

Rehabilitación de cable BES: Estrategia de extensión de vida útil, Optimización de costos, y transición a un modelo circular.

Yulieth Vanessa Ayala Ferreira

Trabajo de grado para optar por el título de Especialista en Producción de Hidrocarburos

Director

Jorge Andres Sáchica Ávila

Magíster en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Especialización en Producción de Hidrocarburos

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada con profundo amor a mi familia, que son mi inspiración y motivación en todo momento. Gracias a mis padres Wilson y Ana Milena decidí iniciar este proceso de aprendizaje, enfrentando miedos con el tiempo que implicaba, pero con la satisfacción del deber cumplido, la constancia y la perseverancia a lo largo de estos meses.

Agradezco de manera especial a la empresa Azul Energy Colombia SAS que me brindo su apoyo desde el inicio y con cual fue posible el desarrollo de este tema tan increíble e interesante para nuestra industria.

Asimismo, dedico este trabajo a mi familia y a todas las personas que me apoyaron en este camino, a mi amigo Cesar que me ayudo en la adecuación de normas necesarias para la entrega final.

En fin, agradezco a todos los que formaron parte de este lindo capitulo de mi vida académica y profesional.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	14
1.1. Objetivo general	14
1.2. Objetivos específicos	14
1.3. Fallas Asociadas Al Cable De Potencia De Un Sistema De Bombeo Electrosumergible (BES)	25
1.1.3 Clasificación de fallas en Cable de potencia BES	26
1.4. Condiciones Operativas Que Afectan El Desempeño Del Cable De Potencia BES.....	32
2.1.1 Altas Temperaturas	32
1.1.4 Cantidad de gas	33
1.1.4 Fluido altamente corrosivos	33
1.5. Pruebas Aplicadas Al Cable De Potencia BES.....	34
1.1.5 Prueba de continuidad.....	35
1.1.5 Prueba Megger	35
1.1.5 Prueba Hipot	36
1.1.5 Inspección visual y física	36
1.1.5 Prueba a tubo capilar.....	37
2. Diseño de proceso de rehabilitación de cable de potencia BES	38
2.1. Esquema de selección de cables usados para proceso de rehabilitación	39
2.2. Proceso de rehabilitación de cable BES.....	40
2.1.2 Estación de Inspección inicial y pruebas de ingreso.....	40

2.1.2 Estación de remoción de armadura	42
2.1.2 Estación de limpieza de fases	44
2.1.2 Estación de postura armadura con/sin capilar.....	46
3. Mercado potencial para el proceso de rehabilitación de cable en sistemas BES.....	50
3.1. Sistema de bombeo electrosumergible (BES) en Colombia	51
3.2. Cable disponible para proceso de rehabilitación en Colombia.....	57
3.3. Contribución a la sostenibilidad y reducción de la huella de carbono.....	61
3.1.3 Estimación en la huella de Carbono mediante el proceso de rehabilitación de Cable.....	64
4. Conclusiones	69
5. Recomendaciones	71
Referencias bibliográficas.....	72
Apéndices.....	76

Tabla de figuras

Figura 1. Configuración Cable redondo vs Cable Plano.....	17
Figura 2. Configuración de conductores.....	19
Figura 3. Empalme invisible con Nicopress.	26
Figura 4. Forma adecuada de realizar cargue de carrete de cable BES	28
Figura 5. Preparación de cable.....	29
Figura 6. Cable de potencia BES en condición de corrosión.....	34
Figura 7. Flujograma de selección cables para rehabilitación.	40
Figura 8. Etapa de inspección cable.....	41
Figura 9. Proceso ilustrativo de remoción de armadura	43
Figura 10. Condiciones físicas durante remoción de armadura.	43
Figura 11. IAM "Interlock Armor Machine"	46
Figura 12. Esquema de estación de postura de armadura	48
Figura 13. Registros fotográficos de cable BES después de proceso de rehabilitación. ...	49
Figura 14. Distribución de pozos activos en Colombia	52
Figura 15. Producción fiscalizada de petróleo por E&P.....	54
Figura 16. Pozos perforados año 2023-2024	58
Figura 17. Proyección comparativa entre 2025 y 2030 en sistemas BES.....	60
Figura 18. Proceso de producción de cable nuevo.....	66
Figura 19. Proceso de producción cable recuperado.	66
Figura 20. Composición del sistema BES.	77

Tabla de tablas

Tabla 1. Consideraciones por tamaño de cable.....	20
Tabla 2. Características de los conductores de los cables BES	20
Tabla 3. Selección de material tubo capilar	24
Tabla 4. Tabla resumen de clasificación de fallas en cables BES y viabilidad en rehabilitación.....	31
Tabla 5. Pruebas asociadas a cable de potencia BES.....	34
Tabla 6. Especificaciones de voltaje en prueba Hipot	36
Tabla 7. Resumen general del proceso de rehabilitación de cable de potencia BES.....	50
Tabla 8. Distribución de sistemas de levantamiento artificial por cuenca.....	53
Tabla 9. Distribución sistema BES por Operadora en Colombia 2025	55
Tabla 10. Distribución de cable de potencia por calibre AWG	55
Tabla 11. Distribución de cable de potencia respecto a uso de tubo capilar	56
Tabla 12. Proyección de pozos ESP en Colombia.....	59
Tabla 13. Proyección de pies totales para proceso de rehabilitación 2025-2030.	61
Tabla 14. Normas o estándares internacionales para la cuantificación de emisiones GEI	64
Tabla 15. Comparación de la huella de carbono en el proceso de manufactura: cable nuevo Kerite vs cable rehabilitado	67

Lista de apéndices

Apéndice A. Sistemas de bombeo electrosumergible (BES).....	76
---	----

Título: Rehabilitación de cable BES: Estrategia de extensión de vida útil, Optimización de costos, y transición a un modelo circular. *

Autor: Yulieth Vanessa Ayala Ferreira**

Palabras Clave: cable BES, bombeo electrosumergible, rehabilitación, economía circular, huella de carbono.

Descripción: El cable de potencia es uno de los componentes más críticos y costosos de un sistema de bombeo electrosumergible (BES), siendo responsable de más del 20% de las fallas del sistema y de cerca del 30% del costo total del equipo. Este trabajo de grado plantea el desarrollo de un proceso de rehabilitación para cables BES retirados de pozo que, sin estar aptos para su reuso directo, conservan condiciones eléctricas y mecánicas recuperables. Para ello, se identificaron y clasificaron las principales fallas eléctricas, mecánicas y de manufactura asociadas al cable de potencia, estableciendo criterios técnicos de selección basados en su historial operativo, pruebas eléctricas (continuidad, Megger, Hipot) e inspección física. A partir de este análisis se diseñó un proceso técnico estructurado en cuatro estaciones de trabajo: inspección y pruebas de ingreso, remoción de armadura, limpieza de fases y postura de armadura con o sin tubo capilar, cada una con puntos de control de calidad y trazabilidad. Adicionalmente, se evaluó el mercado potencial de este proceso en Colombia para el periodo 2025-2030, estimándose cerca de 1.282 pozos candidatos a reemplazo de cable y un volumen aproximado de 8,97 millones de pies de cable disponibles para rehabilitación. Finalmente, se comparó la huella de carbono del proceso de manufactura de un cable nuevo frente a uno rehabilitado, encontrándose una reducción cercana al 80% en las emisiones de CO2 equivalente por pie de cable. Los resultados evidencian que la rehabilitación de cables BES constituye una estrategia técnica, económica y ambientalmente viable, alineada con los principios de la economía circular en la industria de hidrocarburos.

*Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Producción de Hidrocarburos. Director: Jorge Andres Sáchica Ávila. Magíster en Ingeniería.

Title: ESP Cable Rehabilitation: A Strategy for Extending Service Life, Optimizing Costs, and Transitioning to a Circular Model.*

Author(s): Yulieth Vanessa Ayala Ferreira**

Key Words: ESP cable, electric submersible pumping, rehabilitation, circular economy, carbon footprint.

Description: The power cable is one of the most critical and expensive components of an electric submersible pumping (ESP) system, accounting for more than 20% of system failures and nearly 30% of the total equipment cost. This undergraduate thesis proposes the development of a rehabilitation process for ESP cables withdrawn from the well that, while not suitable for direct reuse, retain recoverable electrical and mechanical conditions. To this end, the main electrical, mechanical, and manufacturing-related failures associated with the power cable were identified and classified, establishing technical selection criteria based on operating history, electrical testing (continuity, Megger, Hipot), and physical inspection. Based on this analysis, a structured technical process was designed comprising four work stations: incoming inspection and testing, armor removal, phase cleaning, and armor reinstallation with or without a capillary tube, each including quality-control and traceability checkpoints. In addition, the potential market for this process in Colombia was assessed for the 2025-2030 period, estimating approximately 1,282 wells as candidates for cable replacement and around 8.97 million feet of cable available for rehabilitation. Finally, the carbon footprint of manufacturing a new cable was compared with that of a rehabilitated cable, showing a reduction of nearly 80% in CO₂-equivalent emissions per foot of cable. The results show that ESP cable rehabilitation is a technically, economically, and environmentally viable strategy, aligned with circular economy principles in the hydrocarbon industry.

*Degree Work.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Specialization in Hydrocarbon Production. Director: Jorge Andres SÁCHICA Ávila. Master of Engineering.

Introducción

Los sistemas de levantamiento artificial constituyen un componente fundamental en la etapa de producción de un pozo petrolero, ya que se implementan cuando la presión del yacimiento no es suficiente para permitir el flujo natural de los hidrocarburos hacia la superficie. Actualmente, se estima que aproximadamente el 95 % de los pozos de petróleo y gas en el mundo requieren algún tipo de sistema de levantamiento artificial que brinde la energía necesaria para transportar el fluido desde el fondo del pozo hasta superficie. (Novomet, 2025).

Actualmente el sistema de levantamiento de bombeo electrosumergible (BES) es uno de los métodos de levantamiento artificial más implementado a nivel nacional y mundial, especialmente en pozos de alta producción, ya que se destaca por su alta capacidad y eficiencia en manejos altos de volúmenes. Sin embargo, una de sus desventajas más grandes es el alto costo asociado al sistema. Según reportes de taladro en Campetrol a finales de 2023 más del 50% de los pozos con sistemas de levantamiento utilizan tecnología BES, teniendo un aumento de 4% respecto al año anterior. (Campetrol, 2023). Su composición principal se encuentra en superficie, fondo y cable.

El Cable BES es un componente crítico y a la vez sensible dentro del sistema, su función principal es transmitir la energía eléctrica desde superficie hasta el motor ubicado en el fondo del

pozo, permitiendo así el funcionamiento de la bomba. Adicionalmente, este cable es responsable de conducir las señales de Presión y Temperatura generadas por los sensores, lo cual resulta esencial para garantizar un monitoreo y control efectivo del sistema en tiempo real. Su configuración convencional consta de tres conductores de cobre (sólidos o trenzados), recubiertos por un aislamiento de EPDM, seguido por una cubierta de plomo que proporciona una barrera contra fluidos agresivos y presencia de gas en el pozo, protegido mecánicamente por una cinta (braid) y finalmente por una armadura de acero galvanizado, diseñada para soportar las condiciones mecánicas de la instalación. En ciertos casos, el cable también incorpora un tubo capilar (comúnmente SS316L 3/8" x 0,049") utilizado para la inyección de productos químicos. El cable de potencia del sistema es el responsable del más del 20% de las fallas que ocurren en el sistema en general y comúnmente se producen al principio de la vida útil del sistema. (Harris et al., 2019). A lo largo de los años y debido a los altos costos asociados a intervenciones por fallas del equipo BES y sabiendo que el cable corresponde al 30% del costo total del sistema, se ha optado por el reusó del cable dentro del pozo siempre que cumpla con los parámetros eléctricos (normas asociadas al cable IEEE 1017.2, API 11S6) y mecánicos. Es por ello que la confiabilidad del cable de potencia en un sistema BES es de alta importancia, ya que una falla puede concurrir a altos costos operacionales (intervención a pozo), posible sustitución del cable (gastos inesperados no deseados por las operadoras), y diferida de producción.

Las grandes compañías petroleras en el país han venido trabajando e impulsando modelos de economía circular, enfocado en minimizar impactos negativos tanto ambientes como sociales (uso de recursos naturales, emisiones de CO₂, generación de residuos) impulsando una producción y consumo más sostenible y amigable en sus operaciones.

Una de estas compañías es Ecopetrol, que desde el año 2019 inició a implementar estrategias de economía circular en conjunto con entidades gubernamentales como la ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales), el Ministerio de Ambiente y la ACP (Asociación Colombia de Petróleo y Gas). Esta colaboración buscaba definir una estrategia integral para todas las operaciones a nivel nacional, con el objetivo de minimizar los impactos ambientales y, al mismo tiempo, optimizar el uso de los recursos. (*Ecopetrol | Economía circular en pro del desarrollo*, s. f.) y así en el año 2024 realiza una medición del nivel de madurez en circularidad mediante 4 dimensiones: materiales, residuos, agua y emisiones; con el fin de estar alineado con las metas que se encuentran en la **Estrategia de Sostenibilidad 2040** y estar paralelo con los líderes de la industria Oil&Gas.

Es por esto por lo que el proceso de rehabilitación de cables presenta una oportunidad valiosa en el sector Oil&Gas, no solo por el potencial de optimización de costos, si no por la posibilidad de extensión de vida útil de recursos, categorizados no reutilizables, conservan y representan un alto valor operativo para las compañías operadoras. Además, contribuye

significativamente a la sostenibilidad ambiental alienándose a los estándares buscados en un futuro por las empresas.

1. Objetivos

1.1.Objetivo general

Plantear el desarrollo de un proceso de rehabilitación para cables BES que permita extender la vida útil del cable BES reducir costos operativos y contribuir a la transición hacia un modelo de economía circular en la industria de hidrocarburos.

1.2.Objetivos específicos

- I. Identificar y clasificar las principales fallas del cable BES, estableciendo criterios técnicos para la selección de cables aptos para su reacondicionamiento
- II. Diseñar un proceso técnico de rehabilitación para cables BES que asegure su confiabilidad operativa y el cumplimiento de los estándares mínimos.
- III. Evaluar el mercado potencial para la aplicación del proceso de rehabilitación de cables BES en Colombia, proyectando su impacto en reducción de costos operativos y de la huella de carbono.

Marco Teórico

Sistemas de bombeo electro sumergible (BES)

El bombeo electro sumergible es uno de los métodos de levantamiento artificial más utilizados actualmente en la industria petrolera, y esto es debido a su capacidad de manejar altos volúmenes de fluidos y operación en ambientes exigentes de presión, temperatura y profundidad. (Takacs, 1947). Su rango de operación va desde 100 a 30.000 BPOD en caudal, profundidades entre 5.000 a 15.000 pies, y su rango de eficiencia está entre el 18% a 68%, así mismo son utilizados tanto en pozos on shore y off shore, verticales o desviados. (Suquillo & Samuel, 2017).

El principio de funcionamiento básico de un sistema BES se basa en impulsar el fluido de yacimiento a superficie mediante la rotación centrífuga de una bomba (Escalante, 2015).

Una unidad típica de bombeo electro sumergible está compuesta principalmente por los equipos de superficie, equipo de fondo, y cable de potencia, y se explica en el Apéndice A.

Cable de potencia:

Cable trifásico encargado de suministrar la energía eléctrica desde superficie hasta el motor en fondo, además de poder transmitir las señales de presión y temperatura dadas por el sensor de fondo del equipo. (Castro & Daniel, 2019).

El cable constituye un elemento crítico dentro de la operación, ya que como se menciona anteriormente brinda la energía necesaria al motor para su correcto funcionamiento, su diseño debe garantizar una transmisión continua de voltaje y corriente a condiciones extremas de Temperatura y Presión.

El correcto diseño, selección e instalación del cable no solo asegura la continua operatividad del sistema, sino que además incide en costos de intervención de pozos asociados a fallas

del cable de potencia. Por ello, su estudio resulta vital dentro de cualquier análisis de confiabilidad del sistema BES.

Funcionamiento del Cable de Potencia BES.

El cable de potencia BES constituye en vínculo eléctrico fundamental entre superficie y el motor eléctrico del sistema ubicado en fondo de pozo, el cual se extiende desde la cabeza del motor hacia el cabezal del pozo, sujeto a lo largo de la tubería de producción asegurado con protectores de cable. (Díaz & Varón, 2014). Su función principal es transmitir energía eléctrica trifásica de media tensión, generalmente es un rango de 3.000 a 5.000 voltios, desde el VSD hasta el motor sumergido, permitiendo conversión de energía eléctrica en energía mecánica para impulsar la bomba. El cable además no solo debe garantizar un paso eficiente de corriente, si no también soportar condiciones extremas de operación como altas temperaturas y presiones, y así mismos fluidos corrosivos como H₂S y CO₂.

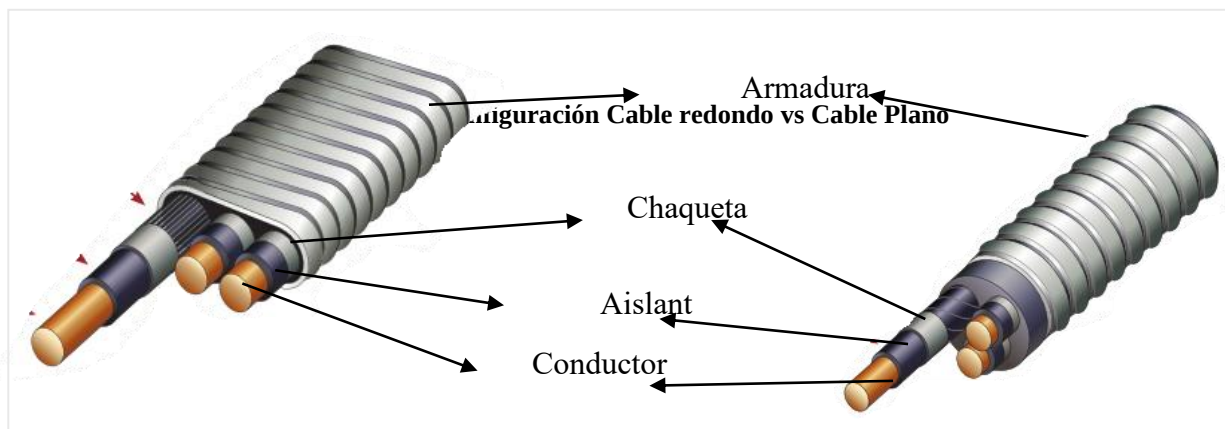
Su diseño consta de 3 conductores de cobre, aislamiento (el más común actualmente es EPDM), barrera de plomo, armadura y en algunos casos tubo capilar, todo esto en conjunto proporcionan estabilidad eléctrica y mecánica, permitiendo soportar esfuerzos de tensión, compresión y algún pequeño mal manejo durante su instalación y operación del pozo. El cable BES es instalado paralelo a la tubería de producción, fijados por protectores de cable para así mayor estabilidad durante su bajada ya que este desciende largas longitudes hasta alcanzar el MLE y así el motor eléctrico; En estas condiciones el cable debe mantener su integridad y su buen desempeño, ya que contemplar una falla asociada al cable conlleva parada total del sistema BES, implicando altos costos operativos y diferida al pozo. Es por esto, que el buen funcionamiento del cable asegura la eficiencia completa del sistema, y más aún contribuye un factor crítico en confiabilidad y costos adicionales.

Partes de un Cable BES

El cable de potencia BES es construido en configuración redonda y plana; la elección de su uso depende del espacio disponible entre tubing y diámetro interno del casing (Lozada Dias & Gaitán Varón, 2014a), sin embargo el uso de cable redondo ayudar en el balance uniforme entre las 3 fases que componen el cable. Figura 2

El diseño final del cable BES se define de acuerdo con las condiciones específicas de cada pozo, incorporando criterios como profundidad, temperatura de operación y la composición del fluido. En función de estos parámetros, se selecciona el material de la armadura (que actúa como blindaje externo) para garantizar resistencia mecánica y protección contra fluidos corrosivos; el espesor de la barrera de plomo para proporcionar aislamiento frente a gases presentes en el pozo (H_2S o el CO_2), y el uso de tubo capilar cuando se requiere inyección de inhibidores químicos.

Figura 1. Configuración Cable redondo vs Cable Plano



Nota: Tomado y Modificado de Brochure Kerite (Kerite, s. f.-a)

Por tanto, las partes de un cable BES son las siguientes:

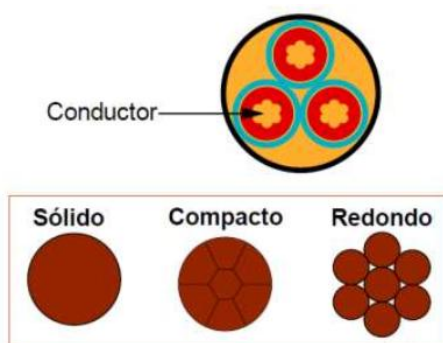
1. **Conductor:** Tienen como función principal transportar la corriente alterna desde superficie hasta el motor de fondo. El cable de potencia está conformado por (3) tres conductores. El material estándar es el Cobre de pureza alta (99.9%) (Lozada Dias & Gaitán Varón, 2014a);

El cobre es un material con muy buena conductividad eléctrica y ductilidad lo que garantiza una adecuada transmisión de energía al motor en fondo, y cumple especificaciones de la norma ASTM B3/B33 (Especificaciones para alambre de cobre recocido y estañado).

Otro material considerado como conductor es el aluminio; sin embargo, su uso es limitado debido a que ofrece únicamente el 61% de la conductividad eléctrica del cobre para un mismo calibre. Esto implica que, al emplearse, se requiere un cable de mayor diámetro para transmitir la misma corriente, lo que genera restricciones de espacio dentro del pozo. Adicionalmente, el aluminio presenta mayores dificultades en la realización de empalmes, dado que su superficie se oxida con facilidad, es más propenso a deformaciones mecánicas y requiere materiales especiales para garantizar conexiones eléctricas confiables.

En la práctica los conductores del cable pueden encontrarse en dos configuraciones: solidos o trenzados; donde después de realizar varias características como resistencia del conductor, amperaje del cable, eficiencia, flexibilidad, radio de curvatura, entre otros, se puede concluir que el mayor peso o ventaja de uso de solidos es la flexibilidad del cable y la resistencia a migración de gases y líquidos del pozo.(Kerite, s. f.-a). Figura 3

Figura 2. Configuración de conductores



Nota. Adaptado de Manual ESP, por Baker Hughes.

El tamaño del conductor en los cables BES se expresa en calibre AWG (American Wire Gauge), un estándar que define el diámetro del alambre y como resultado su capacidad de conducción eléctrica, sin embargo, también es expresado en mm² (milímetros cuadrados). A menor número de calibre, mayor es el diámetro del conductor y, por lo tanto, su capacidad de transportar corriente. La selección del calibre adecuado depende de la capacidad de corriente requerida para el funcionamiento de la bomba en fondo, la caída de voltaje permitida (para reducir pérdidas de energía), también intervienen consideraciones económicas y operativas relacionadas con las condiciones específicas de cada pozo. Actualmente en la industria se ha estandarizado los calibres de cable AWG #1, #2 y #4, no obstante, en algunos campos también se emplea el calibre AWG #6, especialmente en aplicaciones con menores exigencias eléctricas o de profundidad. A continuación, se muestra Tabla 1, correspondiente a consideraciones de amperaje y pérdida de voltaje por tamaño de conductor, y Tabla 2 correspondiente a clasificación de los cables respecto a características conductivas para los tamaños estandarizados.

Tabla 1. Consideraciones por tamaño de cable

Tamaño del conductor		Corriente	Pérdida de Voltaje (vatios/1000 ft)	
AWG	mm ²	Amperios	Configuración sólida	Configuración plana
#1	42.4	110	2202	2251
#2	33.6	94	2032	2069
#4	21.2	70	1793	1828

Nota. Tomada y editada de Brochure Kerite (Kerite, s. f.-a)

Tabla 2. Características de los conductores de los cables BES

Tamaño del conductor		Peso nominal	Resistencia del conductor (Ω/km @ 25 °C)	
AWG	mm ²	Kg/km	Cobre Plano	Cobre recubierto

#1	42.4	386.0	0.412	0.440
#2	33.6	94	0.522	0.554
#4	21.2	70	0.830	0.882

Nota. (*IEEE 1017.2 Recommended Practice for Specifying Electric Submersible Pump Cable., s. f.*)

- 2. Aislamiento:** El aislamiento constituye una de las partes más críticas del cable BES, ya que su función principal es recubrir al conductor y garantizar la integridad eléctrica del sistema durante la operación. Este elemento debe evitar cortocircuitos y pérdidas de energía, además de resistir condiciones extremas de temperatura, presión, así como presencia de gases y fluidos corrosivos del pozo. La selección del material aislante depende principalmente de la temperatura máxima de operación del pozo, la composición química de los fluidos producidos y la vida útil esperada del sistema. Este material se caracteriza por su alta resistencia térmica y química, así como por su excelente flexibilidad a bajas temperaturas (hasta -40 °F). Además, es compatible con ambientes que contienen CO₂ y soporta la exposición a diversos productos químicos utilizados en los tratamientos de pozo. Su rango de operación le permite resistir temperaturas de hasta 400 °F (204 °C), lo que lo convierte en una de las opciones más confiables para condiciones severas de operación. (Lozada Dias & Gaitán Varón, 2014a). Sin embargo, existe otro material utilizado que es el EPR (Etileno-Propileno), se caracteriza por su excelente capacidad dieléctrica, lo que lo hace muy eficiente para minimizar pérdidas eléctricas, pero su rango de temperatura es limitado, hasta 300°F (150 °C) lo que reduce su aplicación.

La única limitación de los materiales EPDM es su tendencia a hincharse cuando entra en contacto con aceite, lo que puede afectar su desempeño en ciertos ambientes de pozo. Sin embargo,

este inconveniente puede mitigarse mediante una formulación adecuada del compuesto que mejoran su resistencia al contacto con aceites. (Lozada Dias & Gaitán Varón, 2014a).

3. Chaqueta de Plomo: La chaqueta de plomo es un componente fundamental en la estructura del cable BES, donde su función principal es actuar como barrera hermética contra la penetración de fluidos del pozo (agua, gas, hidrocarburos y agentes corrosivos). Gracias a su impermeabilidad y resistencia química, protege al aislamiento y a los conductores, garantizando la confiabilidad eléctrica del sistema.(Alarcón & Sierra, 2020a). Los pozos con gases calientes a alta presión requieren estructuras más reforzadas al igual que presencia de sustancias químicas (H_2SO_4 o H_2CO_3) y gases corrosivos (CO_2 o H_2S). Si el pozo desarrolla altas presiones de operación, se debe prestar atención a daños por descompresión.(Kerite, s. f.-a).

El plomo es altamente utilizado por su alta densidad, maleabilidad y capacidad de formar envoltura continua, estas características lo convierten en un material para garantizar la hermeticidad. La fragilización o endurecimiento por envejecimiento de la chaqueta de plomo constituye uno de los principales factores que afectan la vida útil del cable. A ello se suman otros mecanismos de degradación asociados a la exposición a presiones cíclicas y al contacto con sustancias químicas presentes en el pozo, que aceleran el deterioro del material. El espesor de la chaqueta de plomo varía dependiendo de la profundidad y condiciones de operación ya que un mayor espesor incrementa la capacidad de barrera, aunque también afecta la flexibilidad del cable, pero actualmente en Colombia se maneja un estándar en el espesor del plomo dando cumplimiento al a norma para construcción de cables BES. Sin embargo, entre sus limitaciones se encuentra el aumento de peso del cable y su fragilidad relativa frente a esfuerzos mecánicos excesivos.

4. Armadura: La armadura constituye la capa externa de protección mecánica del cable BES y está diseñada para soportar las condiciones severas de instalación y operación en el pozo, impide el hinchamiento de materiales elastómeros subyacentes al contacto con líquido. Generalmente se fabrica con cintas metálicas enrolladas helicoidalmente en sentidos opuestos para aumentar la flexibilidad y la resistencia a la torsión del cable. El material más comúnmente utilizado para la armadura es el acero galvanizado, debido a su alta resistencia mecánica y buena protección frente a la corrosión moderada. Sin embargo, en ambientes más agresivos o con presencia significativa de H₂S, CO₂ o temperaturas elevadas, se prefiere el uso de acero inoxidable/monel, el cual ofrece una mayor resistencia a la corrosión y una vida útil prolongada, aunque el costo es significativamente superior (Alarcón & Sierra, 2020b).

Se puede optar por una configuración de armadura sencilla o doble, decisión que depende principalmente de la aplicación y de las condiciones específicas del pozo, así como de la necesidad de postura de capilar. En pozos profundos o con condiciones de instalación más exigentes, se recomienda el uso de doble armadura, ya que ofrece mayor resistencia mecánica y protección frente a esfuerzos de tensión o torsión. Por el contrario, en pozos someros o con menores requerimientos operativos, una armadura sencilla resulta suficiente para garantizar un desempeño adecuado del cable. Existen diversos factores que pueden afectar la integridad de la armadura del cable BES. Entre los cuales encontramos, corrosión por fluidos de producción, gases como CO₂ o H₂S, así mismo fatiga mecánica o esfuerzos generados durante la instalación u operación del cable, representan riesgos significativos que pueden reducir la vida útil del cable. Por esta razón, la correcta selección del material de la armadura y su tratamiento superficial son aspectos críticos.

5. Tubo Capilar: El tubo capilar es un componente que se integra al cable BES cuando se requiere de inyección de fluidos, productos químicos (tales como anticorrosivos, diluyentes,

entre otros) hacia el fondo del pozo; Su principal función es permitir la inyección controlada de fluidos mencionados anteriormente, así como transmitir señales de presión o temperatura desde sensores de fondo hasta la superficie. Normalmente, su material de fabricación es acero inoxidable o aleaciones con alta resistencia a la corrosión y existen diversas configuraciones en cuanto a diámetro exterior y espesor de pared, seleccionadas según los requerimientos de inyección y la profundidad de instalación (Tabla 3). Sin embargo, la referencia más utilizada actualmente en la industria es el SS 316L de 3/8" x 0,049". En la mayoría de los diseños, la incorporación del tubo capilar depende directamente de las condiciones del yacimiento y los requerimientos operacionales del pozo. Este puede instalarse dentro de la armadura (en configuraciones de armadura sencilla o doble) o externamente al cable de potencia, sujeto por trinchas/cintas de amarre, y se emplea principalmente cuando se requiere facilidad de reemplazo .(Lozada Dias & Gaitán Varón, 2014b).

Tabla 3. Selección de material tubo capilar

MATERIAL	COMPOSICIÓN	APLICACIÓN	LIMITACIÓN
SS 316L	Acero Inoxidable	Pozos con alta presión, temperatura y generalmente en ambientes moderados de corrosión.	Susceptible a corrosión por cloruros (pitting y agrietamiento)
Duplex 2205	Acero inoxidable dúplex con variaciones en su composición	Pozos con alta presencia de Cloruros, CO ₂ y H ₂ S.	Menor ductilidad.
Monel 400	Aleación Níquel y Cobre	Pozos con alta corrosión.	Menor resistencia mecánica y alto costo.
Inconel 625 / 825	Aleación de Ni-Fe-Cr-Mo-Cu	Pozos con presencia elevada de CO ₂ , H ₂ S, ambientes extremadamente	Alto costo y disponibilidad limitada

corrosivos con altas
temperaturas y
presiones.

Nota: Autora junto con información de proveedor MSTCO.

En síntesis, el análisis del cable de potencia BES permite comprender su rol crítico dentro de la confiabilidad y continuidad operativa del sistema de bombeo electro sumergible. El cable se encuentra expuesto a diversas condiciones operativas, tales como esfuerzos mecánicos, eléctricos y químicos, las cuales influyen directamente en su vida útil y en la ocurrencia de fallas que pueden derivar en paradas no programadas y elevados costos de intervención. En los siguientes capítulos se desarrollará la metodología empleada para la evaluación y clasificación de los cables BES, así como la propuesta de un proceso de rehabilitación y el análisis de su impacto económico y ambiental.

1.3.Fallas Asociadas Al Cable De Potencia De Un Sistema De Bombeo

Electrosumergible (BES)

Se ha identificado que una de las partes más críticas de un sistema de bombeo electrosumergible (BES) es el cable de potencia, ya que debe garantizar el suministro continuo y confiable de energía eléctrica desde superficie hasta el motor en fondo. Su desempeño está directamente relacionado con la confiabilidad operativa del sistema, y una falla súbita en este componente puede generar altos costos de intervención, pérdidas de producción y riesgos operacionales.

Las fallas en el cable de un sistema BES, pueden originarse por varios factores; esfuerzos mecánicos durante su instalación y operación, degradación por altas temperaturas, exposición a fluidos del yacimiento, fenómenos eléctricos, entre otros (Lozada Dias & Gaitán Varón, 2014b).

El poder comprender las causas de estos acontecimientos, es el punto cable para establecer criterios técnicos para el proceso de rehabilitación de cable BES. Por ello tenemos la siguiente clasificación asociada a cables de potencia BES.

1.1.3 Clasificación de fallas en Cable de potencia BES

1.1.1.1 Fallas eléctricas. Una falla eléctrica compromete de manera directa e inmediata el suministro de energía al motor, y este a su vez el apagado del sistema, entre las fallas más comunes tenemos:

1.3.1.1.1. Cortocircuito en empalme. Un empalme desempeña la función de conectar aislar y proteger los conductores de un cable BES.(Alarcón & Sierra, 2020b); Su instalación es necesaria cuando un solo tramo no es suficiente para cubrir la profundidad total de pozo, por lo que su correcta ejecución es crítica para la confiabilidad del sistema. Una falla en el empalme suele estar relacionada a inadecuadas conexión de los nicopress (**Figura 3**), favoreciendo la presencia de resistencia de contacto elevadas que, durante la operación, generan puntos alta temperatura y esta a su vez un sobrecalentamiento del sistema. Este recalentamiento localizado acelera la degradación del aislamiento y puede

culminar en un cortocircuito entre fases o hacia tierra, provocando la detención inmediata del sistema electrosumergible.



Figura 3. Empalme invisible con Nicopress.

Nota: Autora, Trabajo realizado en Azul ZF

1.3.1.1.2. Cortocircuito fase-tierra / fase-fase. Fase-tierra, ocurre cuando uno o más conductores energizados entran en contacto eléctrico con la armadura o cualquier parte conductora conectada a tierra. La principal causa de esta falla incluye deterioro de aislamiento por exposición prolongada a altas temperaturas, presencia de fluidos corrosivos, entre otros.

Fase-fase, ocurre cuando dos conductores energizados entran en contacto entre sí, generando un aumento abrupto de corriente, lo cual podría provocar daños severos al variador, motor y en los peores casos destrucción total de cable.

1.3.1.1.3. Falla por Sobre corriente o Sobretenión. La sobre corriente suele originarse por condiciones anormales de operación del sistema, tales como sobrecarga del motor, bloqueo mecánico de la bomba, presencia de sólidos, variaciones abruptas en el caudal o problemas en el variador de velocidad; mientras que la

sobretensión va más asociada a maniobras de arranque debido a apagados no programados, mala regulación del transformador, entre otros. Este tipo de fallas además de comprometer integridad de cable afecta la confiabilidad del equipo en su conjunto, por ello es indispensable contar con un bien sistema de protección eléctrica.

1.1.1.2 Fallas mecánicas. Las fallas mecánicas en un cable de potencia BES están asociadas principales a daños físicos, ocurridos durante etapas de transporte, almacenamiento e instalación del sistema completo, comprometiendo la integridad estructural del cable, afectando su resistencia mecánica y desempeño eléctrico.

1.3.1.1.4. Fallas durante su logística de transporte y almacenamiento. Durante las etapas de transporte, cargue, descargue y almacenamiento, el cable BES puede estar expuesto a condiciones que comprometen su integridad mecánica y eléctrica incluso antes de su instalación. Por esta razón, es indispensable tomar las precauciones necesarias para proteger el cable y el carrito, iniciando desde el momento del cargue al camión para su movilización a campo, se realice un aseguramiento adecuado (**Figura 4**), mediante el uso de precintos (para prevenir hurtos), estibas metálicas y cadenas que garanticen su estabilidad. (Lozada Dias & Gaitán Varón, 2014b).

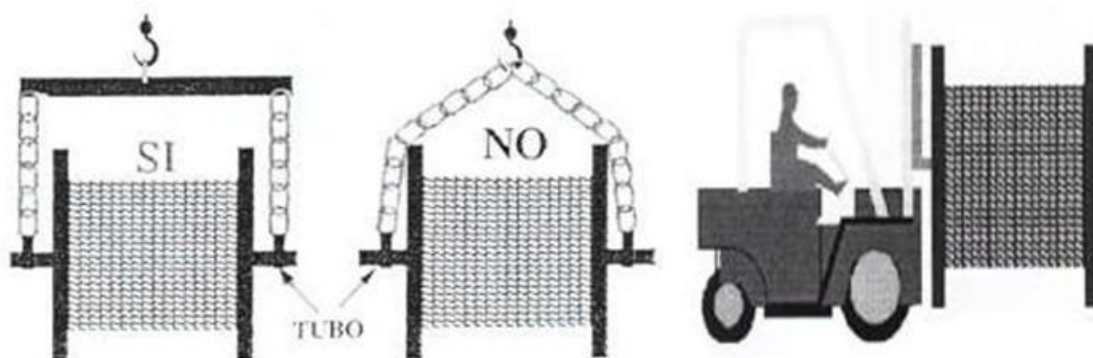


Figura 4. Forma adecuada de realizar cargue de carrete de cable BES

Nota. Adaptado de Instructivo con Recomendaciones Técnicas de Instalación, Reparación y Re-Use de Cable de Potencia del Bombeo Electrosumergible, por Ecopetrol.

Entre las principales fallas asociadas a esta etapa encontramos:

- a. Aplastamiento por inadecuada manipulación
- b. Golpes y deformaciones en el cable y carrete directamente durante cargue y descargue.
- c. Exposición prolongada a la intemperie, favorece degradación de sus componentes, por ello es importante cumplir con la normativa **IEEE 1017.1** la cual nos da las pautas o requerimientos para un adecuado almacenamiento y preservación de carrete de cable.
- d. Enrollado y preparación inadecuada del cable (Figura 5), lo cual podría generar una sobre fatiga.

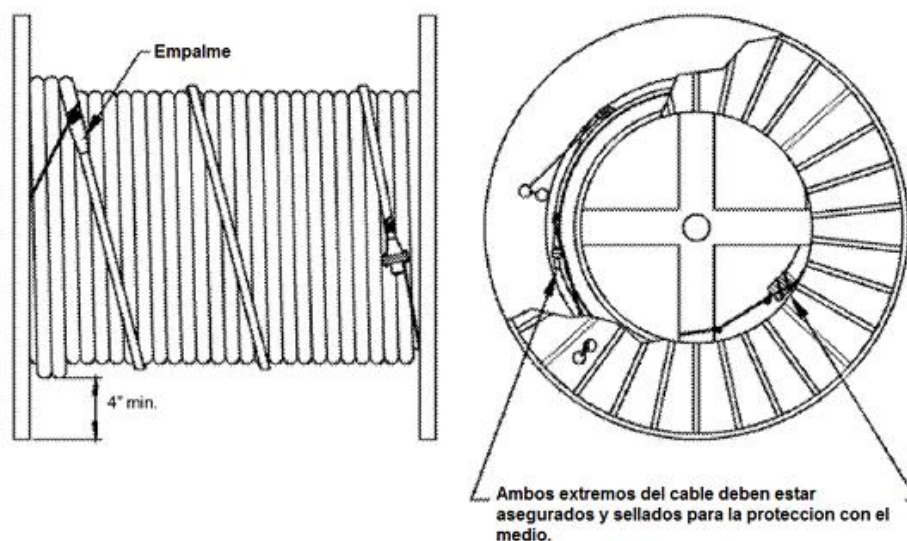


Figura 5. Preparación de cable

Nota. Adaptado de Instructivo de Instalación, Reparación y Re-Usos de Cable de Potencia del Bombeo Electrosumergible, por Ecopetrol.

1.3.1.1.5. Fallas durante su maniobra de instalación y puesta en marcha de equipo

BES. Durante la instalación y puesta en marcha del sistema BES, el cable de potencia está sometido a múltiples esfuerzos mecánicos, térmicos y eléctricos que pueden comprometer su integridad si no se siguen adecuadamente los procedimientos operativos y de seguridad. Estas fallas suelen originarse por prácticas inadecuadas de manipulación, tensiones excesivas y radios de curvatura fuera de especificación, lo que puede ocasionar daños en el aislamiento, la armadura o los conductores. Por esta razón, durante la maniobra de instalación es indispensable el uso de protectores metálicos, los cuales

brindan sujeción, seguridad y protección al cable durante su descenso a lo largo de la tubería de producción.(Alarcón & Sierra, 2020b).

1.3.1.1.6. Fallas desde planta de manufactura. Las fallas provenientes desde la planta de manufactura corresponden a defectos inherentes al proceso de fabricación del cable BES, que pueden comprometer su desempeño incluso antes de su instalación; son fallas asociadas a desviaciones en las especificaciones de sus componentes (espesores fuera de tolerancia, micro fisuras en la chaqueta de plomo) deficiencias en procesos de extrusión de aislamiento (fallas en adherencia), defectos en el proceso de ensamblaje de armadura. Este tipo de anomalías afectan directamente el rendimiento y la confiabilidad del cable, por lo cual resulta indispensable la implementación de estrictos controles de calidad y pruebas de fábrica, tales como ensayos eléctricos, verificación dimensional y pruebas de alta tensión, garantizando así el cumplimiento de las normas técnicas aplicables al cable de potencia BES.

A continuación, la Tabla 4, nos muestra un resumen general de las fallas más recurrentes relacionadas al cable de potencia BES y su viabilidad de un proceso de rehabilitación. Es importante destacar que no todas las fallas presentan un mismo grado de viabilidad, las fallas de origen eléctrico al comprometer el aislamiento o los conductores suelen presentar una baja viabilidad de recuperación, sin embargo, esta condición debe verificarse en un proceso de inspección inicial, ya que aquí se evalúa el estado y longitud de daño.

Tabla 4. Tabla resumen de clasificación de fallas en cables BES y viabilidad en rehabilitación

Tipo de Falla	Falla	Descripción	VIABILIDAD proceso de rehabilitación
Eléctrica	Cortocircuito en empalme	Generada por conexión inadecuada del nicopress en el empalme del cable BES, produciendo altos puntos de sobrecalentamiento.	<u>Media</u> Depende de daño causado y longitud total.
Eléctrica	Cortocircuito fases-fase / fase-tierra	Contacto directo entre fase energizada con armadura o elemento conductor a tierra / Contacto entre fases energizadas generando cambios bruscos en corriente.	<u>Baja</u> Este tipo de falla suelen generar daño grave en el aislamiento.
Eléctrica	Sobre corriente/ Sobretensión	Condiciones eléctricas generales del sistema que general sobrecarga y a su vez degradación en el cable BES.	<u>Baja-Media</u> Puede generar degradación del aislamiento o del conductor; requiere evaluación mediante inspección y pruebas eléctricas.
Mecánica	Golpes/ Deformaciones	Se pueden generar por mala manipulación durante transporte/almacenamiento/cargues.	<u>Media-Alta</u> Depende de magnitud de impacto/daño en alguna de las fases o en una longitud significativa del cable.
Manufactura	Defectos de fabrica	Desviaciones en medidas dimensionales, micro fisuras, fallas en ensamblaje.	<u>Nula</u> Generalmente estos casos entran en procesos de garantía del fabricante.

1.4.Condiciones Operativas Que Afectan El Desempeño Del Cable De Potencia BES.

Existen diversas condiciones operativas que a lo largo del tiempo y su constante aporte van generando alguna falencia en el funcionamiento del cable y reduciendo su vida útil, entre los cuales encontramos:

2.1.1 Altas Temperaturas

La exposición del cable BES a altas temperaturas constituye una de las principales causas de degradación de sus componentes, especialmente del aislamiento y de la chaqueta de plomo. Cuando la temperatura de operación excede los límites de diseño del material aislante, se acelera el envejecimiento térmico, disminuyendo sus propiedades dieléctricas y mecánicas, lo que incrementa el riesgo de cortocircuitos, fallas a tierra y pérdida de integridad eléctrica.(Acevedo, 2018).Es por ello que dentro de su clasificación se encuentra de acuerdo a la temperatura de fondo siendo el rango mayor 450°F.(Kerite, s. f.-b).

1.1.4 Cantidad de gas

Una alta presencia de gas en el pozo representa un factor crítico que afecta tanto integridad mecánica como eléctrica; El gas puede migrar a través de cualquier micro defecto en el aislamiento o la chaqueta de plomo, generando fenómenos de permeación, que combinado con altas presiones y temperaturas causan una falla eléctrica.

1.1.4 Fluido altamente corrosivos

La exposición del cable BES a fluidos altamente corrosivos (CO₂, H₂S), constituye una de las principales causas de degradación prematura de sus materiales. Estos fluidos pueden atacar la armadura metálica, la chaqueta de plomo y el aislamiento, favoreciendo procesos de corrosión Figura 6. En ambientes severos, la pérdida de material metálico (armadura) reduce resistencia

mecánica al cable, aumenta la probabilidad de fallas. Para estás situaciones donde se sabe que tenemos alta presencia de fluidos corrosivos se instala una armadura de acero inoxidable o Monel.



Figura 6. Cable de potencia BES en condición de corrosión

1.5.Pruebas Aplicadas Al Cable De Potencia BES

Con el fin de garantizar la confiabilidad operativa del cable BES y establecer su aptitud para procesos de rehabilitación, es indispensable la aplicación de pruebas eléctricas y mecánicas que permitan evaluar su integridad desde el proceso de fabricación, antes de su instalación y después de su uso en campo. Estas pruebas permiten detectar fallas incipientes, validar condiciones de aislamiento y asegurar el cumplimiento de los estándares técnicos mínimos exigidos por la industria. Previo a la descripción de las pruebas requeridas, se presenta la normativa asociada al cable BES (Tabla 5)

Tabla 5. Pruebas asociadas a cable de potencia BES

NORMA	ALCANCE
-------	---------

IEEE 1017.1	Practica recomendada para pruebas eléctricas y criterios de aceptación de cables de potencia BES.
IEEE 1017.2	Practica recomendada para construcción de cable de potencia BES con aislamiento EPDM.
API 11S6	Practica recomendada para pruebas eléctricas de cable de potencia BES.
ASTM B3	Especificaciones para conductores de cobre.
ASTM A1016	Prueba hidrostática(Labrador et al., s. f.) para tubo capilar

1.1.5 Prueba de continuidad

La prueba de continuidad se realiza con el fin de verificar la integridad eléctrica de los conductores del cable BES, asegurando que no existan interrupciones, cortes internos o conexiones defectuosas a lo largo del conductor. Esta prueba consiste en medir la resistencia eléctrica del cable utilizando un óhmetro o un megóhmetro en modo de baja tensión, comparando los valores obtenidos con los rangos aceptables establecidos por el fabricante o por la normativa aplicable (IEEE 1017.1 / API 11S6) (Labrador et al., s. f.).

1.1.5 Prueba Megger

Se aplica un alto voltaje (aproximadamente 5.000 V) con el fin de evaluar la capacidad del aislamiento para resistir fugas de corriente. Valores bajos de resistencia de aislamiento indican degradación, contaminación o envejecimiento del material aislante, por lo cual los resultados

obtenidos se comparan con los valores mínimos establecidos por el fabricante y la normativa vigente, permitiendo así determinar el nivel de desgaste y la aptitud del cable para su rehabilitación.

1.1.5 Prueba Hipot

Esta prueba consiste en aplicar un voltaje elevado al cable durante un tiempo determinado con el fin de verificar la integridad del aislamiento y detectar posibles fallas, como perforaciones, microfisuras o degradación del material aislante Tabla 6. Esta prueba permite asegurar que el cable puede operar de manera segura y es un criterio clave para determinar su condición para un proceso de rehabilitación de cable BES.

Tabla 6. Especificaciones de voltaje en prueba Hipot

Rating Cable (kV)	Test en fabrica (kV dc)	Test de aceptación cable nuevo (kV dc)	Test para cable usado/ cable rehabilitado (kV dc)
5	36	28	14

Nota. Adaptado de IEEE 1017.1.

1.1.5 Inspección visual y física

Esta inspección se realiza con el objetivo de identificar daños externos tales como aplastamientos, deformaciones y deterioros generales. En la fase de selección de cables para procesos de rehabilitación, permite detectar abrasiones, cortes, corrosión, daños por aplastamiento

y el estado del aislamiento en las puntas. Adicionalmente, se utiliza para el conteo y verificación de la longitud total del cable disponible.

1.1.5 Prueba a tubo capilar

Si el cable dentro de su configuración requiere tubo capilar para tema de inyección de química, se requiere prueba de capilar, para cable nuevo con el fin de comprobar su integridad y se ejecuta respecto a la norma ASTM A1016.

Ya teniendo identificado las principales fallas asociadas al cable de potencia BES, así como las condiciones operativas que influyen en su degradación y la normativa aplicada, vemos lo que representa el cable de potencia BES en la funcionalidad del sistema. Este análisis constituye la base técnica para establecer criterios objetivos de selección de cables aptos para procesos de rehabilitación, contribuyendo en la optimización de costos operativos y mayor eficiencia en momentos de no disponibilidad de inventario. En el siguiente capítulo se abordará la metodología empleada para la evaluación, clasificación y reacondicionamiento de los cables seleccionados.

Un análisis adecuado de las fallas asociadas al cable de potencia BES permite comprender los mecanismos que generan su deterioro y la consecuente afectación en el desempeño del sistema completo. Sin embargo, no todas las fallas presentan el mismo grado de severidad, ya que su impacto depende de factores como la localización del daño, el tiempo de exposición y las condiciones operativas del pozo. La diferenciación entre estos escenarios permite establecer un

criterio técnico preliminar sobre la condición real del cable y su posible viabilidad como candidato para un proceso de rehabilitación.

2. Diseño de proceso de rehabilitación de cable de potencia BES

El propósito principal es establecer un proceso integral que combine criterios técnicos, cumplimiento normativo y controles de calidad desde el inicio hasta su finalización, con el fin de certificar los resultados, extender la vida útil del cable y garantizar el desempeño confiable del sistema. La estructuración metodológica del proceso permite estandarizar procedimientos, minimizar riesgos técnicos y asegurar resultados verificables. Adicionalmente, al reincorporar cables que conservan su integridad eléctrica, el modelo propuesto contribuye a estrategias de optimización de costos y a la transición hacia esquemas de economía circular en la industria. (Labrador et al., s. f.).

Es importante tener en cuenta que este proceso es aplicable en cables que se consideran no aptos ya sea por su condición de armadura (daños mecánicos, óxidos, entre otros), tubo capilar interno obstruido. Sin embargo, desde el punto de vista eléctrico, estos cables pueden conservar condiciones favorables que representan una oportunidad técnica y económica para su reacondicionamiento. Cabe aclarar que, para ser candidatos al proceso, los cables deben cumplir con estándares mínimos, los cuales serán verificados durante la etapa de inspección y pruebas de ingreso, conforme a la normativa aplicable.

El proceso de rehabilitación se compone de cuatro (4) etapas principales; proceso de ingreso e inspección primaria, retiro de armadura, proceso de limpieza 360° de las fases eléctricas, postura de armadura con/sin tubo capilar según requerimiento del cliente, Cada una de estas etapas se ejecuta bajo inspecciones visuales y pruebas eléctricas periódicas a lo largo de la longitud del cable, garantizando control de calidad y trazabilidad del proceso.

Antes de poder explicar cada uno de estos 4 procesos, es importante definir un esquema de selección de cables óptimos para este proceso de rehabilitación.

2.1. Esquema de selección de cables usados para proceso de rehabilitación

Si bien la vida útil de un cable de potencia BES es un parámetro aun no estandarizado en la industria, cada operadora define un target esperado de desempeño, esto en función a la experiencia de campo por condición operativa y comportamiento de sus activos. Por esta razón, el análisis de la historia del cable constituye el primer filtro dentro del proceso de evaluación. El esquema de selección propuesto integra tres niveles de análisis: revisión de antecedentes operativos, verificación de parámetros eléctricos mínimos y evaluación física inicial del cable; de acuerdo con estos filtros, los cables que aprueben podrán continuar hacia el proceso de rehabilitación, en caso contrario, serán avisados y descartados como candidatos potenciales.

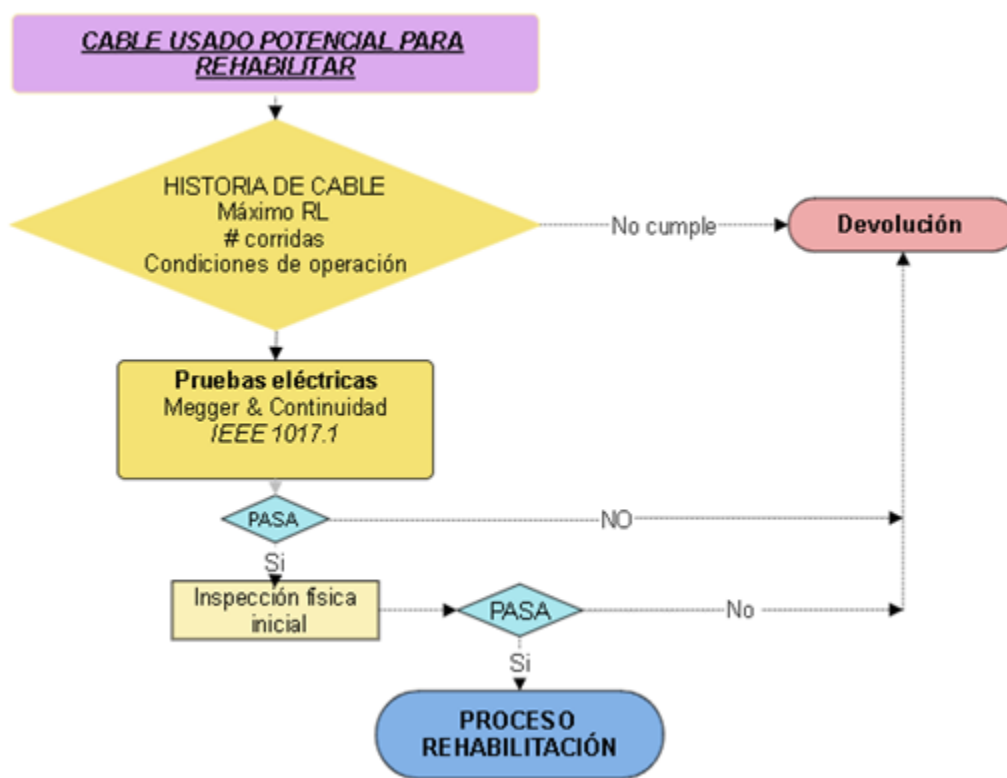


Figura 7. Flujograma de selección cables para rehabilitación.

2.2. Proceso de rehabilitación de cable BES

Este proceso de rehabilitación se estructura bajo un esquema secuencial por estaciones de trabajo. Cada estación cumple una función específica dentro del proceso integral y constituye un punto de control de aceptación o rechazo, permitiendo garantizar trazabilidad, control de calidad y consistencia de resultados.

2.1.2 Estación de Inspección inicial y pruebas de ingreso

En esta etapa se realiza una inspección detallada y evaluación técnica inicial del cable BES, con el propósito de establecer una línea base objetiva de su condición física y eléctrica. Esta fase

permite determinar el estado real del cable al momento de su ingreso al proceso de rehabilitación y definir los pasos técnicos a seguir dentro del flujo metodológico.

Esta estación permite identificar daños visibles, posibles fallas internas y el nivel de deterioro asociado a las condiciones de operación en campo (Figura 8). (Labrador et al., s. f.)

- a. Registro fotográfico e identificación de condición de llegada de cable.
- b. Medidas dimensionales del cable, está se podría contemplar la toma cada cierta longitud.
- c. Verificación de longitud total arribada e identificación de fases (por colores).
- d. Inspección física y visual, incluye específicamente las puntas del cable, donde se evalúa la integridad del EPDM, el cable y el conductor.
- e. Pruebas eléctricas según normativa.
- f. Si el cable contiene tubo capilar, se realiza prueba hidrostática a 5.000 psi, según normativa.



Figura 8. Etapa de inspección cable

Nota. Adaptado de Artículo SPE-225264, por Labrador et al.(Labrador et al., s. f.)

Es importante recalcar que el deterioro en los extremos del aislamiento de EPDM no constituye un criterio automático de descarte del carrete. En estos casos, se realiza una evaluación detallada y un muestreo periódico a lo largo de la longitud del cable (cada cierto pie, esta distancia se especifica), con el fin de determinar si dicha condición es localizada o si se mantiene de manera continua en todo el tramo evaluado.

2.1.2 Estación de remoción de armadura

Una vez se haya realizado el proceso inicial y tengamos aprobación por parte del cliente, se inicia con el proceso de armadura, su objetivo es retirar su coraza metálica y realizar una inspección más detallada de los componentes internos (EPDM, plomo). La remoción de la armadura puede realizarse de manera manual, con herramientas especializadas y procedimientos controlados, o a través del desarrollo e implementación de una máquina diseñada específicamente para este fin. En ambos casos, el proceso debe garantizar la preservación de la integridad del cable. Por esto el objetivo principal de este proceso, además de remover armadura, es evitar la liberación de cables cuya integridad haya sido comprometida durante la remoción.

En esta estación se emplea: dos (2) spoolers: el primero destinado al carrete original con armadura y el segundo para el enrollado progresivo de las fases expuestas, presencia de personal técnica capacitada para el proceso, con sus EPPs correspondientes, y sus herramientas para remoción.



Figura 9. Proceso ilustrativo de remoción de armadura

Durante el proceso de remoción de armadura se realiza de manera simultánea una inspección ampliada del cable, aprovechando que los componentes internos quedan progresivamente expuestos (plomo y EPDM). En esta fase se evalúa el estado del aislamiento-EPDM a lo largo de todo el tramo, verificando cambios de coloración, endurecimiento o signos de degradación térmica (Figura 10). Asimismo, se inspecciona la barrera de plomo para identificar indicios de picaduras, corrosión localizada o fatiga mecánica.



Figura 10. Condiciones físicas durante remoción de armadura.

(Decoloración EPDM, mala adherencia, conductor quemado, fases muy pegadas debido a crudo.)

Nota. Adaptado de presentación interna, por Azul Energy Colombia.

Cuando se detectan tramos con señales de alerta, se procede a realizar cortes adicionales posteriores a la zona afectada, con el fin de determinar si el deterioro corresponde a una condición puntual o si se extiende a lo largo de una mayor longitud del cable. Este análisis permite establecer con mayor precisión la magnitud del daño y definir si es viable continuar con el proceso de rehabilitación o si el cable debe ser descartado por no cumplir con los criterios técnicos establecidos. Es por ello, que esta estación es primordial en el inicio de este proceso, ya que confirma el estado real del cable y valida su viabilidad de continuidad al proceso de limpieza, proceso aún de mayor detalle.

2.1.2 Estación de limpieza de fases

Una vez finalizado el proceso de remoción de armadura, las fases eléctricas pueden presentar contaminación por crudo, parafinas, incrustaciones o residuos sólidos. La finalidad de esta estación es eliminar completamente dichos contaminantes sin afectar la integridad del aislamiento (EPDM) ni la capa de plomo.

El proceso de limpieza contempla el uso de solvente compatible con el EPDM. Para la selección del solvente adecuado, se requiere la evaluación técnica de diferentes candidatos, como gasolina, ACPM y solventes dieléctricos industriales, considerando la capacidad de remoción de crudo sin generar degradación del aislamiento. La evaluación técnica se realiza mediante pruebas de La validación del solvente se realiza mediante pruebas controladas en la planta, donde se puedan analizan variables como tiempo de exposición, posibles reacciones superficiales, cambios en coloración, pérdida de flexibilidad o alteraciones en la integridad del EPDM.

Solo aquellos solventes que demuestren compatibilidad química y estabilidad del material bajo condiciones controladas serán considerados aptos para su aplicación dentro del proceso de rehabilitación, si contamos con más de uno apto su elección dependerá netamente de su precio.

Para la aplicación de este solvente se requiere cepillos de cerdas fuertes para una limpieza profunda de 360° a cada fase; por tanto, el proceso consta en sumergir las 3 fases en el disolvente elegido para que actúe sobre las fases contaminadas especialmente las que presenten el crudo firmemente adherido a ellas (Labrador et al., s. f.). Por tanto, esta etapa está compuesta por cepillos horizontales con cerdas ubicadas en la parte superior/inferior, dos carretes para transferir las fases previamente limpias.

En esta fase del proceso se identifican y corrigen posibles daños puntuales, especialmente en la barrera de plomo principalmente, realizando posteriormente mediciones eléctricas para verificar que la reparación no comprometa la integridad del cable; adicional se realiza el enderezamiento de cada fase para garantizar su correcto ajuste en la siguiente estación, se verifica el calibre y la presencia de deformaciones que puedan afectar su desempeño operativo, y, de requerirse, se ejecutan nuevos empalmes mediante electro fusión, asegurando compatibilidad con el tipo de conductor y las especificaciones técnicas establecidas. El máximo número de empalmes es 3 cada 8.000 ft de cable de potencia.

Una vez verificado todo lo anterior, damos paso al siguiente paso de ensamble.

2.1.2 Estación de postura armadura con/sin capilar

Una vez finalizado el proceso de limpieza de fases y aprobada la inspección correspondiente, el cable pasa a la estación de postura de armadura. En esta etapa se realiza la instalación del blindaje metálico mediante una máquina especializada denominada **IAM (Interlock Armor Machine)**, (Labrador et al., s. f.). diseñada específicamente para la industria de cables. Este equipo es el encargado de instalar la armadura metálica alrededor de las fases del cable, con el propósito de proporcionar protección mecánica adicional y aumentar la resistencia del cable durante su instalación y operación en el pozo. (Figura 11).



Figura 11. IAM "Interlock Armor Machine"

Nota: <https://www.hfsmarter.com/es/maquina-de-blindaje-con-enclavamiento-concentrico-krh/>

La máquina cuenta con configuraciones ajustables, como parámetros de tensión, velocidad de instalación; estos parámetros son definidos por el técnico o supervisor responsable del proceso, ya

que dependen de las características del cable BES, particularmente del calibre AWG de las fases, así como de los requerimientos específicos del cliente, es decir si requiere de capilar interno.

Las fases del cable ingresan de forma paralela a la máquina para iniciar el proceso de postura de armadura y, en caso de requerirse, la instalación del tubo capilar sencillo/doble. Durante esta operación se mantiene una velocidad y configuración previamente definidas, monitoreando de manera continua el número de vueltas de la armadura. Para asegurar el control de calidad del proceso, se establecen puntos de verificación cada cierta longitud del cable (ft), permitiendo confirmar que la instalación se realiza conforme a los parámetros establecidos.

Este control es posible gracias al tablero de control de la máquina, el cual permite programar y supervisar variables como velocidad, tensión y paso de la armadura. De esta manera, el sistema garantiza una colocación precisa y uniforme, cumpliendo con las especificaciones técnicas del proyecto.

La estación requiere el uso de dos spoolers: en el primero se ubica el carrete con las fases previamente limpias, mientras que el segundo recibe el cable ya armado y listo para pruebas finales. En caso de requerirse la instalación de capilar, los carretes que contienen el tubo capilar se disponen al lado del carrete principal, permitiendo su incorporación simultánea durante el proceso de armado.

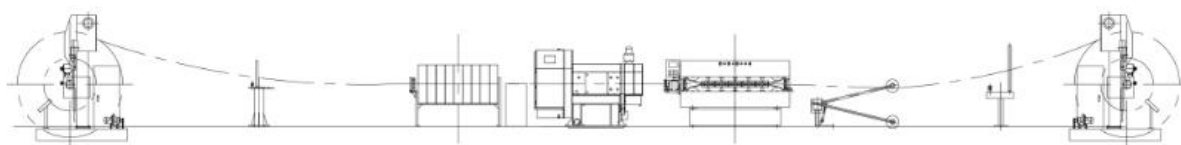


Figura 12. Esquema de estación de postura de armadura

Nota: <https://www.hfsmarter.com/es/maquina-de-blindaje-con-enclavamiento-concentrico-krh/>

Durante todo este proceso se realiza inspecciones visuales con el fin de garantizar que el cable este cumpliendo con las especificaciones de calidad y evitar algún problema de anomalía; realizando toma de medidas dimensionales bajo norma IEEE 1017.1. Todo eso para ser documentado en el informe final a entregar al cliente.

Finalmente, el cable rehabilitado es sometido a una prueba final de aceptación, la cual consiste en repetir las evaluaciones efectuadas durante la etapa de ingreso. Estas incluyen una inspección visual final y la ejecución de pruebas eléctricas, con el propósito de confirmar que el cable cumple con los estándares técnicos y normativos establecidos, garantizando así su aptitud para operación en sistemas BES. Figura 13



Figura 13. Registros fotográficos de cable BES después de proceso de rehabilitación.

FUENTE: (Labrador et al., s. f.)

De esta manera, el proceso de rehabilitación de cable para sistema BES se desarrolla bajo un esquema estructurado por estaciones de trabajo Tabla 7, donde cada etapa incorpora controles técnicos, inspecciones visuales y pruebas eléctricas que permiten evaluar de forma continua la condición del cable. La integración de estos procedimientos garantiza la trazabilidad del proceso, el cumplimiento de estándares técnicos y la validación final de las condiciones operativas del proceso de rehabilitación del cable. En consecuencia, este enfoque metodológico permite extender la vida útil del cable de potencia BES, optimizar recursos operativos y sentar las bases para su reincorporación segura en sistemas de levantamiento artificial. Cabe resaltar que es un proceso que ya se está implementando en la industria colombiana, corriendo en más de 50 pozos, representando

reducción significativa en desperdicio del material y costos asociados a adquisición de un cable nuevo.

Tabla 7. Resumen general del proceso de rehabilitación de cable de potencia BES

Estación de proceso	Objetivo
Recepción e inspección inicial	Evaluación y verificación del estado general de cable con el fin de determinar su viabilidad de recuperación.
Remoción de armadura	Remoción de armadura existente, permitiendo inspección más detallado de las fases.
Limpieza de fases	Eliminación de residuos y/o contaminantes de crudo presentes en las fases, obteniendo fases limpias para inspección y reparación menor.
Postura de armadura	Instalación de armadura con/sin tubo capilar según requerimiento del cliente.
Pruebas finales	Realización de inspección visual y verificación de parámetros eléctricos finales conforme a la normativa aplicable.

3. Mercado potencial para el proceso de rehabilitación de cable en sistemas BES.

Con el paso de los años, la industria petrolera ha incrementado la implementación de métodos de levantamiento artificial con el fin de mantener y optimizar la producción de crudo en campo que han perdido su energía natural. Dentro de estos, el sistema de bombeo electrosumergible (BES) se ha consolidado como una de las tecnologías más eficientes, debido a su capacidad para manejar altos volúmenes de producción y operar de manera confiable en diferentes condiciones de pozo.

El uso de sistema de levantamiento BES ha aumentado progresivamente en la industria, principalmente por las ventajas operativas que presenta frente a otros sistemas de levantamiento a la industria; como se mencionó anteriormente, este sistema se destaca principalmente por su capacidad de producir grandes caudales de fluido a diferentes profundidades de pozo (Aguirre et al., 2016).

Bajo este contexto, la alta implementación de sistemas BES en la industria genera una demanda constante de sus componentes, particularmente del cable de potencia; Asimismo, se presenta un alto volumen de cables que son retirados del pozo, en condiciones que, visualmente no se ven óptimos para su re uso, pueden ser evaluados como un alto potencial para un proceso de rehabilitación, esto evidencia una oportunidad para el desarrollo de alternativas que permitan extender la vida útil de este componente tan crítico, optimizando su aprovechamiento, y generando beneficios tanto en la reducción de costos operativos, como la disminución en la huella de carbono respecto a la adquisición de un cable nuevo.

3.1.Sistema de bombeo electrosumergible (BES) en Colombia

Según reporte dado por Campetrol, para el año 2023 Colombia registro un total de 8.060 pozos activos distribuidos a lo largo del territorio nacional, donde se observa una alta concentración en departamentos como, Meta con 2.378 pozos activos (30%), seguido por Santander con 1.593 pozos (20%) y Boyacá con 1.514 pozos (19%). En menos proporción, encontramos a Casanare con 532 pozos (7%) y Antioquia con (5%); los departamentos distintos a los principales suman aproximadamente 1.604 pozos, representando el 20 % restante del total nacional.(Campetrol, 2024). Figura 14

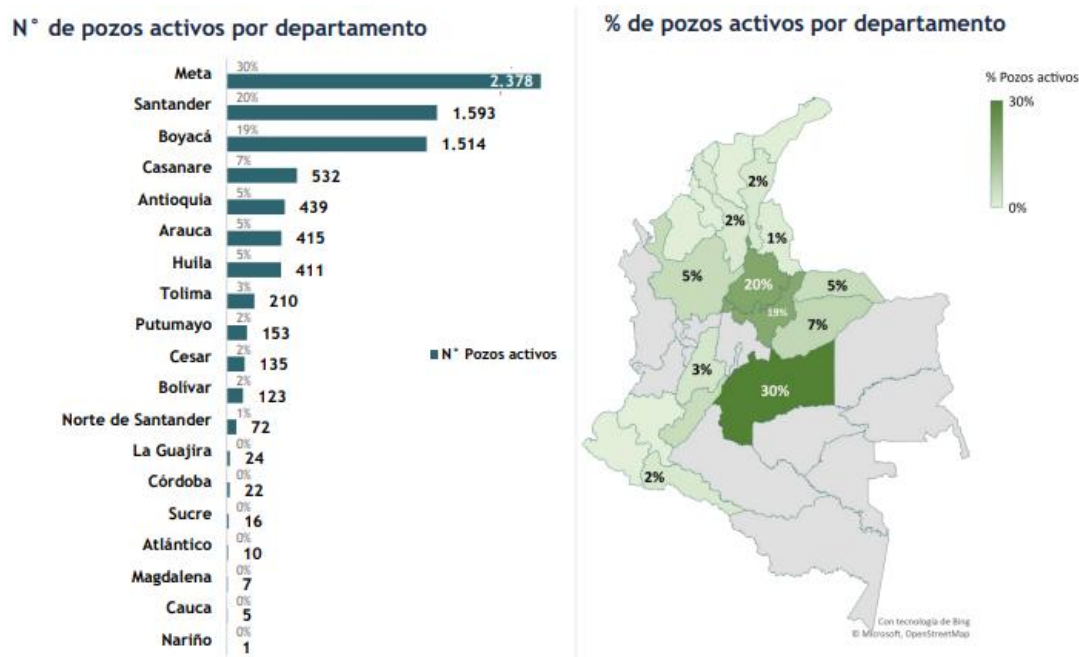


Figura 14. Distribución de pozos activos en Colombia

Nota. Adaptado de Informe de taladros y producción año 2023, por Campetrol.(Campetrol, 2024)

Para el mismo año, del total de pozos que cuentan con algún sistema de levantamiento artificial, aproximadamente el 52% emplea sistema BES, posicionándolo como el método más utilizado a

nivel nacional, seguido por bombeo mecánico, con cerca del 34% de participación, y el sistema de bombeo de cavidades progresivas que alcanza alrededor del 11%. Esta distribución evidencia no solo las ventajas técnicas del sistema, sino su consolidación como solución predominante en campos con requerimientos de alta producción, y condiciones operativas profundas.

A partir de este análisis, también es posible observar la distribución regional en la implementación de sistemas de levantamiento artificial, Tabla 8 posicionando a las principales cuencas productoras del país, Llanos Orientales y Valle Medio del Magdalena (VMM) donde se concentra mayor cantidad de pozos operados con sistemas BES.(Campetrol, 2024)

Tabla 8. Distribución de sistemas de levantamiento artificial por cuenca

	VMM	Llanos Orientales	VSM	VIM	Caguán Putumayo	COR	Catatumbo	Cesar Ranchería	TOTAL
BES	534	3.368	217	245	65	29	9	1	4.468
PCP	556	121	209	2	1	84	7	1	981
BM	2.608	40	77	15	26	-	32	14	2.812
Gas Lift	101	15	9	7	-	4	-	-	136
Otros	12	70	4		63	2	16	-	167
TOTAL	3.809	3.586	512	269	155	115	64	16	8.526

Nota. Adaptado de Informe de taladros y producción año 2023, por Campetrol.(Campetrol, 2024)

Bajo este contexto, y considerando el comportamiento actual de las empresas operadoras en términos de producción (Figura 15), junto con la experiencia adquirida en el área de sistemas de levantamiento artificial (ALS), es posible establecer un estimado del número de pozos operando con sistema BES por compañía. Este análisis permite identificar la participación de cada operadora

dentro del mercado, así como dimensionar una población objetivo para este proceso de rehabilitación de cable de potencia BES.



Figura 15. Producción fiscalizada de petróleo por E&P.

Nota. Adaptado de Informe de taladros y producción año 2026, por Campetrol.(Campetrol, 2026)

La distribución de la producción nacional es liderada ampliamente por el grupo Ecopetrol representando un 65,1% de la producción total del país, seguido por, SierraCol Energy (6,9%), Frontera Energy (6,2%), y GeoPark (5,6%); mientras que otras empresas operadoras presentan participaciones individuales inferiores al 4%. (Campetrol, 2026).

Esta concentración del mercado permite inferir una parte significativa de la operación en el país respecto al uso de sistemas BES, especialmente en estas compañías con alto volumen de producción. Con base en esto, se realizó un estudio de mercado desarrollado en el año 2024 (Tabla 9), se presenta un estimado de número de pozos con sistema BES por empresa operadora, lo cual permite dimensionar de manera más precisa nuestra población objetivo.

Tabla 9. Distribución sistema BES por Operadora en Colombia 2025

Empresa Operadora	Estimados sistemas BES en la operación 2024
Ecopetrol	2256
SierraCol Energy	752
Frontera Energy	705
Gran Tierra	129
Geopark	139
Parex	55
Otras (Perenco, Hocol, Emerald, ONGC, Petrosud, etc.)	321
<u>TOTAL POZOS BES</u>	<u>4.356</u>

Los resultados evidencian que Ecopetrol concentra la mayor cantidad de sistemas BES en la operación, seguido por SierraCol y Frontera; en conjunto estas empresas E&P representa un **85%** de la población total con sistema BES.

A partir de esta distribución, y con estudios adicionales realizados, se presenta la distribución cable de potencia por operadora, según su calibre AWG, y la incorporación de tubo capilar. Tabla 10 y Tabla 11. Este análisis se desarrolla a nivel general por compañía operadora, entendiendo que cada campo presenta condiciones particulares que influyen en la elección de configuración de cable; sin embargo, es una guía representativa de la tendencia del mercado.

Tabla 10. Distribución de cable de potencia por calibre AWG

AWG	ECP	SIERRACOL	FRONTERA	GRAN TIERRA	GEPARK	PAREX	OTRAS	
#1	13	114	30	1	0	0	0	158
#2	1061	172	142	128	139	55	253	1.950
#4	1145	244	533	0	0	0	68	1.990
#6	37	222	0	0	0	0	0	259
TOTAL	2256	752	705	129	139	55	321	4357

Tabla 11. Distribución de cable de potencia respecto a uso de tubo capilar

OPERADORA	Pozos totales	% con Tubo Capilar	% sin Tubo Capilar	Pozos totales con tubo capilar	Pozos totales sin tubo capilar
ECP	2256	42%	58%	948	1308
SIERRACOL	752	1%	99%	4	748
FRONTERA	705	20%	80%	143	562
GRAN TIERRA	129	100%	0%	129	0
GEPARK	139	81%	19%	112	27
PAREX	55	80%	20%	44	11
OTRAS	321	65%	35%	209	112
TOTAL				<u>1588</u>	<u>2769</u>
% GLOBAL				<u>36%</u>	<u>53%</u>

Los resultados muestran que el cable más utilizado en Colombia corresponde a Calibre AWG2 (45%) y AWG4 (46%); En particular, AWG#2 es adoptado en la mayoría de las empresas, mientras que AWG4 evidencia presencia significativa en Ecopetrol y Frontera Energy. La aplicación de cable de calibre 1 y 6 corresponde a aplicaciones particulares dentro de la operación. Esto nos permite inferir una estandarización en la selección de cable de potencia.

Adicional, el uso de tubo capilar, contamos con una población de 1.588 pozos (36%) que cuenta con uso de tubo capilar, mientras que 2.769 pozos (53%) no requieren tubo capilar para su operación. No obstante, esta distribución varía significativamente entre operadoras, reflejando las condiciones específicas de cada campo. Por ejemplo, compañías como Gran Tierra presentan una

adopción del 100% en la incorporación de tubo capilar mientras que otras como SierraCol Energy operan mayoritariamente sin necesidad de uso de tubo capilar.

Ahora bien, con el fin de estimar el Total Available Market (TAM) para el proceso de rehabilitación de cable de potencia, es necesario considerar variables que reflejen la dinámica actual de la industria petrolera en el país; entre esas, la actividad de taladros de perforación/reacondicionamiento, desarrollo de nuevos pozos, índice de falla y el porcentaje de reutilización de cable de potencia; y todo esto en un ejercicio aterrizado hasta 2030.

3.2.Cable disponible para proceso de rehabilitación en Colombia

De acuerdo con el análisis presentado anteriormente, se desarrolla un ejercicio de estimación de mercado potencial para el proceso de rehabilitación de cable en un horizonte de cinco años, esta proyección se fundamenta en el estudio de mercado realizado para el año 2024, tomando base de la condición actual de la industria y considerando su evolución para el periodo 2025-2030.

Iniciamos nuestro análisis partiendo de la cantidad total de pozos con sistema BES estimada a finales de 2024 (4.357 pozos); A partir de ello, se consideran, y con consideración de planes anuales asociados a perforación de nuevos pozos, instalaciones de sistemas de levantamiento, actividad de reacondicionamiento, intervenciones por fallas, entre otros. Todo esto permite proyectar un comportamiento del sistema de bombeo electrosumergible en las operaciones del país, y esto a su vez con la experiencia operativa respecto al uso de cable de potencia nuevo/

reusado/ contemplado como scrap, facilitan una aproximación del mercado asociado a este proyecto de rehabilitación de cables BES.

Para este análisis, se contempla como referencia el comportamiento reciente de perforación de pozos nuevos en Colombia (**Error! Reference source not found.**), el cual sirve como base para proyección en los próximos años. (Campetrol, 2024).

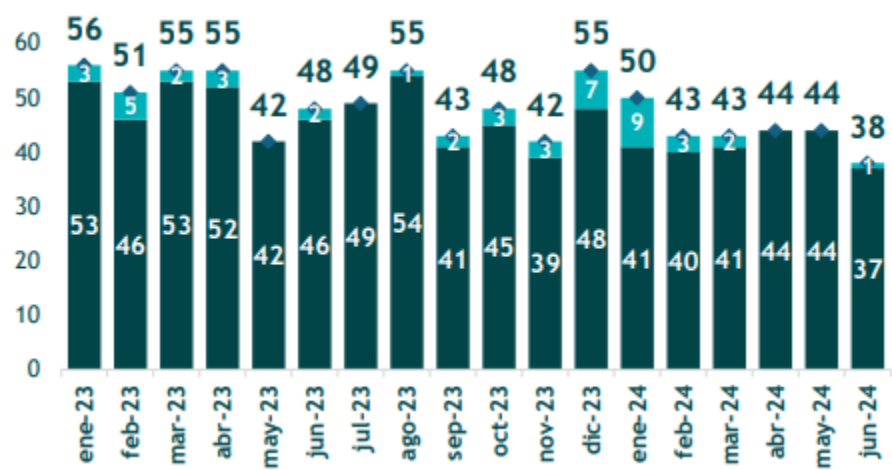


Figura 16. Pozos perforados año 2023-2024

Nota. Adaptado de Informe de taladros y producción, por Campetrol.

Con esta información se tiene que para el año 2023 se perforaron un total de 599 pozos nuevos, de los cuales 568 corresponde a productores, y 31 fueron pozos inyectores. Sin embargo, respecto al año anterior, representa una disminución del 8,8% en la actividad de perforación, esto Asociado a factores políticos e ideologías de gobierno actual al no buscar nuevas exploraciones petroleras, sumado de condiciones de mercado y decisiones de inversión por parte de compañías E&P. Con esto se realiza proyección de nuevos pozos para periodo de 2025-2026 con una disminución del 12.5% (524 pozos) respecto al año 2023; y contemplando una reactivación inicial

del 15% de la industria a partir de 2027 resultado de nuevas elecciones de gobierno en Colombia, con incremento de 7% anual hasta 2030.

Con base a la participación porcentual presentada anteriormente del mercado en Colombia, se estima que aproximadamente el 52% de los nuevos pozos se instalaran con sistemas de levantamiento BES. No obstante, está estimación de población total de pozos con sistema BES no considera únicamente nuevos pozos, ya que hay una fracción de la población existente que sale de operación debido a factores como, abandono de pozos, cambios de sistema ALS; para este análisis se contempla una tasa del 2% anual respecto a los pozos activos BES.

Con base a los supuestos planteados bajo una experiencia y un estudio de mercado realizado, se presenta la Tabla 12, de la proyección de crecimiento del sistema BES en Colombia para los años 2024-2030.

Tabla 12. Proyección de pozos ESP en Colombia

	AÑO	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	POZOS ESP	4.357	4.542	4.724	4.902	5.142	5.403	5.685
	NEW WELLS		524	524	650	700	750	800
52%	NUEVOS ESP		272	272	338	364	390	416
	Abandonos, cambios ALS, otros.		-91	-94	-98	-103	-108	-114
-2%	% CAGR *		4.3%	4.0%	3.8%	4.9%	5.1%	5.2%

*** CAGR: Compound annual growth rate**

Los resultados evidencian una tendencia de crecimiento en la implementación del sistema de bombeo electrosumergible, pasando de 4.357 pozos en los años 2024 a 5.685 pozos proyectados para el año 2030, representando un incremento aproximado del 30% (Figura 17) lo que también

indica es un escenario estable para la demanda de sistema BES, y claramente el uso constante de cable de potencia BES para la operación.

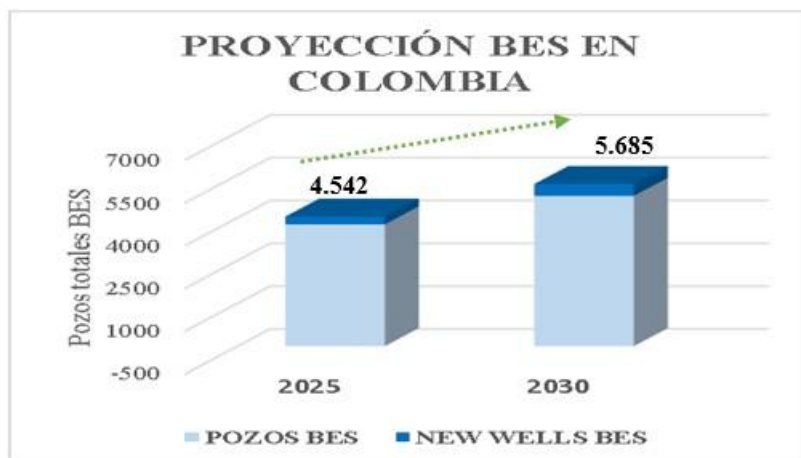


Figura 17. Proyección comparativa entre 2025 y 2030 en sistemas BES.

Bajo este escenario, se evidencia un alto potencial estratégico para la implementación de procesos de rehabilitación de cable de potencia, sin embargo, este potencial se concentra principalmente en los pozos que presentan falla y serán intervenidos (Well Services-WS), ya que aquí se genera la mayor disponibilidad y requerimiento de cable, que inicialmente es inspeccionado, pero que gran parte queda sin inspección y retirado para proceso de scrap.

En este contexto y para evaluar esa población, resulta fundamental considerar el IF (Índice de falla) del sistema BES; este indicador es muy propio de cada compañía operadora ya que depende cada campo es un mundo; es decir un comportamiento operativo diferente; el IF permite aproximar de manera más precisa el número de pozos que fallan anualmente, y por ende cantidad de intervenciones donde se retira cable de potencia; el objetivo para el año siguiente en cada empresa operadora es que su índice de falla mejore respecto al año anterior.

Adicionalmente, se observa que el porcentaje de cable a reemplazar para operaciones de Well Service por parte de las operadoras es, en promedio, cercano al 15%. Este valor se toma como base

para la estimación de nuestro mercado asociado al proceso de rehabilitación de cable de potencia, representando la fracción de cable que entra en ciclo de reemplazo y que es requerido en la operación. Para realizar nuestra conversión a cantidad de pies (ft), tomamos como referencia la profundidad promedio de un campo colombiano (Caño limón), es decir 7.000 ft.

Tabla 13. Proyección de pies totales para proceso de rehabilitación 2025-2030.

		Profundidad promedio (ft)			7.000				
		Proyección Colombia							
%		2025	2026	2027	2028	2029	2030	TOTAL	
	POZOS BES	4.542	4.724	4.902	5.142	5.403	5.685		
0.98	Índice de Falla (IF)	0.3	0.294	0.288	0.282	0.277	0.271		
	Fallas BES	1.348	1.376	1.400	1.432	1.473	1.518		
	Cantidad pozos para reemplazo de cable BES	202	206	210	215	221	228	1.282	
15	Pies totales potenciales para rehabilitación	1'415.371	1'444.278	1'470.341	1'503.419	1'546.848	1'593.974	8'974.230 FT	

El análisis desarrollado para el periodo de 2025-2030 del mercado potencial para el proceso de rehabilitación de cable de potencia BES en Colombia, estima un total de **1.282 pozos candidatos** para reemplazo; esto se traduce en aproximadamente **8,97 millones de pies** potencialmente disponible para el proceso de rehabilitación, lo que nos evidencia la existencia de un mercado relevante y sostenido para la implementación en Colombia.

3.3.Contribución a la sostenibilidad y reducción de la huella de carbono

En los últimos años, la industria de hidrocarburos ha evidenciado la necesidad de reducir su impacto ambiental, lo que ha impulsado la adopción de estrategias orientadas a la sostenibilidad y al uso eficiente de los (Ecopetrol, 2021). En este contexto, la optimización de materiales y la extensión de la vida útil de los componentes se convierte en elementos claves para disminuir la huella de carbono, este enfoque se enmarca en el concepto de economía circular, el cual promueve el aprovechamiento de los recursos mediante su reutilización, recuperación y reincorporación en los procesos.

La transición hacia una economía circular implica intervenir el ciclo de vida de un producto, desde la producción hasta la creación de mercados para materias primas secundarias (summun projects, 2023). Este modelo se fundamenta en los principios de las 9R: Repensar, Reutilizar, Reparar, Restaurar, Remanufacturar, Reducir, Re-proponer, Reciclar y Recuperar (Minambiente, 2018), los cuales buscan maximizar el aprovechamiento de los recursos y minimizar la generación de residuos.

Bajo este enfoque se promueve la generación de valor agregado a lo largo de la cadena de producción y consumo, optimizando el uso de materiales y extendiendo su vida útil. Desde el punto de vista ambiental, esto se traduce en la reducción de extracción de materias primas, disminución de residuos y emisiones, el uso eficiente del agua y la incorporación de fuentes de energía más sostenibles; A nivel económico permite la reducción de costos de materia prima, generación de ingresos por subproductos, la apertura a nuevos mercados y el fortalecimiento de la productividad y competitividad; Por parte del ámbito social, impulsa el desarrollo de capacidades, la creación

de modelos y una mayor demanda de tecnologías, productos y servicios orientados en la eficiencia y el eco-diseño. (Minambiente, 2018).

Alineado con lo anterior, compañías operadoras como Ecopetrol, ha definido estrategias claras, orientadas a sostenibilidad y reducción de emisiones de efecto invernadero (GEI). Estas incluyen planes de descarbonización enfocados en la optimización de procesos, el uso eficiente de la energía, la incorporación de tecnologías limpias y la reducción de emisiones a lo largo de toda la cadena de valor (Ecopetrol, 2021) . Por ello, la reducción de la huella de carbono se ha consolidado como una estrategia corporativa orientada a mejorar la eficiencia operativa y la competitividad del sector, a través de la gestión integral de emisiones en los alcances 1, 2 y 3. El alcance 1 corresponde a las emisiones directas provenientes de fuentes bajo el control de la operación, como combustión, teas y venteos; el alcance 2 incluye las emisiones indirectas, asociadas a la generación de electricidad adquirida a terceros; y el alcance 3 abarca aquellas emisiones indirectas derivadas de la cadena de valor de la empresa. (Ecopetrol, 2021).

Es por ello, que una implementación de proceso de rehabilitación de cable de potencia en sistemas BES, estaría muy alineada a las estrategias de mitigación, contribuye en la demanda de nuevos materiales, disminuir las emisiones asociadas a su fabricación y promover un modelo de economía circular.

Adicionalmente, es importante resaltar que el principal componente de los cables de potencia es el Cobre, elemento esencial en múltiples tecnologías clave para la transición energética, tales como la energía solar fotovoltaica, la energía eólica, los vehículos eléctricos, el almacenamiento de energía en baterías y las redes eléctricas, debido a sus propiedades de alta conductividad eléctrica, maleabilidad y ductilidad. (Zhang, 2015).

En la actualidad la creciente demanda global de las tecnologías que requieren de cobre han generado una presión significativa sobre su suministro, lo que se traduce en variaciones constantes en su precio y una mayor necesidad de optimizar su uso; en este contexto, el aprovechamiento del cobre mediante procesos de reutilización del mismo, cobra especial relevancia, ya que permite reducir la dependencia de materia prima nuevo, disminución de impactos asociados a su extracción y contribuir a la estabilidad en costos dentro de la operación.

3.1.3 Estimación en la huella de Carbono mediante el proceso de rehabilitación de Cable

Existen múltiples enfoques para a evaluación de la huella de carbono, siendo los principales organizacional, territorial, producto (bienes y servicios) e individual; los cuales se fundamenta en metodologías estandarizadas (Tabla 14), establecen los principios, requisitos y directrices para la cuantificación y reporte de la huella de carbono de productos a lo largo de todo su ciclo de vida.

Tabla 14. Normas o estándares internacionales para la cuantificación de emisiones GEI

NORMA/ METODOLOGÍA	ALCANCE	CARACTERÍSTICA PRINCIPAL
GHG Protocol Protocoló GEI	Producto / Organización / Territorio	Contabilización y gestión de emisiones de GEI. Primer estándar global (2001). Incluye metodologías para reporte corporativo, cuantificación de proyectos, inventarios urbanos y estrategias de mitigación. Base para definición de alcances 1, 2 y 3.
Normas PAS (2050 / 2060)	PAS 2050: Producto PAS 2060: Organizaciones/ Territorio	PAS 2050: guía para dos ciclos de vida, business to business: ciclo de vida finaliza cuando se entrega y será usado para fabricación de otro producto; business to customer: ciclo de vida del producto incluye las actividades posteriores a la entrega del producto al cliente/usuario. PAS 2060: relevante en relación con las buenas prácticas de compensación de las emisiones

			no reductibles y está orientada a organismos que buscan ser neutros en carbono.
ISO	14064	Organización	Especificaciones para cuantificar, reportar, monitorear de emisiones y remociones de GEI.
	14067	Productos	Enfocada en la cuantificación y comunicación de la huella de carbono de un producto (bienes y servicios)
Bilan Carbone		Producto / Organización / Territorio	Metodología integral para cuantificar y reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), permitiendo medir su impacto ambiental total.

Nota. Adaptado de Guía para la implementación de Programas Nacionales Voluntarios de Huella de Carbono en América Latina, por Rescalvo (2022).(Rescalvo, 2022)

Para comprender las diferencias entre los enfoques de evaluación de la huella de carbono, se definen los siguientes alcances:

1. **Alcance Organizacional:** Comprende las emisiones de GEI generadas por todas las operaciones y subsidiarias propias de una organización (entidad pública, privada, sociedad civil, etc.) durante un tiempo determinado. (Rescalvo, 2022).
2. **Alcance Territorial:** Incluye las emisiones GEI generadas de un territorio geográfico específico, como un municipio, región, ciudad, entre otros. (Rescalvo, 2022).
3. **Alcance de Productos (Bienes y servicio):** Considera las emisiones GEI asociadas a todas las diferentes fases del ciclo de vida de un producto o servicio; incluyendo su fabricación, ensamble, comercialización, distribución, exportación/importación, entre otros. (Rescalvo, 2022).

Por lo anterior el enfoque del presente proyecto se enmarca en alcance de producto; dado que el análisis se centra cable de potencia utilizado en los sistemas de bombeo electrosumergible a lo largo de su ciclo de vida de operación. Este enfoque permite evaluar las emisiones GEI asociadas a cada una de las etapas, desde obtención de materia prima hasta su operación. Para la

estimación de la huella de carbono (todo en función a un pide de cable), nos basamos en los lineamientos de Protocolo de GEI creado por el World Resource Institute (WRI) y World Business Council for Sustainable Development (WBCSD).

Con el fin de dimensionar el impacto Ambiental del proceso propuesto, se contempla una comparación entre la emisión de la huella de carbono estimada de adquisición de cable nuevo suministrado por fabricante de referencia **Kerite**, y el escenario planteado de rehabilitación de cable BES, para esto se tuvo enfoque en el proceso de manufactura. Figura 18 e Figura 19.

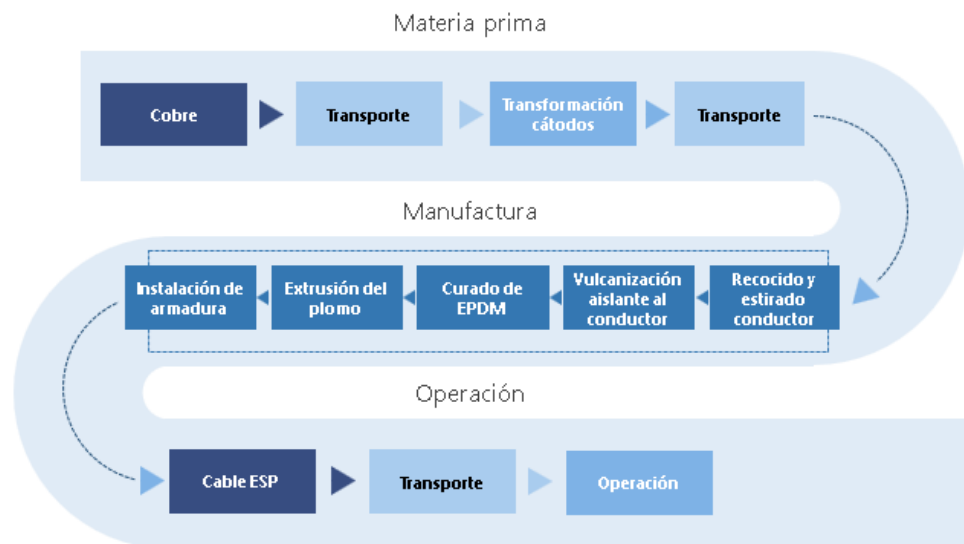


Figura 18. Proceso de producción de cable nuevo.

Nota. Adaptado de Presentación cumbre Recuperación de Cables de Bombas

Electrosumergibles, por Azul Energy.

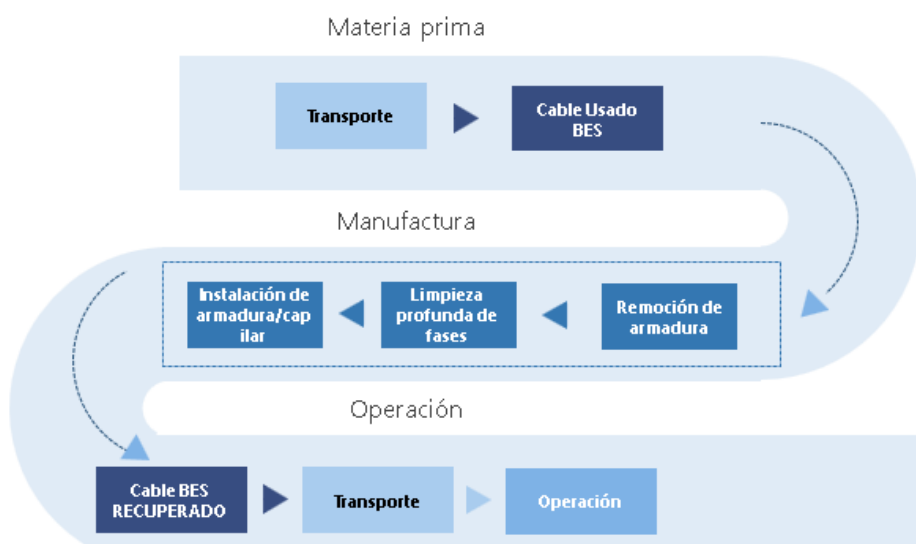


Figura 19. Proceso de producción cable recuperado.

La Tabla 15 consolida el cálculo comparativo de emisiones GEI para los escenarios de cable nuevo marca Kerite y cable rehabilitado (importante tener en cuenta que se tuvo en cuenta capacidad de una planta colombiana pionera en este proceso), permitiendo visualizar de manera directa la reducción de huella de carbono alcanzable mediante la implementación del proceso propuesto. La cuantificación se desarrolló en función a un pie de cable, en primer lugar, se estimó el consumo energético total de la planta de manufactura para cada escenario. En el escenario de cable nuevo se toma como referencia consumo de 60 MWh (correspondiente a un valor estimado obtenido por la planta de la energía requerida en el proceso de manufactura, observado en la Figura 18. En el caso de cable rehabilitado, el consumo energético es de 2.64 MWh, asociado a las etapas de proceso de reacondicionamiento.

El cálculo de emisiones de Co2, se realizó bajo la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones de GEI (ton CO2 eq): Dato de la actividad (MW) x dato de emisión (KgCO2 / MWh) x GWP (potencial de calentamiento global)}$$

Tabla 15. Comparación de la huella de carbono en el proceso de manufactura: cable nuevo Kerite vs cable rehabilitado

Ítem	Unidad	Cable nuevo Kerite	Cable rehabilitado
Dato de actividad	MW	2.5	0.11
Dato de actividad	MWh	60	2.64
Dato de emisión	KgCO ₂ / MWh	243.25	112
GWP	CO ₂	1	1
Emisión GEI	KgCO ₂ equ	14,595.0	295.68
Capacidad diaria de fabricación	Ft	17.500	1.750
Emisión GEI	KgCO₂ /Ft	0.8340	0.1690

Los resultados obtenidos evidencian una diferencia significativa entre ambos escenarios evaluados en el proceso de manufactura. La adquisición de cable nuevo suministrado por Kerite presenta una emisión estimada de **0.834 kgCo₂ eq/ft**, mientras que el proceso de rehabilitación tiene un estimado de **0.169 kgCo₂ eq/ft**.

Lo anterior representa una reducción cercana al 80% por pie de cable, esto es debido principalmente al no tener procesos asociados a manufactura de conductor de cobre, ensamble de fase, entre otros).

Al extrapolar este resultado al mercado potencial estimado para Colombia en el periodo 2025-2030, correspondiente a **8.97 millones de pies**, se obtiene un ahorro acumulado de 5.9 toneladas de CO₂eq respecto al escenario de compra de cable nuevo Kerite.

Este resultado evidencia el alto valor ambiental que se obtendría por el proceso de rehabilitación propuesto; así mismo todo este análisis abarcado permite demostrar la existencia de un mercado potencial sostenible para la implementación del proceso en los sistemas de

levantamiento BES en Colombia, y lo muy asociado y alineado que se encuentra con las estrategias de economía circular de las empresas operadoras en la industria de hidrocarburos.

4. Conclusiones

1. El estudio de las fallas asociadas al cable de potencia BES permitió inicialmente conocer las diferentes causas en diferentes ámbitos de operación que afectan el desempeño y confiabilidad; así mismo se demostró que no todo cable retirado de la operación que presente alguna condición anormal debe clasificarse automáticamente como cable Scrap; ya que no todos los hallazgos comprometen la integridad total del cable; en muchos casos, la afectación puede estar localizada en una sección puntual de armadura o de recubrimiento en alguna fase, manteniendo tramos con condiciones eléctricas y mecánicas recuperables, es decir potenciales para el proceso de rehabilitación, con el fin de darle aprovechamiento a estos activos.
2. El desarrollo metodológico planteado para el proceso de rehabilitación de cables BES permitió estructurar una ruta técnica integral, compuesta por estaciones de trabajo que facilitan una secuencia lógica de inspección, control y aseguramiento de calidad en cada una de ellas. El principal aporte radica en la confiabilidad que tiene este proceso diseñado al demostrar que la rehabilitación puede ejecutarse bajo criterios técnicos controlados, supervisados y estandarizados. Así mismo, se resalta la importancia de contar con personal especializado en su desarrollo, ya que la correcta ejecución de las inspecciones, pruebas y criterios de aceptación por etapa resulta determinante para garantizar la calidad y el buen desempeño del cable BES en la operación.
3. El análisis de mercado potencia en Colombia permitió demostrar que existe una oportunidad real, sostenible y escalable dentro de la industria en el país, esto soportado por la alta

participación del sistema BES en las operaciones nacionales y en la proyección de crecimiento estimada para los próximos años. Así mismo, se evidencio que esta propuesta constituye una estrategia de alto valor para las compañías operadoras ya que se encuentra muy alineados con sus objetivos estratégicos de optimización de costos, aprovechamiento de activos y disminución del impacto ambiental. La comparación frente al suministro de cable nuevo permitió confirmar reducciones significativas en la huella de carbono, consolidando el proceso de rehabilitación de cables BES como una solución alineada con principios de economía circular.

5. Recomendaciones

Con base a los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo y las conclusiones, se sugieren las siguientes recomendaciones:

1. Al tratarse de un proceso relativamente nuevo para la industria, pero con múltiples beneficios técnicos, económicos y ambientales, se recomienda su implementación progresiva dentro de las operaciones. En este sentido, se sugiere a las empresas operadoras y de servicios que consideren la implementación, se realice inicialmente bajo un esquema piloto, que permita validar desempeño en diferentes escenarios operativos, posteriormente, facilitar su masificación.
2. Es de vital importancia contar un sistema de trazabilidad que documente de forma integral la historia operativa del cable BES, incluyendo resultados de pruebas eléctricas, inspecciones visuales, splices, entre otros; Esto permitirá realizar un seguimiento continuo del cable a lo largo de toda su vida operativa.
3. Para futuros estudios, se sugiere ampliar el análisis de huella de carbono incluyendo etapas adicionales del ciclo de vida del cable, tales como transporte, instalaciones en campo, entre otros; Lo anterior permitirá cuantificar de forma integral los beneficios asociados al proceso total de rehabilitación del cable BES.

Referencias bibliográficas

Novomet. (2025). *Novomet*. Obtenido de www.novometgroup.com

Acevedo, L. (2018). *DISEÑO DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA UN CAMPO UBICADO EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES A PARTIR DEL ANÁLISIS DE FALLA*. Universidad Industrial de Santander.

Aguirre, E., Macias, J., Tabango, E., & Medina, P. (2016). *Análisis estratégico de la extracción de petróleo con sistemas de ahorro de energía Novomet*.

Alarcón, C. A. U., & Sierra, D. S. Z. (2020b). *EVALUACIÓN DE LA REUTILIZACIÓN DE CABLE DE POTENCIA DE BOMBAS ELECTROSUMERGIBLES EN POZOS DEL CAMPO CPO-09*.

Bureau Veritas. (s. f.). *Cálculo de la Huella de Carbono*.

Campetrol. (2024, enero). *Informe de taladros y producción*.
<https://campetrol.org/documentos/Informe%20de%20Taladros%20Agosto%202023.pdf>

Campetrol. (2026). *Informe de Taladros y Producción, 2026*.

Carpenter, C. (2024). Study Evaluates Long-Term Corrosion Risk of Load-Bearing, High-Power ESP Cable. *Journal of Petroleum Technology*, 76(10), 82-84.
<https://doi.org/10.2118/1024-0082-JPT>

Castro, G., & Daniel, A. (2019). *Estudio para la optimización de la producción mediante análisis nodal en pozos con sistema BES del Bloque 57* [bachelorThesis, Quito, 2019.].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20213>

Díaz, Á. M. L., & Varón, J. M. G. (2014). *UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS NEIVA – HUILA 2014*.

Ecopetrol. (2021). *Norma para la Estrategia Ambiental* (Norma HSE-N-005; Sistema de Gestión HSE Vicepresidencia HSE).

Ecopetrol | Economía circular en pro del desarrollo. (s. f.). Recuperado 10 de mayo de 2025, de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/economia-circular/modelo-economia-circular>

Escalante, S. (2015). *Bombeo Electrosumergible (BES)*. Blogs.unellez.edu.ve: <http://blogs.unellez.edu.ve/sharon/files/2014/01/Guia-4-BES-SEP-2015.pdf>

Harris, D., Banman, M., & Malone, D. (2019, mayo 6). *Design and Qualification Testing of ESP Cable to Improve ESP System Run Life*. SPE Gulf Coast Section Electric Submersible Pumps Symposium. <https://doi.org/10.2118/194402-MS>

IEEE 1017.2 Recommended Practice for Specifying Electric Submersible Pump Cable. (s. f.). IEEE Standards Association. Recuperado 6 de septiembre de 2025, de <https://standards.ieee.org/ieee/1017.2/10516/>

Informe de taladros y producción, diciembre 2023. (s. f.). Recuperado 10 de marzo de 2026, de <https://campetrol.org/documentos/Informe%20de%20Taladros%20Diciembre%202023.pdf>

INTERNATIONAL STANDARD. (2018). *ISO 14064-1* (2.^a ed.). ISO.

Kerite. (s. f.-b). *ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP (ESP) CABLE*.

Labrador, L., Matheus, L., Londono, Y. M., Herrera, C. L. L., Murcia, A. Z., Carrasquero, N. J. V., Camacho, A., Camacho, A. A. D., Perez, L. M., & Gomez, O. A. (s. f.). *Pushing the Limits of Traditional Cable Reuse Criteria: Innovations in Testing and Major Repairs of*

- Power Cables for Electric Submersible Pumps in Orinoquia Oil Fields*. Recuperado 22 de enero de 2026, de <https://dx.doi.org/10.2118/225264-MS>
- Lara, C., & David, J. (2025). *Evaluación de las principales causas de falla y alternativas de solución química para los sistemas de levantamiento artificial BES. Caso de estudio bloque Llanos 34*. <https://noesis.uis.edu.co/items/ca7d4781-24e8-44a6-89b4-e17ea40a2aab>
- Lozada Dias, A. M., & Gaitán Varón, J. M. (2014a). *Optimización del manejo operacional del cable de potencia para el sistema de levantamiento artificial bombeo electrosumergible (BES) para la superintendencia de operación huila (SOH)*. Universidad Sur colombiana.
- Minambiente. (2018). *Colombia le apuesta a las 9R en economía circular*. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/4225-colombia-le-apuesta-a-las-9r-en-economia-circular>
- Nuestra ambición a 2040*. (2025, mayo 10). <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/economia-circular/ambicion-2040>
- Ramírez, M. (2004). *Bombeo Electrosumergible: Análisis, Diseño, Optimización y Trouble Shooting*. Esp Oil Engineering Consultants.
- Rescalvo, M. (2022). *Guía para la implementación de Programas Nacionales Voluntarios de Huella de Carbono en América Latina*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Suaza, J. E. S. (s. f.). *ANALISIS DE FALLA DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE EN LA SUPERINTENDENCIA CASTILLA- CHICHIMENE DE ECOPETROL EN 2012*.
- summun projects. (2023). *Conferencia Economía Circular*.

- Suquillo, C., & Samuel, F. (2017). *Estudio para la optimización de producción de pozos con bombeo electrosumergible, mediante análisis nodal del campo Cuyabeno* [bachelorThesis, Quito, 2017.]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18852>
- Takacs, G. (1947). *Electrical Submersible Pumps: Manual Design Operations and Maintenance*. Elsevier Inc.
https://www.academia.edu/27844918/Electrical_Submersible_Pumps_Manual_Design_Operations_and_Maintenance
- Zhang, Y. (2015). *Análisis Ambiental de la Producción de Cobre*. Universidad Politécnica de Catalunya.

Apéndices

Apéndice A. Sistemas de bombeo electrosumergible (BES)

Sistemas de bombeo electro sumergible (BES)

El bombeo electro sumergible es uno de los métodos de levantamiento artificial más utilizados actualmente en la industria petrolera, y esto es debido a su capacidad de manejar altos volúmenes de fluidos y operación en ambientes exigentes de presión, temperatura y profundidad. (Takacs, 1947). Su rango de operación va desde 100 a 30.000 BPOD en caudal, profundidades entre 5.000 a 15.000 pies, y su rango de eficiencia está entre el 18% a 68%, así mismo son utilizados tanto en pozos On Shore y Off Shore, verticales o desviados. (Suquillo & Samuel, 2017).

El principio de funcionamiento básico de un sistema BES se basa en impulsar el fluido de yacimiento a superficie mediante la rotación centrífuga de una bomba (Escalante, 2015).

Una unidad típica de bombeo electro sumergible está compuesta principalmente por los equipos de superficie, equipo de fondo, y cable de potencia, como se evidencia en la Figura 20, y se explica a continuación de manera corta.

- Componentes de superficie:

- **Variador (VSD):** Encargado de realizar arranque del sistema así mismo controlar el voltaje, corriente y frecuencia durante su operación. (Suaza, s. f.)
- **Transformador (SDT):** Encargado de reducir la tensión lineal de distribución, a la tensión requerida por el variador para su operación (Suaza, s. f.)

- **Caja de Venteo:** Punto de conexión de cable de fondo del motor y el cable de superficie, además permite ventear a la atmosfera el gas que fluye a través del cable de fondo. (Suaza, s. f.)

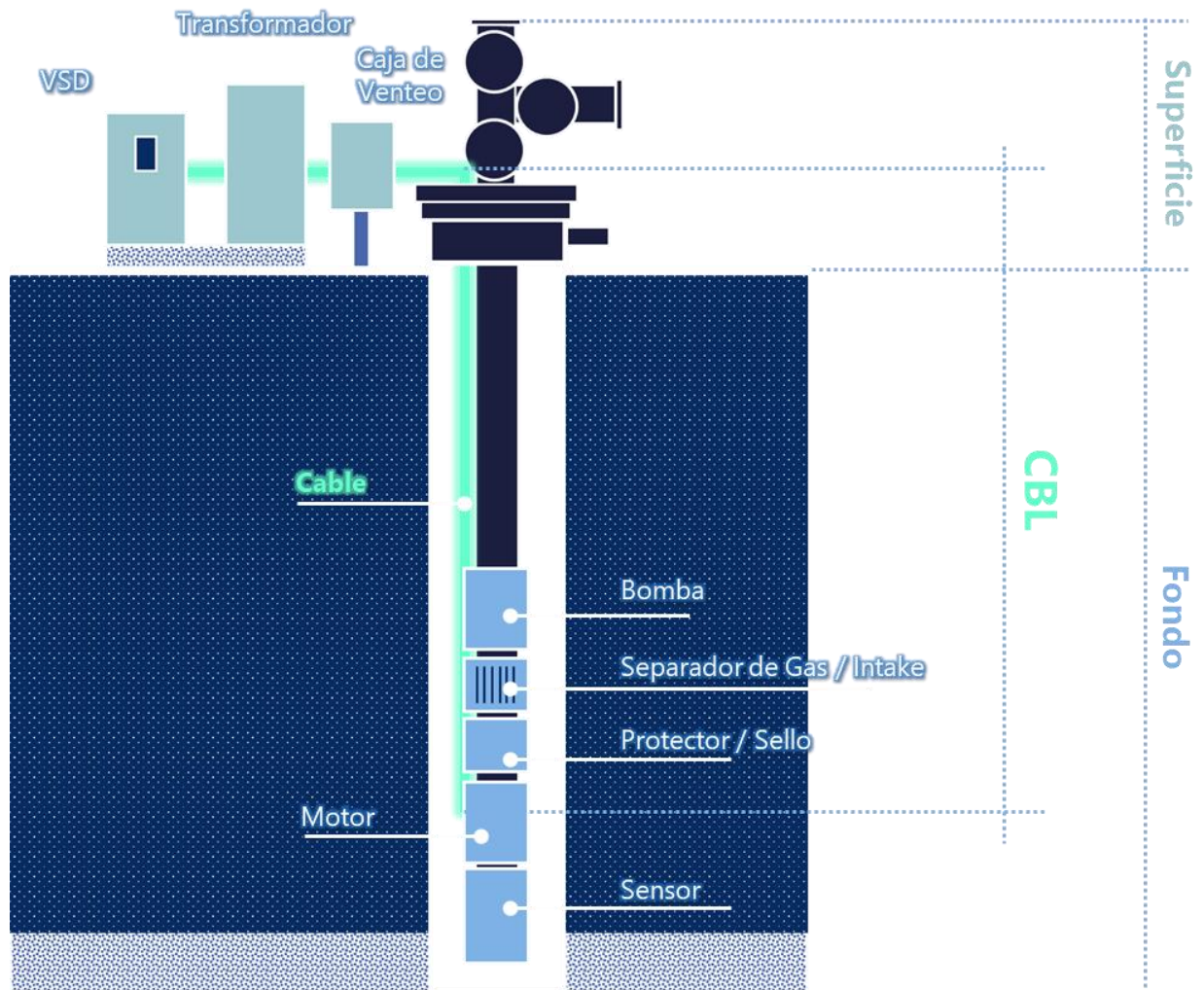


Figura 20. Composición del sistema BES.

Nota. Adaptado de Presentación Cumbre Azul Energy Colombia: Recuperación de Cables de Bombas Electrosumergibles, una contribución a la reducción de huella de CO₂ y optimización de costos, por Azul Energy Colombia.

- Componente de Fondo:

- **Bomba:** Bomba centrífuga multietapa compuesta por un impulsor rotatorio y un difusor estacionario. Su principal función es brindar el aumento de presión necesaria para elevar el fluido a superficie. (Castro & Daniel, 2019).
- **Separador de Gas:** En pozos que presentan alto contenido de gas, se requiere de un dispositivo capaz de eliminar/separar el gas libre del fluido. (Ramírez, 2004).
- **Sello o Protector:** Su función principal es proteger al motor de la contaminación de fluidos provenientes del pozo. (Castro & Daniel, 2019).
- **Motor:** Fuente de potencia que genera el movimiento a la bomba para desplazar fluidos. (Suaza, s. f.)
- **Sensor:** Dispositivo capaz de monitorear condiciones operacionales del sistema. (Castro & Daniel, 2019).