puede llegar a ser hurtado, dicho esto, se propone implementar un procedimiento de inspección al cable para su respectiva reutilización, pues se suponen secciones óptimas del mismo a nuevas corridas en pozo.

Los autores plantean llevar un registro de trazabilidad al cable dispuesto en cada una de las intervenciones a pozo, el cual permita clasificar los cables respecto al estado real de los mismos; dicha clasificación está encaminada a la generación de un código de identificación que garantice la inspección de los cables y su seccionamiento.

Este seguimiento al cable previamente mencionado resulta rentable para ECOPETROL S.A debido a que en primer lugar al reutilizar el cable no se realizarían compras reiterativas del mismo en operaciones de *workover* y/o *well service*, reduciendo costos operacionales significativos dado que los pozos del Campo superan los 7000 ft MD según la información suministrada por la coordinación de producción en sus estados mecánicos y esto se traduce en carretes de cable altamente dispendiosos; en segundo lugar al ser evaluados los cables y presentar daño significativo pueden ser vendidos como chatarra a compañías prestadoras de servicio retribuyendo parte de la inversión inicial a la empresa y finalmente optimizaría tiempo de espera y vida útil del cable.

El presente proyecto tiene como objetivo general evaluar la reutilización de cable de potencia de bombas electrosumergibles en pozos del Campo CPO-09, mediante la realización de pruebas de laboratorio que evalúen mecánica y eléctricamente el cable previamente dispuesto, corroborando sus propiedades con las estipuladas en las normas dictadas por ASTM (American Society of Testing Materials), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) y API (American Petroleum Institute), para lograr de este modo validación técnica a la reutilización y trazabilidad al cable instalado.

Por lo tanto, para cumplir con lo anteriormente planteado se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la integridad mecánica de la armadura del cable de potencia usado en intervenciones a pozos del Campo CPO – 09, permitiendo la identificación y selección de lotes de cable óptimos a reutilizar.
- Realizar pruebas eléctricas y mecánicas a muestras representativas de los tramos de cable seleccionados previamente a nivel laboratorio que permitan la evaluación de la integridad del cable de potencia para su reutilización.

- Generar un código de identificación de los cables de potencia con lenguaje de programación en Visual Basic, que permita visualizar las variables asociadas a la integridad del cable de potencia para intervenciones futuras a pozo.
- Evaluar la rentabilidad que conlleva la actividad de reutilización de cable de potencia, a partir del cálculo del costo reducido.

El desarrollo del proyecto da inicio en el segundo capítulo del documento donde se describen las generalidades del Campo CPO – 09 operado actualmente por la compañía Ecopetrol S.A y de su respectivo sistema de levantamiento artificial, con énfasis en el cable de potencia y su configuración tanto interna como externa.

Posteriormente en el tercer capítulo se indica la metodología que se siguió para la realización de pruebas de laboratorio, y los datos obtenidos a partir de estas. Se inicia con la sección 3.1 la cual contiene la recopilación de información del cable y su evaluación mecánica externa, la cual identifica lotes de cable óptimos a reutilizar, a partir de esto en la sección 3.2 se establecen los procedimientos de las pruebas eléctricas y mecánicas realizadas a muestras representativas de cable.

Durante el cuarto capítulo se analizan los resultados obtenidos previamente en las secciones 4.1 y 4.2; seguido a esto en el numeral 4.3 se genera el código de identificación al cable y en el 4.4 se evalúa la rentabilidad mediante un análisis financiero.

Dando cumplimiento a los objetivos planteados inicialmente, se da paso a las conclusiones del proyecto y sus respectivas recomendaciones.

## 1. MARCO TEÓRICO

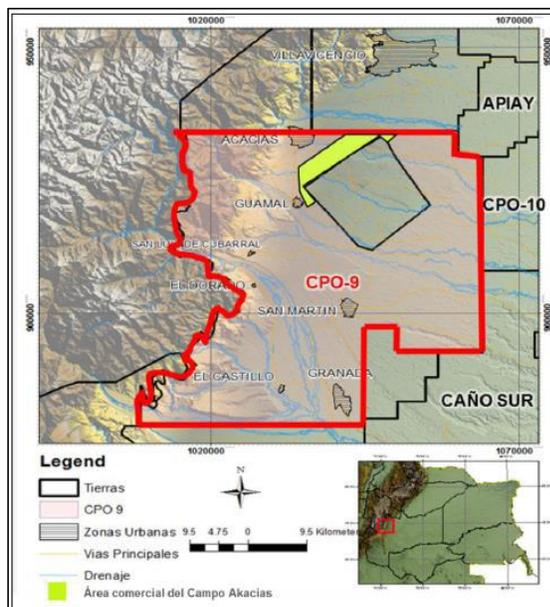
En este capítulo se definirán generalidades del Campo CPO-09, los conceptos básicos de bombeo electrosumergible con énfasis en el cable de potencia necesarios para el desarrollo óptimo del trabajo de grado.

### 1.1 BLOQUE CPO-09 – AKACÍAS

El campo Akacías se localiza dentro del área del BLOQUE CPO-9 como se muestra en la Figura1, este se encuentra ubicado en el departamento del Meta dentro de las jurisdicciones de los municipios de Villavicencio, Acacías, Guamal, San Luis de Cubarral, Castilla la Nueva, San Martín, Lejanías, El Castillo, El Dorado y Granada. Hace parte del mapa de tierras de la ANH. El área Akacías declarada como comercial tiene una extensión de 9,825 Ha.

El acceso al área Akacías se realiza por la vía nacional Ruta 65 que conduce de Villavicencio al municipio de Granada; al campo se accede a través de la vía que comunica el centro urbano del municipio de Acacías con el casco urbano del municipio de Guamal.<sup>4</sup>

**Figura 1.** Bloque CPO-9 y Campo Akacías.



**Fuente:** ECOPETROL S.A. 2018.  
Programa anual de operaciones Campo Akacías.

---

<sup>4</sup> ECOPETROL. Programa anual de operaciones 2018 Campo Akacías. 2018

ECOPETROL S.A. es el operador del bloque CPO-9 desde el año 2010, dicho bloque contiene la mayoría del área en exploración y un área declarada comercial correspondiente al Campo Akacías. El Campo en mención contiene petróleo extra-pesado y se encuentra ubicado en el departamento del Meta dentro de la jurisdicción de múltiples municipios. Esta condición ha conllevado a grandes desafíos ocasionados por las restricciones ambientales y sociales que han generado alto impacto sobre el desarrollo propio del proyecto.

En la estructura monoclinal en la que se desarrolla el campo Akacías se ha estimado un aceite original in situ de 2.472 MMBIs para la Unidad Operacional T2, de la Formación San Fernando, limitado por un LKO establecido en -7.550 ft TVDss, determinado en el pozo AK-20<sup>5</sup>.

## **1.2 SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE**

El sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible (BES) emplea la energía eléctrica convertida en energía mecánica para levantar una columna de fluido desde un nivel determinado hasta la superficie, descargándolo a una determinada presión, dicho sistema ha probado ser un sistema artificial de producción eficiente y económico.

En la industria petrolera, a comparación de otros sistemas de levantamiento presenta ciertas ventajas y desventajas, debido a que por diversas razones no siempre puede resultar el sistema de levantamiento más conveniente, es decir un pozo candidato a producir artificialmente con bombeo electrosumergible, debe reunir características que no afecten el buen funcionamiento de la bomba como las altas relaciones gas/aceite, las altas temperaturas, la presencia de arena en los fluidos producidos, los cuales son factores con influencias indeseables sobre la eficiencia de la bomba debido a los términos de fabricación.<sup>6</sup>

Una unidad típica de bombeo electrosumergible está constituida en el fondo del pozo por los siguientes componentes: motor eléctrico, protector, sección de entrada, bomba electrosumergible y cable de potencia.

El cable de potencia en el sistema de levantamiento por bombeo electrosumergible es lo que genera más costos dadas las extensas longitudes de cable instaladas en cada pozo, esto justifica económicamente la realización del presente trabajo de grado, el cual va encaminado a la reducción de costos que se generan en el sistema.

---

<sup>5</sup> ECOPETROL. Informe semestral de operaciones 2018-1. 2018

<sup>6</sup> MONCADA D. Davian Caracterización del sistema de levantamiento artificial Bombeo Electro-Sumergible: Cable de potencia, Válvula de cheque, Válvula de drenaje, Protector, Intake y Bomba. 2016.

El enfoque presentado es al cable de potencia, su funcionamiento, uso y debida caracterización de los cables usados en el sistema de levantamiento el en Campo CPO-09.

### 1.3 CABLE DE POTENCIA DE BOMBA ELECTROSUMERGIBLE

El cable de potencia es uno de los componentes más importantes y sensibles en el sistema BES. Su función es transmitir la energía eléctrica de la caja de venteo en superficie al fondo del pozo, las señales de presión y temperatura registrada por el sensor de fondo a la superficie, con el fin de asegurar el buen funcionamiento de la bomba electrosumergible, como se mencionó anteriormente la importancia de este cable deriva en la cantidad del mismo y su alto costo.

La industria presenta diversos tipos de cable de potencia como se evidencia en la Figura 2, estos tipos difieren en la respectiva configuración y se adaptan a las diferentes condiciones de subsuelo.

**Figura 2.** Cables de potencia de bombas electrosumergibles (plano y redondo).



**Fuente:** MONCADA D. Davian. 2016. Caracterización del sistema de levantamiento artificial Bombeo Electro-Sumergible.[Sitio WEB] Disponible en: <https://bombeoycrudospesados.wordpress.com>

El cable de potencia debido a las condiciones de fondo a las que se encuentra debe de tener características resistentes a golpes mecánicos, deterioro físico o eléctrico debido a diferentes condiciones de temperatura o agentes abrasivos.

Tres conductores de cobre son los que comprenden el cable de potencia, el cual se extiende desde el cabezal del pozo hasta el tope del motor de fondo, el cable comprende una parte conductiva de potencia compuesta por cobre, con un 99.9% de pureza, por sus características dúctiles y conductivas el cobre es el metal idóneo para este procedimiento.

La configuración del cable permite que se tenga un tubo capilar o dos de serlo necesario según los requerimientos del tratamiento de propiedades petrofísicas por medio de diferentes químicos tales como reductores de viscosidad, antiespumantes,

diluyentes, anticorrosivos, entre otros, generalmente usados en crudos pesados o con un alto corte de agua.

Los cables de potencia estándar están compuestos por tres conductores de fase aislados y pre-reunidos; los cuales pueden ser sólidos o cableados compactados.

El conductor es seleccionado en calibres AWG (calibre de alambre estadounidense) de acuerdo con la capacidad de corriente requerida para el funcionamiento de la bomba electrosumergible, caída de voltaje, consideraciones económicas y características y profundidad del pozo.<sup>7</sup>

Los conductores de cobre pueden ser estañados, con el objetivo de incrementar su resistencia a la oxidación, ataque de gases y mejorar la adherencia al compuesto de aislamiento, con el fin de incrementar la eficiencia de uso del cable.

Los conductores sólidos son utilizados principalmente donde se requiere un excelente bloqueo contra la migración de gases y minimizar el deterioro por sulfuro de hidrógeno. La adherencia entre el cobre y el aislamiento es mejorada utilizando un compuesto adhesivo especial para evitar la migración del fluido tratado. El bloqueo de los conductores cableados es realizado utilizando un compuesto bloqueador especial que rellena los intersticios entre los alambres, de tal forma que los conductores queden aislados entre ellos y así mismo evitar daños por cambios de presión, migración de gas que pueda afectar la conducción de energía.<sup>8</sup> Adicional a las tres fases que componen el cable de potencia, pueden ser incluidos conductores de control y puesta a tierra, tanto en la configuración plana como en la redonda para aplicaciones de manejo de agua.

Con el fin de preservar la integridad mecánica del cable conductor se usa una barrera protectora en el aislamiento del conductor, generalmente con aleaciones de fluoruros o plomo. La chaqueta es el material de protección de la barrera del cable con el fin de generar una protección principalmente química y manteniendo las fases del cable mencionadas anteriormente unidas, hecho generalmente del polietileno de densidades altas o de goma de nitrilo.

La armadura es el elemento final que compone el cable de potencia, por esto es de los más importantes, puesto que al estar localizada sobre la chaqueta proporciona una protección mecánica al conjunto de los componentes del cable, evitando colapsos, fisuras o filtraciones. Esta armadura está hecha principalmente de Monel. El Monel es utilizado en los ambientes más severos, algunos de los cuales incluyen CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y elevadas temperaturas. Estas consideraciones son tomadas al nivel de

---

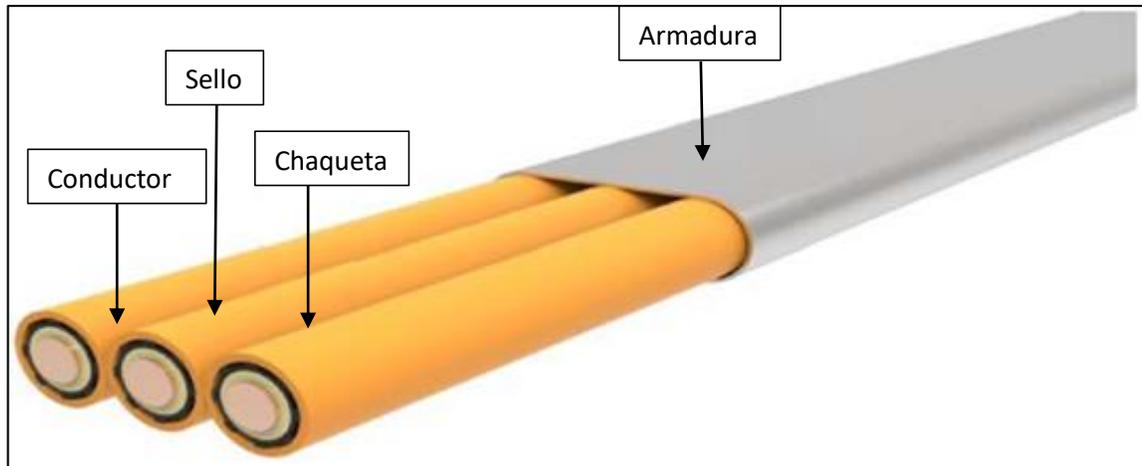
<sup>7</sup> KERITE ESP CABLE, Cables para bombas eléctricas sumergibles (ESP).

<sup>8</sup> CENTELSA CABLES DE ENERGIA Y TELECOMUNICACIONES S.A. Cables para bombas sumergibles.

corrosión y de desgaste que puede generar en pozo. De igual manera este material ha sido adecuado en la gran mayoría de los cables por las diferentes empresas distribuidoras de estos cables.

A continuación, en la figura 3, se ilustra un cable de potencia plano con sus principales secciones dispuestas en cada fase.

**Figura 3.** Partes del cable de potencia (configuración plana).

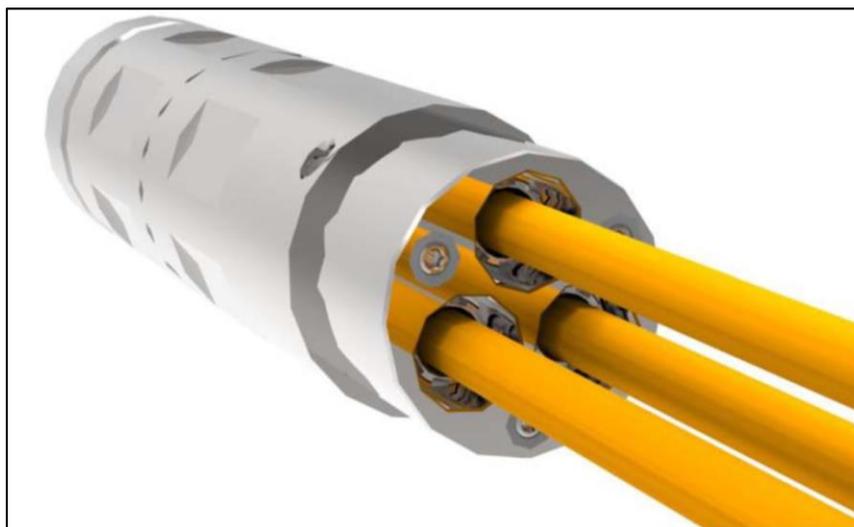


**Fuente:** elaboración propia, con base en: XIAO. J, WINDIARTO

Internacionalmente la industria ha estandarizado los cables de potencia en calibres 1, 2, 4 y 6 de acuerdo al AWG o  $mm^2$ ; los cuales son seleccionados debido a la sección del pozo en la que se encuentren, sin embargo, otros calibres pueden ser utilizados para aplicaciones especiales.

Cabe resaltar que cada uno de los calibres mencionados anteriormente puede presentar tanto configuración plana como redonda, la cual se ilustra a continuación en la Figura 4

**Figura 4.** Cable de configuración redonda



**Fuente:** IEEE Recommended Practice for Specifying Electric Submersible Pump Cable—Polypropylene Insulation. 2013. [Sitio WEB]. Estados Unidos. La entidad. Disponible en: <http://www.tjaote.biz/>

A continuación, se muestra en la Tabla 1, la clasificación de los cables respecto a las características conductoras de los mismos ya que sobre estos factores es que se decide qué tipo de cable debe de usarse.

**Tabla 1.** Características conductoras de los cables de potencia (unidades métricas)

Conductor Trade size	Conductor area ( $mm^2$ )	Nominal weight (kg/km)	Conductor resistance (fi/km @ 25 )°C	
			Plain Copper	Coated Copper
<b>10 <math>mm^2</math></b> 6 Awg	10.0	88.5	1.87	1.88
<b>16 <math>mm^2</math></b> 4 Awg	13.3	118.0	1.32	1.36
<b>25 <math>mm^2</math></b> 2 Awg	16.0	140.0	1.17	1.18
1 Awg	21.1	188.0	0.830	0.882
1/0 Awg	25.0	222.0	0.742	0.749
2/0 Awg	33.6	306.0	0.522	0.554
	42.4	386.0	0.413	0.440
	53.5	475.0	0.335	0.445
	67.4	599.0	0.266	0.276

**Fuente:** IEEE Recommended Practice for Specifying Electric Submersible Pump Cable—Polypropylene Insulation. 2013. [Sitio WEB]. Estados Unidos. La entidad. Disponible en: <http://www.tjaote.biz/>

Los factores que determinan la selección adecuada son: temperatura, presión, GLR (relación de gases y líquidos), voltaje de operación, stress físico sobre el cable. Los materiales para aislamiento estándar determinados por la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) son el EPDM (Ethylene-polypropylene Diene Monomer) y Polipropileno; para las chaquetas es utilizado el EPDM y el Nitrilo.

Adicionalmente a los materiales de aislamiento y chaqueta, pueden ser utilizadas barreras en forma de cintas o mallas, las cuales van ubicadas después del sello y antes de la armadura. Las cintas forman una barrera contra el ingreso del fluido y gas a los conductores con el fin de evitar fallas eléctricas por pérdida de energía o corrosión, generalmente son utilizadas cintas FE (fuorinated ethylene propylene).

La malla proporciona un refuerzo mecánico al cable de potencia, generalmente es utilizado el Nylon o el Kynar, materiales con capacidad de soportar esfuerzos mecánicos, manteniendo la integridad física del cable de potencia.<sup>9</sup>

La armadura sobre el cable proporciona protección y rigidez mecánica, además de resistencia contra la expansión de los materiales elastoméricos (aislamiento y cubiertas) cuando son expuestos a los fluidos del pozo. La armadura puede ser de acero galvanizado, acero inoxidable. La selección del material de la armadura se basa en el nivel de corrosión del fluido en el pozo en el cual el cable será instalado.

El éxito o fracaso de la instalación del cable de potencia depende en gran parte de la adecuada selección del cable para las condiciones de operación, dependiendo del tipo de bomba que se vaya a utilizar, la geometría del pozo, la cual puede generar diferentes tipos de esfuerzos de rozamiento y tensión. En pozos muy profundos que requieren cables especiales caracterizados por la capacidad conductiva, de soporte a esfuerzos de tensión, debido que mayor profundidad se va sumando el peso del cable.

Teniendo en cuenta las condiciones de pozo, la ausencia de gases corrosivos que se manejan en el Campo CPO-09, no es relevante una armadura resistente a migraciones de gas o sustancias corrosivas que puedan afectar el funcionamiento del cable y de los componentes del sistema de levantamiento, puesto que todos los cables tienen la resistencia con respecto a migración de gas y corrosión, el factor que decide que en el Campo CPO-09 se use el tipo de cable tipo AWG 2 es dado por la profundidad de los pozos y la capacidad energética que se emplea en las bombas electrosumergibles.

Los cables de potencia están clasificados en configuración redonda y configuración plana. La configuración redonda (Figura 4) es utilizada generalmente en pozos

---

<sup>9</sup> KERITE ESP CABLE, Cables para bombas eléctricas sumergibles (ESP).

petroleros cuando no exista la limitación de espacio en el mismo, esta limitación es dada por el espacio anular entre el tubing de producción y el casing de revestimiento, si esta limitación existe se debe utilizar la configuración plana, con el fin de evitar afectaciones mecánicas en el cable de potencia. Su selección es determinada por las exigencias de la compañía y las capacidades geométricas y de funcionamiento del pozo. Independientemente de la configuración los materiales de los que se hacen los cables están hechos de la misma composición, lo que varía es la selección de cable de número 1 a 6 el cual, cuanto más alto sea el número más delgado es el alambre. El alambre de mayor grosor soporta mayores corrientes, esto es usado en pozos con grandes distancias de profundidad, así mismo el gran grosor evita interferencias, concentrando mejor la energía dentro del mismo.<sup>10</sup>

#### 1.4 NORMAS EN CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DE CABLES DE POTENCIA

Para el diseño de cables, varias instituciones internacionales establecen normas que validen su correcto funcionamiento en subsuelo, en la tabla 2, se exponen las normas a considerar en la investigación.

**Tabla 2.** Normas representativas para diseño de cables.

	<b>IEEE 1019</b>	<b>ASTM B33-10</b>	<b>ASTM A459-08</b>
Conductor	Tensión, elongación, conductividad, resistencias, materiales	Resistividades	
Sello		Adherencia, diámetros totales, inspecciones, elongación, densidad, termo-resistividad	
Armadura			Tensión, elongación, uniones, materiales, inspección visual, ductilidad, peso por pulgada, adherencia, resistividad.

**Fuente:** elaboración propia

<sup>10</sup> CENTELSA CABLES DE ENERGIA Y TELECOMUNICACIONES S.A. Cables para bombas sumergibles.

## **1.5 FALLAS Y DAÑOS DIRECTOS O INDIRECTOS QUE SE PUEDEN GENERAR EN EL CABLE DE POTENCIA**

**1.5.1 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. Si no hay una buena conexión de los *nicopress*, 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 dentro del sistema. El correcto estudio de los potenciales orígenes de esta falla, debe ser considerablemente meticuloso, puesto que suponen errores de fabricación del cable, errores durante la instalación, entre otras.

Las fallas asociadas al *nicopress* son dadas por errores humanos al momento de no determinar la fuerza necesaria para el enpalde del *nicopress* con el cable de potencia.

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.

**1.5.2 Cable de potencia con bajo aislamiento.** Cuando se presenta un inconveniente asociados al bajo aislamiento en el cable de potencia, es directamente eléctrico, es decir, al momento de realizar un empalme el cable debe de ser sellado de la mejor manera para evitar problemas eléctricos, asociados al aislamiento del mismo, debido a que siendo afectado con el tiempo y las condiciones a las que se encuentra operando, que conlleva a determinar a la exposición eléctrica permitiéndole salir a tierra.

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.

**1.5.3 Pérdida de voltaje de control.** Es la variación o pérdida total de voltaje requerido para el buen funcionamiento de la bomba debido a la potencia requerida de la misma. Este tipo de fallas por lo general se presenta porque el sello no cubre la totalidad del cable de potencia.

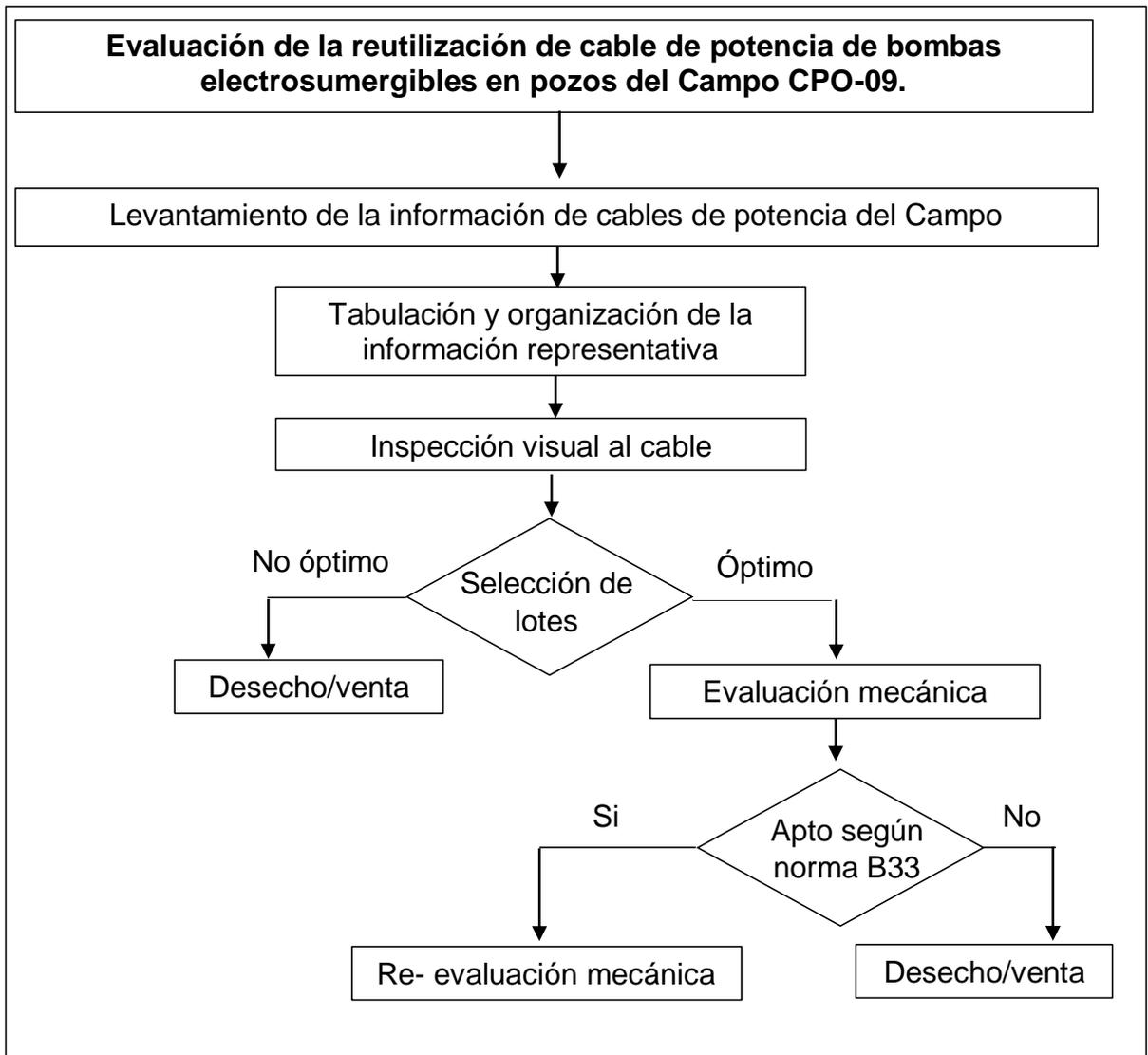
**1.5.4 Mala instalación durante la bajada del equipo BES.** Para la correcta manipulación del cable es necesario usar flejes o protectores de metal los cuales les brindan la protección necesaria así evitando que se presente daños a largo plazo y se debilite el interior del mismo; debe ser correctamente instalado dentro de la tubería de producción para que cumpla su operación de forma exitosa.

Se tiene que llevar a cabo un ajuste debidamente apropiado de estos implementos o accesorios los cuales se pueden ajustar ya sea con equipos neumáticos o de forma manual; el resultado tiene que ser el mismo ya se trabaje de una forma u otra; una de las ventajas de los equipos neumáticos es que al instalar estos accesorios se regula la presión del compresor de aire en el taladro durante la operación BES; los errores más comunes que se han presentado en cuanto a la instalación y al ajuste de los protectores los cuales hacen que el cable llegue a generar senos según el espacio.

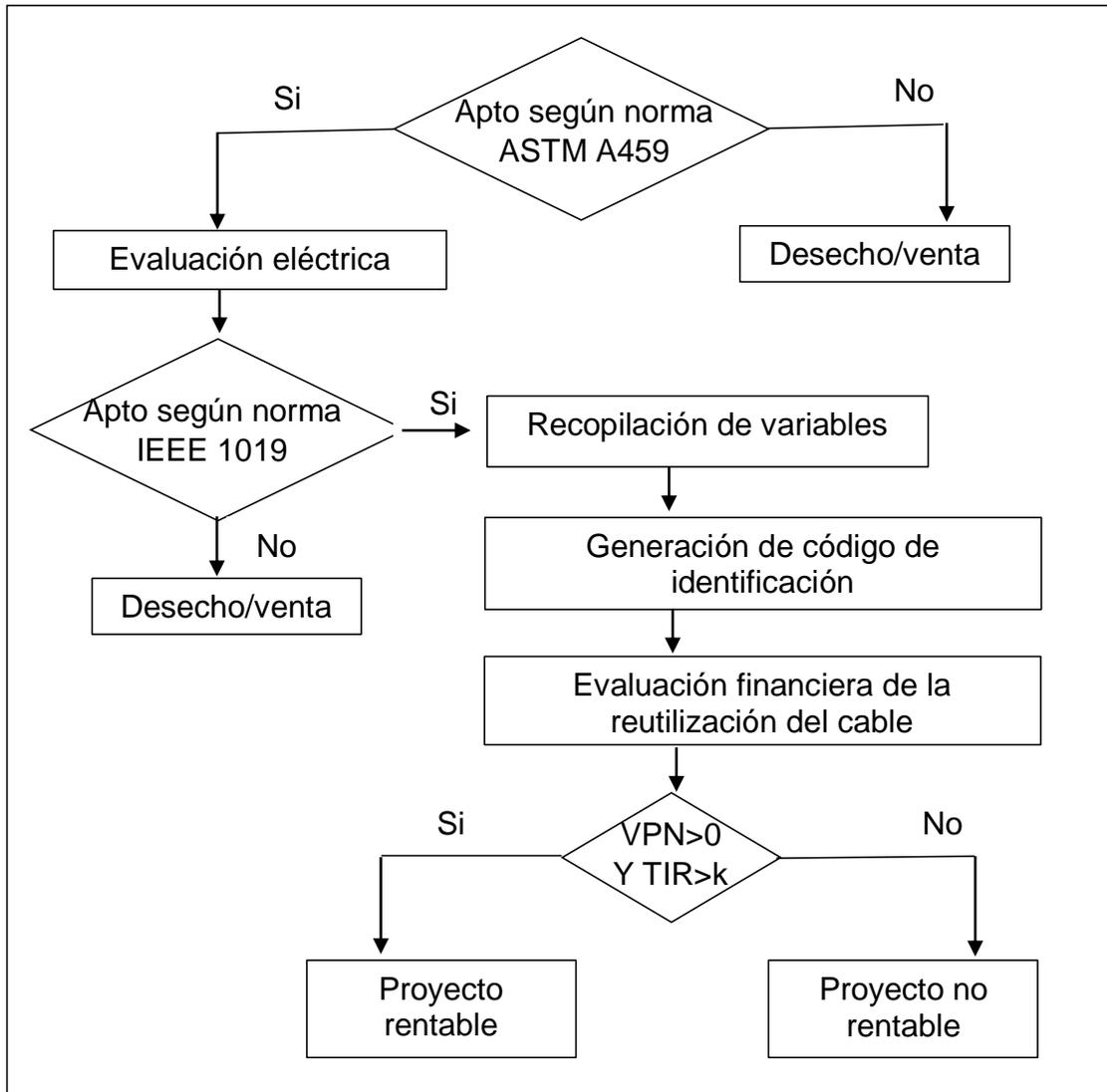
## 2. METODOLOGÍA Y DATOS

En este capítulo se plantea la metodología desarrollada para la realización del proyecto en cuestión y la secuencia lógica utilizada para el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados inicialmente, adicionalmente se referencian las normas y estándares bajo los cuales se llevó a cabo el procedimiento. Antes de entrar en consideración de cada uno de estos se expone el esquema general en la Figura 5.

**Figura 5.** Diagrama general del proyecto.



**Figura 5.** (Continuación)



**Fuente:** elaboración propia

## 2.1 SELECCIÓN DE CABLE

En este apartado se describe el proceso por el cual se dio la selección de lotes óptimos de cable de potencia.

Inicialmente ECOPETROL S.A suministro a los investigadores la información perteneciente al cable de potencia operativo en el momento la cual fue extraída de los estados mecánicos de los respectivos pozos activos y reportes de instalación de las diferentes compañías operadoras, esta data fue organizada y tabulada como se muestra en la Tabla 3 para iniciar trazabilidad del cable desde su primera corrida.

**Tabla 3.** Información cables en operación

N° Cable	Información base				Instalación		
	Pozo	Proveedor	Configuración	Tipo	Capilar	Semestre	Año
1	AK-1	Compañía H	Plano	1	1	I	2015
2	AK-4	Compañía B	Plano	2	1	II	2019
3	AK-5	Compañía B	Plano	2	1	II	2018
4	AK-6	Compañía B	Plano	2	1	I	2019
5	AK-7	Compañía S	Plano	2	No	I	2019
6	AK-8	Compañía L	Plano	2	1	I	2019
7	AK-8	Compañía H	Plano	2	1	I	2019
8	AK-9	Compañía A	Plano	2	1	I	2019
9	AK-10	Compañía K	Plano	2	1	I	2018
10	AK-10	Compañía K	Plano	2	1	I	2018
11	AK-10	Compañía B	Plano	2	1	I	2018
12	AK-11	Compañía H	Plano	1	1	II	2018
13	AK-11	Compañía S	Plano	2	1	II	2018
14	AK-11	Compañía H	Plano	2	1	II	2018
15	AK-12	Compañía H	Plano	2	1	II	2019
16	AK-13	Compañía B	Plano	2	1	I	2019
17	AK-14	Compañía H	Plano	2	1	II	2019
18	AK-14	Compañía H	Plano	2	1	II	2019
19	AK-15	Compañía B	Plano	2	1	II	2019
20	AK-16	Compañía H	Plano	2	1	II	2019
21	AK-17	Compañía A	Plano	2	1	I	2019
22	AK-17	Compañía A	Plano	2	1	I	2019
23	AK.18	Compañía K	Plano	2	1	I	2019
24	AK-19	Compañía H	Plano	2	1	I	2019
25	AK-20	Compañía B	Plano	2	1	II	2019
26	AK.21	Compañía N	Plano	2	1	I	2019
27	AK-22	Compañía B	Plano	2	1	II	2019
28	AK-23	Compañía A	Plano	2	1	II	2019
29	AK-24	Compañía A	Plano	2	1	II	2019
30	AK-27	Compañía A	Plano	2	1	I	2019
31	AK-28	Compañía S	Plano	2	1	I	2019
32	AK-30	Compañía N	Plano	2	1	II	2019
33	AK-30	Compañía B	Plano	2	1	II	2019
34	AK-31	Compañía B	Plano	2	1	II	2018
35	AK-32	Compañía H	Plano	2	1	II	2019
36	AK-33	Compañía S	Plano	2	1	I	2019
37	AK-42	Compañía A	Plano	2	1	I	2019

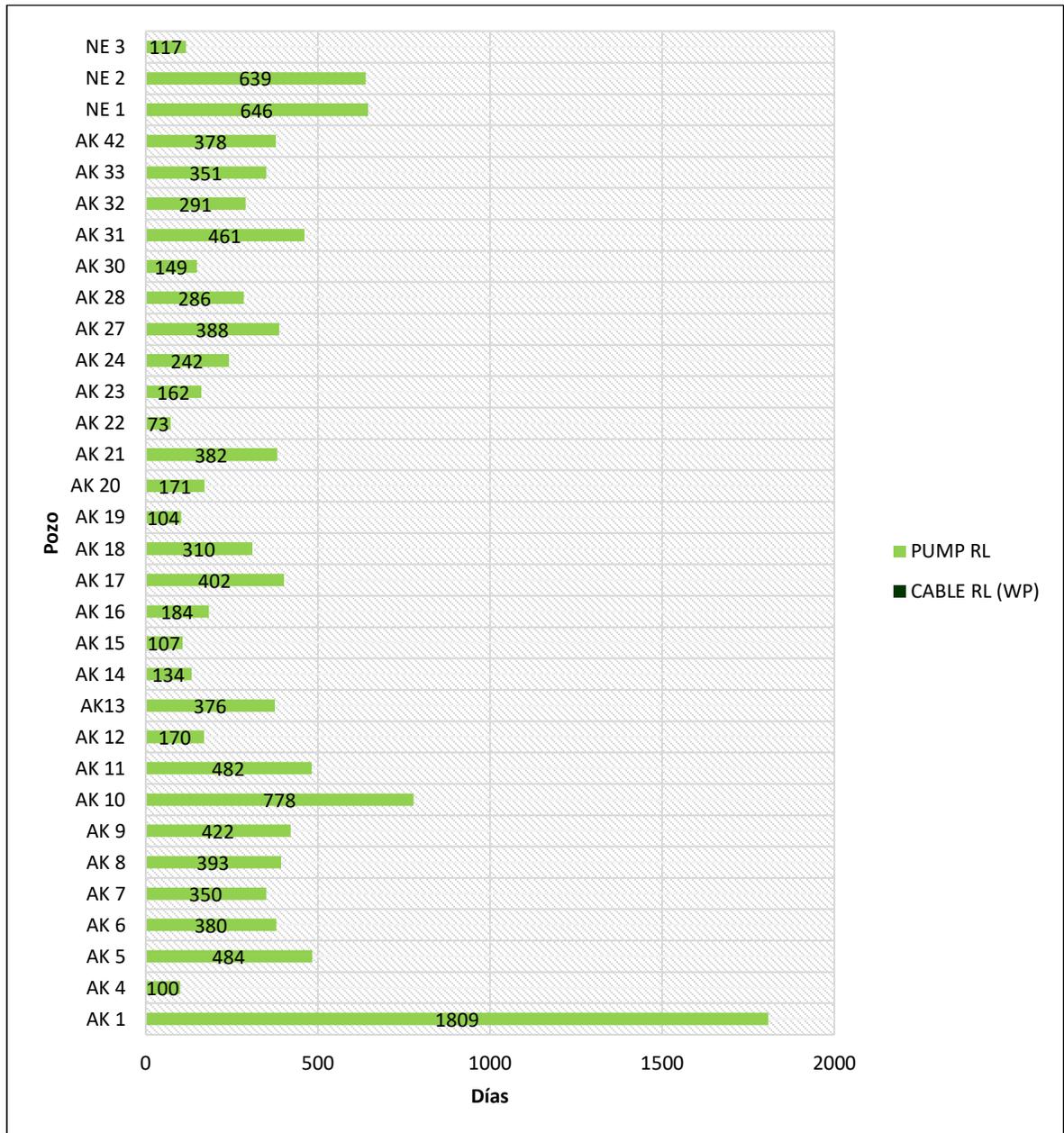
**Tabla 3.** (Continuación).

Información base				Instalación			
38	NE-1	Compañía B	Plano	2	1	I	2019
39	NE-1	Compañía B	Plano	2	1	I	2019
40	NE-2	Compañía A	Plano	2	1	I	2019
41	NE-2	Compañía A	Plano	2	1	I	2019
42	NE-3	Compañía A	Plano	2	1	II	2019

**Fuente:** elaboración propia, con base en: ECOPETROL S.A

De otro lado, con la información suministrada, se obtuvo el tiempo de vida operativo del cable y de la bomba (*run life*), se plasma en la Gráfica 1, en la cual se evidencia que los tiempos son iguales, esto debido a que el cable instalado en fondo para el Campo no tiene ningún tipo de trazabilidad y en su defecto es adquirido como cable nuevo a las compañías proveedoras de equipos de bombeo electrosumergible.

**Gráfica 1. Run life bomba y cable / Pozo**



**Fuente:** elaboración propia, con base en: ECOPETROL S.A

Análogamente se recopiló la información referente a algunos de los cables de potencia del Campo que fueron sacados de línea debido a una falla del sistema de levantamiento artificial asociado (bomba electrosumergible), de esta manera se obtuvo la información necesaria sobre su configuración, capilares, fecha de instalación entre otros; dicha información fue obtenida bajo la data suministrada por parte del equipo de control de producción y se especifica en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Información cables de sistema de levantamiento fallados.

N° Cable	Información base				Instalación	
	Proveedor	Configuración	Tipo	Capilar	Semestre	Año
43	Compañía B	Plano	2	Capilar	II	2018
44	Compañía H	Plano	2	Capilar	II	2018
45	Compañía N	Plano	2	Capilar	I	2019
46	Compañía H	Plano	2	Capilar	I	2019
47	Compañía H	Plano	2	Capilar	I	2019
48	Compañía H	Plano	2	Capilar	I	2019
49	Compañía B	Plano	2	Capilar	I	2019
50	Compañía B	Plano	2	Capilar	II	2019

**Fuente:** elaboración propia, con base en: ECOPETROL S.A

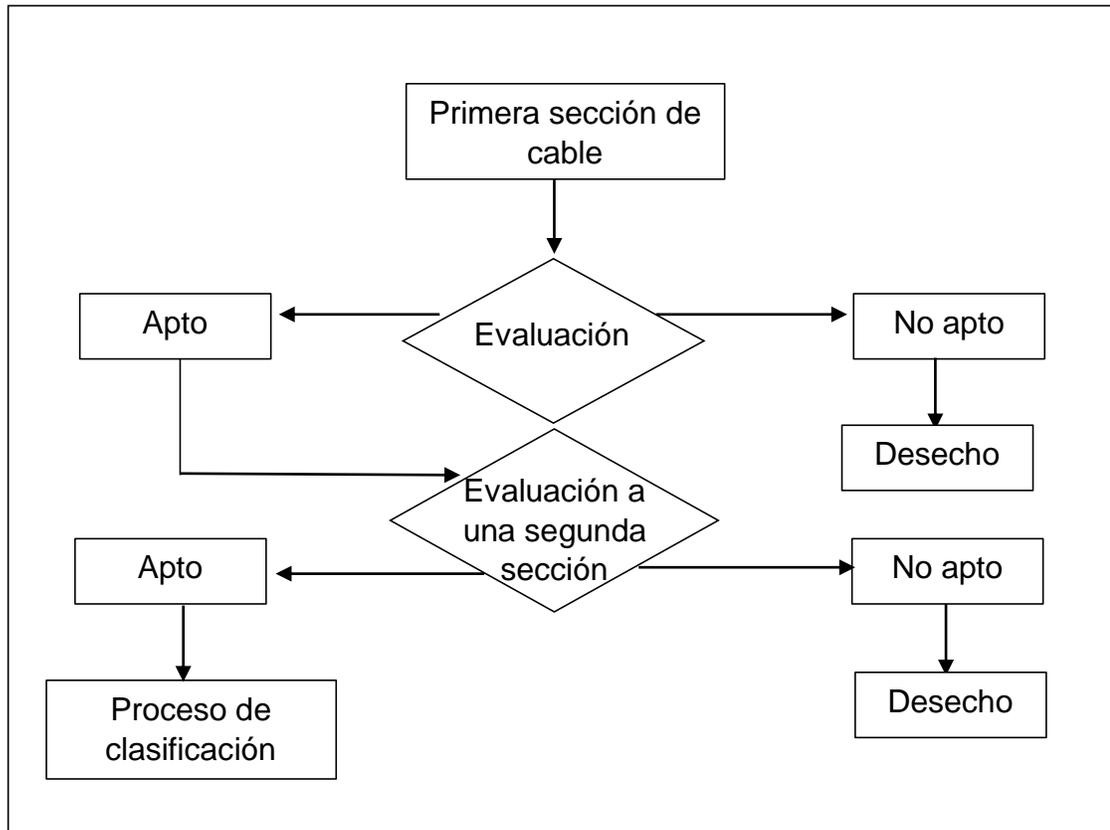
Teniendo en cuenta el cable de potencia existente en bodega, se da paso a una inspección visual, la cual evalúa el estado de la armadura del cable y su continuidad, para de esta manera descartar tramos de cable que presenten fisuras por las cuales el fluido pueda ingresar y causar daño a los conductores internos de este; la evaluación mencionada se realiza en compañía de una de las empresas que presta servicios de instalación y desinstalación de bombas electrosumergibles a ECOPETROL S.A debido a las considerables longitudes a evaluar.

A partir de la primera inspección mencionada se realiza un seccionamiento preliminar a los carretes de cable, en donde el cable se categoriza en lotes óptimos y no óptimos a operación en subsuelo respecto al estado de su armadura generando diferentes lotes de cable.

Dada la categorización mencionada anteriormente, el cable es seccionado según su operatividad tomando como referencia la superficie, es decir se seccionará en n etapas desde 1 hasta n donde 1 es la etapa ubicada en superficie.

Una vez obtenidos los respectivos lotes de cable se aplica una técnica de muestreo sistemático (Figura 6) en donde se toman como base el lote de cable designado de manera secuencial con el fin de asegurar una cobertura total del cable mediante una tendencia conocida se toma como óptimos y se les aplica el respectivo proceso.

**Figura 6.** Técnica de muestreo sistemática para selección de cable a evaluar



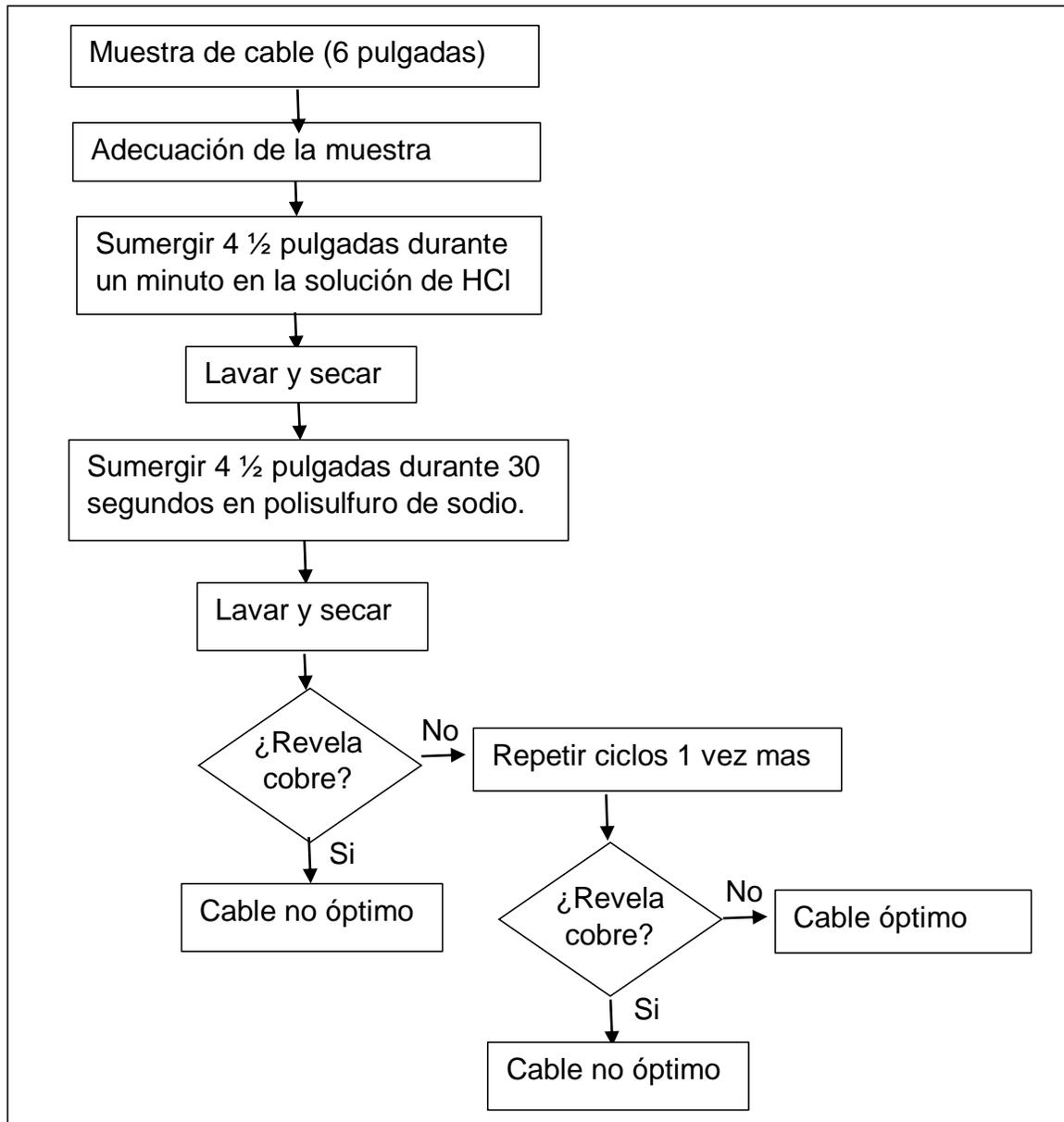
**Fuente:** elaboración propia.

Tras tener seleccionadas las muestras de cable bajo el método probabilístico propuesto, se da paso a la aplicación de la norma ASTM B33 (Ver Anexo A), la cual se expone en la Figura 7 y tiene como objeto principal evaluar el revestimiento del cable a partir de su exposición a las siguientes soluciones especiales de solventes orgánicos:

- Ácido clorhídrico (HCl) diluido en agua destilada (*sp.gr.* 1,088).
- Solución concentrada de polisulfuro de sodio (250 g cristales de polisulfuro de sodio/ 1 litro de agua) diluido en agua destilada (*sp.gr.* 1,145).

Por acción del polisulfuro las muestras pueden presentar un ennegrecimiento en su cobertura, por ende, este efecto no es indicativo de cable dañado, el respectivo daño se establece si los componentes internos a la armadura son revelados tras la exposición a las soluciones.

**Figura 7.** Diagrama aplicación norma ASTM B33



**Fuente:** elaboración propia, con base en: ASTM B33.

La norma sugiere que el anterior procedimiento de prueba sea realizado en un espacio que presente temperatura entre 15,6 y 21 °C.

Se debe tener en cuenta que una vez realizado dicho procedimiento al cable de potencia, se pueden generar nuevas secciones de longitud considerables como no óptimas para el proceso de reutilización, ya que si no cumple a cabalidad con los parámetros de la norma, la cual establece que la armadura no debe desprenderse ni generar ningún tipo que fisura que deje a la intemperie el cable interno, se pueden

llegar a presentar fallas en fondo debido a las altas presiones, temperaturas y presencia de contaminantes.

## 2.2 EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL CABLE

Con el objeto de evaluar la conductividad eléctrica del cable y su resistencia a la tensión, se aplica nuevamente la técnica de muestreo sistemática y las diferentes muestras que arroja esta, se dividen y se someten a evaluación mecánica y eléctrica.

Para la evaluación mencionada es necesario tener en cuenta las condiciones ambientales a las cuales se lleva a cabo la operación. En la Tabla 5 se evidencian los rangos de temperatura en los cuales se deben realizar los procedimientos de acuerdo a la norma mecánica y eléctrica, si varía alguna de estas condiciones establecidas es necesario aplicar un factor de corrección. En cuanto a la presión si bien se establece un estándar de presión atmosférica (14,7 psi), dichas medidas son tomadas a la presión de superficie del Campo, ya que la variación de presión estándar en superficie no va a representar afectación representativa en la lectura de las pruebas.

**Tabla 5.** Condiciones de temperatura para pruebas estándar.

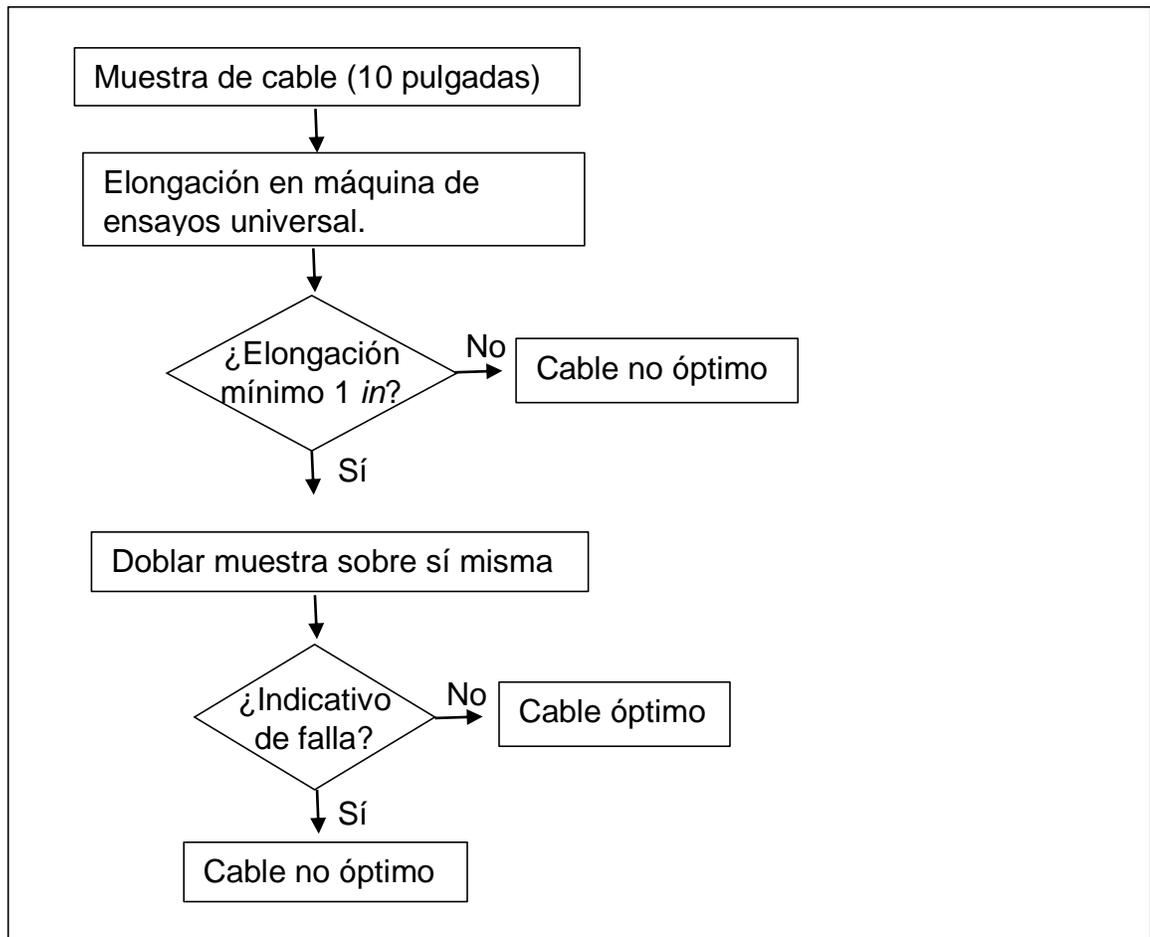
<b>Unidades</b>	<b>Pruebas Mecánicas</b>	<b>Pruebas Eléctricas</b>
Grados Celsius (°C)	15.6 - 21	15.55
Grados Fahrenheit (°F)	60.08 – 69.8	60

**Fuente:** Elaboración propia, con base en: ASTM B33 e Instructivo de inspección Akhorayef Petroleum.

**2.2.1 Evaluación mecánica.** La evaluación mecánica se enfoca en realizar ensayos de tracción para evaluar la elongación como designa la norma ASTM A459 (Ver Anexo B) en su noveno punto, dicha norma está encaminada a asegurar que el cable resista la tensión en fondo y no se fisure dejando al equipo de subsuelo en fondo y sin conexión a superficie o en que se generen espacios que permitan la entrada de fluidos que puedan causar un corto circuito y esta desglosado su procedimiento en la Figura 8.

Para la aplicación de la norma en primer lugar se da uso de la máquina de ensayos universales para generar el esfuerzo de elongación y en segundo lugar se da un trabajo manual en el cual la muestra debe ser resistente al doblez longitudinal, de esta manera se obtendrán resultados tanto cualitativos como cuantitativos, los cuales deben ser tomados en cuenta conjuntamente para la posible reutilización en fondo.

**Figura 8.** Diagrama realización de prueba ASTM A459



**Fuente:** elaboración propia con base en: ASTM A459.

Tras la realización de la prueba los resultados se tabularán respecto al porcentaje de elongación obtenido.

**2.2.2 Evaluación eléctrica.** Los cables con resultados adecuados en las previas pruebas mecánicas, son sometidas a la evaluación eléctrica, para la cual inicialmente se generó el registro de la continuidad fase a fase en la Tabla 6 y el aislamiento fase a tierra en la Tabla 6 respecto a la ficha técnica de cada uno de los proveedores de los cables operativos en subsuelo como se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 6.** Continuidad fase a fase cables de sistemas de levantamiento fallados. (Instalación)

<b>N° Cable</b>	<b>Continuidad A – B (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Continuidad B – C (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Continuidad A – C (<math>\Omega</math>)</b>
43	0.8	0.8	0.8
44	1.2	1.2	1.2
45	1.4	1.4	1.4
46	1.5	1.5	1.5
47	1.5	1.5	1.5
48	1.2	1.2	1.2
49	2	2	2
50	2	2	2

**Fuente:** elaboración propia, con base en: ECOPETROL S.A

En la Tabla 5 se evidencia que el cable presenta balance fase a fase, este es un criterio de suma importancia, ya que para una operatividad optima en subsuelo no se admite ningún porcentaje de desviación entre las fases del conductor de cobre. Se debe tener en cuenta que los valores registrados dependen netamente del calibre del cable, tipo y longitud del mismo.

En la Tabla 6 se observa que los valores no son uniformes como en el caso de las medidas de continuidad, eso debido a que las fases de cobre son independientes en su aislamiento.

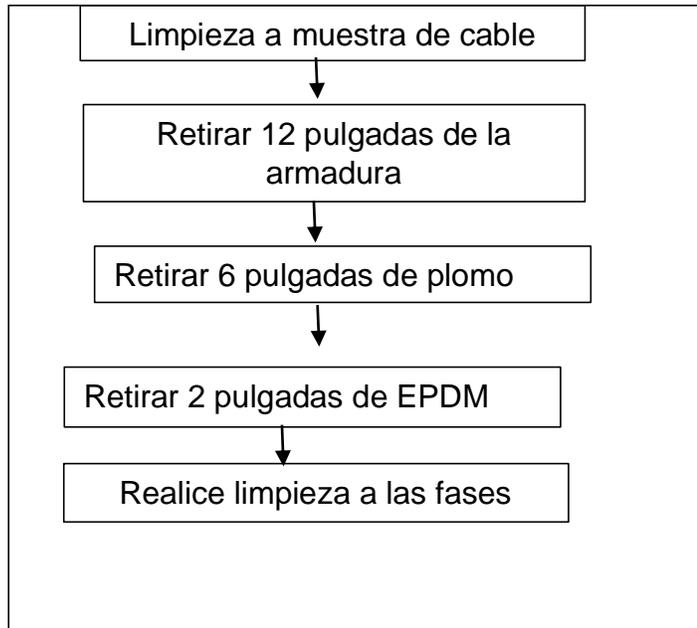
**Tabla 7.** Aislamiento fase – tierra cables de sistemas de levantamiento fallados (Instalación)

<b>N° Cable</b>	<b>A – Tierra (<math>G\Omega</math>)</b>	<b>B – Tierra (<math>G\Omega</math>)</b>	<b>C – Tierra (<math>G\Omega</math>)</b>
43	8.13	13.8	13
44	5.15	4.24	5.34
45	2.93	2.18	2.66
46	18.5	19.8	21.1
47	18.5	19.8	21.5
48	26.7	36.4	36.9
49	6.3	No registra	No registra
50	11	No registra	No registra

**Fuente:** Elaboración propia, con base en: ECOPETROL S.A

Una vez tabulada la información se da paso a la adecuación del cable la cual se expone en la Figura 9.

**Figura 9.** Esquema adecuación de cable para pruebas eléctricas



**Fuente:** elaboración propia con base en: ALKHOREYEF PETROLEUM COLOMBIA.

Una vez se tengan las tres fases de cobre reveladas, el cable fallado es probado eléctricamente bajo el estándar estipulado en la norma IEEE 1019.

**2.2.2.1 Prueba de continuidad.** Inicialmente mediante el uso de un tester digital (multímetro), para determinar si existe balance y continuidad entre las fases, tomando la medida de resistencia en  $\Omega$  (Ohms), y realizando consecutivamente la combinación de fases A – B, B – C y A – C. La continuidad entre fases debe presentar el mismo valor para presentar aval eléctrico de reutilización.

**2.2.2.2 Prueba de aislamiento.** A continuación, se evalúa mediante la prueba de aislamiento, la cual toma la medida de resistencia de cada fase respecto a tierra en un rango de 3kV – 5 kV durante 5 minutos, los altos valores de resistencia generados son tomados por un megohmetro, el cual evaluará cada una de las fases (A, B, C) respecto a tierra.

**2.2.2.3 Prueba de alto potencial.** Por último, se somete a la prueba de *high – potencial* la cual mide las mínimas fugas del aislamiento del cable tras someterlo a corriente (Directa o alterna), dicha tensión se proporciona directamente a la fase del cable por un máximo de 5 minutos o hasta que establezca la lectura del *hipot*. Cabe resaltar que, si el cable presenta alguna ruptura a causa del suministro energético, es descartado ya que en subsuelo podría representar una falla eléctrica asociada directamente a este o al empalme.

### 2.3 GENERACIÓN DEL CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN

Inicialmente se generará un código a cada uno de los cables existentes, tomando como premisa la información entregada por parte de la empresa, data referente a la empresa proveedora, tipo de cable (plano o redondo), tipo de cable, uso del capilar y fecha de instalación.

El código preliminar mencionado toma en cuenta dichas variables y las almacena por medio de una combinación alfanumérica, la cual se genera según la siguiente secuencia:

- El primer carácter hace referencia a una letra correspondiente a la empresa proveedora del cable. (A, B, H, S, N).
- En segunda instancia se toma en cuenta la configuración del cable, es decir si es redondo (R) o plano (P).
- Tras determinar en el código la configuración del cable, se referencia el tipo de cable con su respectivo número (AWG #1, AWG #2, AWG # 3, AWG #4, AWG#5 y AWG#6).
- Seguido a esto se estipula si el cable tiene capilar de inyección química en fondo (C), doble capilar (D) o no presenta (N).
- Finalmente se toma la fecha de instalación del cable, donde se denota únicamente el semestre (I, II) y el año con sus último dos dígitos (Ejemplo, para el año 2017 se toma únicamente el 17)

De esta manera se obtiene un código inicial de 7 u 8 caracteres alfanuméricos que serán introducidos y simplificados a visualización de la letra C (Cable) y un dígito secuencial. Este código es asignado a todos los cables tanto en operación (Incluye información del pozo en el que se encuentra) como en bodega.

Se dio uso al lenguaje de programación establecido en Visual Basic (Figura 9), que mediante el ingreso de data (Figura 10) genera el código de identificación y almacena las diferentes variables de cada uno de los cables.

**Figura 10.** Código de programación ingreso data cable.

```

Npozo = Sheets("Cable Nuevo").Range("E14").Value 'Número de cable registrado'
prove = Sheets("Cable Nuevo").Range("B11").Value 'Compañía proveedora de cable'
cable = Sheets("Cable Nuevo").Range("B13").Value 'Tipo de cable'
conf = Sheets("Cable Nuevo").Range("B15").Value 'Configuración de cable'
cap = Sheets("Cable Nuevo").Range("B17").Value 'Información de capilar'
mes = Sheets("Cable Nuevo").Range("B19").Value 'Mes de instalación'
amo = Sheets("Cable Nuevo").Range("B20").Value 'Año de instalación'
preliminar = Sheets("Cable Nuevo").Range("E10").Value 'Código preliminar'
ft = Sheets("Cable Nuevo").Range("H11").Value 'Longitud instalada den ft'
pozo = Sheets("Cable Nuevo").Range("H13").Value 'Nombre de pozo'

If Npozo = "" Then mensaje = mensaje & "Falta número de cable" & vbCrLf
If prove = "" Then mensaje = mensaje & "Falta proveedor" & vbCrLf
If cable = "" Then mensaje = mensaje & "Falta el tipo de cable" & vbCrLf
If conf = "" Then mensaje = mensaje & "Falta la configuración del cable" & vbCrLf
If cap = "" Then mensaje = mensaje & "Falta información del capilar" & vbCrLf
If mes = "" Then mensaje = mensaje & "Falta el mes de instalación" & vbCrLf
If amo = "" Then mensaje = mensaje & "Falta el año de instalación" & vbCrLf
If preliminar = "" Then mensaje = mensaje & "Falta el código preliminar" & vbCrLf
If ft = "" Then mensaje = mensaje & "Falta la longitud de ft instalados" & vbCrLf
If pozo = "" Then mensaje = mensaje & "Falta el nombre el pozo" & vbCrLf

```

**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 11.** Interfaz ingreso data de cables.

**Fuente:** elaboración propia

Aun, así como se observa en la Figura 11, se tomará en cuenta información adicional que no se verá reflejada en el código, pero será almacenada para consulta

como lo es la longitud instalada (ft), pozo, torre que realizó el *pull in*, material del cable, tipo de coraza, textura y serial o lote de fabricación.

Por otra parte, una vez realizadas todas las pruebas estipuladas anteriormente se integran las variables obtenidas y tabuladas como lo son el rango de elongación obtenido (El porcentaje que se logró elongar), la medida de resistencia fase a fase (Directamente el número obtenido en pruebas) y el aislamiento fase a tierra. Estas variables, aunque no se incorporarán directamente al código son almacenadas como data que valida la reutilización del cable.

Dicho código generado será suministrado a las diferentes compañías prestadoras de servicio para que se identifique el cable en cada uno de los *reels* dispuestos a los cables que salen de operación por medio del sticker de la Figura 12.

**Figura 12.** Formato desinstalación.

		GERENCIA DE OPERACIONES DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN CPO-09
FORMATO SEGUIMIENTO AL CABLE DE POTENCIA - STICKER DESINSTALACIÓN		
REEL	_____	
POZO	_____	
EMPRESA	_____	
CÓDIGO(S) PREVIO	_____	

**Fuente:** elaboración propia

De igual manera se tiene otro formato (Figura 13) para los *reels* que embobinen el cable tras su respectiva inspección y queden dispuestos en bodega para reutilización en nuevas operaciones.

**Figura 13.** Formato *back up*.

		GERENCIA DE OPERACIONES DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN CPO-09
FORMATO SEGUIMIENTO AL CABLE DE POTENCIA - STICKER BODEGA		
REEL	_____	
CÓDIGO	_____	
LONGITUD	_____	
OBSERVACIONES	_____	

**Fuente:** elaboración propia

## 2.4 EVALUACIÓN FINANCIERA

Uno de los pilares de la realización de este proyecto y en general de los proyectos aplicados a la industria petrolífera es el factor financiero, dado que, al ser un área con precios y rentas volátiles, se debe trabajar en la optimización de procesos que permitan que las compañías reducir costos asociados a la operación y generar mayor rentabilidad por cada barril producido.

Por lo tanto, una vez evaluados los aspectos técnicos referentes a la introducción de la práctica de reutilización de cable de potencia, se da lugar a la evaluación financiera del proyecto, en primer lugar, generando lista de costos que permitan estimar un costo reducido aproximado, teniendo en cuenta tarifas de inspección, acople, instalación y compra.

**2.4.1 VPN.** El valor presente neto es un indicador económico que mediante un flujo de caja expresa todos los costos asociados al proyecto en tiempo presente, para evaluar si realmente existirán ganancias ( $VPN > 0$ ), se generarán pérdidas de capital ( $VPN < 0$ ), o por el contrario el impacto económico es nulo ( $VPN = 0$ ). Dicho flujo de caja se relaciona matemáticamente con la Ecuación 1.<sup>11</sup>

**Ecuación 1.** Valor presente neto

$$VPN = \sum_{i=1}^n \left( \frac{F_n}{(1+i)^n} \right) - INV$$

**Fuente:** CANALES, Ricardo. CRITERIOS PARA LA TOMA DE DECISIÓN DE INVERSIONES. Revista Electrónica de Investigación en Ciencias Económicas. [en línea].2015 (3). 109-115. [Consultado 15, febrero 2020]. ISSN: 2308 – 782X.

Disponible en <https://www.camjol.info/index.php/REICE/article/view/2022>

Dónde F hace referencia a los flujos de caja netos, es decir la diferencia entre ingresos y egresos.

**2.4.2 TIR.** De otro lado la tasa interna de retorno es un indicador que representa la rentabilidad que tiene un proyecto o inversión, mediante la medida porcentual de los beneficios que genera un flujo de caja; y su valor presenta un criterio de decisión para aceptar o rechazar alternativas de proyectos económicos.<sup>12</sup>

Para lograr obtener la tasa interna de recobro es necesario hallar el valor actualizado neto (VAN) desarrollado en le ecuación 2, el cual permite que la tasa

---

<sup>11</sup> CANALES, Ricardo. CRITERIOS PARA LA TOMA DE DECISIÓN DE INVERSIONES. Revista Electrónica de Investigación en Ciencias Económicas. [en línea].2015 (3). 109-115. [Consultado 15, febrero 2020]. ISSN: 2308 – 782X. Disponible en <https://www.camjol.info/index.php/REICE/article/view/2022>

interna de recobro, actúe como una tasa de descuento, dando como resultado 0 el valor del valor actualizado neto.

### **Ecuación 2.** Valor actualizado neto

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1 + TIR)^1} + \frac{F_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1 + TIR)^n} = 0$$

**Fuente:** CANALES, Ricardo. CRITERIOS PARA LA TOMA DE DECISIÓN DE INVERSIONES. Revista Electrónica de Investigación en Ciencias Económicas. [en línea].2015 (3). 109-115. [Consultado 15, febrero 2020]. ISSN: 2308 – 782X. Disponible en <https://www.camjol.info/index.php/REICE/article/view/2022>

Donde F son los flujos de dinero cada periodo de tiempo t,  $I_0$  es la inversión a realizar en el momento inicial y n es el número de periodos de tiempo.

De esta manera la tasa interna de retorno es calculada por medio del despeje de la ecuación dependiendo del número de periodos y los flujos de dinero en cada periodo.

Si  $TIR > k$ , el proyecto de inversión será aceptado. En este caso, la tasa de rendimiento interno que se obtiene es superior a la tasa mínima de rentabilidad exigida a la inversión.

Si  $TIR = k$ , se presenta una situación similar a la que se producía cuando el VAN era igual a cero. En esta situación, la inversión podrá llevarse a cabo si mejora la posición competitiva de la empresa y no hay alternativas más favorables.

Si  $TIR < k$ , el proyecto debe rechazarse. No se alcanza la rentabilidad mínima que le pedimos a la inversión.

Tomando a k como la tasa de descuento de flujo para el valor actualizado neto.<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> <sup>11</sup>CANALES, Ricardo. CRITERIOS PARA LA TOMA DE DECISIÓN DE INVERSIONES. Revista Electrónica de Investigación en Ciencias Económicas. [en línea].2015 (3). 109-115. [Consultado 15, febrero 2020]. ISSN: 2308 – 782X. Disponible en <https://www.camjol.info/index.php/REICE/article/view/2022>

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la recolección de datos, pruebas realizadas, análisis de las mismas y el estudio de viabilidad financiera que citan el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados inicialmente.

#### 3.1 SELECCIÓN INICIAL DEL CABLE

Con el levantamiento de información preliminar citado en el capítulo 3 del presente trabajo, se inició el proceso de selección del cable proveniente de sistemas de levantamiento fallados, este se da por medio de una inspección visual inaugural, dado que el cable puede presentar corrosión, abrasión, ampollas, ruptura, entre otros daños que pueden ser identificados fácilmente, como se evidencia en el carrete de la Figura 14, que tiene embobinado cable altamente corroído y por tanto con deficientes condiciones mecánicas para operar en fondo.

**Figura 14.** Cable altamente corroído



**Fuente:** elaboración propia

En lo que respecta al cable proveniente del Campo en cuestión no se tuvo ningún indicio de corrosión que sugiriera desecho por malas condiciones mecánicas propias de su armadura, por el contrario, presento un estado apto visualmente como se observa en la Figura 15.

**Figura 15.** Cable con óptima condición mecánica en su coraza.



**Fuente:** elaboración propia

Tras dicha inspección mencionada, el cable pasa a través del medidor de cable, un dispositivo que determina la longitud del cable en el *reel* y a su vez este se re – embobina en otro, el dispositivo en mención al ser estrecho genera evidencia de fractura, ampolla o ruptura en el cable a causa de esfuerzos mecánicos, golpes, arrastre, entre otros. De esta manera se determinó la longitud de cada uno, expuesta en la Tabla 8 de los tramos de cable dispuestos con óptimo estado mecánico.

**Tabla 8.** Longitud del cable

<b>N° Cable</b>	<b>Longitud (Ft)</b>
43	8193
44	7632.15
45	8100
46	5988.98
47	2041.58
48	7370.7
49	6000
50	2700

**Fuente:** elaboración propia

La longitud determinada fue registrada de igual manera como data de la base de datos de cable en bodega.

Seguido a esto, se sometió el cable a presencia de agentes externos, como es el caso de ácido clorhídrico en solución y de polisulfuro de sodio para evaluar el estado de su coraza y en general de la armadura del cable, dado que les de vital importancia garantizar el estado de cada una de las fases de cobre, dichas evaluaciones arrojaron resultados óptimos, debido que no se dejó en evidencia el cobre en ninguno de los casos, hecho que garantiza el estado de la coraza y por ende la operatividad del conductor.

### **3.2 PRUEBAS DE INTE GRIDAD**

Para la realización de la inspección visual, se adaptó cada una de las muestras de cable, tras descubrir su armadura, plomo y EPDM como se evidencia en la Figura 14, para lograr evidenciar cada una de las fases del cobre (A, B, C) y el estado de sus componentes aislantes.

**Figura 16.** Cable de potencia con sus tres fases descubiertas



**Fuente:** elaboración propia

**3.2.1 Evaluación mecánica.** De acuerdo a la norma ASTM A459, se realiza a los cables pruebas de tensión simulando una tensión aun mayor a la que será sometido en pozo, esto con el fin de tener una sobreestimación de la capacidad a la cual el cable puede ser sometido; de esta manera se evidencia que los cables usados en la inspección no presentan fallas al momento de ser expuestos ante altas fuerzas generadas por la máquina del esfuerzos universales determinando que la capacidad de tensión a la cual va a estar sometido el cable en pozo no van a representar ningún tipo de falla asociada al sobre esfuerzo de tensión.

Por medio de esta evaluación se someten los cables a una inspección visual en la cual se determina la integridad física y operativa del cable.

**3.2.1.1 Fracturas.** Al evaluar el cable mediante el cambio de *reel*, el mismo pasa por un cuenta pies, en el cual se pueden analizar si el cable presenta una fractura que permita afectar su funcionamiento, esta fractura es representa un riesgo en la operación dado que expone el cable de potencia afectando la funcionalidad del sello.

Dentro de la inspección realizada en la base no se evidenció registro de fractura.

**3.2.1.2 Deformación.** A su vez determina si el cable presenta alguna deformación que al momento de ser corrido nuevamente pueda generar fallas de atascamiento, fracturas del cable de potencia, exposición interna del cable debido a fricción generada por esfuerzos de rozamiento.

Dentro de la inspección de los cables en mención fueron analizados y no contaron con fallas por deformación.

**3.2.1.3 Deterioro.** Debido a condiciones de pozo a las que se encuentra el cable en fondo, puede llegar a generar deterioro al llevar una trazabilidad del mismo, permitiendo migraciones de energía, ocasionando fallas en el funcionamiento de la bomba, para esto se debe de determinar a las condiciones a las cuales el cable va a estar expuesto previamente.

Debido a las condiciones presentadas en fondo del Campo CPO-09, los factores que generan deterioro al cable no son significativos con respecto al daño generado al mismo.

**3.2.1.4 Quemadura.** Las quemaduras generalmente son ocasionadas por un aumento en temperatura interna del cable, estas se determinan mediante una inspección visual, en la que se evidencie rastros de una quemadura que afecte el sellante del cable de cobre, de esta manera se procede a una evaluación en la cual se determine el grado de daño generado al cable para poder retirar la zona quemada y reemplazarla con material requerido por el cable para su buen funcionamiento.

Durante la inspección al no presentar fallas asociadas al cable de potencia, no fue necesario recurrir a este tipo de tratamiento dentro de la evaluación mecánica.

**3.2.1.5 Abrasión.** La mayoría de los cables que presentan problemas de abrasión es debido a la concentración de sales dentro del yacimiento, este problema es más frecuente en pozos con mayor *run life*, por lo tanto, el cable va a tener una mayor cantidad de tiempo en operación expuesto a los fluidos de subsuelo.

Debido a que en el Campo fallan en promedio 40% de los pozos al año, los cables son cambiados en cortos periodos de tiempo y por lo ende no presentan abrasión dentro del sistema.

**3.2.1.6 Ruptura.** Independientemente de la manera en la que el cable se haya llegado a romper, bien sea por sobre esfuerzos de tensión o entrampamientos dentro del pozo, se debe de realizar una inspección para determinar el grado de funcionamiento físico que presenta el cable o si se debe de realizar un proceso de empalme para asegurar el buen funcionamiento del cable.

Mediante la inspección del cable se determinó la integridad del cable no presentaba una ruptura que generara algún procerco de empalme o reparo.

**3.2.2 Evaluación eléctrica.** Los cables en mención son sometidos a pruebas eléctricas para determinar técnicamente su correcta operatividad eléctrica en fondo; dicho aval técnico se basa en tres pruebas principales.

**3.2.2.1 Prueba de continuidad.** Tras la adecuación del cable, se realizó la prueba de continuidad fase a fase obteniendo los resultados de la Tabla 9.

**Tabla 9.** Continuidad fase a fase cable fallado

N° Cable	Continuidad A – B ( $\Omega$ )	Continuidad B – C ( $\Omega$ )	Continuidad A – C ( $\Omega$ )
43	1.4	1.4	1.4
44	1.3	1.2	1
45	1.3	1.3	1.3
46	0.9	0.9	0.9
47	0.5	0.5	0.5
48	1.3	1.3	1.3
49	0.9	0.9	0.9
50	2	2	2

**Fuente:** elaboración propia

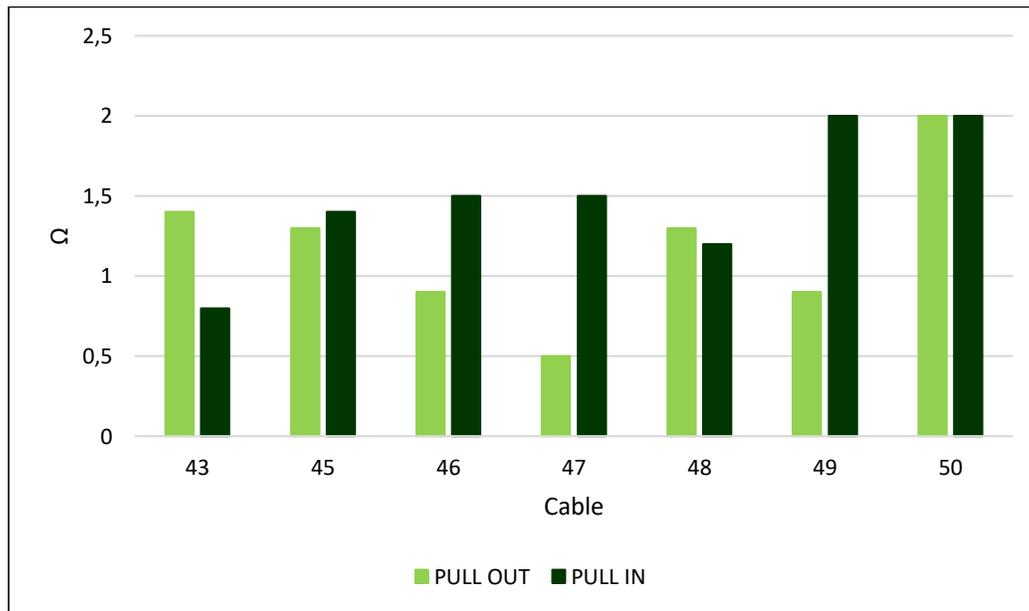
Se evidencia que de los 8 cables en cuestión solo uno presenta desbalance en sus fases, por lo cual dicho cable será dispuesto para venta como *scrap*. Igualmente se observa que así exista balance en la continuidad de las tres fases, dichos valores difieren de los iniciales presentados anteriormente en la Tabla 5, esto atribuido a la operación del cable en fondo.

En la Gráfica 2 se presentan los valores de continuidad de fase para los 7 cables balanceados, antes y después de su operación; se observa que los comportamientos de los valores netos de resistencia de las fases tras estar el

subsuelo pueden incrementar, reducir o permanecer iguales, esto debido a la condición propia del pozo a la que es sometido el cable, como la temperatura, presión, nivel de sumergencia, entre otros; pero principalmente se atribuye a las condiciones eléctricas como tal, es decir los empalmes presentes y la calidad de corriente generada por el variador de frecuencia,

De igual manera la operatividad eléctrica del cable que se evalúa con la prueba de continuidad busca únicamente el balance entre fases para su aval de operación, independientemente de si este valor difiere del valor registrado en el *pull in*.

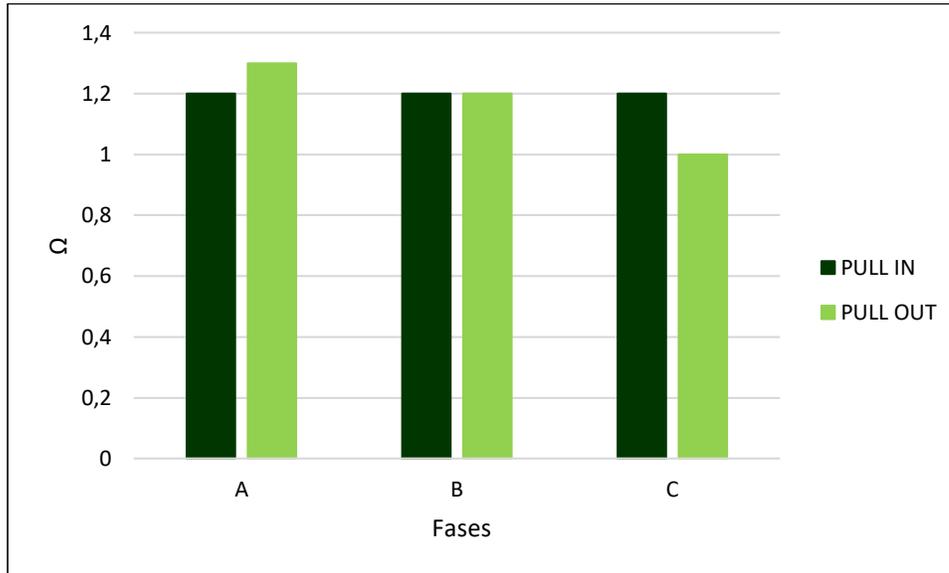
**Gráfica 2.** Comparación de los valores de continuidad de fase *pull in* vs *pull out*



**Fuente:** elaboración propia

De otro lado en la Gráfica 3 se presentan los valores de continuidad de fase (A – B, B – C y C – A) para el cable número 44, el cual fue el único que presento desbalance en superficie y por tanto el único descartado para reutilización en un nuevo completamiento.

**Gráfica 3.** Prueba de continuidad entre fases para el cable 44.



**Fuente:** elaboración propia

**3.2.2.2 Prueba de aislamiento.** La resistencia a tierra de cada una de las fases, fue registrada en la Tabla 10, respecto a una tensión generada de 5 kV durante 5 minutos, la evaluación se realizó para todos los cables aun cuando el número 44 fuera deseleccionado para operación debido al desbalance presentado en sus fases.

**Tabla 10.** Aislamiento fase – tierra cables fallados.

N° Cable	A – Tierra (GΩ)	B – Tierra (GΩ)	C – Tierra (GΩ)
43	3.54	3.57	4.02
44	17.2	18.1	10.5
45	5.32	6.97	4.48
46	11.1	12.9	10
47	9	7.3	8.45
48	28.6	33.7	35.4
49	2.2	No registra	No registra
50	2.2	No registra	No registra

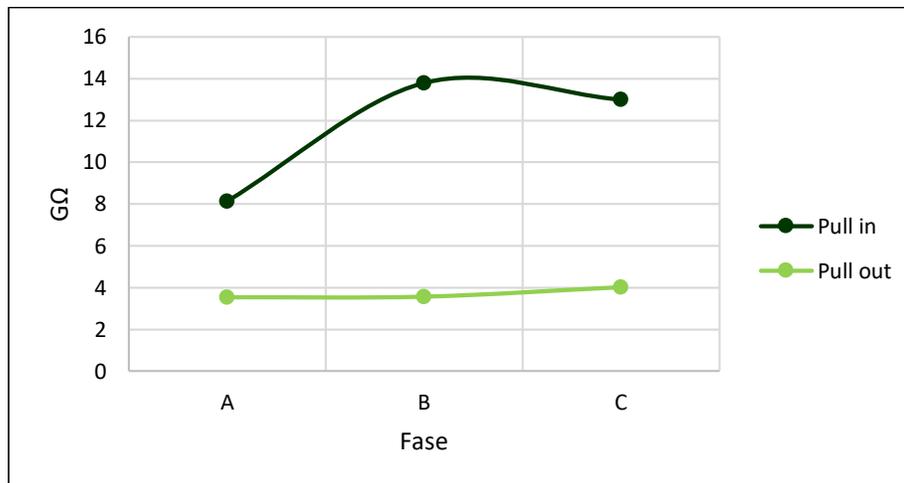
**Fuente:** elaboración propia

De igual manera se realizó el comparativo del aislamiento a tierra para cada una de las fases de los 8 cables en mención, entre lo registrado antes del *pull in* y tras el *pull out*.

Las variaciones observadas en las medidas de las pruebas de aislamiento fase – tierra se muestran en las siguientes gráficas, las cuales presentan distintos

comportamientos como lo son aumento y disminución en aislamiento en cada una de sus fases, esto debido a la temperatura a la cual fue sometida en cable en pozo y al estado del EPDM respecto al cable, ya que en fondo se puede generar un ligero desprendimiento del mismo lo que altera la capacidad de aislamiento del cobre a la coraza; por lo cual cada uno de los cables en estudio presento un comportamiento diferente en sus fases como se ilustra a continuación.

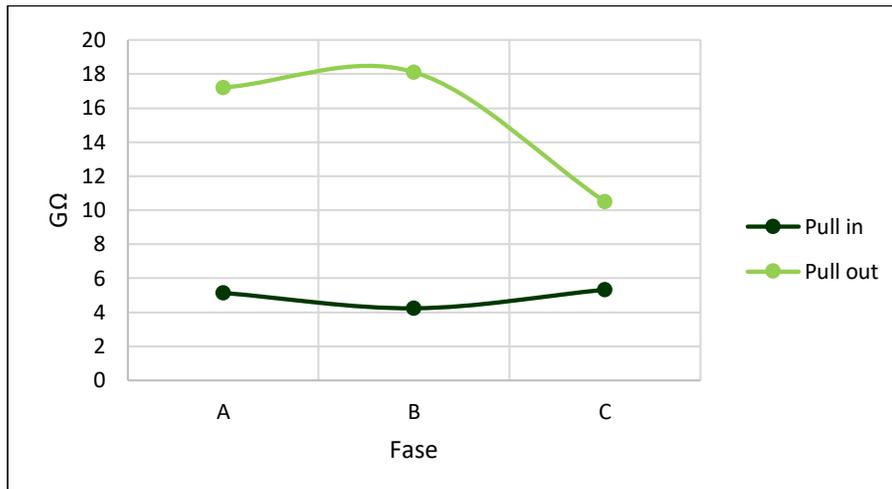
**Gráfica 4.** Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 43



**Fuente:** elaboración propia

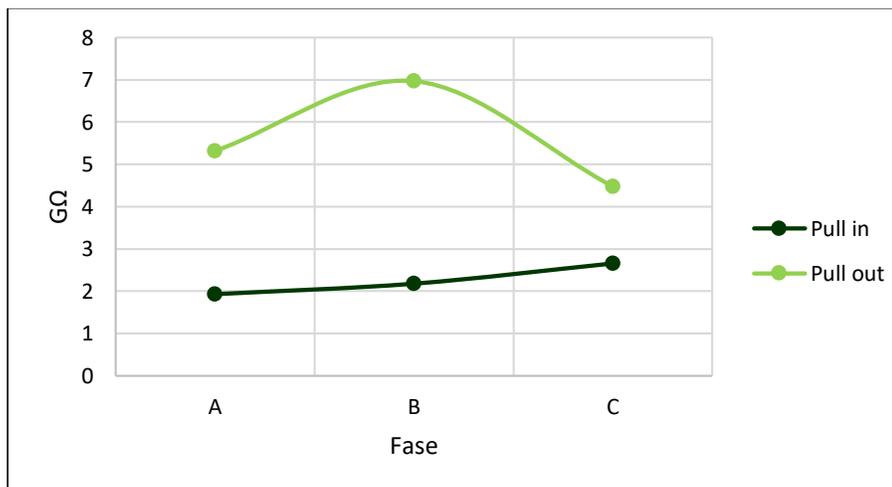
En el caso del cable 43 expuesto en la Gráfica 4 se observa que las medidas de aislamiento para las tres fases disminuyeron y presentaron un valor similar entre estas, esto evidencia que el EPDM tuvo un desprendimiento homogéneo en las tres fases del cable, hasta alcanzar un valor promedio de 3,71 GΩ en su aislamiento.

**Gráfica 5.** Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 44



**Fuente:** elaboración propia

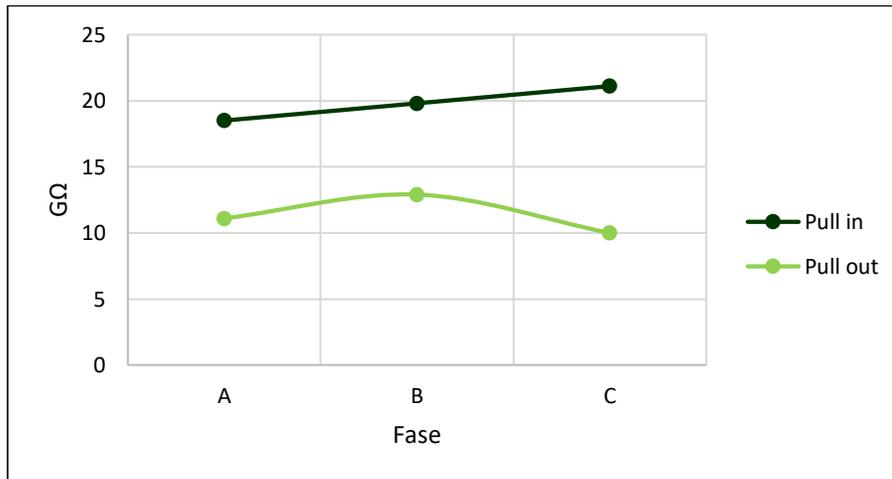
**Gráfica 6.** Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 45



**Fuente:** elaboración propia

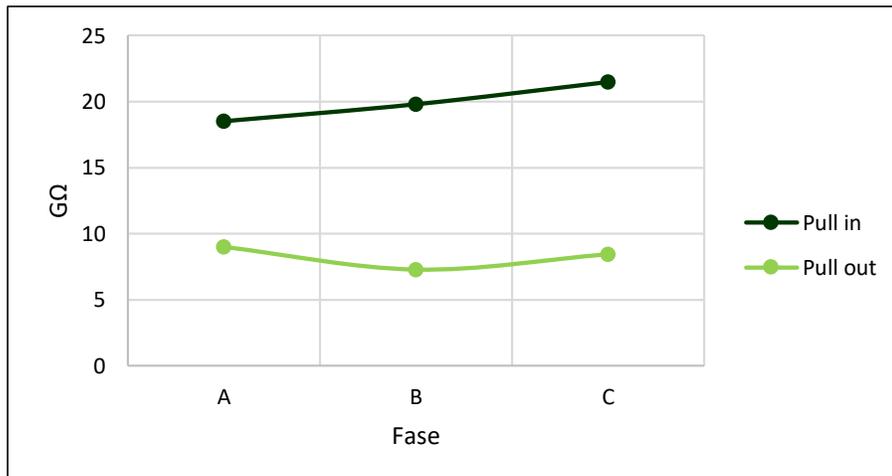
De otro lado se tiene el comportamiento de los cables 44 y 45 (Gráfica 5 y 6), los cuales aumentaron su capacidad de aislamiento fase – tierra en las tres fases del cobre, aunque no es un comportamiento esperado dado que en fondo se espera que el cable sufra deterioro y este se evidencie en sus medidas eléctricas de aislamiento, dicho comportamiento es adjudicado a la temperatura a la cual el cable fue sometido en fondo.

**Gráfica 7.** Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 46



**Fuente:** elaboración propia

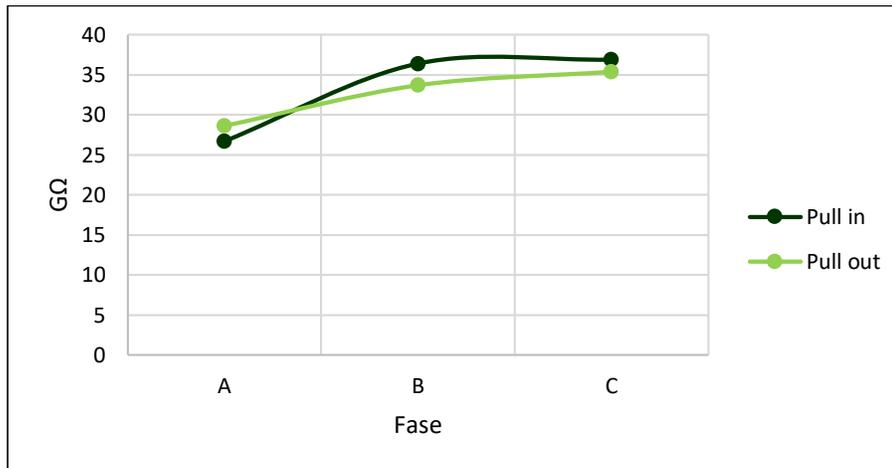
**Gráfica 8.** Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 47



**Fuente:** elaboración propia

Las medidas de aislamiento de fases respecto a tierra de los cables 46 y 47, presentan un comportamiento similar al del cable 43, esto se puede observar en las gráficas 7 y 8, en las cuales se aprecia la disminución del aislamiento respecto a tierra de las fases, lo cual es un indicativo de desprendimiento del EPDM, pero en estos dos casos el desprendimiento mencionado no tuvo un comportamiento homogéneo en las respectivas fases evaluadas.

**Gráfica 9.** Prueba de aislamiento (Fases – tierra) Cable 48



**Fuente:** elaboración propia

El último comportamiento evidenciado es el que presenta el cable 48 en la Gráfica 9, el cual tiene valores muy similares, lo cual indica su poco desgaste eléctrico en fondo.

Los cables 49 y 50 no se muestran en el análisis debido a que los datos de aislamiento de las fases B y C no se reportan en los informes de instalación, por lo cual tampoco se evaluaron dichas fases tras el respectivo *pull out*, su única fase evaluada fue la A, la cual presentó un valor de 2,2 GΩ.

Se debe tener en cuenta que todas las pruebas realizadas arrojan valores mayores a 2 GΩ en las lecturas fase – tierra, esto es garantía del buen estado del cable y de su buena capacidad de aislamiento del cobre con su respectiva coraza y revestimiento; es decir los cables evaluados en su totalidad presentan condiciones de aislamiento óptimas para volver a operar en subsuelo.

**3.2.2.3 Prueba de alto potencial.** Los resultados obtenidos a partir del HIPOT, se exponen en la Tabla 11, en la cual se evidencia que la conductividad del cable es apropiada, ya que al suministrar los diferentes voltajes (250 V, 500 V, 800 V, 1200 V, 3000 V, 5000 V) y observar estabilización no se presentó lectura actual de fugas, es decir pérdida de voltaje, por lo cual se establece que los 8 cables a estudio se encuentran en buen estado según prueba de alto potencial.

**Tabla 11.** Alto potencial de cables fallados.

<b>N° Cable</b>	<b>250 V (GΩ)</b>	<b>500V (GΩ)</b>	<b>800 V (GΩ)</b>	<b>1.200 V (GΩ)</b>	<b>3.000 V (GΩ)</b>	<b>5.000 V (GΩ)</b>
43	248	501	810	1.213	2.994	5.004
44	261	497	801	1.189	3.010	4.993
45	252	506	789	1.220	2.986	5.010
46	246	504	800	1.204	3.008	5.006
47	250	510	793	1.218	3.012	4.994
48	248	496	799	1.202	2.997	4.995
49	252	510	807	1.204	3.006	5.012
50	256	511	811	1.209	3.008	4.989

**Fuente:** elaboración propia

### 3.3 ASIGNACIÓN DE CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN

Toda la información que fue recopilada, organizada, tabulada que hace referencia al cable en operación activa en el Campo, fue suministrada al programa (Formato de concepto) creado por los investigadores, el cual arrojó los respectivos códigos mediante la programación inicial, los cuales se plasman en la Tabla 12, aun así toda la información adicional se encuentra registrada en el formato mencionado anteriormente (coraza, material, textura, torre de instalación, longitud instalada), el cual cumple con el cargue de información continuo para dar seguimiento a la trazabilidad del cable.

**Tabla 12.** Código asignado a los cables activos.

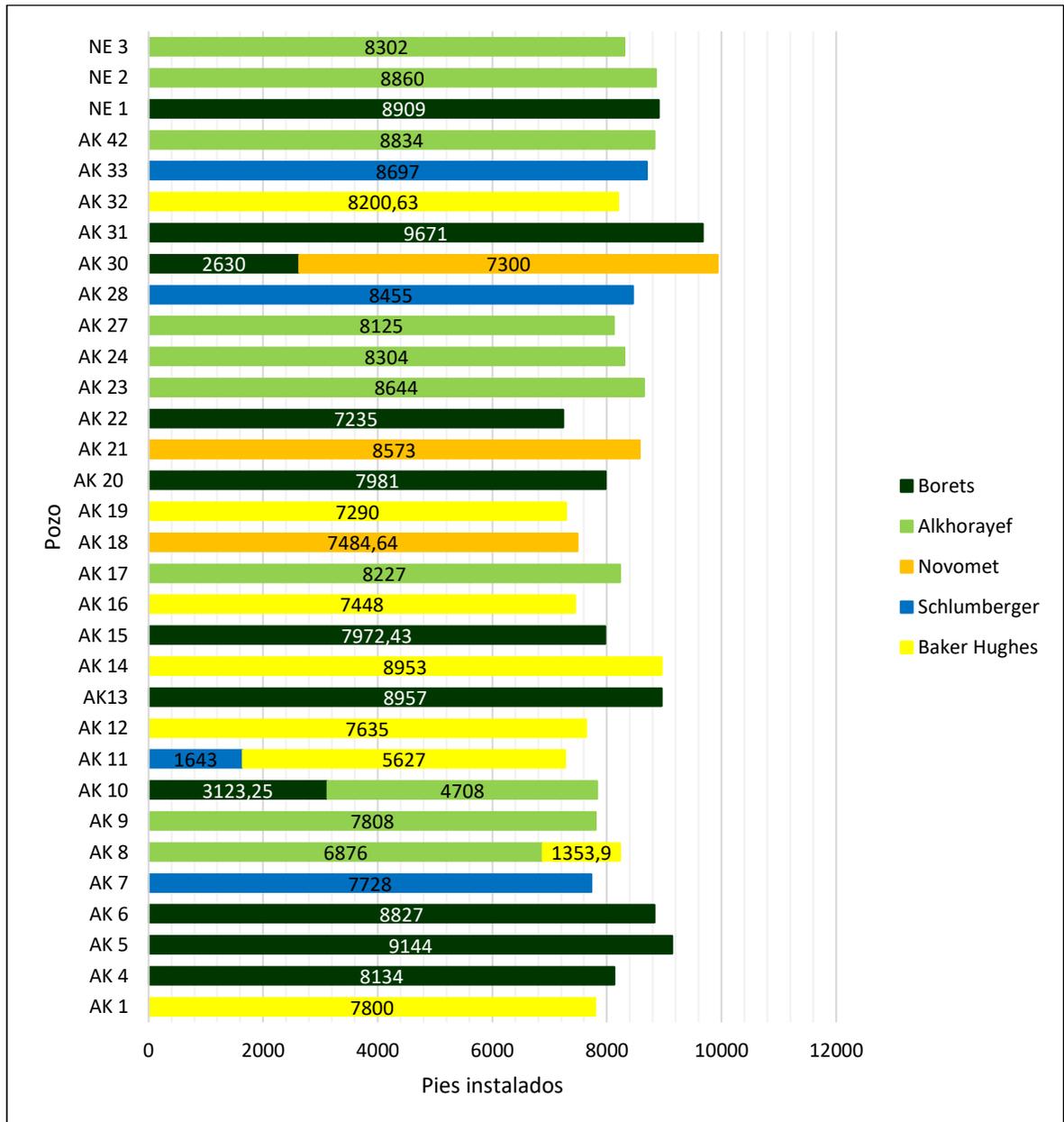
<b>N° Cable</b>	<b>Código preliminar</b>	<b>Código secundario</b>
1	HP1CI15	C1/-/1
2	BP2CII19	C2/-/1
3	BP2CII18	C3/-/1
4	BP2CI19	C4/-/1
5	SP2SI19	C5/-/1
6	LP2CI19	C6/-/1
7	HP2CI19	C7/-/1
8	AP2CI19	C8/-/1
9	KP2CI18	C9/-/1
10	KP2CI18	C10/-/1
11	BP2CI18	C11/-/1
12	HP1CII18	C12/-/1
13	SP2CII18	C13/-/1
14	HP2CII18	C14/-/1
15	HP2CII19	C15/-/1
16	BP2CI19	C16/-/1

<b>Tabla 12. (Continuación)</b>		
<b>N° Cable</b>	<b>Código preliminar</b>	<b>Código secundario</b>
17	HP2CII19	C17/-/1
18	HP2CII19	C18/-/1
19	BP2CII19	C19/-/1
20	HP2CII19	C20/-/1
21	AP2CI19	C21/-/1
22	AP2CI19	C22/-/1
23	KP2CI19	C23/-/1
24	HP2CI19	C24/-/1
25	BP2CII19	C25/-/1
26	NP2CI19	C26/-/1
27	BP2CII19	C27/-/1
28	AP2CII19	C28/-/1
29	AP2CII19	C29/-/1
30	AP2CI19	C30/-/1
31	SP2CI19	C31/-/1
32	NP2CII19	C32/-/1
33	BP2CII19	C33/-/1
34	BP2CII19	C34/-/1
35	HP2CII19	C35/-/1
36	SP2CI19	C36/-/1
37	AP2C219	C37/-/1
38	BP2CI19	C38/-/1
39	BP2CI19	C39/-/1
40	AP2CI19	C40/-/1
41	AP3CI19	C41/-/1
42	AP2CII19	C42/-/1

**Fuente:** elaboración propia

Los 42 cables anteriormente mencionados, instalados en los 32 pozos activos del Campo a la fecha, se representan en la Grafica 10, la cual discrimina las longitudes de cable de potencia instaladas respecto a su compañía proveedora y pozo operativo; a su vez se evidencia los empalmes realizados para cada uno de los cables en subsuelo.

**Gráfica 10.** Longitudes (ft) de cable instalados en pozo.



**Fuente:** elaboración propia

El código plasmado almacena toda la información de interés del cable, la cual proviene de estados mecánicos, reportes de instalación, desinstalación, inspección, entre otros documentos suministrados por parte de ECOPETROL S.A a los autores y se encuentra sintetizada en el entregable generado, cuya interfaz de cable operativo es la expuesta en la Figura 17.

**Figura 17.** Interfaz cable operativo.

GERENCIA DE OPERACIONES DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN CPO - 09																	
CABLE DE POTENCIA EN OPERACIÓN																	
DATOS BASE				INSTALACIÓN			ADICIONALES				OTROS						
N°	PROVEEDOR	TIPO	CONFIGURACIÓN	CAPILAR	DÍA	MES	AÑO	CÓDIGO	LONGITUD	POZO	SECCIÓN	CORRIDA	CÓDIGO	TORRE / RIG	MATERIAL	CORAZA	TEXTURA

**Fuente:** elaboración propia

Al presentar una falla en la bomba, y realizar el respectivo *pull out*, se procede a actualizar el formato en mención de cable operativo, y la información referente a este pasa a la data propia de cable fallado, el formato de la Figura 18 asegura el seguimiento al cable desde su desinstalación.

**Figura 18.** Interfaz cable fallado.

GERENCIA DE OPERACIONES DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN CPO - 09																		
CABLE DE POTENCIA DE SLA FALLADO																		
DATOS BASE				INSTALACIÓN			ADICIONALES				OTROS							
N°	PROVEEDOR	TIPO	CONFIGURACIÓN	CAPILAR	DÍA	MES	AÑO	CÓDIGO	LONGITUD	POZO	SECCIÓN	CORRIDA	CÓDIGO	TORRE / RIG	MATERIAL	CORAZA	TEXTURA	SERIAL

**Fuente:** elaboración propia

Para llevar a cabo un registro estricto de trazabilidad y un cotejo entre la información propia de ECOPETROL S.A y la entregada por las compañías de servicio, se genera un despliegue de dos formularios de inspección, mecánica Figura 19 y eléctrica Figura 20 los cuales aseguraran el cargue de información de operatividad del cable en subsuelo tras las respectivas pruebas.

**Figura 19.** Formulario inspección mecánica del cable

Inspección mecánica del cable de potencia

1. Fractura  
 Sí  
 No

2. Deformado/Doblado  
 Sí  
 No

3. Deteriorado  
 Sí  
 No

4. Quemado  
 Sí  
 No

5. Abrasión  
 Sí  
 No

6. Roto/Reventado  
 Sí  
 No

7. Ampollado  
 Sí  
 No

8. Erosión  
 Sí  
 No

Distancia (ft)

Cancelar      Limpiar      Aceptar

**Fuente:** elaboración propia

**Figura 20.** Formulario inspección eléctrica del cable.

Inspección eléctrica del cable

Prueba de continuidad

A - B

B - C

C - A

Lectura actual de fugas (nA)

A-Gnd

B-Gnd

C-Gnd

Fase a tierra (Ohm)

A - Gnd

B - Gnd

C - Gnd

Unidades tomadas

Cancelar      Aceptar

**Fuente:** elaboración propia

Tras la respectiva inspección, se asignó un código a cada uno de los cables provenientes de sistemas de levantamiento fallados, aunque en este caso, el código almacena en el programa las variables de inspecciones mecánica y eléctrica como validación técnica a su reutilización óptima en fondo. La Tabla 13 presenta los códigos de los cables en mención.

**Tabla 13.** Código asignado a los cables no activos

N° Cable	Código preliminar	Código secundario
43	BP2CII18	C43/-/2
44	HP2CII18	C44/-/2
45	NP2CI19	C45/-/2
46	HP2CI19	C46/-/2
47	HP2CI19	C47/-/2
48	HP2CI19	C48/-/2
49	BP2CI19	C49/-/2
50	BP2CII19	C50/-/2

**Fuente:** elaboración propia

En este caso la interfaz informativa, se toma un formato de cable en *back up*, el cual contiene la información de la inspección realizada como se muestra en la Figura 21

**Figura 21.** Interfaz cable *back up*.

GERENCIA DE OPERACIONES DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN CPO - 09																		
CABLE DE POTENCIA EN BACK UP																		
DATOS BASE				INSTALACIÓN		ADICIONALES				OTROS								
N°	PROVEEDOR	TIPO	CONFIGURACIÓN	CAPILAR	MES	AÑO	CÓDIGO	LONGITUD	POZO	SECCIÓN	CORRIDA	CÓDIGO	TORRE / RIG	MATERIAL	CORAZA	TEXTURA	SERIAL	RL

**Fuente:** elaboración propia

Toda la información referente a cada uno de los cables es almacenada en una base de datos previamente mencionada, la cual compila el historial de cable en cada pozo junto con sus propiedades mecánicas, eléctricas, propias de fabricación e información de interés para la compañía como lo es el *run life*.

Finalmente, los autores hicieron entrega a ECOPETROL S.A de un instructivo paso a paso (Figura 22) que compila la secuencia lógica a seguir de cada una de las

hojas generadas, para asegurar el buen funcionamiento de la herramienta propuesta.

**Figura 22.** Instructivo formato de seguimiento al cable de potencia.

**INSTRUCTIVO FORMATO DE SEGUIMIENTO AL CABLE DE POTENCIA GLC**

**1. Hoja cable nuevo.**

Al realizar compra de cable:

1. Seleccione proveedor, tipo de cable, configuración, capilar, fecha de instalación, tipo de material, coraza, textura.
2. Seleccione pozo de instalación, en caso de no encontrar pozo en la lista desplegable actualice en la hoja 'BASE'.
3. Digite longitud instalada en ft.
4. Digite rig de instalación en mayúscula y con espacio (COMPAÑÍA ##)
5. Digite serial sin espacios.
6. Click al botón agregar cable.

**2. Hoja cable en**

VISUALIZACIÓN DE CABLE EN SUBSUELO

1. Al presentar falla en algún pozo, seleccione el nombre de la lista desplegable.
2. Click al botón Actualizar.
3. Verifique que la información haya sido eliminada de la hoja y pegada en 'CABLE FALLADO'

**3. Hoja cable fallado**

**PREVIO A LA INSPECCIÓN**

1. Imprima los formatos de sticker de seguimiento.
2. Identifique el cable que se inspeccionara (Pozo previo)
3. Complete la información respectiva en el sticker (Manual o digital)

**POSTERIOR A LA INSPECCIÓN**

1. Seleccione el pozo en el cual estuvo instalado el cable previamente.

**Fuente:** elaboración propia

### 3.4 ANÁLISIS FINANCIERO

Para llevar a cabo la realización del estudio financiero, se tomaron inicialmente los costos promedio que estipulan las compañías prestadoras de servicios a ECOPETROL S.A por compra de cable e inspección del mismo, dichos precios se consignaron en la Tabla 14.

Los valores de conversión entre divisas, se tomaron respecto a la TRM promedio de los últimos 6 meses que presenta el grupo Aval en sus balances semestrales, siendo esta de 3392.8 COP/USD.

**Tabla 14.** Precios promedio cable de potencia

Servicio	USD/FT	COP/FT
Compra de cable	11.58	39288.6*
Inspección de cable	0.56	1911.2*

\*Valores sin IVA

**Fuente:** elaboración propia

Posterior a esto se generó un promedio de longitud de cable de potencia instalado en subsuelo con los 32 pozos activos a la fecha, el cual presento un valor de 8272.68 ft de cable/pozo.

Para realizar el análisis de costo reducido que se generaría al reutilizar el cable de potencia, se consideraron las fallas al sistema de levantamiento artificial del Campo durante el 2019, las cuales se presentaron en 13 de 32 pozos operativos (40,6%), y tomando en cuenta el crecimiento del Campo de los últimos años, se tomó un estimado de 45 pozos para el 2020 de los cuales fallaran 18 si se mantiene el porcentaje presentado en el año inmediatamente anterior. Dicho esto, y tras los cálculos asociados se generó la Tabla 15, en la cual se exponen los costos de cable por pozo, y costos anuales sin IVA.

**Tabla 15.** Costos asociados al cable sin IVA.

	<b>USD/POZO</b>	<b>USD @2019</b>	<b>USD @2020</b>
Compra	95797.64	1245369.41	1724457.64
Inspección	4660.08	60581.15	83881.59
Ahorro	91137.55	1184788.26	1640476.05

**Fuente:** elaboración propia

Asimismo, se generó la Tabla 16, la cual toma en cuenta el IVA como impuesto adicional del 19% sobre el valor fijado previamente.

**Tabla 16.** Costos asociados al cable con IVA.

	<b>USD/POZO</b>	<b>USD @2019</b>	<b>USD @2020</b>
Compra	113999.19	1481989.6	2051985.6
Inspección	5545.5	72091.57	99819.09
Ahorro	108453.69	1409898.03	1952166.5

**Fuente:** elaboración propia

Al comparar las tarifas de compra e inspección de cable, se cuantifico un costo reducido de 108453.69 USD/Intervención a pozo y un estimado de 1.9 millones de dólares anualmente; dicho ahorro se presentaría si todos los cables fueran óptimos para reutilización en fondo, pero este es un caso ideal, por lo cual los autores proponen dos escenarios adicionales, uno favorable y otro desfavorable.

En la Tabla 17 se expone el caso favorable, en el cual el 87.5% (Según el presente estudio) de los cables es apto para una nueva instalación, por lo tanto el 12,5% de la longitud del cable a instalar (1034,085 ft) debe ser adquirido como nuevo.

**Tabla 17.** Escenario favorable (Costo reducido)

	<b>USD/POZO</b>	<b>USD @2019</b>	<b>USD @2020</b>
Compra (Total)	113999.19	1481989.6	2051985.6
Inspección	5545.5	72091.57	99819.09
Compra 12,5%	11974.7043	155671.16	215544.68
Total reutilización 87,5%	17520.2	227762.73	315363.77
Ahorro	96478.98	1254226.87	1736621.8

**Fuente:** elaboración propia

De otro lado la Tabla 18 contiene los valores para un escenario desfavorable con un 35% de cables clasificados como no operativos, es decir se toma en cuenta la compra de 2895.438 ft de cable de potencia.

**Tabla 18.** Escenario desfavorable (Costo reducido)

	USD/POZO	USD @2019	USD @2020
Compra (Total)	113999.19	1481989.6	2051985.6
Inspección	5545.5	72091.57	99819.09
Compra 35%	33529.17	435879.24	603525.09
Total reutilización 65%	39074.67	507970.8	703344.18
Ahorro	74924.52	974018.79	1348641.41

**Fuente:** elaboración propia

**3.4.1 VPN.** Para la evaluación representativa del indicador del valor presente neto, se evaluaron dos escenarios económicos y de operación, pero en los dos se tomó como input de información una producción de crudo diaria de 500 BOPD, un EBIDTA/Bbl de 30 USD y finalmente un *run life* del sistema de levantamiento artificial de un año.

**Tabla 19.** Valor presente neto

	INVERSIÓN/POZO	BENEFICIO/POZO	NETO/POZO
Compra	113999.19	5400000	5286000,81
Inspección	5545.5	5400000	5394454,5
Diferencia	108453.69		108453.69

**Fuente:** elaboración propia

En la Tabla 19 se muestra el análisis del valor presente neto, calculado con el respectivo flujo de caja; el cual presenta como único diferencial la inversión, por lo tanto, la diferencia del VPN es la misma establecida en el costo reducido tras la introducción de la práctica.

Nuevamente tomando como base de análisis un único pozo se evalúa según los dos escenarios establecidos previamente en la Tabla 20 y 21.

**Tabla 20.** Valor presente neto (Escenario favorable)

	INVERSIÓN/POZO	BENEFICIO/POZO	NETO/POZO
Compra total	113999.19	5400000	5286000,81
Inspección y reutilización (87.5%)	17520.2	5400000	5382479.8
Diferencia	96478.98		96478.98

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 21.** Valor presente neto (Escenario desfavorable)

	<b>INVERSIÓN/POZO</b>	<b>BENEFICIO/POZO</b>	<b>NETO/POZO</b>
Compra total	113999.19	5400000	5286000,81
Inspección y reutilización (65%)	39074.67	5400000	5360925.33
Diferencia	74924.52		74924.52

**Fuente:** elaboración propia

Al evidenciar que en los tres casos evaluados se presenta un VPN>0 y mayor al VPN registrado por compra de cable, se evidencia que la reutilización del cable de potencia es una práctica no solo viable técnicamente sino también económicamente ya que representa ahorro considerable para la compañía anualmente.

**3.4.2 TIR.** De igual manera la tasa interna de retorno se evaluó para los dos casos de estudio previamente mencionados.

**Tabla 22.** Tasa Interna de Retorno

	<b>INVERSIÓN/POZO</b>	<b>BENEFICIO/POZO</b>	<b>TIR/POZO</b>
		<b>(MES)</b>	
Compra	113999.19	5400000	<b>394,74%</b>
Inspección	5545.5	5400000	<b>8114,69%</b>
Diferencia	108453.69		<b>7719,95%</b>

**Fuente:** elaboración propia

En la Tabla 22 se muestra el análisis de la tasa interna de retorno, tras trasladar los costos asociados a la producción al presente, al tener establecido el mismo comportamiento de esta, la diferencia del TIR es la misma establecida en el costo reducido tras la introducción de la práctica, tomando como base de análisis un único pozo.

De igual manera en las Tablas 23 y 24 se evidencia el análisis de la tasa interna de retorno para el caso favorable y desfavorable respectivamente.

**Tabla 23.** Tasa interna de retorno (Escenario favorable)

	<b>INVERSIÓN/POZO</b>	<b>BENEFICIO/POZO</b>	<b>TIR/POZO</b>
Compra	113999.19	5400000	<b>394,74%</b>
Inspección y reutilización (87,5%)	17520.2	5400000	<b>2568,46%</b>
Diferencia	96478.98		<b>2173,72%</b>

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 24.** Tasa interna de retorno (Escenario desfavorable)

	<b>INVERSIÓN/POZO</b>	<b>BENEFICIO/POZO (MES)</b>	<b>TIR/POZO</b>
Compra	113999.19	5400000	<b>394,74%</b>
Inspección y reutilización (65%)	39074.67	5400000	<b>1145,78%</b>
Diferencia	74924.52		<b>751,04%</b>

**Fuente:** elaboración propia

Al evidenciar un TIR>0 y mayor al TIR registrado por compra de cable, se evidencia que la reutilización del cable de potencia es una práctica no solo viable técnicamente sino también económicamente dando grandes ahorros a la compañía anualmente.

Los valores resultantes del TIR en todos los escenarios planteados si bien muestran una favorabilidad al momento de inspeccionar el cable, no son datos representativos dentro del proyecto debido a que no son tomadas en cuenta otras operaciones como lo sería la compra de la bomba electrosumergible, transporte del equipo de levantamiento artificial, equipo de superficie, tratamiento del fluido, entre otras operaciones que no fueron evaluadas en el proyecto.

Para la compañía la tasa interna de retorno es uno de los factores de decisión para la determinación de la viabilidad de un proyecto, por ende, teniendo en cuenta los requerimientos de la compañía se realizó el análisis del TIR, el cual, aunque arroje resultados incoherentes muestra mayor rentabilidad al inspeccionar y reutilizar el cable de potencia.

## 4. CONCLUSIONES

- La evaluación mecánica del cable y específicamente de su armadura, es de suma importancia debido a que el quien protege a las tres fases conductoras del contacto con fluidos en fondo.
- La determinación de la longitud del cable en carrete debe ir acompañada de una inspección visual para evaluar la presencia de fractura, deformación, deterioro, quemadura, abrasión o ruptura del cable.
- La prueba de aislamiento eléctrico, evalúa la resistencia generada entre cada fase respecto a tierra tras suministrarle al cable 5 kV, (valor que excede el necesario para operar en fondo) y debe registrar un mínimo de 2 GΩ para una futura reutilización, valor que superaron los cables evaluados en su totalidad.
- Las tres fases de cobre del cable deben estar balanceadas en su resistencia fase a fase o de continuidad para garantizar operatividad en fondo, por lo cual el 12,5% de los cables evaluados fueron descartados para reutilización debido a este factor eléctrico.
- Los cables de potencia dentro del Campo CPO-09 no son expuestos a condiciones extremas que afecten su integridad física y funcionamiento, esto se evidencio en el bajo desgaste encontrado durante la inspección el cual determino la viabilidad técnica de reutilización en fondo.
- Los daños asociados a los cables de potencia más frecuentes son atribuidos a empalmes mal ejecutados, sobreesfuerzos de fricción o arrastre, y al presentar una variación de voltaje teniendo desgaste en los sellos del cable.
- Con el estudio de la trazabilidad del cable de potencia instalado en subsuelo, es posible conocer su *run life*, estado eléctrico, mecánico, longitud real, material, calibre y demás variables que determinan su operatividad en subsuelo en nuevas operaciones.
- El código generado permite facilitar a la empresa la búsqueda de datos y análisis de los pozos obteniendo como resultado un análisis de la integridad de cada cable ya usado y los cables en operación.
- Desde el punto de vista económico la implementación de la práctica de reutilización de cable es viable, debido a la rentabilidad que representa para el Campo, el cual reduciría sus costos en aproximadamente 1.9 millones de dólares anuales en un escenario ideal.

- Al tener en cuenta que no todo el cable inspeccionado resultara adecuado para reutilización en subsuelo se plantearon dos escenarios de reutilización, en los cuales el % de cable óptimo fue de 87,5 y 65% respectivamente; dados estos casos se obtuvo un costo reducido para la compañía de 1.7 y 1.3 millones de dólares anuales respectivamente.
- El indicador económico TIR no es representativo en este estudio, debido que desestiman múltiples variables de costos asociados al equipo y por ende arroja valores incoherentes.

## 5. RECOMENDACIONES

- Realizar la adaptación del modelo de formato suministrado como entregable, a un modelo operativo con alta capacidad de almacenamiento de información, para que este pueda ser implementado en cualquier gerencia de ECOPETROL S.A.
- Generar trazabilidad para el análisis de la integridad del MLE (Motor lead extensión), debido a que a pesar de no tener longitudes tan representativas como el cable de potencia, es un activo de la empresa que al momento no presenta registro.
- Incluir la data alusiva a las empresas fabricantes de cable de potencia, dado que solo se realizó el registro con proveedores.

## BIBLIOGRAFÍA

ALKHOREYEF PETROLEUM COLOMBIA. Instructivo inspección y prueba cable de potencia. Colombia. La entidad 2018.3.11-14 p.

ALKHOREYEF PETROLEUM COLOMBIA. ESP Power Cable Range. [Sitio WEB]. La entidad. [15, febrero, 2020]. Disponible en: <https://www.alkhorayefpetroleum.com/Alkhorayef/media/AlkhorayefMedia/PDF/SP ECTRUM-ESP-Power-Cable-Range.pdf>

ASTM. Designation A459 – 08. Standard Specification for Zinc – Coated Flat Steel Armoring Tape. Estados Unidos. La entidad.2013. 1.2 p.

ASTM Designation ASTM B33. Standard specification for tin – coated soft or annealed copper wire for electrical purposes. Estados Unidos. La entidad. 2020. 2.3 p.

BANCO SANTANDER. ¿Qué es el EBITDA y cómo se calcula?. [Sitio WEB]. Colombia. La entidad. [5, marzo, 2020]. Disponible en <https://www.bancosantander.es/es/diccionario-financiero/ebitda>

CANALES, Ricardo. CRITERIOS PARA LA TOMA DE DECISIÓN DE INVERSIONES. Revista Electrónica de Investigación en Ciencias Económicas. [en línea].2015 (3). 109-115. [Consultado 15, febrero 2020]. ISSN: 2308 – 782X. Disponible en <https://www.camjol.info/index.php/REICE/article/view/2022>

CENTElsa. Cables para bombas sumergibles. [Sitio WEB]. La entidad. [15, febrero, 2020]. Disponible en <http://www.centelsa.com.co/archivos/Plegable-Bombas-Sumergibles.pdf>

CENTElsa. Ensayos de campo. [Sitio WEB]. La entidad. [15, febrero, 2020]. Disponible en <http://www.centelsa.com.co/archivos/ensayos-decampo-final.pdf>

CENTRO DE ESCRITURA JAVERIANO. Manual normas ICONTEC. [Sitio WEB]. Cali, Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. [15, febrero, 2020] Disponible en: <https://www.javerianacali.edu.co/centro-escritura/recursos/manual-de-normas-icontec>

ECOPETROL S.A. Contrato E&P no. 08 del 2009, Informe semestral de operaciones 2018.Colombia. La entidad. 2018.

GNANARAJ, et al. Testing of umbilical cable for reliable and safe operation. En *ISOPE. The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*. [en

línea]. Sapporo: ISOPE, junio de 2018, ISOPE-I-18-496, [consultado: 10 de febrero de 2020]. ISBN 978-1-880653-87-6.

GRUPO AVAL. Tasa representativa del Mercado. [Sitio WEB]. Colombia. La entidad. [5, marzo, 2020]. Disponible en <https://www.grupoaval.com/wps/portal/grupo-aval/aval/portal-financiero/monedas/dolar/datos-historicos>

HARRIS, Dennis; BANMAN Mark y MALONE, David. Design and Qualification Testing of ESP Cable to Improve ESP System Run Life. En: *SPE Gulf Coast Section Electric Submersible Pumps Symposium*. [en línea]. Texas: SPE, mayo de 2019, SPE-194402-MS, [consultado: 10 de febrero de 2020] DOI 10.2118/194402-MS

IEEE Recommended Practice for Specifying Electric Submersible Pump Cable - Polypropylene Insulation Estados Unidos. La entidad. 2013. 33-35 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

KERITE. Cables para bombas eléctricas sumergibles (ESP). [Sitio WEB]. La entidad. [10, febrero, 2020]. Disponible en [https://www.marmonutility.com/Portals/0/Pump/MU035\\_KeritePumpCable\\_ES-resized\\_lores\\_nopocket.pdf?ver=2018-03-14-161139-887](https://www.marmonutility.com/Portals/0/Pump/MU035_KeritePumpCable_ES-resized_lores_nopocket.pdf?ver=2018-03-14-161139-887)

## **ANEXOS**

## **ANEXO A**

### **DESIGNATION ASTM B33**

Standard specification for tin – coated soft or annealed copper wire for electrical purposes. (Ver en CD – ROM)

## **ANEXO B**

### **DESIGNATION ASTM A459**

Standard specification for zinc – coated flat Steel armoring tape. (Ver en CD – ROM)

## **ANEXO C**

### **DESIGNATION IEEE STD 1019**

IEEE Recommended practice for specifying electric submersible pump cable –  
polypropylene insulation (Ver en CD – ROM)