

**OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS EQUIPOS DE BES EN EL
CLÚSTER A, DE UN CAMPO DE CRUDO PESADO UBICADO EN LA CUENCA DE
LOS LLANOS ORIENTALES**

NICOLAS CAMILO CALVO ACOSTA

MISAEEL STEVEN HERNÁNDEZ ORDÓÑEZ

**Proyecto integral de grado para optar al título de
Ingeniero de Petróleos**

Orientador

Lenin Peña Cardoso

Ingeniero de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

BOGOTÁ D.C.

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Lenin Peña Cardoso
Firma del Director

Ing. Camilo Andrés Guerrero Martin
Firma Jurado

Ing. Sebastian Alejandro Gómez Alba
Firma Jurado

Bogotá, D.C. Enero de 2021.

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrectora de Académica y de Investigaciones

Dra. MARIA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMAN

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. JUAN CARLOS RODRÍGUEZ ESPARZA

DEDICATORIA

El presente proyecto va dedicado con todo mi amor y cariño a toda mi familia, quienes me acompañaron durante todos los tiempos buenos y malos.

A mi abuelo Abel Calvo, mi consejero y mi guía, quien inculco en mí, los valores de voluntad, disciplina, gratitud, paciencia, perseverancia y optimismo, fallecido durante el desarrollo de este proyecto.

A mi padre Mauricio Calvo, que me hizo entender que antes de ser profesional debo ser persona, tener buenos sentimientos y siempre estar dispuesto ayudar a los demás.

A mi madre Yary Acosta, que me enseñó lo más bonito de la vida que es soñar, que trabajando incansablemente, creyendo en mis capacidades, sin miedo al fracaso y con fe se cumplen los sueños.

A ellos que con todo su sacrificio, dedicación y esfuerzo me sacaron adelante y son mi fuente de inspiración para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos brinde un mejor futuro.

A Dios y la vida que independientemente de las dificultades me enseñó lo realmente importante que es la felicidad, la familia, el amor, las amistades, las lecciones, los recuerdos y los momentos.

A mis amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas, en especial a Misael Hernandez quien me acompañó durante este proceso como amigo y consejero, a todas aquellas personas que durante estos años estuvieron a mi lado apoyándome y lograron que este sueño se haga realidad.

Nicolas Camilo Calvo Acosta.

DEDICATORIA

Principalmente le dedico mi trabajo de grado a mis padres, Evelio Hernández y Libia Ordoñez, quienes sin importar la circunstancias me apoyan de manera incondicional, son mi mayor fortaleza y lo han dado todo por ayudarme a cumplir mis metas hasta este momento, tanto a nivel personal como profesional. Enseñándome que el trabajo y la dedicación siempre son parte del camino para el éxito, sin dejar de la mano la felicidad.

A mi hermano mayor Camilo Hernandez quien siempre ha sido mi mejor amigo y compañero desde la infancia, de quien estoy orgulloso que sea mi modelo a seguir, enseñándome que sin importar los errores se debe perseverar para triunfar y Evelyn Hernandez mi hermana menor quien siempre con una sonrisa me motiva a seguir mis sueños y a quien apoyare para cumplir cada una de sus metas.

Finalmente a mis amigos por apoyarme y motivarme sin ningún interés alguno, con quienes puedo contar en las buenas y en las malas, a mi compañero y amigo Nicolas Calvo quien con la misma paciencia y dedicación permitió que se lograra esta meta.

En este trabajo se refleja cada uno de los esfuerzos y sacrificios realizados a lo largo del estudio de mi carrera y así mismo uno de mis primeros logros como ingeniero, por eso especialmente le agradezco a Dios y Máxima Morales por orientarme y enseñarme que se debe luchar para salir a delante y permitirme llegar hasta esta etapa de la vida.

Misael Steven Hernandez Ordoñez.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la **Fundación Universidad de América**, a sus directivas, sus docentes y a sus empleados quienes hicieron parte de nuestra formación integral como ingenieros de petróleos, así mismo nos brindaron cada una de las herramientas y la orientación necesarias para el desarrollo exitoso y finalización del proyecto.

Se agradece a la compañía **Frontera Energy Corp.** por suministrar la información, los recursos necesarios y así mismo por la orientación profesional requerida para el desarrollo del proyecto.

Se agradece al director de tesis **Ing. Lenin Peña Cardoso** por la oportunidad brindada de su parte, la atención, el tiempo, dedicación y la orientación profesional para el desarrollo y terminación del proyecto de grado.

Se agradece al **Ing. Edinson Jiménez** quien fue el docente y orientador de trabajo de grado, por su guía y recomendaciones durante el desarrollo del presente proyecto.

Finalmente se agradece a los **Ings. Leonardo González, Diego Estupiñán, Néstor Barón y Juan Carlos Rojas**, por su colaboración y aporte durante el desarrollo del proyecto.

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

TABLA DE CONTENIDOS

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1. Historia sistemas de levantamiento artificial (ALS)	16
1.2. Antecedentes del Bombeo Electrosumergible	17
1.3. Bombeo electrosumergible (BES)	18
1.4. Conceptos técnicos del bombeo electrosumergible	19
1.4.1. Viscosidad (μ)	19
1.4.2. Índice de productividad (IP)	19
1.4.3. Basic sediment and water (BSW)	19
1.4.4. Water cut (WC)	19
1.4.5. Densidad (ρ)	19
1.4.6. Gravedad específica (SG)	20
1.4.7. Grados API	20
1.4.8. Caudal (Q)	20
1.4.9. Presión (P)	21
1.4.10. Cabeza dinámica total (TDHsistema)	21
1.5. Componentes de fondo del sistema bombeo electrosumergible	22
1.5.1. Sensor de bomba	22
1.5.2. Motor	22
1.5.3. Sello	24
1.5.4. Intake	25
1.5.5. Separador de gas	25
1.5.6. Bomba	25
1.5.7. Motor lift extention (MLE)	26
1.5.8. Cable	26
1.6. Equipos de superficie del sistema bombeo electrosumergible	27
1.6.1. Fuentes de alimentación	28

1.6.2.	Transformador reductor	28
1.6.3.	Variador de frecuencia	28
1.6.4.	Transformador elevador	28
1.6.5.	Caja de venteo	29
1.7.	Fundamentos técnicos de energía	29
1.7.1.	Voltaje (V)	29
1.7.2.	Corriente (I)	29
1.7.3.	Resistencia (R)	29
1.7.4.	Potencia eléctrica (P)	30
1.7.5.	Factor de Potencia	31
1.7.6.	Frecuencia (F)	31
1.7.7.	Ley de ohm	31
1.8.	Eficiencia del sistema BES	32
1.9.	Consumo de energía	33
2.	METODOLOGÍA Y DATOS	34
2.1.	Selección y jerarquización de pozos	36
2.2.	Identificación de ineficiencias del sistema	36
2.3.	Causas de la ineficiencia	37
2.4.	Propuesta técnica para la optimización	37
2.4.1.	Pozo CM-7	37
2.4.2.	Procedimiento de de-rating CM-7	38
2.4.3.	Pozo CM-9	39
2.4.4.	Procedimiento de de-rating CM-9	40
2.5.	Evaluación de resultados	41
3.	ANALISIS Y RESULTADOS	42
3.1.	Selección y jerarquización de pozos	42
3.1.1.	Recolección de información	42
3.1.2.	Cálculos de Base de Datos	45
3.1.3.	Selección de pozos para la optimización energética	53
3.2.	Identificación de ineficiencias del sistema	54
3.3.	Causas de la ineficiencia	55

3.3.1.	Pozo CM-7	55
3.3.2.	Pozo CM-9	55
3.4.	Propuesta técnica para la optimización	56
3.4.1.	Estado actual del pozo CM-7	57
3.4.2.	Resultados de la propuesta pozo CM-7	58
3.4.3.	Estado actual del pozo CM-9	60
3.4.4.	Resultados de la propuesta pozo CM-9	62
3.5.	Evaluación de resultados	64
3.5.1.	Evaluación de resultados estimados por simulación pozo CM-7	64
3.5.1.	Evaluación de resultados validados en campo pozo CM-7	66
3.5.1.	Evaluación de resultados estimados por la simulación pozo CM-9	70
3.5.1.	Evaluación de resultados validados en campo pozo CM-9	72
4.	CONCLUSIONES	76
	BIBLIOGRAFÍA	79

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Primera marca bomba electrosumergible	17
Figura 2. Sistema de Bombeo electrosumergible	18
Figura 3. Comparación de comportamiento en motores de AM y PMM	24
Figura 4. Caída de voltaje en el cable	26
Figura 5. Cables de potencia y sus fases	27
Figura 6. Triangulo de potencias	30
Figura 7. Energía de entrada y salida BES	32
Figura 8. Diagrama metodología de trabajo	35
Figura 9. Ambiente principal de DesingRite®	38
Figura 10. Módulo de motor DesingRite®	39
Figura 11. Estado mecánico y trayectoria del pozo CM-7	57
Figura 12. Estado de operación de la bomba del pozo CM-7	58
Figura 13. Estado mecánico y trayectoria CM-9	60
Figura 14. Estado de operación de la bomba del pozo CM-9	61
Figura 15. Relación de caudal y consumo pozo CM-7	69
Figura 16. Relación de caudal y consumo pozo CM-9	75

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Prueba de producción validada de pozo	42
Tabla 2. Medidas eléctricas de pozo	43
Tabla 3. Datos básicos de diseño BES	44
Tabla 4. Datos equipo BES instalado	44
Tabla 5. Desbalance actual de fases en el motor	46
Tabla 6. TDH actual requerida por el pozo	48
Tabla 7. Potencias presentes en el sistema BES	50
Tabla 8. Cálculo de eficiencias y carga del motor	52
Tabla 9. Criterios para selección de pozo a optimizar	53
Tabla 10. Valores de placa motor pozo CM-7	55
Tabla 11. Valores de placa motor pozo CM-9	56
Tabla 12. Resultados simulación de optimización energética pozo CM-7	59
Tabla 13. Resultados propuesta de optimización energética pozo CM-9	63
Tabla 14. Contraste resultados estimados de consumo pozo CM-7	66
Tabla 15. Medidas eléctricas de superficie proceso de optimización pozo CM-7	67
Tabla 16. Contraste resultados validados en campo de consumo pozo CM-7	68
Tabla 17. Contraste resultados estimados de consumo pozo CM-9	72
Tabla 18. Medidas eléctricas de superficie proceso de optimización pozo CM-9	73
Tabla 19. Contraste resultados validados en campo de consumo pozo CM-9	74

RESUMEN

Frontera Energy Corp. se puede catalogar como una de las compañías de Colombia con mayor inversión en tecnología referente al BES, esto representa un reto importante cuando se trata del sistema energético que se asocia a este, debido a que demanda una cantidad de electricidad considerable para su operación. Por esta razón se realiza un estudio que propone mediante la simulación y aplicación en campo, generar una optimización y ahorro económico referente al consumo energético, sin sobrecostos operativos para la producción de crudo.

Este proyecto aplica la estrategia denominada de-rating, la cual se basa en la modificación de parámetros nominales del motor, sin necesidad de realizar la extracción del equipo, requiriendo solo ajustar el voltaje de entrada en superficie estimado mediante simulación. Al realizar la simulación del de-rating se estima un ahorro dependiendo de la carga y eficiencia del motor; en este caso se realizó la simulación y estimación del ahorro en 2 pozos, donde se calculó una disminución del consumo eléctrico en el pozo CM-7 de 6,01 % y el pozo CM-9 de 0,57 %. Teniendo en cuenta mencionados valores estimados de reducción de consumo, se realiza la aplicación del procedimiento en cada pozo, validando un ahorro energético en el pozo CM-7 de 5,26 % y en el pozo CM-9 de 2,55 % respectivamente. Finalmente como resultado de la aplicación se logra aumentar la eficiencia del sistema evaluado (CM-7 37,84 % - 47,77 % y CM-9 38,49 % a 49,09 %), garantizando la viabilidad técnica y económica de la optimización.

PALABRAS CLAVES: Bombeo electrosumergible, Eficiencia sistema BES, Optimización, Consumo energético, De-rating.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la implementación de los Sistemas de Levantamiento Artificial (ALS), como una estrategia que facilita la extracción de crudo es bastante empleada en la industria Oil and gas, esto con la finalidad de suministrarle la energía necesaria a los pozos productores que experimentan agotamiento en el yacimiento, permitiendo así que el hidrocarburo llegue hasta superficie. Es evidente que los equipos ALS requieren de una cantidad considerable de energía, para aportar el trabajo necesario al pozo y contribuir al proceso de producción de hidrocarburos, uno de los principales problemas que se evidencian en la industria, es el alto consumo energético de los equipos asociados al bombeo electrosumergible (BES), como lo es el caso de la empresa de apoyo para el desarrollo del proyecto, donde se estima una inversión de aproximadamente \$30'000.000 USD al año en consumo eléctrico asociado a ALS.

El campo en donde se desarrollará la optimización registra costos de energía de aproximadamente el 45% relacionados a ALS con respecto a los costos totales de operación. Debido a esto, cualquier práctica inmediata que pueda generar un ahorro de energía, puede ser de gran ventaja para las compañías Oil and Gas en Colombia. Este proyecto pretende implementar una estrategia de monitoreo y control directamente en superficie, que permita identificar oportunidades de optimización en el consumo energético asociado al bombeo electrosumergible y generar una reducción en costos operativos de producción, en un campo ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales.

Se han adelantado estudios a nivel mundial y nacional que evidencian la reducción del consumo energético asociado al bombeo electrosumergible, por ejemplo el caso aplicado en los bloques 16 & 67 de Ecuador, donde se obtuvieron incrementos en la eficiencia energética del bombeo electrosumergible (25.4% a 40.9%), generando un ahorro de 0.99 MW/d [1], la optimización energética realizada en operaciones de BES en Western Siberia, donde se logró mejorar la eficiencia eléctrica del sistema hasta el 40% [2] y finalmente el estudio económico del consumo eléctrico realizado mediante simulaciones de optimización de carga del sistema BES [3].

Es por ello que el presente proyecto tiene como objetivo general, optimizar el consumo energético de los equipos de bombeo electrosumergible (BES) en el clúster A, de un campo de crudo pesado ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales. Para dar resultado al anterior objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los pozos con oportunidad de mejora en el consumo energético, mediante el uso del indicador eficiencia del sistema BES.
- Plantear los escenarios de simulación que permitan la evaluación del cambio en la eficiencia energética del sistema de BES, para los pozos candidatos a la optimización.
- Realizar la simulación de los escenarios, que permitan la selección de la propuesta más adecuada, para la optimización de consumo energético de los sistemas de BES seleccionados.
- Evaluar financieramente el escenario con mejor desempeño en el clúster A, mediante una predicción del indicador financiero Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

Mediante la identificación de los pozos con alto consumo energético, se evaluarán escenarios de simulación numérica de eficiencia energética y carga del motor del conjunto de BES, lo anterior permitirá optimizar el consumo de energía del clúster A de un campo ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales, sin generar sobrecostos para la operación y manteniendo la producción de los pozos seleccionados.

1. MARCO TEÓRICO

Los conceptos que se deben tener en cuenta para la comprensión y desarrollo del proyecto son:

1.1. Historia sistemas de levantamiento artificial (ALS)

En el documento Pumping Oil: 155 Years of Artificial Lift se describen los principios básicos del ALS, donde se evidencian con el bombeo mecánico, este se extiende hacia el año 476 CE en Egipto. El bombeo mecánico ha sido el equipo más frecuente estos 155 años, desde 1859 se observó su primera aplicación en la industria Oil and Gas, sin embargo, fue en 1927 donde John H. Suter patentó el método.

De todos los métodos de levantamiento de petróleo, el gas lift es por mucho el más antiguo. Según Silas Frederick Shaw en 1927, pionero en flujo vertical, escribió que el flujo de un pozo se da mediante el gas lift, donde el gas comprimido es suministrado por naturaleza y es disuelto para ser mezclado con el crudo, puesto que sin este fenómeno no habría flujo natural en pozos de crudo si no hay gas asociado al crudo. En 1800, algunos métodos estaban siendo desarrollados continuamente para levantar artificialmente agua de pozos de agua. Este fue basado en el trabajo de un ingeniero de minas alemán llamado Carl Emanuel Löscher quien inventó usar aire comprimido para bombas de líquidos. El primer pozo que operó mediante el método de air lift fue en 1862 pero H.C. Miller en 1911 desarrolló los primeros experimentos para levantar petróleo de pozos con gas natural.

Hay dos tipos de bombas hidráulicas utilizadas hoy en día en levantamiento artificial de petróleo: bombas de pistón hidráulico reciprocante y bombas jet. Para las bombas de pistón hidráulico su funcionamiento básicamente empieza desde el año 1798 diseñado por William Bull and Richard Trevithick, pero fue hasta 1872 donde apareció la primera patente para el uso en pozos de crudo por Hiram W. Faucett and Alexander T. Por otro lado, las bombas jet hicieron su aparición al mercado comercial en la década de 1970.

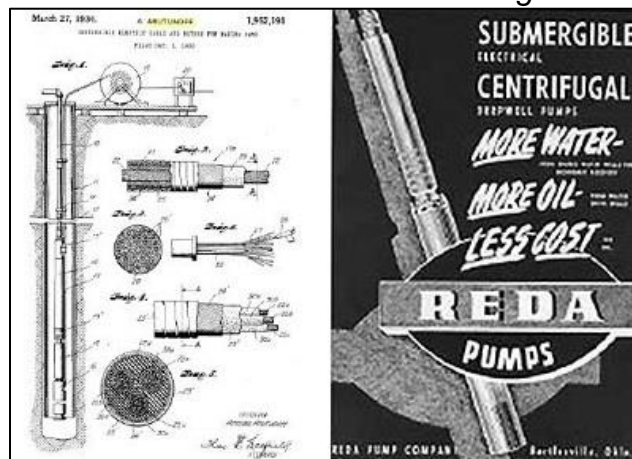
Por ultimo las bombas de cavidades progresivas son basadas en un mecanismo inventado por René Joseph Louis Morineau, patentado en 1937, la idea tiene raíces de una bomba para el levantamiento de agua llamado “Tornillo de Arquímedes” inventado por Arquímedes en (287-212 BCE). [4].

1.2. Antecedentes del Bombeo Electrosumergible

En 1894 fue emitida la primera patente de un modelo de bomba eléctrica enfocada a la producción de petróleo por Harry Pickett. En 1918 Robert Newcomb obtuvo la patente para un motor electromagnético que fuera capaz de operar en presencia de fluidos.

Posteriormente Armais Arutunoff nacido en Tiflis, Rusia, emigro a los Estados Unidos en 1923 antes de emigrar, conformo la empresa llamada “Russian Electrical Dynamooof Arutunoff” (REDA) en 1911 para manufacturar motores electrosumergibles. El sistema de bombeo electrosumergible fue patentado para un propósito comercial y funcional en 1926 por Armais Arutunoff, a su vez este fue el encargado de inventar y desarrollar el cable de potencia, como resultado se registra la primera instalación de un sistema de bombeo electrosumergible en el campo “El Dorado” ubicado en Kansas durante el mismo año [5].

Figura 1.
Primera marca bomba electrosumergible.

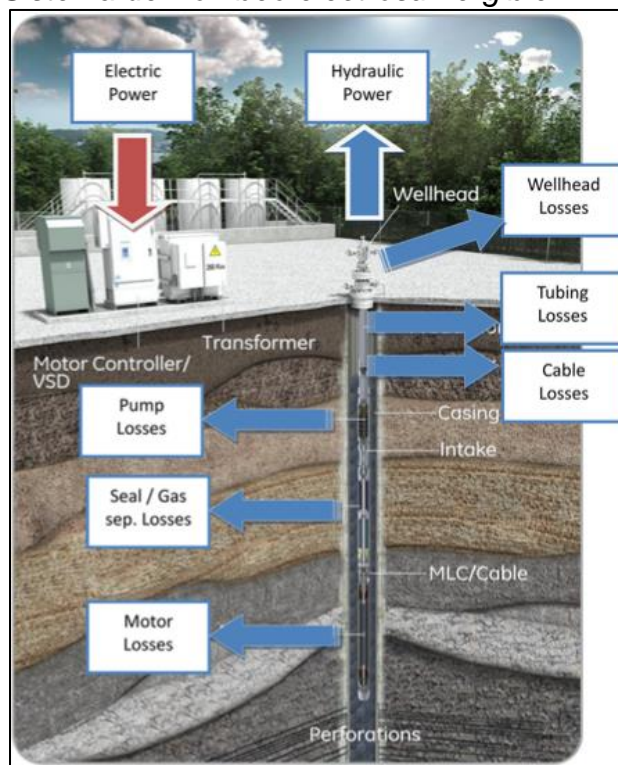


Nota. Primera marca en la historia del BES.
Tomado de: *Inventing the Electric Submersible Pump - American Oil & Gas Historical Society.*

1.3. Bombeo electrosumergible (BES)

“Un sistema de Bombeo electrosumergible como método de levantamiento artificial, se caracteriza por emplear energía eléctrica con el propósito de convertirla en energía hidráulica, lo anterior con la finalidad de levantar una columna de fluido mediante la rotación de una bomba centrífuga” [6]. Así mismo se deben tener en cuenta los conceptos técnicos para comprender el funcionamiento del sistema de bombeo electrosumergible.

Figura 2.
Sistema de Bombeo electrosumergible.



Nota. En la figura se exponen los componentes básicos de BES. Tomado de: “Study to Improve Energy Efficiency Using ESP Introduction: ESP Basin evolution,” pp. 1–23, 2015.

1.4. Conceptos técnicos del bombeo electrosumergible

1.4.1. Viscosidad (μ)

“Es una propiedad del fluido que representa la cantidad de fluido que fluye a través de una determina longitud en un determinado tiempo ($\frac{g}{cm*seg}$), la viscosidad de un fluido se puede calcular como la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte. Estas variables dependerán de las condiciones en las que se encuentra el fluido (composición, temperatura y presión)” [7], la viscosidad se reporta en centiPoise (cP) y a condiciones de yacimiento.

1.4.2. Índice de productividad (IP)

“El índice de productividad es una expresión matemática que indica la capacidad de flujo de un pozo a medida que aumenta la caída de presión del reservorio”[8]. Para determinar el IP de un pozo se emplea la siguiente ecuación 1:

$$IP = \frac{Q}{(Pr - P_{wf})} \left[\frac{BFPD}{PSI} \right]$$

1.4.3. Basic sediment and water (BSW)

Se reconoce el BSW como la cantidad de sedimentos y agua que se encuentran contenidos en el fluido de producción [9], este indicador se reporta en %.

1.4.4. Water cut (WC)

También llamado corte de agua es la cantidad producida de agua expresada en % con respecto al total del fluido de producción obtenido [10]; a diferencia del BSW este parámetro no contempla la cantidad de sedimentos.

1.4.5. Densidad (ρ)

“Es una propiedad física intensiva que relaciona la cantidad de masa de un material contenida en una unidad de volumen determinada, esta también depende de las condiciones de presión y temperatura en la que se encuentre el material” [11], normalmente se expresa por medio de la siguiente ecuación 2:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{gr}{cc} \right]$$

1.4.6. Gravedad específica (SG)

“Es un indicador adimensional, que resulta de la relación entre la densidad a condiciones normales de un fluido líquido con respecto a la densidad del agua, en el caso de los gases con respecto al aire” [12]. Se describe como la ecuación 3:

$$SG = \frac{\rho_{fluido}}{\rho_{H_2O}}$$

En el caso de un fluido de producción con mezcla entre agua y petróleo se puede estimar su gravedad específica mediante la ecuación 4:

$$SG_{mix} = (SG_{H_2O} * \%WC) + (SG_{oil} * (1 - \%WC))$$

1.4.7. Grados API

“Es una escala que se emplea para medir la densidad relativa de diversos hidrocarburos, tomando como referencia la densidad del agua a condiciones normales (60°F y 1 Atm), lo anterior se hace teniendo en cuenta la gravedad específica del fluido, esta escala la estableció American Petroleum Institute” [13], empleando la siguiente ecuación 5:

$$API = \frac{141.5}{GE} - 131.5$$

1.4.8. Caudal (Q)

Se define como caudal a la unidad de medida que determina el volumen fluido que circula a través de un área específica por unidad de tiempo [14]. Normalmente el caudal se expresa en BFPD en la industria del petróleo. El caudal de un pozo se puede calcular según el caso de estudio:

a. Ecuación 6 Darcy.

$$Q = \frac{7.08 \times 10^{-3} * K * h * (Pr - Pwf)}{\mu * \beta_o * \ln\left(\frac{re}{rw}\right)}$$

b. Ecuación 7 Vogel.

$$Q = IP (Pr - Pwf)$$

1.4.9. Presión (P)

Es una propiedad física, que relaciona la fuerza que se ejerce en una superficie por unidad de área, normalmente se determina con la siguiente ecuación 8:

$$P = \frac{F}{A} \left[\frac{Lb}{in^2} \right]$$

Se puede determinar la presión según el punto de referencia en el que esta sea tomada, las presiones más comunes registradas en pozo son:

- a. Presión Intake (PIP). Se define como la presión que se registra en la entrada de la bomba, esta normalmente es medida con el sensor de fondo [15].
- c. Presión Descarga (PID). Es la presión que resulta de todo el trabajo ejercido por la bomba, al igual que la PIP esta es medida con un sensor instalado en fondo [15].
- d. Presión de fondo fluyente (P_{wf}). Se define como la presión registrada o medida a nivel de la zona media de perforados en condición de flujo [15], esta se puede calcular mediante la siguiente ecuación 9:

$$P_{wf} = PIP + (PMP - TVD_{sensor}) * GP_{fluido}$$

- e. Presión en cabeza (THP). Se define como la fuerza que se registra en la superficie o cabeza del pozo, esta depende de factores como el diámetro de la tubería de producción, el tipo de Choke instalado y las condiciones de flujo [15].

1.4.10. Cabeza dinámica total ($TDH_{sistema}$)

Se define como la columna dinámica en [ft] de fluido que se debe levantar para que el fluido de producción logre llegar a superficie, esta depende principalmente [16] por la siguiente ecuación 10:

$$TDH_{sistema} = H_{cabeza} + H_{friccion} + H_{nivel\ fluido}$$

Donde en fluidos de producción con presencia de agua y tubería de acero:

- $H_{cabeza} = \frac{THP}{GP_{fluido}}$
- $H_{friccion} = MD_{bombas} * \left[2083 * \left(\frac{1000}{343*120} \right)^{1,85} * ID_{tubing}^{-4,8655} \right]$
- $H_{nivel\ fluido} = TVD_{perforados} * \frac{P_{wf}}{GP_{fluido}}$

El cálculo de la TDH es uno de los pasos con mayor importancia para el diseño del equipo BES, de ser calculado de manera errónea, no se lograría transportar el fluido desde fondo hasta superficie, se debe vencer la columna hidrostática es por ello que se basa en la ecuación de Bernoulli la cual en el caso de estudio la incidencia del TVD es directamente proporcional al cálculo de la cabeza dinámica global debido a que esta describe la longitud total de mencionada columna hidrostática, independientemente de la posición. Adicional a lo anterior la columna dinámica se traduce en la energía o potencia que requiere el sistema para la producción de los fluidos en superficie, para calcular dicha potencia se emplea la siguiente ecuación 11:

$$HP_{sistema} = \frac{\left(\frac{BFPD}{34,286} \right) * TDH_{sistema}}{3960}$$

1.5. Componentes de fondo del sistema bombeo electrosumergible

El conjunto de bombeo electrosumergible se compone por una bomba, intake, sello, motor, sensor, MLE y cable, en ese orden se realiza el ensamblaje del conjunto de BES.

1.5.1. Sensor de bomba

“Este dispositivo es el encargado de monitorear en tiempo real cada una de las variables de fondo como lo son la presión de entrada al intake (PIP), temperatura de intake, temperatura de motor, la presión de descarga (PID) y emitir la comunicación hasta superficie” [16].

1.5.2. Motor

“Esta parte recibe energía eléctrica por medio del cable de potencia y se encarga de transformar la energía eléctrica a energía mecánica con el propósito de suministrar

torque a la bomba centrífuga y que ésta ejerza el trabajo hidráulico necesario para enviar el fluido hasta superficie” [16]. Los motores electrosumergible son seleccionados según la potencia requerida, este valor se encuentra en los datos de placa, junto con el voltaje y amperaje nominal del motor medidos a 60 Hz, a su vez los datos energéticos actuales del motor permiten estimar el porcentaje de carga actual del motor con la siguiente ecuación 12:

$$\% \text{ Carga}_{\text{motor}} = \frac{\text{Potencia actual}_{\text{requerida}}}{\text{Potencia nominal}_{\text{motor}}}$$

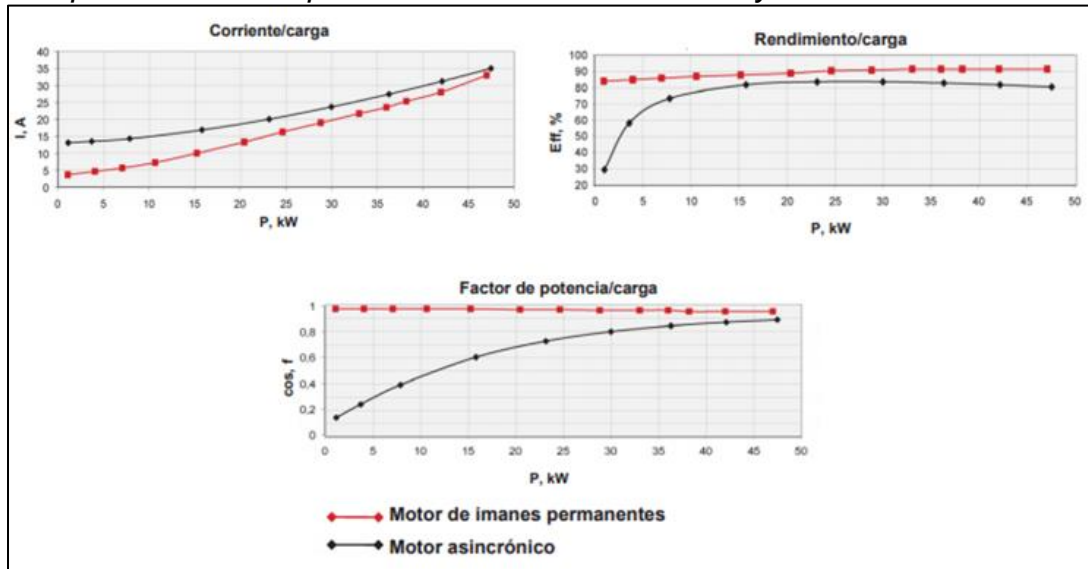
Existen motores asincrónicos y PMM, algunas diferencias entre estos son las siguientes:

- a. Inducción o Asincrónicos (AMM). «El funcionamiento del motor de inducción, se debe al hecho de energizar un estator que produce un flujo magnético giratorio de magnitud y velocidad constante en un rotor, se inducen polos magnéticos que siguen su giro al flujo del estator, el voltaje que se aplica a los embobinados del estator es un voltaje de frecuencia constante y potencial constante, y el voltaje que se aplica al rotor es un voltaje inducido de frecuencia y potencial variables que se produce como consecuencia de la velocidad del rotor con respecto a la velocidad síncrona generada en el estator» [17].
- b. Imán permanente (PMM). “La principal diferencia entre los motores asincrónicos y PMM son la introducción de los imanes permanentes los cuales tiene la función de proporcionar un campo magnético uniforme al devanado del rotor o armadura, de modo que interactúe con el campo formado por el embobinado y así se origina el movimiento del rotor como resultado de la interacción de estos campos” [17].

En la siguiente figura se puede visualizar una comparación del comportamiento en los motores de inducción y de imán permanente según la carga experimentada [18]:

Figura 3.

Comparación de comportamiento en motores de AM y PMM.



Nota. En la figura se observa 3 gráficos que describen el comportamiento de los motores según su tecnología AM y PMM. Tomado de: COMPAÑÍA BORETS, “MOTOR DE IMANES PERMANENTES.”.

Es necesario tener en cuenta que independientemente del tipo de motor se debe estimar la condición de balance del equipo, esta se determina con los datos eléctricos de amperaje mediante la ecuación 13:

$$Desbalance_{motor} = \frac{Desviacion_{max} (A, B \text{ o } C)}{Promedio (A, B, C)}$$

Donde la desviación de las fases se determina con la ecuación 14:

$$Desv_{fase} = Prom (A, B, C) - Amp_{fase}$$

1.5.3. Sello

“Este componente se ubica en medio del intake y el motor del conjunto de BES, este tiene como propósito proteger el motor de la entrada de fluidos de producción hacia el motor, previniendo el desbalance o aterrizaje del motor” [19]. Los sellos en el sistema de bombeo se clasifican según su configuración:

- a. Laberintico. “Emplean una configuración de cámaras ensambladas en laberinto, las cuales mantiene el fluido de producción separado del aceite dieléctrico a pesar de que entren en contacto los fluidos directamente” [17].
- b. Positivo. “Utiliza una barrera física para separar el fluido de producción y el aceite dieléctrico que protege el motor, a diferencia del laberintico en este tipo de protector los fluidos no están en contacto” [17].

1.5.4. Intake

“Es un equipo pequeño que conforma la entrada del fluido, se ubica debajo de la bomba y sobre el sello. La función principal de este accesorio es recibir el fluido para que este sea llevado a superficie” [16].

1.5.5. Separador de gas

“Cuando existe presencia de gas en una concentración mayor al 65% del fluido total de producción a la entrada de la bomba, se implementa en esta una bomba multifásica. La cual se encarga de eliminar los bloques de gas enviándolos hacia el anular, lo anterior para mejorar la presión a la entrada de la bomba, previniendo el daño por presencia de gas en las etapas de la bomba” [17].

1.5.6. Bomba

“Este sistema emplea una bomba centrífuga-multietapas, cada etapa consiste en un impulsor rotativo (rotor) y un difusor fijo (estator). Esta bomba funciona bajo la transferencia de energía al fluido, para que este pueda ser llevado a superficie. El impulsor realiza un movimiento rotacional dentro del difusor creando un vacío parcial dentro de la etapa y una transferencia de energía al fluido” [19].

El número de etapas determina la capacidad de levantamiento de la bomba (TDH) y la potencia requerida, para ello se emplea la gráfica de bomba según el modelo seleccionado. Finalmente se puede estimar la potencia que requiere la bomba electrosumergible para su correcto funcionamiento teniendo en cuenta la frecuencia de operación como se describe en la siguiente ecuación 15:

$$HP_{req\ bomba} = HP/etapa * \#etapas\ bomba * \frac{Hz_{actual}}{60} * SG_{mix}$$

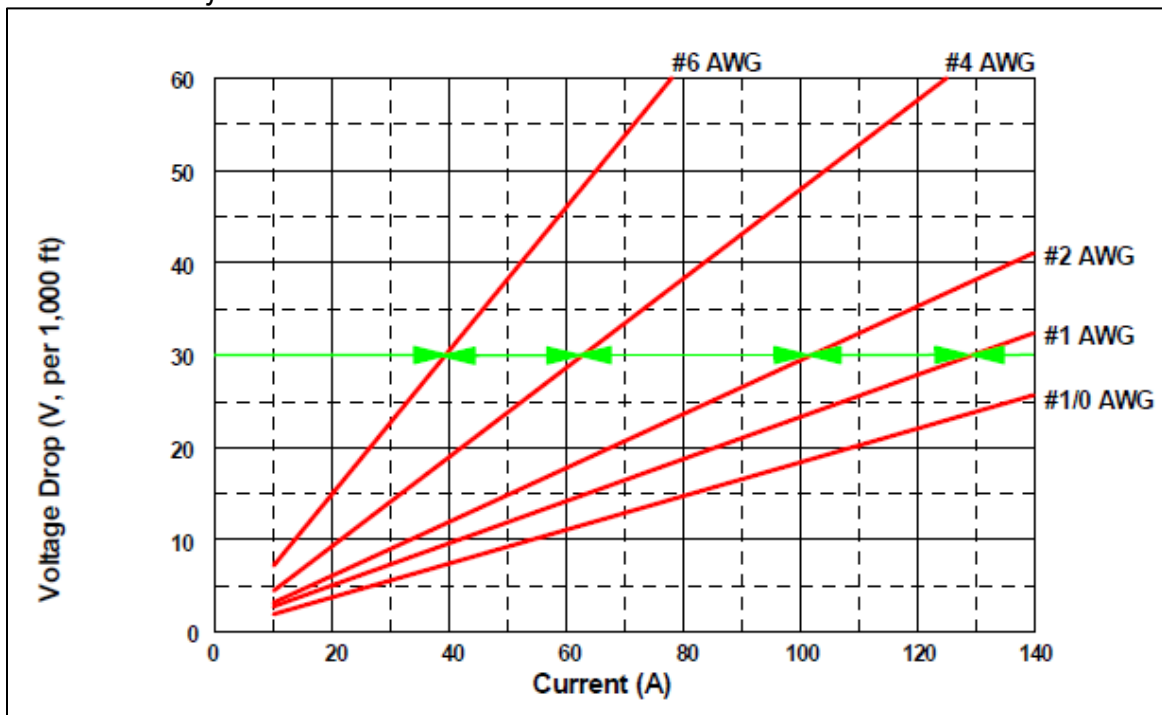
1.5.7. Motor lift extention (MLE)

“Es la extensión del cable de potencia, normalmente se instala a lo largo de la longitud del equipo de BES, una de sus funciones es tener menor diámetro que el cable y realizar un empalme efectivo entre el extremo inferior del cable de potencia y la cámara principal del sello” [17].

1.5.8. Cable

“El cable de potencia tiene como objetivo transmitir la energía eléctrica de alimentación desde superficie hasta el motor, adicional a lo anterior se debe tener en cuenta que este dispositivo tiene un valor de pérdida de voltaje por longitud, este valor depende del número de cable y la forma del cable” [16], como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4.
Caída de voltaje en el cable.



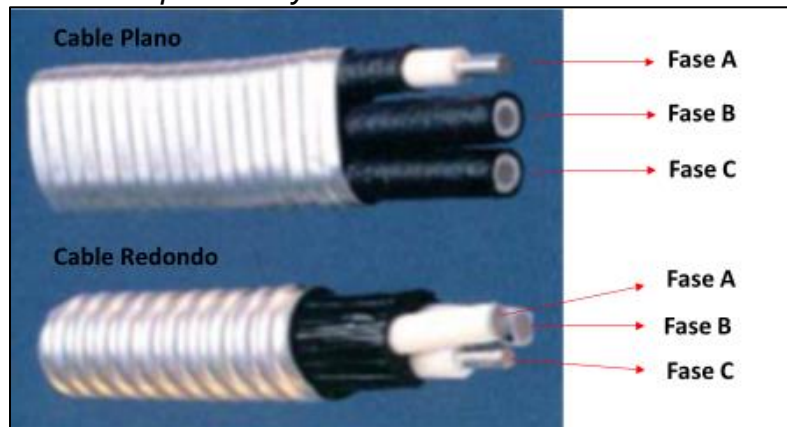
Nota. Gráfico de comportamiento de voltaje según amperaje actual y tipo de cable. Tomado de: I. M. Ramírez, H. Stauffer, and E. D. E. F. Y. D. E. Superficie, “Diseño , Optimización y Trouble Shooting,” 2004.

Teniendo en cuenta lo anterior al obtener el valor de caída de voltaje cada 1000 ft, se puede estimar la caída total de voltaje según la longitud de cable y su temperatura, mediante la siguiente ecuación 16:

$$Caida_{voltaje} = \left(\frac{L_{fondo}}{1000} * voltaje / 1000ft_{grafica} * FT_{cable} \right) + \left(\frac{L_{sup}}{1000} * voltaje / 1000ft_{grafica} \right)$$

Es importante recalcar que dentro de la estructura interna del cable de potencia se ubican tres fases principales que componen este dispositivo, dichas fases se denominan Fase A Fase B y Fase C como se evidencia en la siguiente figura.

Figura 5.
Cables de potencia y sus fases.



Nota. Gráfico fases del cable de potencia y sus fases, imagen modificada por los autores. Tomado de: I. M. Ramírez, H. Stauffer, and E. D. E. F. Y. D. E. Superficie, "Diseño , Optimización y Trouble Shooting," 2004.

1.6. Equipos de superficie del sistema bombeo electrosumergible

Cada uno de estos componentes representan una fracción de la potencia hidráulica total necesaria, para que todo el conjunto de BES logre cumplir el propósito de levantar una columna determinada de fluido. Para generar la potencia hidráulica requerida se debe tener en cuenta los equipos de superficie que suministran la energía al sistema de BES. Este conjunto de equipos tiene la finalidad de controlar, modificar y ser un puente de comunicación, para que las partes del sistema de bombeo electrosumergible operen de la forma correcta y deseada. Dentro de esos componentes de superficie se tienen: las

fuentes de alimentación, el transformador, el variador de frecuencia (VDS), el SUT y la caja de venteo.

1.6.1. Fuentes de alimentación

“Las fuentes de alimentación pueden provenir de red locales o generadores de energía, la selección de estas depende de la disponibilidad. Para la primera opción se debe contar con la cercanía a una red local nacional y para la segunda se debe contar con los generadores de energía estos pueden ser tipo Gas o Diesel. Estos son los responsables de alimentar el campo y a su vez todos los equipos eléctricos que se asocian a un sistema de BES” [16].

1.6.2. Transformador reductor

“Es un equipo que cumple la función de reducir el voltaje proveniente de la fuente de alimentación (red local o generadores), para cumplir las condiciones operacionales del variador de frecuencia” [16].

1.6.3. Variador de frecuencia

“Está encargado principalmente de recibir la energía brindada por el transformador, para variar la frecuencia de dicha energía. Esto se hace con la intención de modificar la frecuencia con la que se desea operar el motor, consecuentemente esta afecta el régimen de la bomba centrífuga, dando flexibilidad a la tasa de flujo que se requiere” [16]. La selección del variador y el voltaje de entrada (TAP@sup) al mismo, depende de los datos de placa del motor y la frecuencia de operación. Como se muestra en la siguiente ecuación 17:

$$TAP@sup = Caida_{voltaje} + \frac{Frec_{operacion} * Vol_{de\ placa}}{60\ Hz}$$

1.6.4. Transformador elevador

“El voltaje suministrado por el variador de frecuencia es muy bajo según lo requerido por el motor, es por ello que este equipo consiste en aumentar la potencia, para entregar el voltaje adecuado para la operación del motor” [16].

1.6.5. Caja de venteo

«Es un equipo que sirve como punto de conexión entre el cable de superficie y cable de fondo, por lo cual es el punto de desconexión durante una intervención de pozo. A su vez este permite el acceso al sistema eléctrico del cabezal de pozo para hacer pruebas de rutina de control para determinar las condiciones operativas del equipo de fondo» [17].

1.7. Fundamentos técnicos de energía

1.7.1. Voltaje (V)

“Es la fuerza electromotriz que origina el flujo de corriente, es decir, la fuerza que genera el movimiento de las cargas. Realmente el voltaje es una diferencia de energía potencial entre dos puntos” [20]. Normalmente la unidad que representa el voltaje son los voltios (V) y esta es medida con un voltímetro.

1.7.2. Corriente (I)

“Es el flujo de carga eléctrica (iones o electrones) que recorre un material conductor. Este material conductor puede ser sólido, líquido o gaseoso. La corriente siempre fluirá en una dirección y se le denomina corriente directa o continua. En electricidad la cantidad de corriente se determina en función de la carga y del tiempo empleado para mover la carga de un punto a otro” [20], la corriente es reportada en unidades de ampere (A) y es medida por medio de un amperímetro.

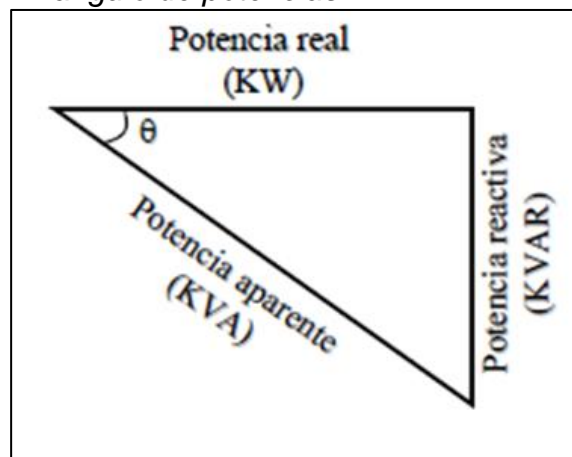
1.7.3. Resistencia (R)

“Es la oposición que presenta un material al flujo de corriente, todos los materiales ofrecen cierta resistencia a la corriente. La resistencia convierte la energía eléctrica en térmica cuando la corriente pasa a través de un material” [20]. La resistencia de la fase a tierra se determina midiendo la magnitud de la resistencia del motor o el cable de potencia y el contacto tierra. La resistencia es representada por R.

1.7.4. Potencia eléctrica (P)

“La potencia se refiere al tiempo o rapidez con la que se transforma la energía, es decir, se entiende como la rapidez con la que se es usada la energía para producir el trabajo” [20]. El símbolo de potencia es P y se mide en Watts, se debe tener en cuenta que en un circuito el trabajo puede ser útil o desperdiciado, debido a esto la potencia se puede clasificar según su caso de estudio, como se observa en la figura 6 que describe la relación entre cada uno de los tipos de frecuencia:

Figura 6.
Triangulo de potencias.



Nota. Triangulo de potencias y su comportamiento. Tomado de: I. M. Ramírez, H. Stauffer, and E. D. E. F. Y. D. E. Superficie, “Diseño , Optimización y Trouble Shooting,” 2004

- Potencia real (KWatts). “Es la que realiza el trabajo útil en el sistema eléctrico, esta se manifiesta en trabajo (movimiento, luz, calor o en cualquier otra aplicación)” [21].
- Potencia reactiva (KVAR). “Esta potencia no realiza un trabajo útil en un circuito eléctrico, simplemente se encarga de mantener los campos electromagnéticos de los equipos inductivos” [21]
- Potencia aparente (KVA). Es el resultado de la suma vectorial entre la potencia real y la potencia reactiva, normalmente se denota con la letra S” [21], se determina mediante la siguiente ecuación 18:

$$KVA^2 = KW^2 + KVAR^2$$

$$KVA = \frac{1.732 * Voltaje * Amperaje}{1000}$$

En el caso de cuantificar la potencia eléctrica en Horse Powers, es posible emplear la siguiente ecuación 19:

$$Hp = \frac{1.732 * Voltaje * Amperaje * FP * \eta}{746}$$

1.7.5. Factor de Potencia

“Indica con que eficiencia se está empleando la energía eléctrica en un circuito, se define como la relación que hay entre la potencia real y la potencia aparente” [21], como se muestra en la siguiente ecuación 20:

$$FP = \cos \phi = \frac{KWatss}{KVA}$$

1.7.6. Frecuencia (F)

“Es la variación de corriente, también se le conoce como la frecuencia de corriente, representa el número de ciclos completos generados por segundo, su unidad de medida es Hertz, esto equivale a un ciclo por segundo” [22].

1.7.7. Ley de ohm

“Es la relación que existe entre la corriente, el voltaje y la resistencia. Fue descubierta George S. Ohm a principios de 1800, Ohm hallo que cuando la resistencia se mantiene constante, la corriente es directamente proporcional al voltaje” [20]. Esta puede ser descrita con la siguiente ecuación 21 matemática:

$$I = \frac{V}{R}$$

Adicional, mediante la ley de ohm se puede describir la potencia con la siguiente ecuación 22 matemática:

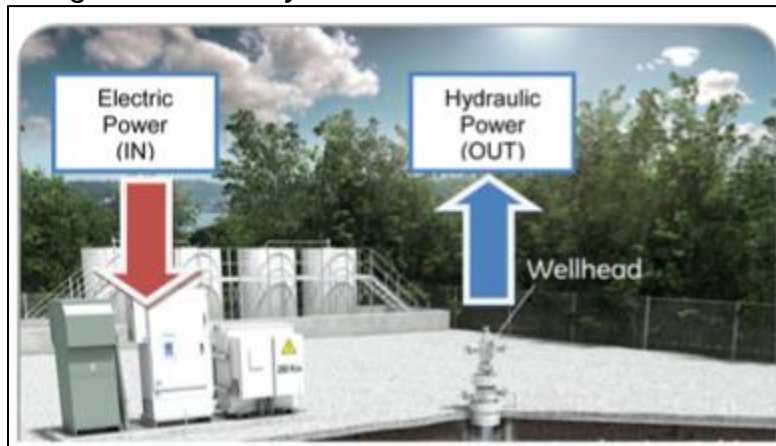
$$P = \frac{V^2}{R}$$

1.8. Eficiencia del sistema BES

Los equipos que se ubican en superficie determinan cuánta energía disponible hay para suministrar al conjunto del sistema de BES el cual describe la energía hidráulica que requiere para su funcionamiento, la relación de estos dos parámetros nos permite determinar la eficiencia del sistema de BES. “Para identificar y optimizar los pozos que presentan un alto consumo energético se utiliza el indicador que corresponde a la eficiencia energética del sistema de BES. Como ya se mencionó este se describe como la relación entre la energía hidráulica requerida y la energía eléctrica suministrada al sistema” [2], la ecuación 23 de eficiencia de BES es la siguiente:

$$\eta_{sistema} = \frac{N_{Hydr}}{N_{el}}$$

Figura 7.
Energía de entrada y salida BES.



Nota. Ubicación de la energía de entrada y de salida en el sistema BES. Tomado de: “Study to Improve Energy Efficiency Using ESP Introduction: ESP Basin evolution,” pp. 1–23, 2015.

La potencia hidráulica contempla la energía que requiere cada uno de los componentes del sistema de BES para levantar la columna de fluido, esta se puede calcular a partir de la siguiente ecuación 24:

$$N_{hydr} = \alpha Q_{mix}(P_{dis} - P_{intake})$$

La energía de entrada al sistema para el caso de estudio puede ser una variable medida en campo mensualmente o esta se puede describir con la siguiente ecuación 25:

$$N_{el} = N_{el,day} \frac{t_{run} + t_{stop}}{t_{run}} \frac{1}{24}$$

Adicional a lo anterior “la eficiencia del sistemas BES se puede evaluar mediante la determinación y la multiplicación de las eficiencias de cada una de las partes que conforma el sistema” [23] como se muestra en la ecuación 26:

$$\eta_{sistema} = \eta_{VDS} * \eta_{cable} * \eta_{motor} * \eta_{bomba\ y\ sellos}$$

1.9. Consumo de energía

“Para entender el costo energético de operación de una bomba electrosumergible es necesario comprender que la potencia es el parámetro que se debe pagar. Por lo cual voltaje y la corriente son factores que afectan directamente el consumo o costo energético. Para calcular el costo mensual, se requiere de 3 factores” [24]:

- El consumo de potencia del equipo en KW.
- Cuántas horas al día o al mes opera el equipo.
- El costo de la potencia en KW/hora.

La siguiente ecuación describe como calcular el costo o consumo mensual de la operación de un equipo de ALS, como se observa en la siguiente ecuación 27:

$$Costo\ dia = Potencia\ Eletrica * horas\ de\ operación\ al\ dia * costo\ por\ hora$$

2. METODOLOGÍA Y DATOS

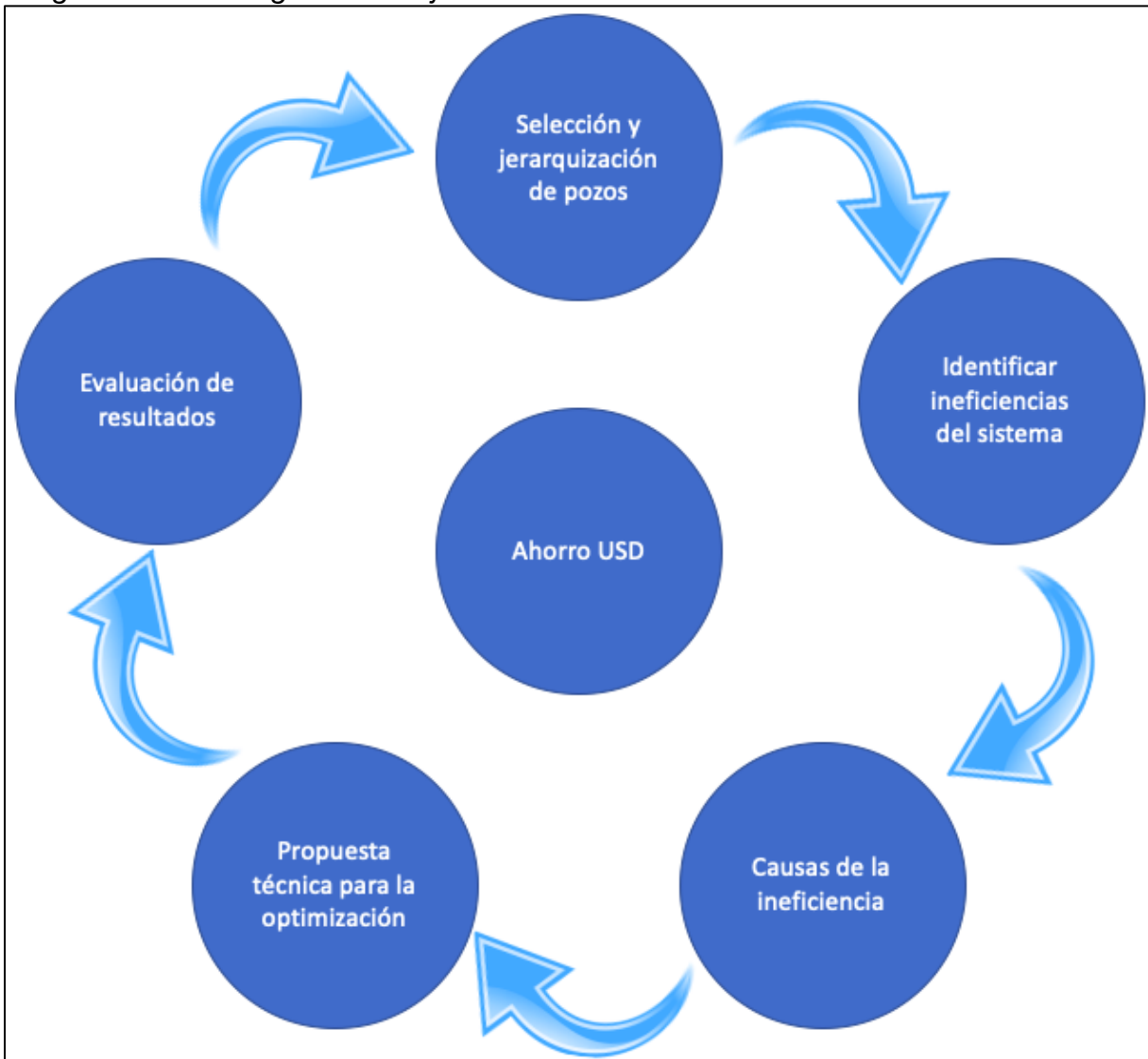
En el presente capítulo, se desarrolla la descripción de la metodología que se empleará para dar resultado a los objetivos del actual proyecto teniendo en cuenta la delimitación anteriormente establecida en la propuesta, la mencionada metodología contempla la “norma ISO 50001-2015 del sistema de gestión de energía, la cual establece el orden de los procesos necesarios para la mejora continua del desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética, el uso y el consumo de la energía de cualquier sistema eléctrico” [25]. Para establecer el procedimiento de optimización energética se debe realizar una “evaluación continua del rendimiento del BES y su integración dentro del sistema de gestión de energía, lo anterior se consigue con medidas tomadas en campo del consumo de energía del BES, historial de producción y datos de diseño del equipo para estimar los requisitos de energía hidráulica” [1]. En segunda instancia, se toma como referencia la “eficiencia del sistema BES como la relación entre la potencia hidráulica efectiva y la energía eléctrica consumida por el BES en superficie” [2]. Finalmente se define el “mejor voltaje para los motores de BES que funcionan en condiciones de cargas distintas al 100%. Esto se hace para determinar el rendimiento del motor y el gasto económico al aplicar varios voltajes” [3]. Aunque el procedimiento analiza todo el comportamiento del conjunto del ALS la investigación se enfoca principalmente en lo que se permite ejecutar desde superficie para la optimización del sistema.

El procedimiento que se propone para la optimización del consumo energético de los equipos de bombeo electrosumergibles se denomina de-rating. Este método consiste en ajustar los parámetros de placa del motor del equipo electrosumergible, con la finalidad de reducir el consumo energético mediante la reconfiguración de los datos nominales del motor según el comportamiento actual del sistema. Dicho comportamiento se estimará mediante el cálculo y la simulación de las condiciones energéticas actuales del pozo con el apoyo de un simulador de diseño BES denominado DesignRite® de la compañía Schlumberger y con apoyo de la licencia de Frontera Energy Corp, adicional a lo anterior es importante aclarar que cada compañía proveedora del equipo de BES, emplea su propio software para determinar las

condiciones actuales de este, así mismo las tablas de comportamiento del motor a diferentes cargas, las cuales varían según el modelo del motor y son propiedad intelectual de las compañías anteriormente mencionadas. El procedimiento contempla 5 etapas, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 8.

Diagrama metodología de trabajo.



Nota: En la figura se representan los pasos de la metodología a emplear basada en el procedimiento de gestión de energía de la norma ISO 50001-2015.

2.1. Selección y jerarquización de pozos

En la etapa inicial que corresponde a la selección y jerarquización de pozos se realiza el estudio mediante la recolección de información para la elaboración de una base de datos teniendo en cuenta como principal criterio el control de calidad y verificación de los datos proporcionados por la compañía Frontera Energy Corp. Los valores requeridos para elaborar la mencionada base de datos contemplan los antecedentes de producción, medidas eléctricas tomadas en campo, parámetros de diseño del BES y características del equipo en fondo, esto con la finalidad de realizar los cálculos requeridos para la selección del pozo.

Esta etapa está limitada a un grupo de 10 pozos productores, correspondientes al clúster A del campo donde se realizará el proyecto; se llevará a cabo la evaluación de cada uno de los pozos, para la posterior selección de los candidatos a la optimización, teniendo en cuenta criterios como la tecnología del motor (AM), eficiencia del sistema menor al 40%, carga del motor menor al 80% y alta frecuencia de operación mayor o igual a 60Hz, con el objetivo de no generar limitaciones en el pozo seleccionado. Al aplicar la selección y jerarquización de pozos teniendo en cuenta los parámetros mencionados, se obtiene como resultado la selección de 2 pozos candidatos para la optimización, estos corresponden al pozo CM-7 en donde se realizó la propuesta técnica con el apoyo del simulador DesingRite® y el pozo CM-9 en el cual se realizó la propuesta técnica con el apoyo de la empresa proveedora del equipo Novomet.

2.2. Identificación de ineficiencias del sistema

Para los pozos seleccionados en la anterior etapa se realizará el respectivo análisis de cada una de las eficiencias presentes a lo largo del sistema BES, esto con el objetivo de identificar en que componente se ubica la mayor ineficiencia del sistema. No obstante, como se mencionó al principio del capítulo el estudio se enfoca principalmente en lo que se permite ejecutar desde superficie para la optimización del sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior se considera principalmente la eficiencia del motor y configuración del VDS, para la optimización eléctrica, sin embargo, se contemplará la eficiencia presente en la bomba (incluyendo el sello) para futuras recomendaciones en el proyecto.

2.3. Causas de la ineficiencia

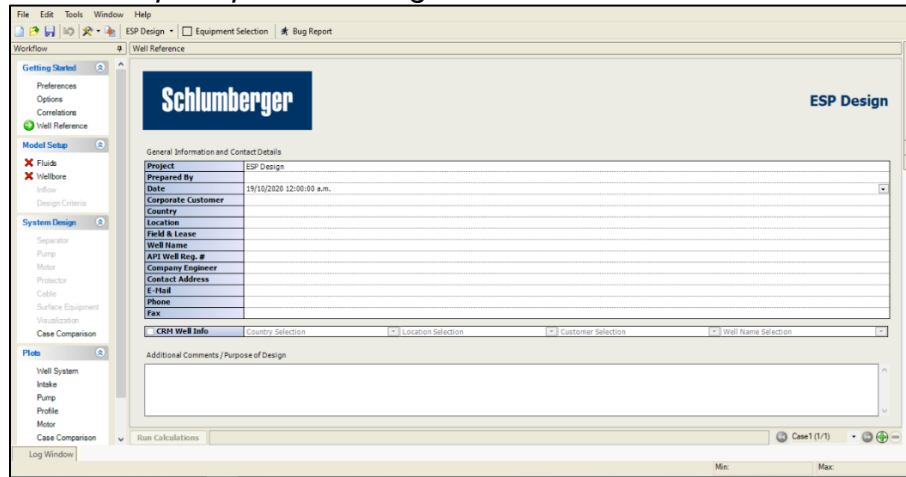
Al identificar el componente con baja eficiencia en el sistema BES (menores al 40%), se procederá a analizar los parámetros que influyen en el comportamiento inadecuado del elemento afectado; en el caso del motor y el VDS se realizara los cálculos y la simulación de la propuesta más adecuada de voltaje en superficie y potencia (hp) requerida por el sistema actualmente, estos resultados permiten establecer el de-rating idóneo para el aumento de la eficiencia energética del pozo evaluado para la optimización.

2.4. Propuesta técnica para la optimización

2.4.1. Pozo CM-7

En la propuesta técnica del pozo CM-7 a optimizar se determina las especificaciones nominales del motor para llevar a cabo el de-rating para la optimización, estas pueden ser modificadas desde el variador por medio de un ajuste en el monitor, la determinación de las especificaciones se hará mediante simulación, variando el factor de rating y ajustando la frecuencia de operación, se debe tener en cuenta que el porcentaje óptimo de de-rating debe ser seleccionado con respecto a la carga actual que experimenta el motor, adicional se debe aclarar que no es factible disminuir el porcentaje de de-rating por debajo del 50% de la capacidad del motor, la sensibilidad del comportamiento del sistema BES se realizará con el apoyo del software de diseño DesingRite® de la compañía Schlumberger, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 9.
Ambiente principal de DesingRite®.



Nota. Ambiente principal del software de diseño DesingRite®.
Tomado de: Schlumberger, 2020.

Como se observa en la figura 7 el programa requiere datos de diseño para el correcto análisis, como lo son:

- Propiedades del fluido.
- Geometría del pozo.
- Datos de producción.
- Criterio de diseño
- Tipo de bomba
- Tipo de motor
- Protector y cable
- Consumo eléctrico en superficie.

Al validar los anteriores datos, se procederá a efectuar la sensibilidad del porcentaje del de-rating mediante el módulo de ESP design, este nos ofrece la eficiencia del motor y el consumo de energía del sistema para la optimización del conjunto BES según las condiciones actuales del pozo.

2.4.2. Procedimiento de de-rating CM-7

El procedimiento de de-rating es empleado en pozos con requerimiento de potencia menor al esperado en la etapa de diseño, mediante este proceso es posible reconfigurar los valores de placa nominal del motor, haciendo que este se comporte

como un motor con parámetros más ajustados (menores) al requerimiento eléctrico actual, generando una reducción en el consumo y aumento en la eficiencia del sistema. Para llevar a cabo el de-rating en la simulación son necesarias las tablas del comportamiento del motor a distintas cargas y definir la carga actual del motor, el módulo de motor en el software DesingRite® nos permite estimar mencionados parámetros como se observa en la siguiente figura:

Figura 10.
Módulo de motor DesingRite®.

The screenshot shows the 'Motor' configuration window in DesingRite®. It has four tabs: 'Motor Selection', 'Heat Rise', 'Sensor/Gauge', and 'Advanced/Options'. The 'Advanced/Options' tab is active. The 'Motor Information' section includes dropdowns for 'Manufacturer' (REDA) and 'Series' (562 Maximus), and a 'Type' dropdown (Variable Rating). A 'Rating Factor' is set to 85% with a blue arrow pointing to it. The 'Operating Conditions' section shows 'Required Power (@ 60 Hz Nameplate Frequency)' as 97,89 hp. The 'Power Controller' section has 'VSD' selected. A legend on the right shows 'User Define' is selected.

Nota. Módulo de motor DesingRite® ejemplo de de-rating al 85% motor Maximus 562. Tomado de: Schlumberger, 2020.

Sin embargo, es necesario determinar el porcentaje actual de carga con las medidas eléctricas en campo, así se estimará un de-rating más adecuado para la optimización energética del pozo. Para realizar la reconfiguración del motor con los nuevos valores de placa, se debe ingresar en el monitor del variador de frecuencia el voltaje resultante del de-rating, este permitirá que el motor se comporte con los nuevos parámetros seleccionados de placa.

2.4.3. Pozo CM-9

Para la propuesta técnica de optimización del pozo CM-9, se deben tener en cuenta los mismos parámetros mencionados en la anterior propuesta de optimización, es decir se iniciará determinando los valores nominales con los que opera actualmente el motor instalado en fondo con el objetivo de determinar el de-rating adecuado, lo anterior teniendo en cuenta la carga actual del motor, según esta se realizará la estimación del valor de de-rating este debe ser cercano a la carga del motor. Para evaluar el estado actual del pozo se solicitó a la compañía prestadora de servicios Novomet, la simulación

de las condiciones de operación actuales de la bomba y el motor instalados en el pozo CM-9, similar a la propuesta del pozo CM-7 para ejecutar la simulación correctamente se precisaron los siguientes datos:

- Propiedades del fluido.
- Geometría del pozo.
- Datos de producción.
- Criterio de diseño.
- Tipo de bomba.
- Tipo de motor.
- Protector y cable.
- Consumo eléctrico en superficie.

A diferencia de la propuesta anterior al realizar la validación de los datos mencionados y la determinación de las condiciones de operación actual del equipo en fondo, se procede a establecer el porcentaje de de-rating mediante el empleo de las tablas del comportamiento a distintas cargas del motor instalado en fondo, las cuales son propiedad de la compañía proveedora del equipo en este caso Novomet. Mencionada compañía nos ofreció la mejor opción de de-rating para la reducción del consumo.

2.4.4. Procedimiento de de-rating CM-9

Para el procedimiento de de-rating en el pozo CM-9 se realiza el estudio de la potencia requerida actualmente por la bomba y la carga actual que se le ejerce al motor, así será posible evidenciar en las tablas del comportamiento a distintas cargas del motor del proveedor cual es el porcentaje de de-rating más adecuado para el motor. Al igual que en el caso anterior se realiza mediante la reconfiguración del volteje de entrada en superficie, esto permitirá que el motor opere con los parámetros más ajustados al requerimiento actual del sistema, a su vez se evidenciará una reducción del consumo eléctrico y consecuentemente el aumento en la eficiencia actual del sistema BES.

2.5. Evaluación de resultados

En la etapa final se iniciará determinando el consumo de energía eléctrica, su respectivo costo diario y costo por barril producido del pozo estudiado para su respectiva optimización energética mediante de-rating, adicional se estimará el costo anual en ambos casos. Los indicadores anteriormente mencionados se estimarán de igual manera con los resultados obtenidos por la simulación, con el objetivo de realizar un contraste económico entre los valores actuales y estimados, para determinar el ahorro generado por la mejora del desempeño energético del equipo BES. Adicional a lo anterior fue posible implementar el estudio en campo con el pozo CM-7 y el pozo CM-9, por esto se decide realizar el mismo procedimiento con la validación de la operación realizada en los mencionados pozos.

3. ANALISIS Y RESULTADOS

Para el desarrollo del capítulo correspondiente a los análisis y resultados, se pretende realizar el procedimiento detallado de cada una de las etapas descritas en el capítulo 2 METODOLOGÍA Y DATOS, dejando en evidencia los resultados de cada una de las secciones y su respectivo análisis, para finalmente estimar la mejora energética del pozo de estudio seleccionado.

3.1. Selección y jerarquización de pozos

Inicialmente como se describió en la metodología se realiza la recolección de información para elaborar posteriormente la base de datos, la cual incluirá cada uno de los cálculos requeridos para la selección de los pozos a optimizar:

3.1.1. Recolección de información

Para la recolección de información fue necesario el apoyo por parte de Frontera Energy Corp. la cual suministro los datos requeridos para el desarrollo del proyecto, estos fueron precisados mediante diferentes tablas generadas en Excel, cada una de las tablas fueron solicitadas según la información establecida.

La Tabla 1 contiene la información de la última prueba de producción válida para el estudio de optimización energética, esta contiene información del caudal, frecuencia, temperaturas y las presiones que experimenta actualmente el pozo.

Tabla 1.
Prueba de producción validada de pozo.

Pozo	Fecha de prueba	Presión cabeza (THP) [PSIA]	Temperatura cabeza (THT) [°F]	Caudal [BFPD]	WC [%]	Agua (S.G)	GOR [SCF/Bbl]	Frecuencia (Hz)	Presión intake (PIP) [PSIA]	Temperatura intake (PIT) [°F]
CM-1	8/08/2020	100,0	147,0	8410	96,62	1	0,10	59,9	748,0	155,0

Nota. *Tabla establecida para la recolección de información referente a la producción de los pozos. Tomado de: Frontera Energy CORP, 2020.*

Para la Tabla 2 correspondiente a la recolección de información se solicitaron los datos de medidas eléctricas tomadas en campo durante el mes de agosto del presente

año, estas coinciden y tienen una fecha cercana a la prueba de producción suministrada por la empresa, estas medidas eléctricas se deben tomar en la entrada del VDS, la salida del VDS y en la entrada del motor considerando las distintas fases del cable de potencia, adicional se confirma la frecuencia y el TAP de superficie actual del pozo.

Tabla 2.
Medidas eléctricas de pozo.

Pozo	Fecha	TAP actual	Frecuencia [HZ]	VDS Entrada								
				VOLTIOS F-F			VOLTIOS F-T			AMPERIOS DE FASE		
				A-B	B-C	A-C	A-N	B-N	C-N	A	B	C
CM-1	28/08/2020	3333	59,9	448	448	444	257	260	258	237	238	233
				VDS Salida								
				VOLTIOS F-F			VOLTIOS F-T			AMPERIOS DE FASE		
				A-B	B-C	A-C	A-N	B-N	C-N	A	B	C
				387	388	387	226	225	225	308	305	309
				MOTOR de fondo								
				VOLTIOS F-F			VOLTIOS F-T			AMPERIOS DE FASE		
				A-B	B-C	A-C	A-N	B-N	C-N	A	B	C
				2565	2576	2569	1473	1478	1487	44,5	43,4	40,2

Nota. Tabla establecida para la recolección de información referente a las medidas eléctricas de pozo. Tomado de: Frontera Energy CORP, 2020.

La Tabla 3 y la Tabla 4 recolectan los datos empleados para el diseño del equipo BES y los datos del equipo de fondo que actualmente está instalado respectivamente. Para la Tabla 3 correspondiente a los criterios de diseño se solicitaron datos como grados API del crudo, presión y temperatura de reservorio, profundidad de asentamiento de la bomba (MD y TVD), tope de perforados (MD y TVD) y los diámetros internos tanto de la tubería de producción como de la bomba electrosumergible.

En la Tabla 4 se realiza la recolección de datos del equipo de fondo como lo es la fecha de instalación, run life, el estado del pozo (operando/apagado), modelo de bomba y sus etapas, modelo de motor con sus respectivos datos de placa y tipo de tecnología

(AM/PMM), modelo de sensor, tipo cable y modelo VDS con sus respectivos datos de placa.

Tabla 3.

Datos básicos de diseño BES.

Pozo	API	Presión reservorio [PSIA]	Temperatura reservorio [°F]	Profundidad sensor (MD) [ft]	Profundidad sensor (TVD) [ft]	ID tubing (in)	ID bomba (in)	Top perforados (MD) [ft]	Top perforados (TVD) [ft]
CM-1	12,5	1184	148	2832	2832	2,992	6,135	3455	3015

Nota. Tabla establecida para la recolección de información referente a los datos de diseño BES del pozo. Tomado de: Frontera Energy CORP, 2020.

Tabla 4.

Datos equipo BES instalado.

Pozo	Estado	N° Instal	Fecha instalación	Run Life [Días]	Descripción Bomba		Motor Descripción				
					Modelo	etapas	Modelo	(Hp)	(V)	Amp	PMM/AM
CM-1	Operando	1	10/02/2011	3543	TE7000	53	TR5- UT	255	2455	57	AM

Modelo Sello	Sensor	Cable Descripción		VSD Descripción			
		Cable #	Cable Round /Flat	Modelo	KVA	Amp	Pulsos
AFLAS-STL	SMARTGUARD	2	FLAT	CILA 2S-ESP-3G	260	325	6

Nota. Tabla establecida para la recolección de información referente a los datos equipo de fondo y VDS de superficie BES del pozo. Tomado de: Frontera Energy CORP, 2020.

Finalmente se debe resaltar que adicional a la información recolectada en la base de datos, para realizar la simulación de la propuesta técnica es necesario contar con el survey o la tabla trayectoria y el estado mecánico del pozo, así el modelo para la simulación será más asertivo para la evaluación del desempeño energético.

3.1.2. Cálculos de Base de Datos

Teniendo en cuenta la recolección de datos anteriormente descrita, se procede a realizar los cálculos requeridos para la evaluación e identificación de los pozos a optimizar en el clúster A, adicional se deja en evidencia el procedimiento de cada uno de los caculos mencionados tomando como ejemplo uno de los pozos seleccionados para la optimización en este caso el pozo CM-7.

- a. Desbalance del motor. Con el objetivo de no generar limitaciones en el equipo se debe tener en cuenta el desbalance actual en el aislamiento del motor y así cerciorarse que un cambio en superficie no afecte las fases del motor, para evaluar el desbalance actual se emplea la ecuación 13:

$$Desbalance_{motor} = \frac{Desviacion_{max}(A, B \text{ o } C)}{Promedio(A, B, C)}$$

Donde la desviación de las fases se determina teniendo en cuenta la corriente de las fases con la ecuación 14:

$$Desviación_A = |Prom(35,35,36) - 35| = 0.33$$

$$Desviación_B = |Prom(35,35,36) - 35| = 0.33$$

$$Desviación_C = |Prom(35,35,36) - 36| = 1.67$$

$$Desbalance_{motor} = \frac{1.67}{35.33} * 100\% = 1.89 \%$$

Como resultado del cálculo representativo anteriormente descrito, se obtuvieron los siguientes valores de desbalance para los 10 pozos evaluados, como se logra evidenciar en la Tabla 5:

Tabla 5.
Desbalance actual de fases en el motor.

Pozo	DESVIACION A	DESVIACION B	DESVIACION C	DESBALANCE DE MOTOR
CM-1	1,80	0,70	2,50	5,85%
CM-2	1,10	1,00	0,10	4,64%
CM-3	1,33	0,67	0,67	5,06%
CM-4	0,00	0,00	0,20	0,88%
CM-5	1,13	1,27	0,13	2,43%
CM-6	0,47	1,13	0,67	3,07%
CM-7	0,33	0,33	0,67	1,89%
CM-8	0,67	1,33	0,67	2,53%
CM-9	0,33	0,67	0,33	1,50%
CM-10	0,33	0,67	0,33	1,27%

Nota. Resultado de cálculo de desbalance actual en las fases del motor.

Al analizar los resultados obtenidos en cada uno de los pozos referente al desbalance de fases del motor, se logra evidenciar un bajo desbalance de las fases el cual en ninguno de los casos sobrepasa el 6%, esto nos permite inferir que no hay limitaciones por parte de las fases del motor para la optimización eléctrica.

- b. Cálculos de TDH. Para iniciar con el cálculo de la TDH es necesario determinar previamente la gravedad específica del fluido de producción, el cual corresponde a una mezcla de crudo y agua. Para calcular la gravedad específica de un fluido se emplea la ecuación 3, sin embargo, en el caso de un fluido de producción con mezcla entre crudo y agua se puede estimar la gravedad específica mediante la ecuación 4:

$$SG_{oil} = \frac{141.5}{131.5 + 12.5} = 0,9826$$

$$SG_{mix} = (SG_{H_2O} * \%WC) + (SG_{oil} * (1 - \%WC))$$

$$SG_{mix} = (1 * 0,9647) + (0,9826 * (1 - 0,9647)) = 0,9826$$

Calculada la gravedad específica del fluido de producción se continúa determinando el gradiente de presión, para determinarlo se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Gradiente de presión} = SG_{mix} * G_{AVG}$$

$$\text{Gradiente de presión} = 0,9826 * 0,433 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} = 0,4327 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}$$

Al calcular con antelación el gradiente de presión se procede a calcular la presión de fondo dinámica del pozo denominada Pwf, calculada de la siguiente manera mediante la ecuación 9:

$$P_{wf} = PIP + (PMP (TVD) - TVD_{sensor}) * GP_{fluido}$$

$$P_{wf} = 798 \text{ psi} + (2972,7 \text{ ft} - 2509 \text{ ft}) * 0,4327 = 998,66 \text{ psi}$$

Finalmente, con los cálculos previos se continúa con la estimación del primer parámetro referente a la TDH, el cual corresponde al Hcabeza:

$$H_{cabeza} = \frac{THP}{GP_{fluido}}$$

$$H_{cabeza} = \frac{122}{0,4327} = 281,93 \text{ ft}$$

El segundo parámetro por calcular es Hfricción:

$$H_{friccion} = MD_{bombas} * \left[2083 * \left(\frac{1000}{343 * 120} \right)^{1,85} * ID_{tubing}^{-4,8655} \right]$$

$$H_{friccion} = 2622 * \left[2083 * \left(\frac{1000}{343 * 120} \right)^{1,85} * 2,992^{-4,8655} \right] = 26,04 \text{ ft}$$

Por último, el parámetro a determinar es Hnivel:

$$H_{nivel\ fluido} = TVD_{perforados} * \frac{P_{wf}}{GP_{fluido}}$$

$$H_{nivel\ fluido} = 2972,70\ ft * \frac{998,66\ psi}{0,4327} = 664,91\ ft$$

Como resultado final se puede estimar la TDH_{sistema} requerida del pozo mediante la ecuación 10:

$$TDH_{sistema} = H_{cabeza} + H_{friccion} + H_{nivel\ fluido}$$

$$TDH_{sistema} = 281,93\ ft + 26,04\ ft + 664,913737\ ft = 1215,88\ ft$$

Al aplicar el procedimiento para el cálculo de TDH_{sistema} requerida en los 10 pozos evaluados, se compilaron los resultados de TDH_{sistema} en la siguiente Tabla 6:

Tabla 6.
TDH actual requerida por el pozo.

Pozo	SG mix	GRAD PRESION [PSI/ft]	Pwf [PSI]	IP [BFPD/PSI]	H(THP) [ft]	H fricción	H nivel	TDHreq SISTEMA ft
CM-1	0,9994	0,4327	827,19	23,57	231,08	29,39	1103,50	1363,98
CM-2	0,9994	0,4327	950,38	32,42	233,40	28,49	810,79	1072,67
CM-3	0,9996	0,4328	954,59	39,23	201,01	31,24	754,49	986,74
CM-4	0,9997	0,4329	988,59	20,28	231,01	28,94	742,26	1002,21
CM-5	0,9995	0,4328	383,89	7,31	346,58	28,40	2060,01	2435,00
CM-6	0,9991	0,4326	628,83	7,83	369,83	27,57	1443,49	1840,89
CM-7	0,9994	0,4327	893,50	22,25	281,93	26,04	907,91	1215,88
CM-8	0,9998	0,4329	868,36	34,03	422,71	26,58	803,18	1252,47
CM-9	0,9997	0,4329	899,11	36,23	231,02	28,17	895,84	1155,03
CM-10	0,9999	0,4330	984,63	51,62	235,59	28,66	729,49	993,74

Nota. Resultado de cálculo de TDH actual requerida por el pozo.

c. Cálculo de potencias presentes en el sistema. Es necesario calcular las potencias actuales presentes en el sistema con la finalidad de llevar a cabo la evaluación de la carga del motor, con el objetivo de identificar pozos con motor sobredimensionado y posteriormente ser empleadas en el cálculo de las diversas eficiencias contempladas para la evaluación energética. La potencia presente del sistema se determina mediante la ecuación 11:

$$HP_{sistema} = \frac{(BFPD/34,286) * TDH_{sistema}}{3960}$$

$$HP_{sistema} = \frac{(6063/34,286) * 1215,88 \text{ ft}}{3960} = 54,3 \text{ hp}$$

La segunda potencia presente es la requerida por la bomba, esta se calcula por medio de la ecuación 15, sin embargo, previamente se debe estimar la potencia por etapa en este caso 3,168 $HP/etapa$, el cálculo se debe realizar en el orden respectivamente establecido y teniendo en cuenta la gráfica de la bomba:

$$HP_{req \text{ bomba}} = HP/etapa * \#etapas \text{ bomba} * \frac{Hz_{actual}}{60} * SG_{mix}$$

$$HP_{req \text{ bomba}} = 3,168 \text{ hp/etapa} * 31 \text{ etapas} * \frac{61 \text{ Hz}}{60} * 0,4327 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} = 99,80 \text{ hp}$$

En tercera instancia se procede a calcular la potencia de entrada al VDS la cual es suministrada por la red de alimentación eléctrica empleada actualmente, en el caso del pozo CM-7 la energía eléctrica es proporcionada por generadores, es importante tener en cuenta un factor de potencia tomado con medidas de calidad energética. Teniendo presente lo anterior se estima la potencia de entrada al VDS mediante la ecuación 19:

$$Hp_{\text{entrada VDS}} = \frac{1,732 * Voltaje_{IN VDS} * Amperaje_{IN VDS} * FP * \eta}{746}$$

$$Hp_{\text{entrada VDS}} = \frac{1,732 * 477 \text{ Vol} * 141 \text{ Amp} * 0,92}{746} = 143,49 \text{ hp}$$

Por último, se debe calcular la potencia de entrada al motor la cual tiene en cuenta las medidas eléctricas tomadas a la entrada del componente mencionado e igualmente el factor de potencia actual, para determinar la potencia del entrada al motor se emplea la ecuación 19:

$$Hp_{\text{entrada motor}} = \frac{1.732 * \text{Voltaje}_{\text{motor}} * \text{Amperaje}_{\text{motor}} * FP * \eta}{746}$$

$$Hp_{\text{entrada motor}} = \frac{1.732 * 2444 \text{ Vol} * 36 \text{ Amp} * 0,92}{746} = 187,71 \text{ hp}$$

Teniendo en cuenta los datos anteriormente determinados de potencias presentes en el sistema se aplicó el procedimiento para cada uno de los 10 pozos evaluados, obteniendo como resultado la Tabla 7:

Tabla 7.
Potencias presentes en el sistema BES.

Pozo	FP Calidad energética	[Hp] Requeridas sistema	[HP] Requerida Bomba	[HP] entrada VDS	[HP] entrada motor
CM-1	0,96	84,49	188,76	237,37	255,20
CM-2	0,96	47,81	98,97	130,06	109,48
CM-3	0,96	60,84	165,86	169,56	145,77
CM-4	0,96	29,85	78,70	82,10	94,06
CM-5	0,96	101,04	169,55	230,20	258,69
CM-6	0,96	53,64	58,49	105,82	116,44
CM-7	0,92	54,30	99,80	143,49	187,71
CM-8	0,96	71,48	152,95	239,64	270,97
CM-9	0,91	82,26	235,28	213,73	273,31
CM-10	0,96	73,44	195,15	271,61	269,38

Nota. Resultado de cálculo de Potencias presentes en el sistema BES en cada pozo.

Los resultados de la Tabla 7 permiten identificar cual es la potencia requerida por el sistema y a su vez haciendo un cotejo con la información de placa del motor de fondo actualmente instalado, se permite estimar si el motor está debidamente seleccionado o si se presenta un sobredimensionamiento en el motor del sistema BES que pueda una elevación en el consumo eléctrico.

d. Cálculo de eficiencias y carga del motor. Para realizar el cálculo de las eficiencias presentes del sistema se contemplan en la base de datos solo la eficiencia del sistema BES, eficiencia del motor y eficiencia de la bomba, lo anterior es debido a que estos componentes son en donde se identifican las mayores pérdidas energéticas del BES, consecuentemente para estimar las eficiencias anteriormente mencionadas se tendrán en cuenta los valores de potencia previamente determinados. Inicialmente se estimará el valor de la eficiencia del sistema BES esta será nuestro principal indicador para la selección del pozo a optimizar y se calcula mediante la ecuación 23:

$$\eta_{sistema} = \frac{N_{Hydr}}{N_{el}}$$

$$\eta_{sistema} = \frac{54,30}{143,49} * 100\% = 37,84\%$$

Para el cálculo de eficiencia en el motor se utiliza el mismo concepto de la ecuación 23, teniendo en cuenta la potencia de entrada al motor y la potencia que solicita la bomba, como se muestra en la siguiente expresión:

$$\eta_{motor} = \frac{Hp_{req\ bomba}}{Hp_{entrada\ motor}}$$

$$\eta_{motor} = \frac{99,8}{187,71} * 100\% = 53,17\%$$

Empleando la siguiente ecuación se logra estimar el comportamiento de la eficiencia de la bomba, teniendo en cuenta el caudal actual, $TDH_{sistema}$ y la potencia que solicita la bomba:

$$\eta_{bomba} = 0,000007368 * BFPD * \frac{TDH_{sistema}}{Hp_{req\ bomba}}$$

$$\eta_{bomba} = 0,000007368 * 6063 BFPD * \frac{1515,88 ft}{99,80 hp} = 72,08$$

Por último, se estima la carga que ejerce la bomba sobre el motor mediante la relación de la potencia que solicita la bomba y la potencia nominal del motor, como se describe en la ecuación 12:

$$\% Carga_{motor} = \frac{Potencia\ actual_{requerida}}{Potencia\ nominal_{motor}}$$

$$\% Carga_{motor} = \frac{99,8 hp}{225 hp} * 100\% = 44,36\%$$

Con los resultados del procedimiento aplicado se procedió a calcular las respectivas eficiencias y carga en el motor para cada uno de los pozos de estudio, obteniendo como resultado los valores expuestos en la Tabla 8:

Tabla 8.
Cálculo de eficiencias y carga del motor.

Pozo	η sistema %	η Bomba %	η motor %	Carga BOMBA/MOTOR %
CM-1	35,59%	66,28%	73,97%	74,02%
CM-2	36,76%	72,66%	90,39%	32,99%
CM-3	35,88%	90,43%	113,79%	68,82%
CM-4	36,35%	80,64%	83,67%	52,46%
CM-5	43,89%	72,25%	65,54%	37,68%
CM-6	50,69%	76,26%	50,23%	22,24%
CM-7	37,84%	72,08%	53,17%	44,36%
CM-8	29,83%	59,68%	56,44%	33,99%
CM-9	38,49%	70,24%	86,08%	48,81%
CM-10	27,04%	69,27%	72,45%	57,74%

Nota. Resultado de cálculo de eficiencias y carga del motor en cada pozo.

3.1.3. Selección de pozos para la optimización energética

Como se estableció en el desarrollo de la metodología se tendrán en cuenta cada uno de los criterios para la selección del pozo al que se le realizara la optimización energética, adicional se tendrán en cuenta los valores de potencias presentes en el sistema y los valores de placa nominal del motor, para identificar el pozo con oportunidad de de-rating. para ello se estableció la Tabla 9, la cual contiene cada uno de los criterios para la selección.

Tabla 9.
Criterios para selección de pozo a optimizar.

Pozo	η sistema	η Bomba	η motor	Carga BOMBA MOTOR %	Tecnología	RUN LIFE [DIAS]	Frecuencia [HZ]
CM-1	35,59%	66,28%	73,97%	74,02%	AM	3547	59,9
CM-2	36,76%	72,66%	90,39%	32,99%	PMM	836	60,5
CM-3	35,88%	90,43%	113,79%	68,82%	PMM	833	51,0
CM-4	36,35%	80,64%	83,67%	52,46%	AM	642	45,0
CM-5	43,89%	72,25%	65,54%	37,68%	AM	470	60,0
CM-6	50,69%	76,26%	50,23%	22,24%	AM	226	50,0
CM-7	37,84%	72,08%	53,17%	44,36%	AM	996	61,0
CM-8	29,83%	59,68%	56,44%	33,99%	AM	623	62,4
CM-9	38,49%	70,24%	86,08%	48,81%	AM	1104	51,0
CM-10	27,04%	69,27%	72,45%	57,74%	AM	410	60,0

Nota. *Está tabla contiene cada uno de los criterios previamente establecidos para la selección del pozo a optimizar.*

Realizando la evaluación y el debido análisis de cada uno de los criterios observados en la Tabla 9, se determina que los pozos con mayor oportunidad de mejora energética; el pozo CM-7 el cual presenta una eficiencia baja menor al 40% en el sistema, la tecnología instalada en pozo es un motor AM, experimenta una frecuencia alta de 61Hz,

adicional se observa que presenta un run life cercano a los 1000 días esto asegura el buen estado de los componentes de bomba, previniendo un daño de cualquier componente durante el procedimiento de de-rating, por otra parte al observar el comportamiento actual del pozo CM-9 presenta un desempeño del sistema similar de 38,49% el cual es menor al 40 % establecido, al realizar la evaluación de la potencia de entrada al sistema la cual es 190,44 hp comparada con la requerida de 86,86 hp y teniendo en cuenta que el equipo se encuentra a una frecuencia de 51 Hz por condiciones de operación en la bomba la cual se encuentra en Upthrust (maneja un caudal mayor al permitido) se decide realizar la optimización energética por medio del de-rating, debido a que por lo anteriormente mencionado el equipo no se encuentra en condiciones de aumento de frecuencia.

3.2. Identificación de ineficiencias del sistema

Al realizar la validación y el análisis respectivo de cada una de las eficiencias calculadas en la base de datos, se observa una eficiencia del sistema menor al 40% en el pozo CM-7 y CM-9, mencionados pozos reúnen cada uno de los criterios de selección previamente establecidos en el capítulo 2 METODOLOGÍA Y DATOS.

En la Tabla 9 referente a los criterios de selección del pozo a optimizar, se logra evidenciar la eficiencia de la bomba y el motor las cuales son de 72,08% y 53,17% respectivamente. Si se realiza un contraste entre los porcentajes de cada uno de los desempeños en los componentes, se logra determinar que la ineficiencia del sistema se encuentra principalmente en el motor, dado el caso en el que la ineficiencia se localiza en el motor es posible plantear la viabilidad del de-rating del motor, debido a que la investigación se enfoca principalmente en lo que se permite ejecutar desde superficie para la optimización del sistema.

Por parte del análisis realizado en el pozo CM-9 se puede observar que la eficiencia en la bomba y el motor, 70,24 % y 86,08 % respectivamente son consideradas buenas dentro del sistema, sin embargo, se observa una limitación del equipo que actualmente se encuentra trabajando en un rango de caudal más alto de lo esperado para el manejo de la bomba lo cual genera desgaste en sus etapas, es por lo anterior que se

decide efectuar el procedimiento de optimización en el motor así se logra reducir los costos durante la vida útil del equipo.

3.3. Causas de la ineficiencia

3.3.1. Pozo CM-7

Previamente identificado el componente con mayor ineficiencia en el sistema en este caso el motor, se debe realizar la respectiva relación entre los valores nominales de placa del motor con respecto a lo requerido por la bomba para el funcionamiento del sistema. En la Tabla 10 se describen los datos actuales de placa en el motor instalado:

Tabla 10.
Valores de placa motor pozo CM-7.

Pozo	Motor Descripción				
	Modelo	Potencia (Hp)	Voltaje (V)	Corriente (Amp)	PMM/AM
CM-7	MAXIMUS	225	2229	61,1	AM

Nota. *La presente tabla describe los valores de placa del motor actualmente instalado en el pozo CM-7. Tomado de: Frontera Energy CORP, 2020.*

Se logra evidenciar que el motor actualmente instalado en el pozo CM-7, presenta un comportamiento de 225 hp nominales, si se tiene en cuenta el valor de potencia requerida actualmente por el sistema previamente calculada y correspondiente al valor de 99,8 hp, se puede inferir que el motor actual instalado en el pozo presenta características sobredimensionadas para el adecuado funcionamiento de este. Lo anterior genera un acenso en el consumo eléctrico del sistema de BES causando la ineficiencia del sistema, sin embargo, es posible generar la optimización del sistema energético del pozo mediante la propuesta del de-rating, el cual permite ajustar los valores de placa del motor.

3.3.2. Pozo CM-9

En el caso del pozo CM-9 se pretende realizar la optimización del sistema por parte del motor por ello se realiza el mismo caso de estudio, es decir se procede a identificar los valores nominales de placa actuales del motor y así realizar la relación entre estos y lo que verdaderamente requiere el sistema para su funcionamiento óptimo. Como se

puede observar en la tabla 11 se describen los datos de placa actual del motor instalado en fondo del pozo CM-9.

Tabla 11.
Valores de placa motor pozo CM-9.

Pozo	Motor Descripción				PMM/AM
	Modelo	Potencia (Hp)	Voltaje (V)	Corriente (Amp)	
CM-9	2 MOTORES N512 UT CR0 MT ZDS0	482	3360	82	AM

Nota. *La presente tabla describe los valores de placa del motor actualmente instalado en el pozo CM-9. Tomado de: Frontera Energy CORP, 2020.*

Se puede observar que actualmente en el pozo hay dos motores instalados en fondo de la misma referencia, lo anterior permite que en el pozo se presente un comportamiento por parte de los motores de 482 hp nominales, si se contempla el valor de potencia requerida por parte de la bomba que es actualmente de 235,28 hp, se evidencia un sobredimensionamiento en los parámetros nominales con los que opera actualmente el pozo, lo anterior ocasiona un ascenso en el consumo energético del pozo cuando se refiere a la electricidad consumida, teniendo en cuenta lo anterior se decide realizar una propuesta de de-rating para el pozo CM-9 esto permitirá disminuir el consumo eléctrico y un aumento de eficiencia en el sistema durante la vida útil de la bomba la cual se encuentra trabajando con un caudal mayor al permitido por el equipo.

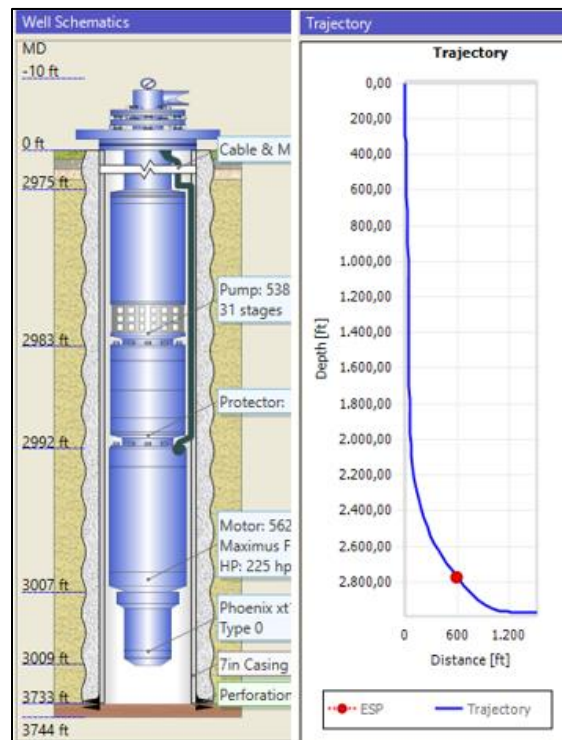
3.4. Propuesta técnica para la optimización

En la propuesta técnica para la optimización se realiza inicialmente un análisis del estado actual del pozo CM-7 y el pozo CM-9, esto con la finalidad de comprender cual es la producción y el consumo actual, así mismo evidenciar el estado de la bomba y el motor en fondo, para finalmente observar las diferencias entre el consumo actual del pozo y los resultados de la propuesta de optimización generada con el apoyo de DesingRite® en el caso del pozo CM-7 y por otro lado el pozo CM-9 generada con las tablas de comportamiento del motor a diferentes cargas las cuales son propiedad de la empresa proveedora del equipo.

3.4.1. Estado actual del pozo CM-7

El pozo CM-7 presenta una geometría horizontal con completamiento para control de sólidos, casing y tubing de producción de 7 pulgadas y 3,5 pulgadas respectivamente, como método de levantamiento artificial cuenta con un sistema de bombeo electrosumergible con una profundidad de asentamiento de la bomba de 2509 pies MD y 2752 pies TVD, el tope de la formación productora se encuentra ubicado a 3412,70 pies MD y 2972,70 pies TVD. En la siguiente figura se puede observar la geometría y estado mecánico del pozo.

Figura 11.
Estado mecánico y trayectoria del pozo CM-7.

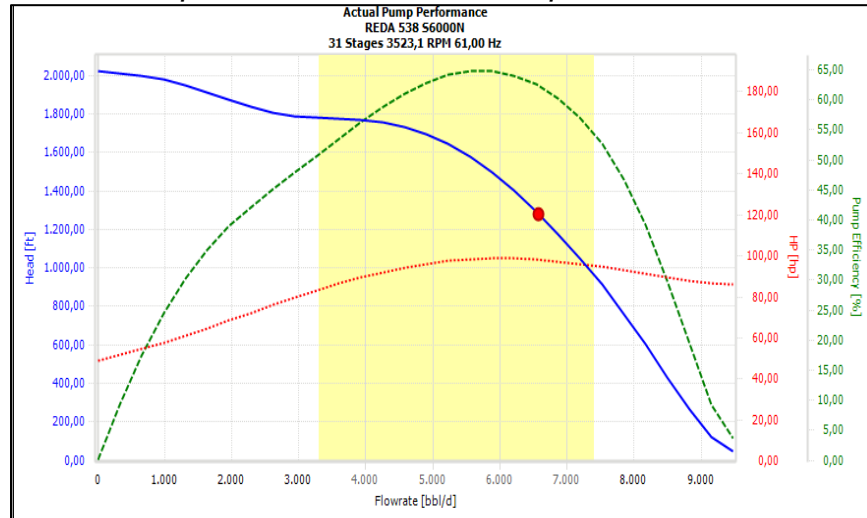


Nota. Figura del estado mecánico y trayectoria pozo CM-7 generada mediante simulación. Tomado de: Schlumberger, 2020.

Actualmente el pozo tiene instalada una bomba S6000N de 31 etapas de la compañía Schlumberger, esta se encuentra con una frecuencia de 61Hz la cual permite la producción de 6063 BFPD con un corte de agua de 96,46% y baja producción de sólidos, presenta un índice de productividad de 22,5 BFPD/Psi, presenta una presión de cabeza

(THP) de 122 Psia y presión de entrada al intake de 798 Psia. Según la siguiente figura se puede observar el estado actual de operación relacionado a la bomba instalada en el pozo CM-7.

Figura 12.
Estado de operación de la bomba del pozo CM-7.



Nota. Figura del estado actual de operación de la bomba pozo CM-7 generada mediante simulación. Tomado de: Schlumberger, 2020.

En la Figura 12 mediante el análisis de los parámetros de la gráfica del estado de operación actual de la bomba se evidencia una eficiencia actual de 63,33 % la cual se asemeja a la eficiencia calculada en la base de datos. Posteriormente se puede observar que la bomba se encuentra operando dentro del rango óptimo comprendido entre 3200 BFPD y 7200BFPD aproximadamente, generando una TDH de 1215,88 pies y requiriendo 99,8 hp para su funcionamiento.

Finalmente, el pozo CM-7 se encuentra operando con un motor Maximus serie 562 al cual actualmente se le suministra 2473 V desde superficie registrando una potencia de entrada al VDS de 143,49 hp y dejando en evidencia un consumo alto con respecto a lo solicitado por el sistema 54,3 hp y la bomba instalada 99,8 hp.

3.4.2. Resultados de la propuesta pozo CM-7

Según los resultados obtenidos a condiciones actuales de operación del equipo de BES se hace la siguiente propuesta técnica para la optimización eléctrica del pozo

CM-7. Se debe resaltar que en las condiciones actuales la bomba requiere 99,8 hp para su funcionamiento y el motor se encuentra con carga de 44,36 %. Como se puede evidenciar en la Tabla 10 los valores de placa nominal del motor son mucho mayores a los hp requeridos actualmente por la bomba es decir 99,8 hp. Por lo cual se propone hacer un de-rating del motor al 50%, es decir se debe ajustar el voltaje de entrada al motor de 2473 V a 1995 V, lo anterior con la finalidad de que los datos de placa del motor se comporten con las características de un motor de 112,5 hp, 1881,5 V y 35,4 AMP con el propósito de reducir la sobrestimación energética. En la Tabla 12 se puede observar un contraste del pozo CM-7 según las condiciones actuales de operación y las estimadas con los resultados de la simulación de optimización con el apoyo de DesingRite®.

Tabla 12.

Resultados simulación de optimización energética pozo CM-7.

Condiciones de bombeo			
CASO	Motor 100%	Motor 50%	
Caudal Actual	6474,85	6488,69	STB/d
TDH	1281,44	1283,76	ft
PIP	894,87	894,46	psi
PID	1442,01	1442,59	psi
Frecuencia	61,00	60,20	Hz
Información de la bomba			
Tipo	REDA 538 S6000N	REDA 538 S6000N	
Velocidad de operación	3523,06	3528,30	RPM
Hp requeridos	98,18	98,61	hp
Eficiencia de bomba	62,31	62,28	%
Etapas	31,00	31,00	
Información de motor			
Tipo	562 Maximus	562 Maximus	
Hp nominal motor	225,00	112,50	hp
Velocidad del motor	3523,06	3528,30	RPM
Amperaje	35,64	33,01	Amp
Voltaje de motor	2266,36	1887,82	Volts
FP	0,67	0,76	
Carga bomba/motor	42,92	87,36	%
eficiencia del motor	89,57	89,59	%
Información eléctrica			
Voltaje en superficie	2300,88	1919,72	Volts
Consumo KVA	141,88	109,64	KVA

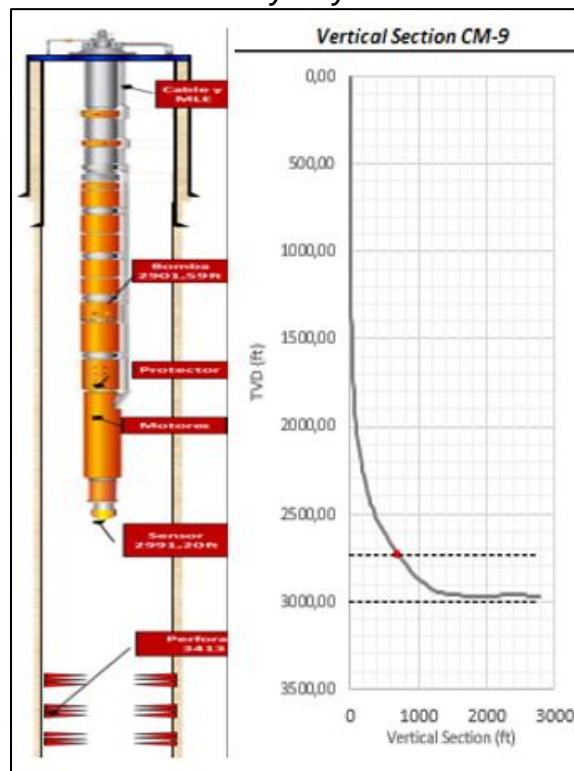
Nota. Esta tabla presenta los resultados obtenidos de la simulación de de-rating con el apoyo de DesingRite®.

Al examinar la propuesta técnica del de-rating al 50 % para la optimización eléctrica del pozo CM-7 el motor resulta operando a una carga del 87,36 % con un factor de potencia de 76,82 %. Adicionalmente se pueden observar resultados estimados de un consumo eléctrico de 141,88 KVA a un consumo de 109,64 KVA generando una diferencia de 32,24 KVA la cual corresponde al ahorro energético estimado.

3.4.3. Estado actual del pozo CM-9

El pozo CM-9 presenta una geometría horizontal con completamiento para control de sólidos, casing y tubing de producción de 7 pulgadas y 3,5 pulgadas respectivamente, como método de levantamiento artificial cuenta con un sistema de bombeo electrosumergible con una profundidad de asentamiento de la bomba de 2714 pies MD y 2714 pies TVD, el tope de la formación productora se encuentra ubicado a 3413 pies MD y 2973 pies TVD. En la siguiente figura se puede observar la geometría y estado mecánico del pozo.

Figura 13.
Estado mecánico y trayectoria CM-9.

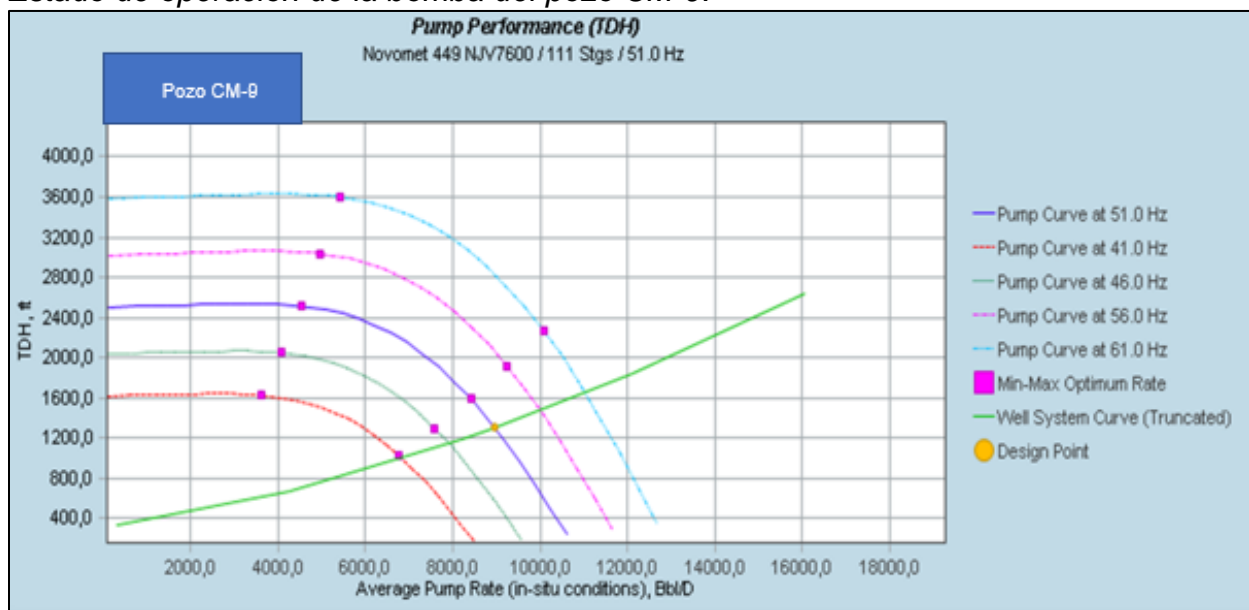


Nota. estado mecánico y trayectoria CM-9 graficada por parte de los autores.

Actualmente el pozo tiene instalada una bomba NJV7600 de 111 etapas de la compañía Novomet, esta se encuentra con una frecuencia de operación de 51Hz la cual permite la producción de 9669 BFPD con un corte de agua de 98,06% y baja producción de sólidos, presenta un índice de productividad de 33,35 BFPD/Psi, experimenta una presión de cabeza (THP) de 147 Psia y presión de entrada al intake de 764 Psia. Según la siguiente figura se puede observar el estado actual de operación relacionado a la bomba instalada en el pozo CM-9.

Figura 14.

Estado de operación de la bomba del pozo CM-9.



Nota. Figura del estado actual de operación de la bomba pozo CM-9 generada mediante simulación. Tomado de: Novomet, 2020.

En la Figura 14 mediante el análisis del rango de operación de la gráfica del estado de operación actual de la bomba se evidencia que el estado de operación del pozo se encuentra fuera de rango precisamente en un Upthrust severo (maneja un caudal muy mayor al permitido), lo cual ocasiona un desgaste temprano de las etapas de la bomba, adicional se determina una eficiencia actual de 70,24 % la cual se asemeja a la eficiencia calculada en la base de datos. Posteriormente se puede observar que la bomba debería operar dentro del rango optimo comprendido entre 5283 BFPD y 7546 BFPD aproximadamente, generando un TDH de 2319,68 pies y requiriendo 226,05 hp para su funcionamiento.

Finalmente, el pozo CM-9 se encuentra operando con dos motores N512 UT CRO MT ZDS0 al cual actualmente se le suministra 3617 V desde superficie registrando una potencia de entrada al VDS de 213,73 hp y dejando en evidencia un consumo alto con respecto a lo solicitado por el sistema 86,86 hp y la bomba instalada 226,05 hp.

3.4.4. Resultados de la propuesta pozo CM-9

Según los resultados obtenidos de las condiciones actuales de operación del equipo de BES se hace la propuesta técnica para la optimización eléctrica del pozo CM-9. Se debe resaltar que en las condiciones actuales la bomba requiere 226,05 hp para su funcionamiento y el motor se encuentra con carga de 46,9 %. Como se puede evidenciar en la Tabla 11 los valores de placa nominal del motor son mucho mayores a los hp requeridos actualmente 226,05 hp. Por lo cual se propone hacer un de-rating del motor al 75%, es decir se debe ajustar el voltaje de entrada al motor de 3617 V a 3055 V, lo anterior con la finalidad de que los datos de placa del motor se comporten con las características de un motor de 362 hp, 3039 V y 68 AMP con el propósito de reducir la sobrestimación energética. En la siguiente tabla se puede observar una comparación del pozo CM-9 según las condiciones actuales de operación y las estimadas con los resultados del ajuste propuesto.

Tabla 13.
Resultados propuesta de optimización energética pozo CM-9.

Condiciones de bombeo			
CASO	Motor 100%	Motor 75%	
Caudal Actual	8797	8797	STB/d
TDH	1299	1299	ft
PIP	787	793	psi
PID	1364	1370	psi
Frecuencia	51	51	Hz
Información de la bomba			
Tipo	NJV7600	NJV7600	
Hp requeridos	226,05	226,05	hp
Eficiencia de bomba	70,24	70,24	%
Etapas	111	111	
Información de motor			
Tipo	N512 UT CR0 MT ZDS0	N512 UT CR0 MT ZDS0	
Hp nominal motor	482	362	hp
Amperaje	45	44,6	Amp
Voltaje de motor	2878	2729	Volts
FP	67	72	%
Carga bomba/motor	46,9	64,99	%
eficiencia del motor	89,2	91,6	%
Información eléctrica			
Voltaje en superficie	3617	3055	Volts
Consumo KVA	172,4	171,42	KVA

Nota. *Esta tabla presenta los resultados obtenidos del de-rating con el apoyo de Novomet y Frontera Energy Corp.*

Al examinar la propuesta técnica del de-rating al 75 % para la optimización eléctrica del pozo CM-9 el motor resulta operando a una carga del 64,99 % con un factor de potencia de 72 %. Adicionalmente se pueden observar resultados estimados de un consumo eléctrico de 172,4 KVA a un consumo de 171,42 KVA generando una diferencia de 1 KVA la cual corresponde al ahorro energético estimado.

3.5. Evaluación de resultados

En la sección de evaluación de resultados se realiza el procedimiento para determinar si la propuesta del proyecto de optimización energética es técnica y económicamente viable para su aplicación en la totalidad del campo de crudo pesado con equipos de BES instalados referentes a motores de inducción o asíncronos AM.

Para demostrar lo anterior se realizan los cálculos económicos de consumo actual por el pozo CM-7 la estimación del costo eléctrico con los resultados de la simulación, finalmente se exponen los valores reales (validación) de la aplicación del procedimiento de optimización desarrollado en campo con el pozo CM-7 y el pozo CM-9 para el contraste económico de los datos anteriores y actuales a la mejora realizada.

3.5.1. Evaluación de resultados estimados por simulación pozo CM-7

Para la evaluación de los resultados estimados por la simulación del pozo CM-7 se debe tener en cuenta el consumo actual en KVA del pozo, este valor depende del voltaje y amperaje medido a la entrada al VDS, en este caso estos valores corresponden a 477 Vol y 141 Amp, para calcular el consumo de potencia con las medidas mencionadas se emplea la ecuación 18:

$$KVA = \frac{1,732 * Voltaje * Amperaje}{1000}$$

$$KVA = \frac{1,732 * 477 Vol * 141 Amp}{1000} = 116,35$$

Posterior al cálculo de la potencia en KVA se debe determinar la potencia real en KWatts que el sistema está consumiendo actualmente debido a que esta es la que genera el valor real del costo eléctrico, esta se puede determinar teniendo en cuenta el factor de potencia actual en este caso 0,92, haciendo un despeje de la ecuación 20, se logra determinar dicha potencia.

$$FP = \cos \phi = \frac{KWatts}{KVA}$$

$$KWatts = FP * KVA$$

$$KWatts = 0,92 * 116,35 = 107 KWatts$$

Adicional es preciso determinar el costo de KWatts en el día teniendo en cuenta que son 24 horas operativas del equipo de BES y el costo por hora que depende de si es suministrado por generación o red local, estos valores de costo por hora son 0,1792 USD/hora y 0,1289 USD/hora respectivamente. Para el caso del pozo CM-7 la energía es suministrada por generación, por consiguiente, mediante el uso de la ecuación 27 es posible determinar el costo de la operación del equipo en un día:

$$Costo\ dia = Potencia\ Eletrica * horas\ de\ operación\ al\ dia * costo\ por\ hora$$

$$Costo\ dia = 107 KWatts * 24 horas * 0,1792 USD/hora = 460,37 USD$$

Por último, se asumen que los costos energéticos son estables durante los 365 días del año para establecer el valor operacional eléctrico en el año (CAUE):

$$CAUE = 460,37 USD * 365 dias = 168.033,68 USD$$

Dentro de los resultados obtenidos por la simulación se contempló el consumo eléctrico en superficie este es de 109 KVA, al aplicar la ecuación 20 se estima la potencia real:

$$KWatts = FP * KVA$$

$$KWatts = 0,92 * 109,35 = 100,6 KWatts$$

Teniendo en cuenta los criterios para el costo por día de operación se estimó el valor operacional eléctrico en el año.

$$Costo\ dia = Potencia\ Eletrica * horas\ de\ operación\ al\ dia * costo\ por\ hora$$

$$Costo\ dia = 100,6 KWatts * 24 horas * 0,1792 USD/hora = 432,67 USD$$

$$CAUE = 432,67 USD * 365 dias = 157.924,21 USD$$

Como resultado de los cálculos anteriores se generó la Tabla 14 en donde se puede visualizar el contraste entre los resultados del consumo actual del pozo y el estimado con los valores de la propuesta simulada:

Tabla 14.

Contraste resultados estimados de consumo pozo CM-7.

	Actual	Simulación	Unidades	Ahorro [%]
Potencia	116,35	109,35	[KVA]	
FP	92	92	[%]	
Potencia real	107	100,6	[KWatts]	
Costo día	\$ 460,37	\$ 432,67	[USD]	
CAUE	\$ 168.035,05	\$ 157.924,55	[USD]	6,01

Nota. Esta tabla presenta los resultados obtenidos por el contraste entre el consumo actual y estimado por la simulación.

Es evidente que al realizar el contraste del costo en dólares se observa una reducción en el consumo de 7 KVA que se traducen en \$ 27,7 USD por día en el costo de consumo eléctrico del pozo, con la propuesta técnica de la optimización como resultado se estima un ahorro referente a los costos operacionales de electricidad de \$ 10.110,5 USD considerados de manera anual. Haciendo así económicamente viable el proyecto de optimización teniendo en cuenta que el desarrollo de esta no se contemplan costos adicionales en la aplicación y se genera en un ahorro del 5,98% en potencia real, traducido a una reducción de 6,01% en costos.

3.5.1. Evaluación de resultados validados en campo pozo CM-7

Con los valores y resultados obtenidos por la propuesta técnica planteada para el pozo CM-7, se tomó la decisión de realizar la optimización propuesta en campo. Para recordar mencionada aplicación consiste en reconfigurar el voltaje de entrada en superficie específicamente en el TAP en 1995 V.

Para iniciar con la aplicación del de-rating se tomaron medidas eléctricas de entrada en el VDS, salida en el VDS y entrada al motor nuevamente con la finalidad de tener una evaluación de los resultados más significativa del antes de la optimización, así mismo después de la operación se realizaron las mismas medidas con la finalidad de realizar el contraste económico. En la Tabla 15 se pueden observar los datos de las

medidas eléctricas antes y después del procedimiento de optimización aplicada en el pozo CM-7.

Tabla 15.

Medidas eléctricas de superficie proceso de optimización pozo CM-7.

		Fecha	23/10/2020	26/10/2020
POZO	CM-7	Caso	100%	50%
		TAP SUT	2473,00	1995,00
		FP Motor	0,67	0,76
		TEMP Motor	203,00	202,00
ENTRADA VSD	VOLTAJE F-F	A-B	481,00	481,00
		B-C	483,00	481,00
		C-A	481,00	481,00
	VOLTAJE F-T	A-N	277,00	277,00
		B-N	278,00	277,00
		C-N	277,00	277,00
	CORRIENTE (A)	A	114,00	108,00
		B	113,00	109,00
		C	113,00	108,00
SALIDA VSD	VOLTAJE F-F	A-B	476,00	454,00
		B-C	474,00	453,00
		C-A	471,00	453,00
	VOLTAJE F-T	A-N	278,00	282,00
		B-N	278,00	267,00
		C-N	275,00	271,00
	CORRIENTE (A)	A	186,00	150,00
		B	192,00	152,00
		C	190,00	156,00
MOTOR FONDO	VOLTAJE F-F	A-B	2440,00	2065,00
		B-C	2443,00	2059,00
		C-A	2439,00	2048,00
	VOLTAJE F-T	A-N	1451,00	1210,00
		B-N	1444,00	1178,00
		C-N	1370,00	1162,00
	CORRIENTE (A)	A	36,00	35,00
		B	36,00	33,00
		C	38,00	33,00

Nota. Esta tabla presenta los resultados obtenidos por el contraste entre el consumo actual y estimado por la simulación. Tomado de: Elaboración propia con apoyo de Frontera Energy, Corp.

Realizando el mismo procedimiento aplicado para el cálculo de resultados estimados por la simulación y teniendo en cuenta las medidas eléctricas tomadas antes y después de la optimización, se obtienen los siguientes resultados reportados en la Tabla 16.

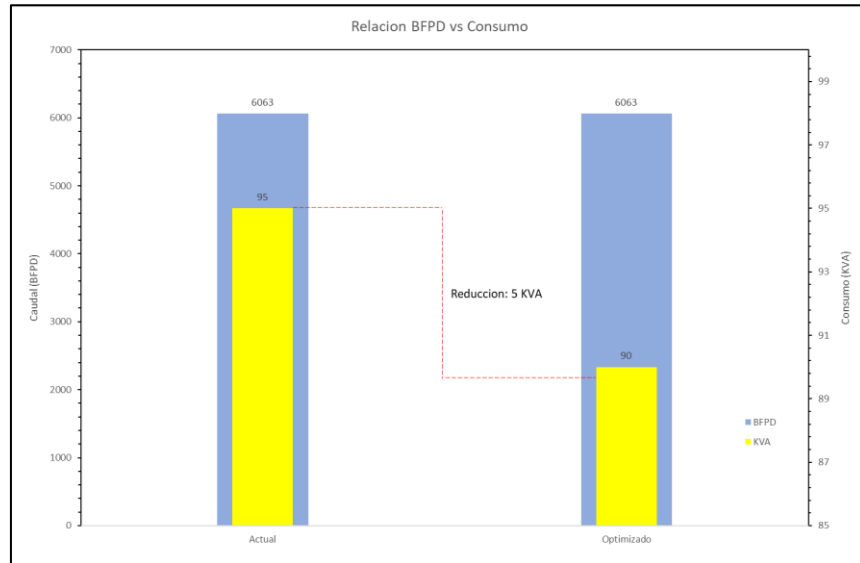
Tabla 16.
Contraste resultados validados en campo de consumo pozo CM-7.

	Actual	Optimizado	Unidades	Ahorro [%]
Potencia	95	90	KVA	
FP	92	92	[%]	
Potencia real	87,4	82,8	KWatts	
Costo día	\$ 375,89	\$ 356,11	USD	
CAUE	\$ 137.199,82	\$ 129.978,78	USD	5,26

Nota. *Esta tabla presenta los resultados obtenidos por el contraste entre el consumo actual y estimado por la simulación.*

Observando los resultados obtenidos por la aplicación de la optimización en campo se detalla un descenso de 5 KVA, esto genera un ahorro estimado de consumo eléctrico referente a un costo anual de \$ 7.212,04 USD correspondiente al 5,26 % por la modificación realizada en superficie, garantizando la misma producción de fluido por día correspondiente 6063 BFPD, como se puede evidenciar en la siguiente figura 15:

Figura 15.
Relación de caudal y consumo pozo CM-7.



Nota. Grafica correspondiente al contraste entre la producción y el consumo eléctrico luego de la optimización.

Teniendo en cuenta los datos suministrados en superficie y por la simulación se establece que el principal parámetro a observar debe ser el factor de potencia presente en el motor antes y después de la optimización, debido a que se presenta un incremento considerable de 67% a 76% y según lo definido por el marco teórico este determina la relación entre la potencia real y la potencia aparente, lo cual quiere decir que al mejorar el factor de potencia presente en el motor se realiza un mejor uso energético de la electricidad suministrada al sistema.

Analizando y realizando una comparación entre el comportamiento del factor de potencia y la carga del motor antes y después de la optimización se presenta una relación proporcional, es decir generando el de-rating se observa un aumento en la carga que ejerce la bomba sobre el motor y consecutivamente se observa el aumento en el factor de potencia, lo anterior obedece a un comportamiento esperado por definición en las curvas del motor evaluado.

Finalmente se debe recalcar que al realizar el cálculo de eficiencia en el motor se registró con un valor de 64,67%, generando una mejor eficiencia del sistema en general de 47,77 % y manteniendo el caudal de producción, adicional se observa una mejora de

la temperatura actual en el motor según las medidas tomadas en campo después de la optimización se registró en 202°F, lo anterior genera una mejora en las condiciones de operación del de bombeo electrosumergible aumentando la vida útil del equipo instalado y previniendo la intervención temprana en el pozo CM-7.

3.5.1. Evaluación de resultados estimados por la simulación pozo CM-9

Similar al anterior caso para la evaluación de los resultados estimados por la propuesta realizada para el pozo CM-9 se debe tener en cuenta el consumo actual en KVA del pozo, este valor depende del voltaje y amperaje medido a la entrada al VDS, en este caso estos valores corresponden a 489 Vol y 203 Amp, para la evaluación de este caso también es pertinente realizar el procedimiento de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta lo anterior para calcular el consumo de potencia con las medidas mencionadas se emplea la ecuación 18:

$$KVA = \frac{1,732 * Voltaje * Amperaje}{1000}$$

$$KVA = \frac{1,732 * 489 Vol * 203 Amp}{1000} = 172,4$$

Posterior al cálculo de la potencia en KVA se determinar la potencia real en KWatts que el sistema está consumiendo actualmente, como ya se mencionó esta se puede determinar teniendo en cuenta el factor de potencia actual en este caso 0,91 y haciendo un despeje de la ecuación 20, se logra determinar dicha potencia.

$$FP = \cos \phi = \frac{KWatts}{KVA}$$

$$KWatts = FP * KVA$$

$$KWatts = 0,91 * 172,4 = 156,88 KWatts$$

Para determinar el costo de KWatts en el día teniendo en cuenta que se mantienen las 24 horas operativas del equipo de BES y el costo por hora que depende del suministro que en el caso del pozo CM-9 es de red local el cual se estima en 0,1289

USD/hora respectivamente. Por consiguiente, mediante el uso de la ecuación 27 es posible determinar el costo de la operación del equipo en un día:

$$\text{Costo dia} = \text{Potencia Eletrica} * \text{horas de operación al dia} * \text{costo por hora}$$

$$\text{Costo dia} = 156,88 \text{ KWatts} * 24 \text{ horas} * 0,1289 \text{ USD/hora} = 485,34 \text{ USD}$$

Por último, se mantiene la premisa de que los costos energéticos son estables durante los 365 días del año para establecer el valor operacional eléctrico en el año (CAUE):

$$\text{CAUE} = 485,34 \text{ USD} * 365 \text{ dias} = 177.149,1 \text{ USD}$$

Dentro de los resultados obtenidos por la propuesta para el pozo CM-9 se estimó el consumo eléctrico en superficie este es de 171,42 KVA, al aplicar la ecuación 20 se estima la potencia real:

$$\text{KWatts} = \text{FP} * \text{KVA}$$

$$\text{KWatts} = 0,91 * 171,42 = 155,99 \text{ KWatts}$$

Teniendo en cuenta los criterios para el costo por día de operación se estimó el valor operacional eléctrico en el año.

$$\text{Costo dia} = \text{Potencia Eletrica} * \text{horas de operación al dia} * \text{costo por hora}$$

$$\text{Costo dia} = 155,99 \text{ KWatts} * 24 \text{ horas} * 0,1289 \text{ USD/hora} = 482,57 \text{ USD}$$

$$\text{CAUE} = 482,57 \text{ USD} * 365 \text{ dias} = 176.138,05 \text{ USD}$$

Como resultado de los cálculos anteriores se generó la Tabla 17 en donde se puede visualizar el contraste entre los resultados del consumo actual del pozo y el estimado con los valores de la propuesta de optimización:

Tabla 17.

Contraste resultados estimados de consumo pozo CM-9.

	Actual	Simulación	Unidades	Ahorro [%]
Potencia	172,4	171,42	[KVA]	
FP	91	91	[%]	
Potencia real	156,88	155,99	[KWatts]	
Costo día	\$ 485,34	\$ 482,57	[USD]	
CAUE	\$ 177.149,1	\$ 176.138,05	[USD]	0,57

Nota. *Esta tabla presenta los resultados obtenidos por el contraste entre el consumo actual y estimado por la propuesta.*

Se evidencia que al realizar el contraste del costo en dólares se observa una reducción en el consumo de 1 KVA según la propuesta de optimización que se traducen en \$ 2,77 USD por día en el costo de consumo eléctrico del pozo, con la propuesta técnica de la optimización como resultado se estima un ahorro referente a los costos operacionales de electricidad de \$ 1.011,1 USD correspondiente al 0,57% considerados de manera anual. Haciendo así económicamente viable el proyecto de optimización teniendo en cuenta que el desarrollo de esta no se contemplan costos adicionales en la aplicación y el pozo se encuentra en constante desgaste por su condición de caudal alto en la bomba.

3.5.1. Evaluación de resultados validados en campo pozo CM-9

Al realizar la evaluación de los resultados obtenidos por la propuesta de optimización planteada para el pozo CM-9, se decide realizar el procedimiento en campo. Para recordar mencionada aplicación consiste en reconfigurar el voltaje de entrada en superficie específicamente en el TAP en 3055 V.

Tal cual al primer procedimiento para iniciar con la aplicación del de-rating se tomaron medidas eléctricas en entrada en el VDS, salida en el VDS y entrada al motor nuevamente con la finalidad de tener resultados más significativa del antes de la optimización, así mismo después de la operación se realizaron las mismas medidas para realizar el contraste económico y así determinar el ahorro real de la optimización.

En la Tabla 18 se pueden observar los datos de las medidas eléctricas antes y después del procedimiento de optimización aplicada en el pozo CM-9.

Tabla 18.

Medidas eléctricas de superficie proceso de optimización pozo CM-9.

		Fecha	12/11/2020 8:00 am	12/11/2020 10:15 am	
POZO	CM-9	Caso	100%	75%	
		TAP SUT	3617	3055	
		FP Motor	0,67	0,72	
		THP	100	230	
ENTRADA VSD	VOLTAJE F-F	A-B	478,00	481,00	
		B-C	480,00	480,00	
		C-A	478,00	478,00	
	VOLTAJE F-T	A-N	276,00	276,00	
		B-N	277,00	277,00	
		C-N	275,00	278,00	
	CORRIENTE (A)	A	204,00	197,00	
		B	208,00	204,00	
		C	211,00	206,00	
	SALIDA VSD	VOLTAJE F-F	A-B	392,36	437,00
			B-C	392,27	437,00
			C-A	392,29	437,00
VOLTAJE F-T		A-N	226,52	252,00	
		B-N	226,47	252,00	
		C-N	226,51	252,00	
CORRIENTE (A)		A	329,00	270,00	
		B	341,00	281,00	
		C	345,00	285,00	
MOTOR FONDO		VOLTAJE F-F	A-B	2871,00	2728,0
			B-C	2878,00	2720,0
			C-A	2878,00	2729,0
	VOLTAJE F-T	A-N	1650,00	1569,0	
		B-N	1660,00	1587,0	
		C-N	1656,00	1571,0	
	CORRIENTE (A)	A	44,00	43,2	
		B	45,00	44,6	
		C	44,00	42,5	

Nota. Esta tabla presenta los resultados obtenidos por el contraste entre el consumo actual y estimado por la simulación. Tomado de: *Elaboración propia con apoyo de Frontera Energy, Corp.*

Realizando procedimiento de evaluación aplicado para el cálculo de resultados estimados por la por la propuesta de optimización para el pozo CM-9 y teniendo en

cuenta las medidas eléctricas tomadas antes y después de la optimización, se obtienen los siguientes resultados reportados en la Tabla 19.

Tabla 19.

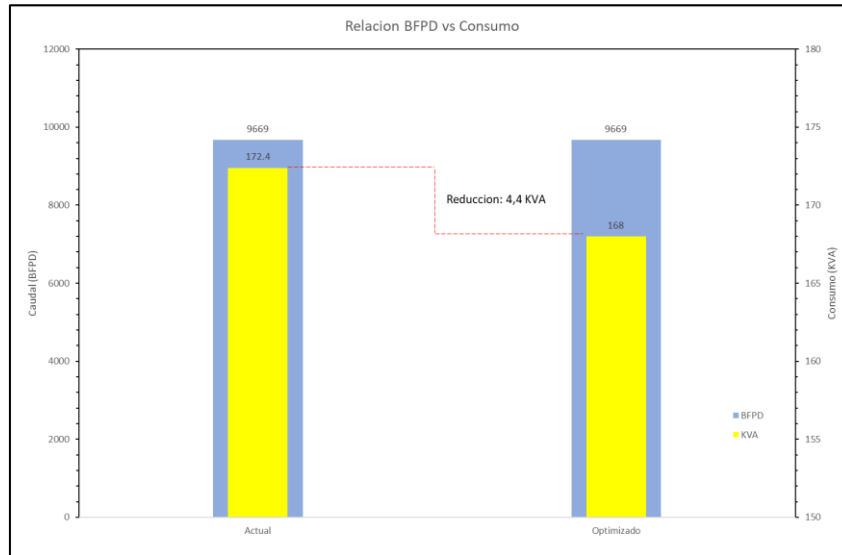
Contraste resultados validados en campo de consumo pozo CM-9.

	Actual	Optimizado	Unidades	Ahorro [%]
Potencia	172,4	168,00	[KVA]	
FP	91	91	[%]	
Potencia real	156,88	152,88	[KWatts]	
Costo día	\$ 485,34	\$ 476,25	[USD]	
CAUE	\$ 177.149,1	\$ 173.831,89	[USD]	1,87

Nota. *Esta tabla presenta los resultados obtenidos por el contraste entre el consumo actual y estimado por la simulación.*

Al presentar los resultados obtenidos por la aplicación de la optimización en campo del pozo CM-9 se identifica un descenso en el consumo eléctrico de 4,4 KVA, lo cual permite determinar un ahorro anual de \$ 3.317,21 USD de consumo eléctrico correspondiente al 1,87 % gracias a la reconfiguración que es resultado de la propuesta de optimización y garantizando la misma producción de fluido correspondiente a 9669 BFPD, como se puede observar en la siguiente figura 16:

Figura 16.
Relación de caudal y consumo pozo CM-9.



Nota. Grafica correspondiente al contraste entre la producción y el consumo eléctrico luego de la optimización.

Como ya se mencionó uno de los parámetros que se debe evaluar es el factor de potencia presente en el motor antes y después del procedimiento, como en el anterior caso aplicado se presenta un comportamiento similar evidenciando un incremento de 67 % a 72 %, logrando observar una mejora en el uso de la electricidad suministrada al sistema de bombeo electrosumergible y manteniendo la producción actual en el pozo CM-9. Se debe tener en cuenta la condición actual en la que estaba trabajando la bomba antes de la optimización, para lograr el resultado exitoso de la optimización fue necesario generar un aumento en la presión de cabeza en el pozo, así fue posible ubicar el punto de operación dentro del rango óptimo de caudal que maneja la bomba. Finalmente se debe recordar que al realizar el cálculo de eficiencia en el motor después de la optimización se registró un valor de 91,60%, generando una mejoría en el desempeño del sistema de 49,09 %, así mismo al realizar el proceso de llevar a rango óptimo de operación la bomba se garantiza el aumento de la vida útil del equipo lo cual es muy importante económicamente hablando, sin embargo, es posible considerar el rediseño del equipo para su próximo servicio de pozo, lo anterior debido a que el modelo de bomba no es el más recomendable para el caudal y el índice de productividad que aporta actualmente el pozo CM-9.

4. CONCLUSIONES

Se logra comprobar por medio de la simulación y los datos obtenidos en campo, que la eficiencia del motor depende directamente del factor de potencia con el que trabaja el equipo, lo anterior se refleja en los resultado obtenidos en el pozo CM-7 donde el factor de potencia aumento de 67 % a 76 % y en el pozo CM-9 de 67 % a 72 % generando una mejora en la eficiencia del motor de 89,57 % - 89,59 % y de 89,2 % - 91,6 % en cada pozo respectivamente.

Se comprueba que la eficiencia del sistema y el factor de potencia son valores proporcionales a la carga que experimenta el motor, esto se evidencia mediante el procedimiento de de-rating, el cual se aplicó en los pozos CM-7 y CM-9 donde se registró un aumento en la carga del motor de 87,36 % y 64,99 % respectivamente en cada pozo, obteniendo un aumento en el factor de potencia (76 % y 72%) y eficiencia del sistema (47,77 % y 49,09 %) en cada caso.

Es importante resaltar que durante el desarrollo del estudio se obtuvieron altas eficiencias por parte de los motores de imanes permanentes (PMM) las cuales son cercanas al 100 %, dando certeza de que el procedimiento de de-rating es más significativo en motores de inducción (AM), en los cuales se registraron bajas eficiencias de en promedio 63,57 %.

Se confirmo que el procedimiento de de-rating funciona como estrategia para la reducción del consumo eléctrico del bombeo electrosumergible sin sobrecostos para la operación del pozo, esto se refleja en el ahorro estimado de los dos pozos estudiados donde se obtuvo una disminución de costos del 5,26 % en el pozo CM-7 y del 1,87 % en el pozo CM-9.

Se evidencia que el de-rating genera un fenómeno de reducción de la temperatura actual que maneja el motor mediante la reducción del amperaje, lo anterior se puede observar en el pozo CM-7 donde debido a la reducción de corriente consumida registrada en 3 AMP, se generó una reducción de 1°F en la temperatura con la que opera el motor Maximus 562 lo cual evita el desgaste prematuro del equipo prolongando la vida útil del equipo en fondo.

Como se pudo evidenciar en los resultados validados obtenidos por la aplicación de la optimización en el pozo CM-9, es necesario trabajar los equipos de bombeo electrosumergible dentro del rango de caudal que permita la bomba, lo anterior con la finalidad de evitar el desgaste prematuro en las etapas del equipo.

La optimización simulada y desarrollada en el pozo CM-7 es técnica y económicamente viable, esto debido a que se obtuvo una reducción de consumo energético de 5KVA, traduciéndose en reducción en costos eléctricos del 5,26 % (\$ 7.221,04 USD anuales) y a su vez una mejora en la eficiencia del sistema de 37,84 % a 47,77 %. Lo anterior permite afirmar que el procedimiento del de-rating en motores de inducción AM, es viable para otros pozos siempre y cuando se tengan en cuenta las tablas del comportamiento de placa según la carga del motor de estudio y las condiciones actuales de operación del conjunto BES.

La optimización propuesta y desarrollada en el pozo CM-9 es técnica y económicamente viable; lo anterior debido a que se registró una reducción del consumo eléctrico de 4,4 KVA referente al 2,55 % (\$ 3.317,21 USD anuales) con respecto al consumo antes de la optimización y una mejora en la eficiencia del sistema de 38,49 % a 49,09 %. Lo anterior reafirma que el procedimiento de de-rating en los motores de inducción es aplicable siempre y cuando se tenga en condiciones óptimas de operación el equipo de bombeo electrosumergibles.

Se puede evidenciar que el ahorro económico es más significativo en equipos a los que se les suministra energía por medio de generación, lo anterior quiere decir que el costo de electricidad por generación es más elevado y menos viable económicamente que el suministrado por la red local. Lo anterior se comprueba con los resultados obtenidos en ambas optimizaciones donde es posible realizar una comparación del ahorro, puesto que en el pozo CM-7 se disminuyó en 5 KVA el consumo el eléctrico y en el pozo CM-9 se disminuyó en 4,4 KVA un ahorro aproximadamente similar en ambos casos si se habla en términos eléctricos, sin embargo al realizar el estudio económico de las dos aplicaciones es mayor el ahorro en pozo CM-7 al cual se le suministra la energía por medio de generación.

Como principal recomendación se sugiere implementar los cálculos realizados en la base de datos propuesta durante el desarrollo del documento, lo anterior con la finalidad de aplicar el procedimiento de selección y jerarquización en la totalidad de los pozos de Frontera Energy Corp, esto permite identificar futuras recomendaciones para la optimización energética en otros pozos.

Se debe evaluar la producción de sólidos en los pozos propuestos para la optimización, debido a que está es una de las principales causas que genera sobreconsumo e ineficiencias en los sistemas de levantamiento artificial.

Se recomienda el monitoreo continuo de las condiciones actuales de producción, consumo eléctrico y calidad de energía del BES, esto facilitara la evaluación de las condiciones de operación y desempeño energético para cada pozo de la compañía Frontera Energy Corp.

Se recomienda trabajar los equipos de bombeo electrosumergible dentro de su rango óptimo de operación, con la finalidad de evitar el desgaste prematuro del equipo y a su vez hacer uso de la base de datos propuesta durante el desarrollo del documento para identificar pozos con equipos que clasifiquen para rediseño, teniendo en cuenta el caudal de producción y el índice de productividad actual del pozo.

Se sugiere tener en cuenta el cálculo de potencia solicitada por el sistema y la bomba, con la finalidad de realizar una futura selección del diseño más adecuado del equipo, teniendo en cuenta el modelo de bomba y sus etapas, modelo del motor y el variador instalado en superficie para los pozos que presenten sobredimensionamiento en el diseño de BES con oportunidad de próximos Well services.

Se sugiere realizar un análisis exergético relación máquina-sistema, para lograr identificar las irreversibilidades del proceso con el objetivo de optimizar los parámetros de operación del BES.

Se recomienda efectuar una evaluación económica referente a los indicadores financieros TIR (taza interna de retorno) y VPN (valor presente neto), para el procedimiento de de-rating aplicado a los motores de inducción, lo anterior con el objetivo de identificar el margen de ganancias luego de la optimización.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Martinez, A. Caicedo, L. Paredes, M. Guevara, and E. Álvarez, “Energy management applied to electric submersible pumping ESP,” *Soc. Pet. Eng. - SPE Artif. Lift Conf. Exhib. - Am. 2018*, pp. 1–19, 2018, doi: 10.2118/190934-ms.
- [2] R. Khabibullin and N. Sarapulov, “ESP energy efficiency analysis on western Siberia fields,” *Soc. Pet. Eng. - SPE Russ. Pet. Technol. Conf. 2018, RPTC 2018*, no. October, pp. 15–17, 2018, doi: 10.2118/191538-18rptc-ms.
- [3] J. F. Lea, A. Eptg, and J. Liu, “SPE 37450 ESP Motor Voltage Adjustment for Maximum Profits Introduction : Table 1 : Base Design Case Results (Motor Fully Loaded with Nameplate Voltage Applied) Examples : Table 2 : Overloaded Motor Design Case , NPV Table 3 : Underloaded Motor Design C,” pp. 517–522, 1997.
- [4] R. Beckwith, “Pumping Oil: 155 Years of Artificial Lift,” *J. Pet. Technol.*, vol. 66, no. 10, pp. 101–107, 2014, doi: 10.2118/1014-0101-jpt.
- [5] “Inventing the Electric Submersible Pump - American Oil & Gas Historical Society.” <https://www.aoghs.org/technology/electric-submersible-pump-inventor/> (accessed Sep. 16, 2020).
- [6] “BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE DE PETROLEO | Petroblogger.com.” <https://www.ingenieriadepetroleo.com/bombeco-electrosumergible-de-petroleo/> (accessed Sep. 16, 2020).
- [7] “Viscosidad del petróleo – La Comunidad Petrolera.” <https://lacomunidadpetrolera.com/2009/01/viscosidad-del-petrleo.html> (accessed Sep. 17, 2020).
- [8] “Índice de productividad – La Comunidad Petrolera.” <https://lacomunidadpetrolera.com/2010/03/indice-de-productividad-ip.html> (accessed Sep. 17, 2020).
- [9] “BSW (contenido de agua y sedimentos) – La Comunidad Petrolera.” <https://lacomunidadpetrolera.com/2010/05/bs-basic-sediment-and-water.html> (accessed Sep. 17, 2020).

- [10] “Corte de agua – La Comunidad Petrolera.” <https://lacomunidadpetrolera.com/2010/03/corte-de-agua.html> (accessed Sep. 17, 2020).
- [11] “Densidad: concepto y medida – Cienciaonthecrest.” <https://cienciaonthecrest.com/2016/07/16/densidad-concepto-y-medida/> (accessed Sep. 17, 2020).
- [12] “Gravedad específica – La Comunidad Petrolera.” <https://lacomunidadpetrolera.com/2010/03/gravedad-especifica.html> (accessed Sep. 17, 2020).
- [13] “Determinación de la gravedad Api y densidad por el metodo de hidrómetro y del picnómetro – La Comunidad Petrolera.” <https://lacomunidadpetrolera.com/2009/01/determinacin-de-la-gravedad-api-y.html> (accessed Sep. 17, 2020).
- [14] “▷ CAUDAL: DEFINICION Y METODOS DE MEDICION * TÉRMINOS Y DEFINICIONES.” <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/caudal-definicion-y-metodos-de-medicion/> (accessed Sep. 17, 2020).
- [15] “Bombeo Electrosumergible – Bombeo – La Comunidad Petrolera.” <https://lacomunidadpetrolera.com/2013/08/bombeo-electrosumergible-bombeo.html> (accessed Sep. 17, 2020).
- [16] E. Giovany, M. Paez, J. Luis, and V. León, “ORIENTALES MEDIENTE LA HERRAMIENTA DESIGNPRO 9.0.2 JOSE DANIEL OREJARENA ALARCÓN Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos Tutor UIS.”
- [17] “EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DEL RENDIMIENTO DE LOS MOTORES DE IMANES PERMANENTE CON BOMBAS ELECTROSUMERGIBLES DE ALTA EFICIENCIA DEL CAMPO A UBICADO EN LA CUENCA LLANOS ORIENTALES MÓNICA MAYERLY COLORADO RÍOS.”
- [18] COMPAÑÍA BORETS, “MOTOR DE IMANES PERMANENTES.”
- [19] D. Andrés, A. Bastidas, M. Alexander, and C. Apolo, “ESCUELA SUPERIOR

POLITÉCNICA DEL LITORAL.”

- [20] “Electricidad principios y aplicaciones - Richard J. Fowler - Google Libros.” https://books.google.com.mx/books?id=LdzhG3XZd2IC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (accessed Sep. 17, 2020).
- [21] I. M. Ramírez, H. Stauffer, and E. D. E. F. Y. D. E. Superficie, “Diseño , Optimización y Trouble Shooting,” 2004.
- [22] G. Patricio and D. Velasco, “UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO ENTRE EL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CONVENCIONAL Y BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON OPTIMIZACIÓN DE LA ENERGÍA (POWER SAVE) PARA EL CAMPO CUYABENO TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO DE PETRÓLEOS.”
- [23] R. Mazzola, M. Colla, M. Teodoulou, M. Ballarini, M. Pereyra, and H. Muñoz, “Study To Improve Energy Efficiency Using ESP Introduction : ESP Basin evolution,” pp. 1–23, 2015.
- [24] “Información para calcular el costo eléctrico de una bomba sumergible – Franklin Electric | Noticias del Mercado.” <https://franklinlinkmx.wordpress.com/2012/10/09/informacion-para-calculer-el-costo-electrico-de-una-bomba-sumergible/> (accessed Sep. 17, 2020).
- [25] ISO, “ISO 50001 Traducción oficial,” *Sist. gestión la energía — Requisitos con orientación para su uso*, 2015.