

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPOS
ELECTRO SUMERGIBLES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE EN POZOS
DE CAMPO RUBIALES.

PEDRO JAVIER BOADA PÉREZ

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

2023

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPOS
ELECTRO SUMERGIBLES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE EN POZOS
DE CAMPO RUBIALES.

PEDRO JAVIER BOADA PÉREZ

Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Producción de
Hidrocarburos

Director

Jorge Enrique Meneses

Magister en Ingeniería Mecánica

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

2023

DEDICATORIA

Esta Monografía se la dedico especialmente a mi abuela Sara Elena Chamorro de Pérez Q.E.P.D quién ha sido inspiración a lo largo de mi vida por su entrega, lucha y espíritu resiliente, a pesar de no estar hoy en cuerpo presente, está cada día de mi vida en mi corazón y en cada paso que doy.

A mis padres, Pedro Pablo Boada Quintero y Sara Concepción Pérez Chamorro, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido mi mayor motivación durante cada paso de este camino. Su confianza en mis capacidades y su aliento inagotable me han impulsado a superar obstáculos y a perseguir mis sueños con determinación.

A mis hermanos, familia, amigos y seres queridos, les agradezco por su paciencia, comprensión y compañía. Sus palabras de aliento, gestos de apoyo y momentos compartidos han hecho que este camino sea más llevadero y significativo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero iniciar agradeciendo A Dios por darme la vida, la fortaleza y sabiduría para poder alcanzar mis objetivos.

Quiero agradecer de corazón a mi pareja, Mónica Corzo, por su amor incondicional, dedicación constante y por su positividad diaria. Tu apoyo y presencia han sido fundamentales en mi vida.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarme la oportunidad de realizar esta especialización. Este logro representa un paso significativo en mi crecimiento y desarrollo profesional.

A mis profesores, agradezco profundamente su dedicación y pasión por enseñar. Vuestra sabiduría y guía han sido pilares fundamentales en mi formación académica. Cada lección, cada consejo y cada desafío superado han contribuido a mi crecimiento intelectual y personal.

Agradezco sinceramente a mis compañeros de trabajo, Oliver García, Álvaro Correal y Cesar Murallas, quienes me brindaron un valioso apoyo y las herramientas necesarias para llevar a cabo este trabajo de grado con éxito.

Agradezco de manera especial a David Cañas y su familia por su valiosa asesoría, por dedicar su tiempo y por brindarme un apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. GENERALIDADES, SISTEMAS DE PRODUCCIÓN Y GEOLOGÍA DE CAMPO RUBIALES.....	20
2.1. RESEÑA HISTÓRICA	20
2.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	22
2.3. GEOLOGÍA DE CAMPO RUBIALES	23
2.3.1. FORMACIONES GEOLÓGICAS DE LA CUENCA DE LO LLANOS ORIENTALES	25
2.3.1.1. FORMACIÓN UNE.....	25
2.3.1.2. FORMACIÓN GACHETA.....	25
2.3.1.3. FORMACIÓN GUADALUPE	26
2.3.1.4. FORMACIÓN BARCO	26
2.3.1.5. FORMACIÓN LOS CUERVOS	26
2.3.1.6. FORMACIÓN MIRADOR	27
2.3.1.7. FORMACIÓN CARBONERA	27
2.3.1.8. FORMACIÓN LEÓN	29
2.3.1.9. FORMACIÓN GUAYABO	29
2.4. MÉTODO DE PRODUCCIÓN – CAMPO RUBIALES.....	30
2.4.1. Tiempo de producción	31
2.4.2. Cantidad de pozos.....	32
2.4.3. Características del yacimiento	32
2.4.4. Producción.....	32
3. MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL (ALS).....	35

3.1.	BOMBEO MECÁNICO.....	39
3.2.	BOMBEO HIDRÁULICO.....	41
3.3.	GAS LIFT.....	41
3.4.	BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS (PCP)	42
3.5.	BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE (BES)	45
4.	MOTOR ELECTRO SUMERGIBLE	48
4.1.	MOTORES DE INDUCCIÓN (IM)	48
4.1.1.	Principio de funcionamiento.....	49
4.2.	Motor de Imanes permanentes (PMM)	50
4.2.1.	Sistemas ESP con motores PMM.....	51
4.2.1.1.	Diferencias de diseño entre motores de inducción y de imanes permanentes.....	51
4.2.1.2.	Conceptos de seguridad en la implementación de los PMM.....	63
4.2.1.3.	Línea TPS de motores PMM de Schlumberger (VEPDMT)	67
5.	IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO.	69
5.1.	CRITERIOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS	69
5.1.1.	Consumo de energía total (KW/H).....	69
5.1.2.	Consumo energético (USD).....	69
5.1.3.	Tasa de ahorro energético (kw(h)).....	70
5.1.4.	Potencia total de los motores implementados	70
5.1.5.	Índice de Consumo Energético.....	70
5.1.6.	Tasa de Cambio representativa (COP – USD)	70
5.1.7.	Run Life y selección de pozos	71
5.2.	CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE PRODUCCIÓN DE LOS POZOS SELECCIONADOS.....	71
5.2.1.	Pozo A-1H	71
5.2.1.1.	Análisis del equipo BES pozo A-1H	73
5.2.1.2.	Cálculo de Eficiencia Eléctrica pozo A-1H	74
5.2.2.	Pozo B-1H	78
5.2.2.1.	Análisis del equipo BES pozo B-1H	80

5.2.2.2.	Cálculo de Eficiencia Eléctrica pozo B-1H	81
5.2.3.	Pozo C-1H	89
5.2.3.1.	Análisis del equipo BES pozo C-1H	91
5.2.3.2.	Cálculo de Eficiencia Eléctrica pozo C-1H	92
5.2.4.	Pozo D-1H	96
5.2.4.1.	Análisis del equipo BES pozo D-1H	98
5.2.4.2.	Cálculo de Eficiencia Eléctrica pozo D-1H	98
6.	BENEFICIOS ECONÓMICOS E IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE	103
6.1.	BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MOTORES PMM	103
6.2.	RELACIÓN DE CONSUMO ELÉCTRICO Y PRODUCCIÓN	105
6.3.	IMPACTO AMBIENTAL Y HUELLA DE CARBONO	106
7.	CONCLUSIONES	109
8.	RECOMENDACIONES	110
	BIBLIOGRAFÍA	112
	ANEXOS	115

LISTA DE CUADROS

pág.

Cuadro 1. Ventajas de los métodos de levantamiento artificial.....	36
Cuadro 2. Limitaciones de los métodos de levantamiento artificial.....	37
Cuadro 3. Componentes del sistema de bombeo mecánico.....	40
Cuadro 4. Rangos de aplicación bombeo mecánico.....	40
Cuadro 5. Componentes del sistema de bombeo de cavidades progresivas.	43
Cuadro 6. Rangos de aplicación bombeo de cavidades progresivas.....	44
Cuadro 7. Elementos típicos de fondo de un sistema BES.....	46
Cuadro 8. Elementos típicos de superficie de un sistema BES.	47
Cuadro 9. Diferencias clave entre los Motores IM y PMM	59
Cuadro 10. Especificaciones de los motores TPS PMM de Schlumberger.....	68
Cuadro 11. Equipo Instalado pozo A-1H.....	72
Cuadro 12. Histórico producción pozo A-1H (Últimos 4 meses).	72
Cuadro 13. Datos eléctricos históricos pozo A-1H (Últimos 4 meses).	73
Cuadro 14. Data del pozo A-1H.....	73
Cuadro 15. Valores eléctricos arrojados por ®DesignPro pozo A-1H.....	74
Cuadro 16. Comparativo de consumos eléctricos motor PMM e IM en ®DesignPro Pozo A-1H.....	75
Cuadro 17. Comparativo de consumos eléctricos simulados en ®DesignPro y valores reales, Pozo A-1H.	76
Cuadro 18. Equipo Instalado B-1H.	79
Cuadro 19. Histórico producción pozo B-1H (Últimos 4 meses)	79
Cuadro 20. Datos eléctricos históricos pozo B-1H (Últimos 4 meses).	79
Cuadro 21. Datos del pozo B-1H @ 40 Hz	80
Cuadro 22. Valores eléctricos obtenidos mediante simulación del pozo B-1H a las frecuencias de 40 Hz y 44 Hz.	81
Cuadro 23. Simulación/®DesignPro consumos eléctricos B-1H – 40 Hz.....	82

Cuadro 24. Simulación/®DesignPro Medidas Eléctricas Reales @ 40 Hz.	84
Cuadro 25. Simulación/®DesignPro B-1H – 44 Hz.	86
Cuadro 26. Simulación/®DesignPro Medidas Eléctricas Reales B-1H – 44 Hz.	87
Cuadro 27. Equipo Instalado C-1H.	89
Cuadro 28. Histórico producción pozo C-1H (Últimos 4 meses).	90
Cuadro 29. Datos eléctricos históricos pozo C-1H (Últimos 4 meses).	90
Cuadro 30. Data del pozo C-1H.	91
Cuadro 31. Valores eléctricos del pozo C-1H a la frecuencia de 55.1 Hz.	92
Cuadro 32. Simulación/®DesignPro C-1H @ 55.1 Hz.	93
Cuadro 33. Simulación/®DesignPro Medidas Eléctricas Reales C-1H @ 55.1 Hz.	94
Cuadro 34. Equipo Instalado pozo D-1H	96
Cuadro 35. Histórico producción pozo D-1H (Últimos 4 meses).	97
Cuadro 36. Datos eléctricos históricos pozo D-1H (Últimos 4 meses).	97
Cuadro 37. Data del pozo D-1H.	97
Cuadro 38. Valores eléctricos arrojados mediante simulación en el pozo D-1H @ 46.2 Hz.	99
Cuadro 39. Simulación/®DesignPro D-1H @ 46.2 Hz.	99
Cuadro 40. Simulación/®DesignPro Medidas Eléctricas Reales D-1H @ 46.2 Hz.	101
Cuadro 41. Costos de energía eléctrica Motor PMM vs Motor de inducción.	103
Cuadro 42. Emisiones de CO2 con factor de emisión red eléctrica colombiana.	106
Cuadro 43. Emisiones de CO2 con factor de emisión red eléctrica de EEUU.	107

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Mapa Campo Rubiales.	23
Figura 2. Geología Campo Rubiales.....	24
Figura 3. Perfil estructural Cuenca Llanos Orientales - Campo Rubiales.	30
Figura 4. Esquema de empuje por acuífero activo.....	31
Figura 5. Pozos perforados y producción entre 1981- 2017.	33
Figura 6. Producción de agua y aceite en Campo Rubiales.	34
Figura 7. Porcentaje BSW entre años 2000-2019 para Campo Rubiales.	35
Figura 8. Sistema de Bombeo mecánico.	39
Figura 9. Sistema de bombeo hidráulico.....	41
Figura 10. Sistema de Gas lift.....	42
Figura 11. Sistema de bombeo por cavidades progresivas.	43
Figura 12. Esquema general de un sistema ESP de fondo y superficie.	46
Figura 13. Partes de un motor IM.	50
Figura 14. Esquemas de partes básicas de un motor IM.....	52
Figura 15. Esquema de fases y campo magnético un motor IM.	52
Figura 16. Esquema de un motor PMM.	56
Figura 17. Motor PMM de 4 polos.....	58
Figura 18. Circuito equivalente de un motor IM por fase.	59
Figura 19. Factor de potencia y eficiencia en motores PMM.	61
Figura 20. Curva de desempeño bomba A-1H @ 50.4 Hz.....	74
Figura 21. Comparación consumo de energía pozo A-1H @ 50.4 Hz.	78
Figura 22. Curva de desempeño bomba B-1H @ 40 Hz.....	81
Figura 23. Consumo energético pozo B-1H @ 40 Hz.	85
Figura 24. Consumo energético pozo B-1H @ 44 Hz.	89
Figura 25. Curva de desempeño bomba pozo C-1H @ 55.1 Hz.....	91
Figura 26. Consumo energético pozo C-1H @ 55.1 Hz.....	96

Figura 27. Curva de desempeño bomba D-1H @46.2 Hz.	98
Figura 28. Consumo energético pozo D-1H @ 46.2 Hz.....	102
Figura 29. Comparativo de consumos Motor PMM vs Motor de Inducción.	104
Figura 30. Ahorro económico anual (USD).	104
Figura 31. Índice de consumo eléctrico ICE de los pozos seleccionados.	105
Figura 32. Emisiones de CO2 con factor de emisión red eléctrica colombiana. .	107
Figura 33. Emisiones de CO2 con factor de emisión red eléctrica en Estados Unidos.....	108

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Abreviaturas.	115

GLOSARIO

CO₂/KWh: Es una medida de la cantidad de dióxido de carbono emitido por cada kilovatio-hora de energía producida.

DIÁMETRO EXTERNO (OD): Es el diámetro total de un objeto, medido en la parte más externa.

EFICIENCIA DEL MOTOR: Es la relación entre la potencia de salida del motor y la potencia de entrada. Es una medida de cuánta energía de entrada se convierte en trabajo útil.

FACTOR DE POTENCIA: Es la relación entre la potencia real y la potencia aparente en un circuito. Un factor de potencia de 1 indica una eficiencia máxima, donde toda la potencia es potencia real.

HUELLA DE CARBONO: Es la cantidad total de gases de efecto invernadero emitidos directa o indirectamente por una persona, organización, evento o producto.

MOTOR DE IMANES PERMANENTES (PMM): Es un tipo de motor eléctrico que utiliza imanes permanentes en lugar de bobinas de inducción en el estator para generar el campo magnético.

MOTOR DE INDUCCIÓN (IM): Es un tipo de motor eléctrico que funciona mediante la creación de un campo magnético mediante corriente eléctrica. Los motores de inducción utilizan bobinas de inducción en lugar de imanes permanentes.

POTENCIA APARENTE (KVA): Es el valor absoluto de la potencia compleja en un circuito de corriente alterna. Esta potencia es la suma de las potencias activa y reactiva.

POTENCIA REAL: Es la cantidad de trabajo útil que se realiza en un circuito. Es la potencia que efectivamente se convierte en energía útil.

POTENCIA REACTIVA (KVAR): Es la cantidad de potencia en un circuito de corriente alterna que no realiza trabajo útil. Esta potencia se almacena y devuelve al generador.

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPOS ELECTRO SUMERGIBLES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE EN POZOS DE CAMPO RUBIALES.

AUTOR: PEDRO JAVIER BOADA PÉREZ

PALABRAS CLAVE: BOMBA ELECTRO SUMERGIBLE, EFICIENCIA ELÉCTRICA, MOTORES DE INDUCCIÓN, MOTORES DE IMANES PERMANENTES, AHORRO ENERGÉTICO, HUELLA DE CARBONO.

DESCRIPCIÓN: Para nadie es un secreto el fuerte impacto económico que ha generado la pandemia generada por el COVID 19 en el sector petrolero. En la mayoría de los países, la industria petrolera se considera un sector central y no está sujeta a cierres obligatorios. Sin embargo, el confinamiento mundial y la resultante caída de la actividad económica han reducido la demanda de forma drástica.

Como consecuencia de lo anterior, las compañías del Sector Oil& Gas han buscado alternativas que permitan brindar la posibilidad de generar ahorro sin comprometer la capacidad productiva de los pozos, la integridad de los equipos instalados y mantener el flujo de caja, así como disminuir el impacto ambiental y la huella de carbono.

Los equipos electro sumergibles con motor de imanes permanentes brinda la posibilidad de mejorar el consumo eléctrico del equipo de fondo sin comprometer la eficiencia de todo el sistema, adicionalmente brinda ventajas adicionales como un rango de operación del motor más amplio (500 rpm – 6000 rpm), menor calentamiento y por consiguiente una menor velocidad de enfriamiento.

El alcance de esta monografía se fundamenta en las ventajas técnico-económicas de la instalación de motores de imanes permanentes en pozos con sistemas de

bombeo electro sumergible, Los resultados obtenidos pretenden demostrar que mediante la implementación de esta tecnología se disminuyen costos asociados al consumo eléctrico, sumado a una optimización en la eficiencia del equipo de fondo, brindando una alternativa rentable en la que se busca mejorar la productividad y vida útil del pozo.

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL-ECONOMIC EVALUATION OF THE IMPLEMENTATION OF ELECTRO-SUBMERSIBLE EQUIPMENT WITH PERMANENT MAGNET MOTOR IN RUBIALES FIELD.

AUTHOR: PEDRO JAVIER BOADA PÉREZ

KEY WORDS: ELECTRO SUBMERGIBLE PUMP, POWER EFFICIENCY, INDUCTION MOTOR, PERMANENT MAGNET MOTOR, ELECTRICAL SAVINGS, CARBON FOOTPRINT.

DESCRIPTION: It is no secret that the COVID-19 pandemic has had a strong economic impact on the oil and gas industry. These companies have been seeking alternatives that allow them to reduce operational costs and generate savings without compromising the productive capacity of wells, the integrity of installed equipment, and maintaining cash flow. Additionally, there is a desire to decrease environmental impact and carbon footprint.

Electro-submersible equipment with permanent magnet motors can improve the electrical consumption of downhole equipment without compromising the overall system efficiency. Furthermore, it provides additional advantages such as a wider motor operating range (500 rpm - 6000 rpm), lower heating, and a slower cooling rate.

The main scope of this study is based on the technical and economic advantages of installing permanent magnet motors in four wells with electro-submersible pumping systems in Colombia's biggest and most important oilfield. The obtained results aim to demonstrate that by implementing this technology, the associated cost of electrical consumption is reduced, coupled with optimization in downhole equipment

efficiency, providing a cost-effective alternative that seeks to improve well productivity and lifespan.

INTRODUCCIÓN

Las compañías del sector de petróleo y gas están cada vez más enfocadas en lograr ahorros energéticos mediante la implementación de tecnologías más eficientes. Dentro de los sistemas de producción de petróleo, las bombas electro sumergibles (BES) se consideran como uno de los principales generadores de impacto económico en términos de consumo energético. Dentro de estos sistemas electro sumergibles, los componentes que más influyen en el alto consumo energético son las propias bombas, que demandan energía eléctrica, y los motores encargados de suministrar la potencia necesaria a las bombas.

Estos altos consumos energéticos tienen un impacto económico significativo, especialmente en campos petroleros maduros, donde suele haber una alta proporción de agua o un incremento progresivo en su presencia. Además, la baja eficiencia de los equipos electro sumergibles actualmente en operación en los diferentes pozos es otro factor de consideración relevante. Como consecuencia de lo anterior, las empresas del sector de petróleo y gas están buscando activamente alternativas que permitan generar ahorros energéticos sin comprometer la capacidad productiva de los pozos, la integridad de los equipos instalados y su eficiencia operativa.

El objetivo de esta monografía es analizar los resultados, tanto desde el punto de vista técnico como económico, de la implementación de motores de imanes permanentes en pozos con bombas electro sumergibles. Se llevará a cabo un análisis exhaustivo de las características y rendimiento de estos motores, evaluando su impacto en la eficiencia energética, la reducción de costos operativos y el incremento de la rentabilidad en comparación con los sistemas convencionales. Además, se considerarán los aspectos técnicos y de seguridad relacionados con la instalación y operación de los motores de imanes permanente.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar una evaluación técnico-económica de la implementación de Equipos Electro sumergibles con motor de imán permanente en cuatro pozos seleccionados de Campo Rubiales.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir el comportamiento de consumo energético y de producción, en cuatro pozos con bombas electro sumergibles en el campo de estudio.
- Analizar el desempeño de la tecnología de imanes permanentes con bombas electro sumergibles de cada pozo seleccionado.
- Evaluar los beneficios técnicos y económicos de la implementación de la tecnología de imanes permanentes en pozo con bombas electro sumergibles en los pozos seleccionados.

2. GENERALIDADES, SISTEMAS DE PRODUCCIÓN Y GEOLOGÍA DE CAMPO RUBIALES

Campo Rubiales en la actualidad es uno de los más importantes para el sector hidrocarburos en Colombia, debido a su extensión, desarrollo y capacidad productora.

2.1. RESEÑA HISTÓRICA

Campo Rubiales fue descubierto en el año 1981 por Exxon a través de su subsidiaria Intercol, el desarrollo inicio con la perforación del pozo Rubiales #1 el cual a una profundidad de 3.100 pies dio muestras de hidrocarburo con una gravedad de 13.5 API¹, según la información suministrada por la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP), diversos factores evitaron el total desarrollo y puesto en producción del campo como son:

- Falta de vías de acceso.
- Complejidad y desconocimiento completo del yacimiento.
- Precios internacionales del crudo del momento.
- Condición social y de inseguridad.

En 1988 se celebró el contrato de partición por riesgo y asociación Pirirí entre las empresas Ecopetrol, Tethys Petroleum Company Limited, Turnsector Limited y Tuskar , posterior a una serie de cesiones de participación y transiciones internas por parte de la empresas Tethys PCL y Tuskar respectivamente, en 1995 se iniciaron las actividades de perforación pero no fue sino 2 años después cuando el

¹ Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2012). Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Bogotá, ANH.

ministerio de minas declaró el inicio de la explotación bajo la denominación de “ Solo Riesgo” sin embargo a finales del mismo año el campo se cerró por problemas de orden público.

Hasta el año 2000 se pudieron reiniciar las actividades operacionales del campo, un año después, Tethys Petroleum fue asignada como la empresa que operaría el campo, para el 2002 los grupos Elliot y Synergy entraron a participar invirtiendo en la perforación, siendo esta asociación la que llevo a cabo la primera perforación horizontal del campo. Para el año 2003 se unieron al proyecto las empresas Turnsector, Astralstake y Colpex las cuales estaban comprendidas en la empresa Meta Petroleum Limited tomando en un 80% la operación del campo con el fin de mejorar la producción e infraestructura.

El desarrollo inicialmente se llevó a cabo por medio de pozos verticales, iniciando en año 2005, la producción promedio era de 4.000 barriles producidos por día, en búsqueda de mejorar la producción y generar mayor rentabilidad por cada pozo perforado a inicios del 2006 se realizaron los primeros pozos pilotos horizontales arrojando resultados muy positivos, en comparación cada pozo horizontal llegando a producir entre 5 y 7 veces más que un pozo vertical es decir entre 20.000 y 28.000 barriles producidos al día, así como la vida de los pozos horizontales es 2 a 1.5 veces mayor al de los pozos verticales, de acuerdo a estos resultados se impulsó el desarrollo de la nueva campaña perforando 4 pozos de este tipo.

En 2007 la participación del grupo Elliot y parte de la participación del grupo Synergy son adquiridos por la empresa Petro rubiales de la cual hacia parte Meta Petroleum Limited, al año siguiente (2008) hubo la fusión entre Pacific Stratus Energy y Petro Rubiales Energy, esto trajo consigo el interés de exmiembros de la empresa Petróleos de Venezuela S.A (PDVSA) los cuales enfocaron esfuerzos en el desarrollo del campo gracias a su conocimiento previo en la producción y manejo de yacimientos con crudo pesado. En respuesta de las acciones realizadas hubo un aumento en la producción en cerca de 100.000 barriles diarios producidos entre

2009 y 2013 donde se alcanzó su pico histórico de producción de 212.115 barriles diarios.

El 30 de junio de 2016 al terminar el contrato de asociación Pirirí, Campo Rubiales pasa a manos de Ecopetrol en un 100% con lo cual aumenta el valor de las regalías al estado colombiano, sin embargo, tendrían el reto de reactivar la producción dado que la transición del campo generó un declive en su producción.

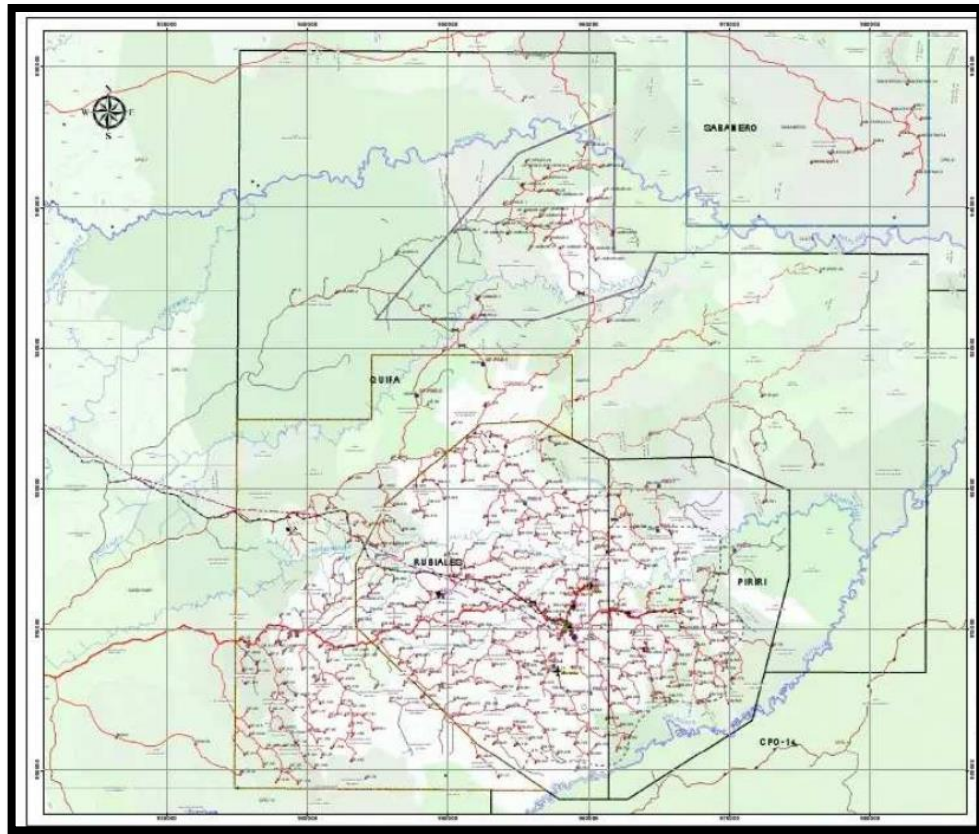
En la actualidad Ecopetrol desarrolla un plan de acción para incrementar la producción y consiste en la perforación de 700 pozos productores hasta el año 2025, este plan está condicionado por la problemática social, economía mundial y precio internacional del crudo.

2.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Campo Rubiales se encuentra ubicado a 250 km al Sur este de la ciudad de Villavicencio, en la Figura 1-B se observa su ubicación a nivel nacional enfocando el recuadro presente en el departamento del meta, Colombia. Desde la Ciudad de Bogotá D.C se debe tomar la vía al llano pasando por los municipios de Soacha, Quetame, Guayabetal donde se toma la vía 40 por la cual se atravesará Villavicencio, Santa Clara, Pachaquiario, Puerto López, La Bonga, La Victoria hasta Puerto Gaitán donde se toma la vía alterna con dirección al Alto de Neblinas. Se recorren cerca de 135 km para finalmente llegar a Campo rubiales⁵, esta ruta se encuentra enmarcada en la Figura 1-C, ubicado en las coordenadas (Latitud: 3.780650, Longitud: -71.626204), La temperatura promedio anual es de 32,3°C y anualmente se precipitan entre 1.900 a 22.000 mm de aguas lluvia².

² Solano Giraldo, S. V. L. Branderley. (2019). Evaluación del caso de negocio para un piloto de bombeo electrosumergible con motor de imanes permanentes (PMM) para la reducción de consumo

Figura 1. Mapa Campo Rubiales.



FUENTE: Modificado de (Mapa Campo Rubiales, Scribd 2013)³

2.3. GEOLOGÍA DE CAMPO RUBIALES

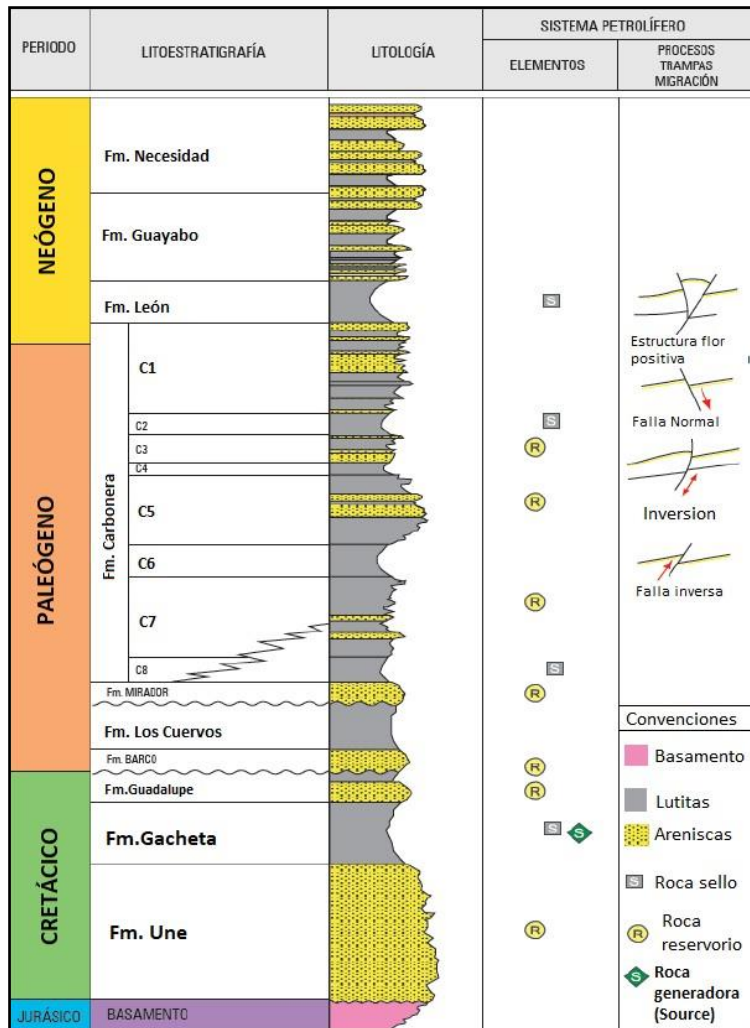
Campo Rubiales encuentra ubicado en la cuenca de los llanos orientales, limitada por la cordillera oriental colombiana, sin embargo, a nivel local tanto aspectos estructurales como estratigráficos definirán las características del reservorio, a

energético y el aumento de la eficiencia en un campo de Ecopetrol. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América.

³ Fonseca, J. (26 de marzo de 2013). Scribd. Recuperado el 2 de junio de 2023, de <https://es.scribd.com/doc/273949834/Mapa-Actualizado-Del-Campo-Rubiales>

continuación, se expondrán las características más relevantes a nivel geológico del yacimiento.

Figura 2. Geología Campo Rubiales.



FUENTE: Modificado de Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) 2012⁴.

⁴ Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2012). Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Bogotá: ANH. Recuperado de https://www.anh.gov.co/documents/2669/5._Informe_Final_Llanos.pdf p48.

2.3.1. FORMACIONES GEOLÓGICAS DE LA CUENCA DE LO LLANOS ORIENTALES

2.3.1.1. FORMACIÓN UNE

Esta formación corresponde al Cretácico Albiano cerca de 113 millones de años atrás, conformada en su mayoría por arenas cuarzosas con intercalaciones menores de lutitas y limolitas carbonosas, según la ANH6 su espesor aumenta en general hacia el Noroeste donde llega a alcanzar hasta 650 pies de espesor mientras que en la parte oriente y sureste posee espesores de 50 pies o no se encuentra la formación. La arenisca corresponde a ambientes aluviales de canales de ríos meándricos y de canales de llanuras mareales enfatizando en la presencia de limolitas carbonosas, esta formación es reservorio y productora en los campos Apiay -Suria, infrayace la formación Gacheta⁵.

2.3.1.2. FORMACIÓN GACHETA

Esta formación se depositó en el Cretácico entre el Turoniano y el Coniaciense es decir entre 129 y 125 millones de años atrás, según la ANH está constituido por secuencias de lutitas con desarrollo menor de areniscas, estas últimas contienen glauconita y ciertos niveles calcáreos, esta formación posee forma de cuña la cual aumenta su espesor hacia el noroccidente de la cuenca, hacia el suroccidente el espesor aumenta hasta tener un espesor cercano a los 600 pies. La presencia de glauconita denota un ambiente marino somero, cabe resaltar que durante este periodo se llevó a cabo la última transgresión del cretácico sobre el escudo de Guyana. Esta formación suprayace la formación Une e infrayace la formación Guadalupe, es importante resaltar su función como roca sello debido al gran porcentaje de lutitas en la formación evitando la permeabilidad⁶.

⁵ Ibid. p. 48

⁶ Ibid. p. 48

2.3.1.3. FORMACIÓN GUADALUPE

Según la ANH esta formación corresponde según pozos perforados y datos palinológicos al cretácico superior, con mayor precisión al Campiano y Maastrichtiano por tanto esta formación se depositó entre 72 y 83 millones de años atrás aproximadamente, litológicamente esta formación está compuesta de areniscas masivas con intercalaciones de lutitas, en ocasiones con capas de carbón. Como se evidencian en las formaciones anteriores esta también posee un espesor que aumenta hacia el piedemonte donde posee un espesor de 600 pies, su ambiente de depositación es continental, esta formación suprayace la formación gacheta e infrayace de manera discordante la formación Barco, en la zona superior de esta formación debido al aumento de lutitas tiene características de roca sello sin embargo predomina su clasificación como reservorio⁷.

2.3.1.4. FORMACIÓN BARCO

Según la ANH esta formación se depositó durante el Paleógeno hace aproximadamente 60 millones de años, su litología está caracterizada por areniscas masivas, suprayacidas por lutitas y con intercalaciones de delgadas capas de carbón e intercalaciones de areniscas, es de las formaciones con mayor espesor en toda la cuenca de los llanos, llegan a tener cerca de 1.000 pies de espesor sin embargo hacia la zona este su espesor se reduce. Geológicamente suprayace la formación Guadalupe e infrayace la formación Los Cuervos, dentro de la estratigrafía de la ANH está caracterizada como reservorio⁸.

2.3.1.5. FORMACIÓN LOS CUERVOS

Según la ANH Los Cuervos evidencia su depositación entre épocas correspondientes al paleoceno superior y al eoceno inferior entre 56 y 59 millones de años atrás, litológicamente corresponde a lutitas color gris intercaladas con

⁷ Ibid. p. 48

⁸ Ibid. p. 49

areniscas color parduzco, de grano fino a medio, posee un espesor entre 800 y 1.700 pies. Esta formación suprayace a la formación cuervo de manera concordante sin embargo infrayace a la formación mirador de manera discordante⁹.

2.3.1.6. FORMACIÓN MIRADOR

Según la ANH Esta formación corresponde al Eoceno tardío cerca de 37 millones de años atrás, es considerado el reservorio más importante de toda la cuenca debido a sus propiedades petrofísicas litológicamente este compuesto por areniscas masivas con diferente granulometría, en su mayoría el tamaño de grano desciende de la base al techo de la formación en general compuestas de cuarzo y feldespato, materia orgánica y glauconita, su ambiente de formación es predominantemente deltaico. El espesor de la formación aumenta hacia el occidente donde alcanza 950 pies, suprayace discordantemente la formación Los Cuervos e infrayace la formación Carbonera¹⁰.

2.3.1.7. FORMACIÓN CARBONERA

Carbonera se encuentra comprendida desde Oligoceno temprano hasta el mioceno medio comprendido entre 13 a 28 millones de años atrás, es de las formaciones con mayor espesor en la cuenca de los llanos orientales (cerca de 6.000 pies). La formación fue dividida en 8 unidades desde C1 hasta C8 por parte de Elf Aquitaine, los niveles pares correspondían a transgresión por tanto había niveles finos granulares, importantes rocas sello, mientras que los impares corresponden a zonas de regresión arenosos dando lugar a reservorios los cuales hoy día se encuentran en producción, a continuación, se caracterizaran las 8 unidades de acuerdo con la información geológica y geofísica de la ANH¹¹.

⁹ Ibid. p. 49

¹⁰ Ibid. p. 49

¹¹ Ibid. p. 49

- **Unidad C8:** corresponde a la unidad suprayacente a la formación mirador, esta unidad presenta un espesor variable desde los 50 hasta los 400 pies de los llanos al piedemonte debe resaltarse su formación se dio en un ambiente marino.
- **Unidad C7:** litológicamente compuesto de areniscas correspondientes a un ambiente marino somero deltaico, por lo cual el tamaño de grano va desde fino hasta conglomerados, en la zona central de la cuenca poseen espesores entre 250 y 280 pies.
- **Unidad C6:** Conformado por lutitas posee un espesor cercano a los 100 pies en la zona correspondiente la zona centro de la cuenca de los llanos.
- **Unidad C5:** Litológicamente compuesto de alternaciones de arcillolita y arenisca poco consolidada con tamaño de grano medio, con presencia de glauconita indicador de un ambiente fluvial, su espesor a lo largo de la cuenca varía entre 50 y 300 pies¹⁵.
- **Unidad C4:** conformado por una alternancia de capas de arenisca, limolitas y lutitas, en la parte central de la cuenca presenta un espesor entre 150 y 300 pies, no siempre son evidentes las características de esta unidad en especial en la zona suroeste de la cuenca.
- **Unidad C3:** En la zona central posee un espesor entre 150 pies y aumenta su espesor hacia el piedemonte aumentando hasta los 700 pies su espesor, conformada por niveles de arenisca fina y gruesa con algunos pies de limolitas y arcillolitas en ocasiones con niveles carbonosos en la secuencia localizada en el centro de la cuenca.
- **Unidad C2:** De toda la formación es el sello de mejores características debido a que está unida de se conforma de lutita y posee una extensión considerable hacia el este, en la zona central posee un espesor entre 100 y 200 pies, hacia los extremos de la cuenca aumenta el porcentaje de arenas esto a razón del ambiente deltaico al que se debe su depositación.

- **Unidad C1:** Litológicamente se encuentra constituida por alternancia de cuerpos arenosos separados por niveles delgados de limolitas y lutitas. Infrayace a la formación León, su espesor aumenta hacia el piedemonte donde llega a tener 2.000 pies de espesor.

2.3.1.8. FORMACIÓN LEÓN

Según la ANH se deposita en el mioceno medio entre 7 y 11 millones de años atrás, compuesta por capas gruesas de lutitas grises, sus espesores varían de acuerdo a su localización puede llegar a tener 2.500 pies en Chaparral, mientras que hacia el suroeste la secuencia cronoestratigráfica presenta fracciones arenosas, representa la última transgresión de la época. La formación suprayace la formación carbonera e infrayace la formación Guayabo, es caracterizada como roca sello¹².

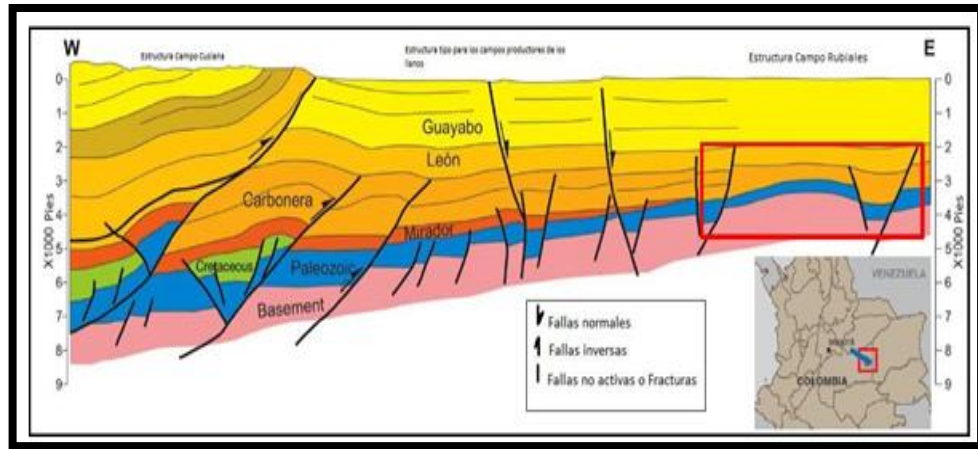
2.3.1.9. FORMACIÓN GUAYABO

Según la ANH y siendo la última depositación de la cuenca de los llanos comprende las edades del mioceno tardío y el plioceno, (entre 3 y 7 millones de años atrás), está constituido por intercalaciones de arcillolitas y areniscas mal seleccionadas de tamaños finos a muy gruesos, en ciertas zonas se presentan conglomerados, en la parte superior se presentan niveles carbonosos, el ambiente correspondiente va de influencia marina en la zona inferior hasta continental en la parte superior. El espesor en la zona central posee entre 2.000 y 8.000 pies, suprayace la formación Guayabo¹³.

¹² Ibid. p. 52

¹³ Ibid. p. 52

Figura 3. Perfil estructural Cuenca Llanos Orientales - Campo Rubiales.



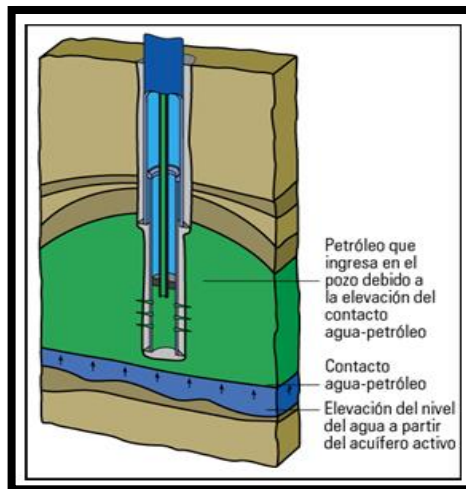
FUENTE: Modificado de Oil distribution in the Carbonera Formation, Arenas Basales unit¹⁴.

2.4. MÉTODO DE PRODUCCIÓN – CAMPO RUBIALES

El mecanismo de producción en Campo Rubiales es empuje por acuífero activo en algunos casos el flujo de agua es lateral, se mantiene la presión debido a la roca sello compuesto de lutitas y a la presencia de un acuífero activo.

¹⁴ Cárdenas, A., Quintero Villa, D., & Fernanda, M. (2019). Optimización del consumo energético de pozos con sistema de levantamiento artificial PCP y ESP de la troncal siete de campo Rubiales mediante simulación. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América.

Figura 4. Esquema de empuje por acuífero activo.



FUENTE: Modificado de Energy Glossary, Drenaje por agua 2023¹⁵

2.4.1. Tiempo de producción

La producción del campo inicio en 1992, tiempo en el cual se produjo alrededor de 800 barriles de petróleo al día, debido a conflictos sociales se detuvo hasta el año 2000 donde con una tasa promedio de 354 barriles producidos al día se inició la reactivación del Campo, añadido a esto vino la inversión de diferentes empresas realizando campañas de perforación las cuales permitieron que en el 2013 se llegara a producir cerca de 210.000 barriles diarios, para el mes de agosto de 2018 de acuerdo a la fiscalización reportada a la ANH Campo Rubiales produjo 123.536 barriles de petróleo al día¹⁶.

¹⁵ Dasilva, Á. G. Y. V. M. Y. F. M. D. (2014). Oil distribution in the Carbonera Formation, Arenas Basales unit. A case study in the Quifa and Rubiales fields. En AAPG International Conference & Exhibition, Cartagena.

¹⁶ Ibid. p. 23

2.4.2. Cantidad de pozos

A 2017 se tuvo un total de 1.271 pozos perforados de los cuales el 30% están cerrados por cuestión económica, el 21% son horizontales, el 15% son verticales y el restante 34% se encuentra en estudio, actualmente se proyecta una nueva campaña entre 2019 y 2025 con la cual se pondrían en funcionamiento cerca de 700 pozos exclusivos para producción, cabe resaltar que la vida útil por pozo es de 7 años en promedio según Ecopetrol¹⁷.

2.4.3. Características del yacimiento

De acuerdo con Cárdenas y Quintero¹⁸, el yacimiento está compuesto por las areniscas del tercio inferior de la Formación Carbonera conocidas como “arenas basales”, las cuales fueron depositadas en un ambiente fluvial, la zona de interés se encuentra entre los 2.400 y 2.900 pies de profundidad vertical, posee muy baja sobrecarga lo cual permite que el yacimiento se encuentre poco consolidado siendo propicio para albergar el hidrocarburo, con una porosidad promedio de 29% y permeabilidad promedio de 4 Darcys se concluye en la buena calidad del reservorio. El contacto agua petróleo sigue la tendencia estructural del yacimiento por tanto posee inclinación hacia el piedemonte y variación en profundidad debido a las fallas normales presentes.

2.4.4. Producción

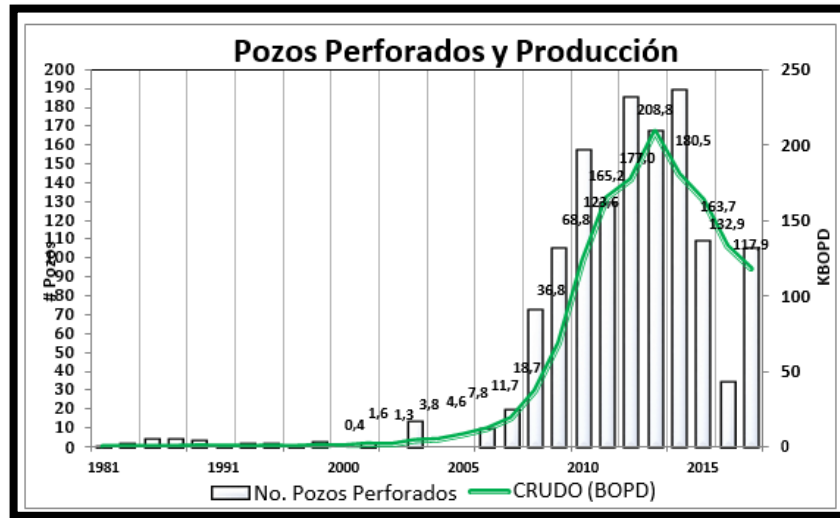
Para llevar a cabo la producción comercial de Campo Rubiales fue necesario desarrollar varias campañas de perforación y desarrollo. En la Gráfica 1, se observa la cantidad de pozos perforados desde la adjudicación del contrato de asociación y su relación con los barriles de aceite producidos al día (BOPD), es posible afirmar

¹⁷ Ibid. p. 21

¹⁸ Cárdenas, A., Quintero Villa, D., & Fernanda, M. (2019). Optimización del consumo energético de pozos con sistema de levantamiento artificial PCP y ESP de la troncal siete de campo Rubiales mediante simulación. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América.

que el número de pozos perforados por año es directamente proporcional a la producción desarrollada en el campo.

Figura 5. Pozos perforados y producción entre 1981- 2017.



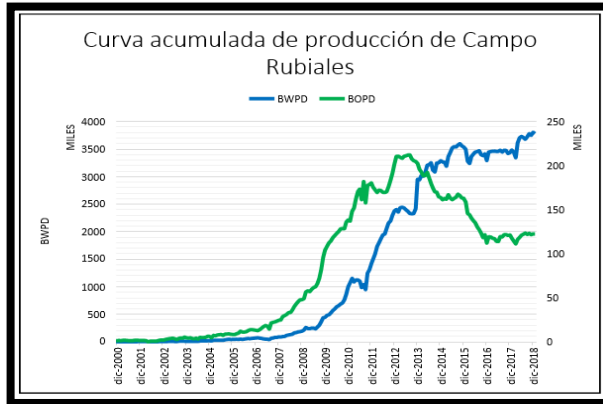
FUENTE: Tomado de Departamento Producción, Vicepresidencia técnica Ecopetrol 2019¹⁹.

A continuación, se presenta la curva acumulada de producción en Campo Rubiales, es posible segmentar las curvas de acuerdo con su tendencia, la primera por su pendiente positiva indicando el aumento en la producción del campo, esto es directamente proporcional al crecimiento en la producción de agua sin embargo en la gráfica 2 se observa el comportamiento unimodal creciente de este último, a pesar de que esta curva tiende a estabilizarse a partir del 2014. El segundo segmento de la curva de producción de hidrocarburos posee pendiente negativa que inicia en 2012, a partir de ese momento la producción ha decrecido, existen 2 pendientes negativas a tener en cuenta, la primera que inicia a mediados del 2013 está corresponde a la reducción de precios del hidrocarburo a nivel mundial lo cual limito los planes de desarrollo previstos por la empresa operadora y sobre el año 2016 se observa otro descenso marcado en la producción, en este caso se encuentra

¹⁹ Ibid. p.38.

relacionado al cambio de operador ya que Ecopetrol S.A asume el control total del campo y en la transición el desarrollo del campo se limitó²⁰

Figura 6. Producción de agua y aceite en Campo Rubiales.



FUENTE: Tomado de Histórico de Producción, Departamento de tecnologías de producción, Vicepresidencia técnica Ecopetrol SA 2019²¹.

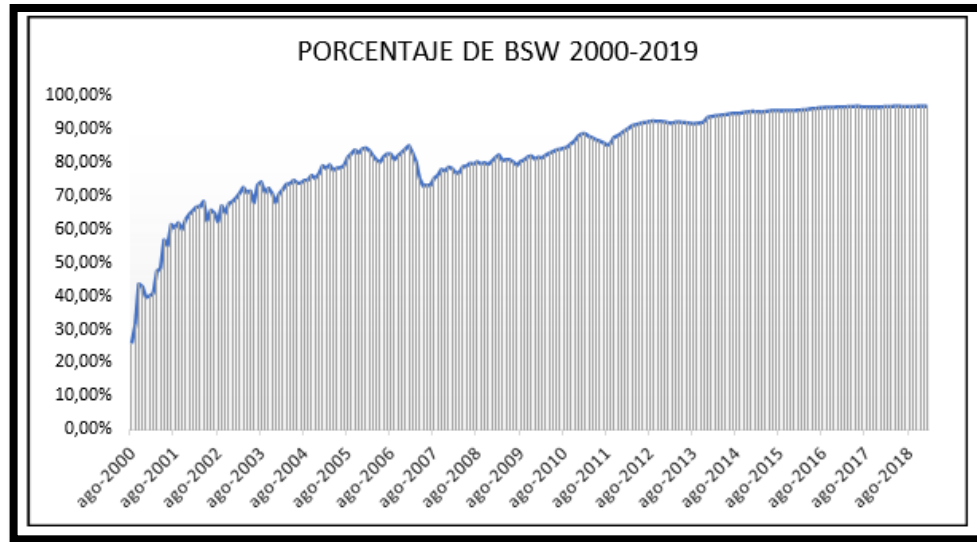
El corte de agua es de los factores que han afectado la producción de aceite dentro del campo, en la gráfica 3 podemos ver la diferencia, es de resaltar el porcentaje de BSW inicia con 25,76% de corte de agua en el año 2000 sin embargo para finales del año 2002 el corte de agua se encontraba en un 68,19% es decir hubo un aumento del 43% en un periodo de tiempo relativamente corto, a pesar de esto el campo sigue en producción, actualmente el porcentaje de BSW es del 96,86%. Para tener mayor claridad de 3.902.116 barriles de fluido producidas en el mes de enero del 2019, tan solo 122.499 corresponden a producción de aceite²².

²⁰ Ibid. p.38

²¹ Ibid. p.38

²² Ibid. p.38

Figura 7. Porcentaje BSW entre años 2000-2019 para Campo Rubiales.



FUENTE: Tomado de Histórico de Producción, Departamento de tecnologías de producción, Vicepresidencia Técnica Ecopetrol SA 2019²³.

3. MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL (ALS)

Más del 90% de los pozos productores de petróleo requieren algún tipo de levantamiento artificial para incrementar el flujo de fluidos. Esto se debe a que los yacimientos, con el tiempo, pueden perder la energía necesaria para producir petróleo o gas de forma natural a regímenes económicos, o bien, se busca aumentar la producción inicial con el objetivo de mejorar el rendimiento financiero. Entre los métodos más versátiles y adaptables de levantamiento artificial se encuentra el bombeo electro sumergible, conocido como ALS (Artificial Lift Systems, por sus siglas en inglés).

A continuación, se mencionan las ventajas más comunes de los sistemas de levantamiento artificial más populares actualmente disponibles:

²³ Ibid. p.40

Cuadro 1. Ventajas de los métodos de levantamiento artificial.

Ventajas de los métodos de levantamiento artificial				
Bombeo Mecánico	Bombeo Hidráulico	Bombeo Electro sumergible (ESP)	Gas Lift	Bombeo de cavidades progresivas (PCP)
Fácil diseño	Sin limitaciones de profundidad	Capacidad de bombeo de altos caudales	Puede ser empleado para iniciar la producción de un pozo posterior a un servicio	Bajo costo
Simple y fácil de operar	Mínimos problemas en tuberías desviadas	Relativamente sencillo de operar	Fácil de obtener presiones de fondo y gradientes de presión	Puede utilizar motores en fondo que facilitan su uso en pozos desviados. (ESPCP)
Aplicable en pozos estrechos y con completamientos múltiples.	Se puede utilizar gas o electricidad como fuente de energía	Aplicable en costa afuera (offshore)	Pozos con una tasa alta de gas son fáciles de producir	Alta eficiencia energética.
Se puede bombear en pozos con presiones de fondo muy bajas	Se puede bombear en pozos con presiones de fondo muy bajas	El costo de levantamiento por barril es relativamente bajo cuando se producen caudales altos	Pozos desviados no generan problema	Perfil bajo
Como fuente de energía se puede hacer uso de motores eléctricos o de combustión.	Aplicable a off-shore y completamientos múltiples	Problemas como incrustaciones y la corrosión son fáciles de tratar		
Capacidad de operación con fluidos viscosos y altas temperaturas	Poca obstrucción en locaciones cercanas a zonas residenciales	Permite el monitoreo de la presión en fondo si se instala un sensor		
Tratamientos de scale e incrustaciones son	Las bombas en fondo de pozo pueden circular en sistemas libres.			

relativamente fáciles de aplicar				
----------------------------------	--	--	--	--

FUENTE: Modificado de Lea and Nickens²⁴.

Los diferentes sistemas de levantamiento artificial presentan algunas limitaciones. A continuación, mencionaré algunas de ellas

Cuadro 2. Limitaciones de los métodos de levantamiento artificial.

Limitaciones de los métodos de levantamiento artificial				
Bombeo mecánico	Bombeo hidráulico	Bombeo electro sumergible (ESP)	Gas Lift	Bombeo de cavidades progresivas (PCP)
Pozos desviados pueden presentar problemas de fricción entre las varillas y la tubería de producción	Requiere más protocolos de seguridad en superficie al tratar un sistema a alta presión.	Dependiendo del diseño se requieren altos requerimientos de potencia.	Se requiere de una fuente constante de gas para poder aplicarlo.	Los elastómeros en el estator son sensibles a algunos tipos de fluidos.
La producción de gas puede reducir la eficiencia volumétrica de la bomba.	Costos operativos pueden ser más altos.	Se requiere una fuente de energía eléctrica.	Requiere más protocolos de seguridad al tratar gas a alta presión.	Perdida de eficiencia a medida que el pozo es más profundo
Producción de alta tasas de sólidos puede	Producción de alta tasas de sólidos puede	Los cables empleados para alimentar la bomba se	Se dificulta el levantamiento de crudos	Las varillas pueden sufrir desgaste por la rotación

²⁴ J. F. Lea and H. V. Nickens. (1999). Selection of Artificial Lift. Society of Petroleum Engineers Inc, Oklahoma.

afectar su eficiencia	afectar su eficiencia	deterioran a altas temperaturas	emulsionados o viscosos	constante y el contacto que tienen con la tubería de producción.
Diseño de la bomba limitado a los diámetros de tubería de producción.		Aplicación poco práctica en pozos con muy bajo caudal.	Puede tener problemas de hidratos de gas.	Temperatura de operación limitada por las características del elastómero instalado.
Susceptible a problema de parafinas.		Se generan problemas al producir gases o solididad en altas cantidades		Equipos propensos a falla por altas vibraciones al operar a alta velocidad. Requiere instalación de accesorios adicionales como centralizadores de varilla y/o estabilizadores de tubería.
		Costos de equipo y reemplazo altos.		Desgaste por rozamiento en pozos desviados.

FUENTE: Modificado de Lea and Nickens²⁵.

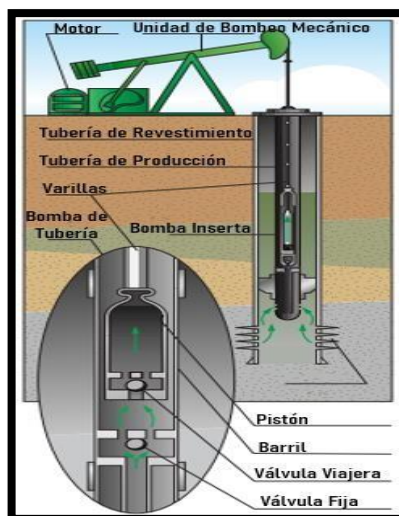
²⁵ Ibid. p.2

3.1. BOMBEO MECÁNICO

Fue el primer sistema artificial utilizado para extraer crudo y en la actualidad sigue siendo el sistema de levantamiento artificial más utilizado en el mundo, sus factores principales se deben a:

- Alta eficiencia.
- Fácil operación.
- Amplio rango operacional.
- Fácil diagnóstico y análisis de fallas.
- Sistema resistente a condiciones severas.

Figura 8. Sistema de Bombeo mecánico.



FUENTE: Runza Buitrago, S. (2021). Evaluación de factibilidad técnica y económica de la implementación en campo de equipos de imanes permanentes (PMM) para bombeo electrosumergible (BES). Neiva: Universidad Surcolombiana.

El sistema de bombeo mecánico está conformado por dos componentes principales:

Cuadro 3. Componentes del sistema de bombeo mecánico.

Componentes	
Superficie	Fondo
Unidad de bombeo	Varillas
Motor	Tubería de producción.
Caja reductora	Barril
Barra lisa	Pistón
Stuffing box	Válvulas
Te de bombeo	Otros componentes adicionales

FUENTE: Modificado de Lea and Nickens 1999²⁶.

El sistema de bombeo mecánico presenta unos rangos de aplicación recomendados para lograr su mayor eficiencia. A continuación, se mencionan algunos de estos rangos:

Cuadro 4. Rangos de aplicación bombeo mecánico.

Rango de aplicación	
Criterio	Rangos típicos
Caudales	5-1500 BFPD
Profundad asentamiento	100 – 8000 FT
Temperatura de operación	100- 350 °F (Máximo 400 °F)
Desviación	0 – 20 °
Gravedad del fluido	Mayor a 8 °API
Tipo de motor	Eléctrico, combustión.
Aplicación Costa afuera (offshore)	Limitada

FUENTE: Modificado de Lea and Nickens²⁷.

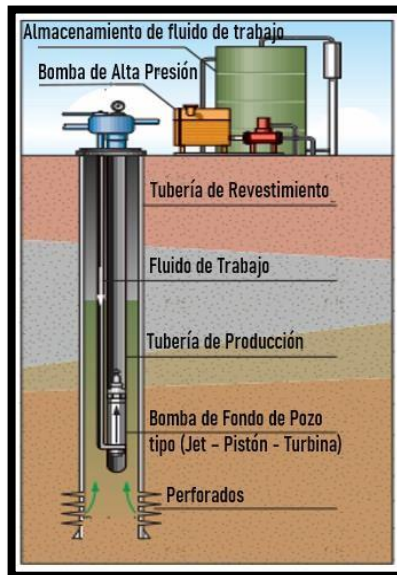
²⁶ Ibid. p.3

²⁷ Ibid. p.3

3.2. BOMBEO HIDRÁULICO

Este sistema de levantamiento artificial utiliza fluido a alta presión para transmitir la potencia al subsuelo, con el fin de convertir la presión generada y proporcionar al fluido energía potencial para traer los fluidos de fondo a superficie. Se basa en el “Efecto Venturi”, que succiona los fluidos del pozo hacia una región de baja presión, su producción normalmente se obtiene a través del anular del pozo.

Figura 9. Sistema de bombeo hidráulico.



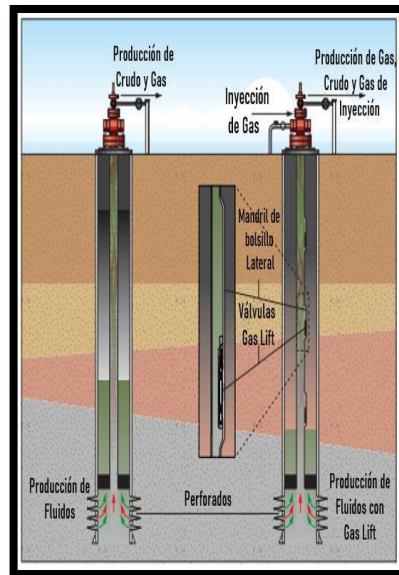
FUENTE: Runza Buitrago, S. (2021). Evaluación de factibilidad técnica y económica de la implementación en campo de equipos de imanes permanentes (PMM) para bombeo electrosumergible (BES). Neiva: Universidad Surcolombiana.

3.3. GAS LIFT

Este sistema de levantamiento artificial no requiere de una bomba en fondo, pero si un arreglo de válvulas a diferentes profundidades mediante las cuales se inyecta gas a través de la tubería de producción.

El sistema de levantamiento artificial gas lift se puede denominar como de los tipos que aligeran la carga ya que al inyectarse gas se reduce el peso del líquido, logrando que la presión natural del yacimiento pueda llevar los fluidos hasta superficie.

Figura 10. Sistema de Gas lift.



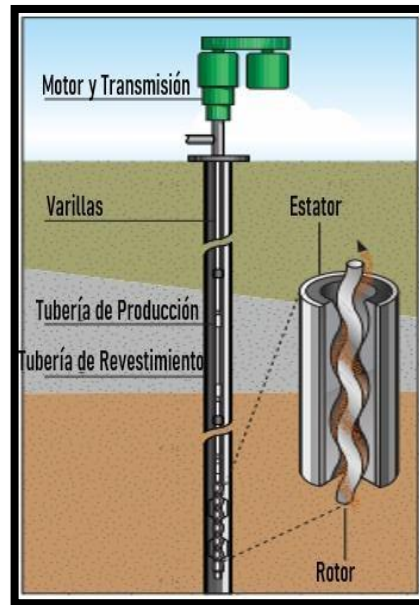
FUENTE: Runza Buitrago, S. (2021). Evaluación de factibilidad técnica y económica de la implementación en campo de equipos de imanes permanentes (PMM) para bombeo electrosumergible (BES). Neiva: Universidad Surcolombiana.

3.4. BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS (PCP)

Actualmente, es un sistema ampliamente utilizado en la industria especialmente con crudos pesados, fue implementado entre los años 1980 a 1990 y desde entonces ha ido evolucionando tecnológicamente cada vez más. Su principio de funcionamiento se base de una bomba de desplazamiento positivo que está conformada de un estator compuesto de un elastómero instalado en el fondo de la tubería de producción y un rotor helicoidal hecho de una aleación metálica resistente a la abrasión y la corrosión. En superficie se tiene un motor y una transmisión que

proporcionan un movimiento rotacional a una sarta de varillas que va conectada al rotor de la bomba en el fondo del pozo, permitiendo que el fluido se desplace verticalmente hacia la superficie por un sistema de cavidades que simulan un movimiento de apertura y cierre progresivo.

Figura 11. Sistema de bombeo por cavidades progresivas.



FUENTE: Runza Buitrago, S. (2021). Evaluación de factibilidad técnica y económica de la implementación en campo de equipos de imanes permanentes (PMM) para bombeo electrosumergible (BES). Neiva: Universidad Surcolombiana.

El sistema de bombeo de cavidades progresivas (PCP, por sus siglas en inglés Progressive Cavity Pumping) consta de dos principales componentes:

Cuadro 5. Componentes del sistema de bombeo de cavidades progresivas.

Componentes	
Superficie	Fondo
Red/Generador eléctrico	Sarta de varillas
Variador de velocidad	Tubería de producción
Motor / Sistema de transmisión	Bomba PCP (Estator/Rotor)

Cabezal de rotación	Pin de paro
Árbol de navidad/línea de producción	Ancla anti-torque
Otros	Otros accesorios (Dependiendo de la aplicación)

Fuente: Modificado de Lea and Nickens²⁸.

En cuanto a los rangos de aplicación de un sistema de bombeo de cavidades progresivas (PCP), se pueden mencionar los siguientes:

Cuadro 6. Rangos de aplicación bombeo de cavidades progresivas.

Rango de aplicación	
Criterio	Rangos típicos
Caudales	5-2000 BFPD (Máximo 5000 BFPD)
Profundad asentamiento	100 – 8000 FT (Máximo 12000 FT)
Temperatura de operación	100- 300 °F (Máximo 350 °F)
Desviación	0 – 20 °
Gravedad del fluido	Mayor a 8 °API
Tipo de motor	Eléctrico, combustión.
Aplicación Costa afuera (offshore)	Buena

FUENTE: Modificado Lea and Nickens 1999²⁹.

Este tipo de sistema de levantamiento artificial tiene la habilidad de producir fluidos altamente viscosos y con altas concentraciones de arena, presenta bien manejo al gas libre y resistencia a la abrasión, fácil instalación, alta eficiencia energética y con los sistemas de instrumentación y control actuales este sistema presenta alto nivel de automatización.

²⁸ Ibid. p.36

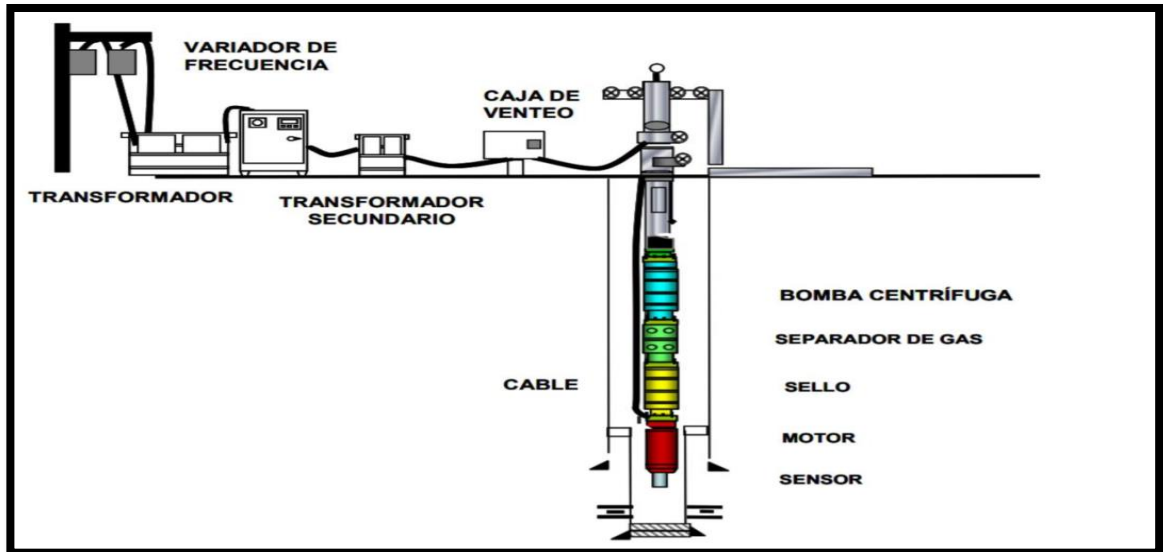
²⁹ Ibid. p.36

3.5. BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE (BES)

La bomba BES convencional es una bomba centrífuga de múltiples etapas, los requisitos operativos del pozo y el diseño del completamiento dictaminan el número de etapas. Cada etapa consta de un impulsor (Elemento rotativo) y un difusor (Elemento estacionario).

El funcionamiento de un equipo BES convencional inicia cuando el fluido del pozo ingresa por el intake hacia la primer etapa de la bomba, este fluido pasa a través de un impulsor y después al salir de este, el fluido es forzado a realizar un cambio en su dirección para ingresar el difusor, a medida que va atravesando el difusor, la energía cinética del fluido se convierte en presión, el fluido que contiene una presión levemente más alta, ingresa por las siguiente etapas para repetir el proceso, consecutivamente, pasa a través de todas la etapas adquiriendo una presión de descarga asignada, y cuenta con suficiente energía para llegar a la superficie del pozo. Estas etapas se encuentran encapsuladas en una carcasa denominada "housing". La energía rotacional de las etapas de la bomba es suministrada por el motor electro sumergible.

Figura 12. Esquema general de un sistema ESP de fondo y superficie.



FUENTE: Frias. (2018). Análisis comparativo de producción de petróleo del uso del equipo BES convencional frente al uso del equipo BES con motores de imanes permanentes (MIP) implementados en pozos del activo Auca. Quito: Escuela Politécnica Nacional Ecuador.

El sistema de levantamiento artificial BES se divide en dos componentes principales, elementos de fondo y elementos de superficie. A continuación, se mencionan los elementos típicos de fondo en el sistema BES.

Cuadro 7. Elementos típicos de fondo de un sistema BES.

Elementos típicos de fondo de un sistema BES	
Elemento	Función
Bomba centrífuga	Encargada de agregar presión al fluido.
Intake/Separador de gas	Permite la entrada de fluido dentro del equipo ESP y también de separar una porción del gas.
Sellos/Protector	Proporcionan protección al motor de los fluidos del pozo, permite la expansión térmica del aceite, reserva de aceite dieléctrico del motor, transmisión del torque generador por el motor hacia la

	bomba, permite balance de presiones entre el interior del equipo BES y el exterior
Motor	Genera la potencia requerida para la operación del equipo BES
Cable y MLE (Motor lead extensión)	Transmite la potencia desde superficie al motor ESP.
Sensor	Encargado de capturar los datos que permiten el monitoreo de las variables de fondo y permiten la protección del equipo ESP, ayudan a la optimización de la producción y la gestión de los yacimientos

Los componentes típicos de superficie en un sistema de bombeo electro sumergible se menciona a continuación:

Cuadro 8. Elementos típicos de superficie de un sistema BES.

Elementos típicos de superficie de un sistema BES	
Elemento	Función
Variador de velocidad (VSD)	<ul style="list-style-type: none"> Opera, monitorea y controla la operación del equipo BES.
Transformador Reductor (SDT)	Proporciona energía al VSD. Por lo general este tipo de SDT reducen la tensión de 13.5 KV @ 480 V
Transformador Elevador (SUT)	Proporcionan energía al motor de fondo.
Caja de Conexiones / Caja de venteo	Permite la conexión eléctrica entre superficie y el equipo de fondo, adicionalmente ayuda a la ventilación a la atmosfera del gas proveniente del pozo a través del cable de potencia
Red Eléctrica/Generador	Encargado de suministrar la energía eléctrica a todo el sistema.

4. MOTOR ELECTRO SUMERGIBLE

La parte del sistema encargada de transformar la energía eléctrica proveniente de los equipos de superficie en energía mecánica se conoce como motor eléctrico. Este motor transmite la energía mecánica a la BES mediante un eje, con el propósito de impulsar los fluidos desde el reservorio hasta la superficie.

Los motores eléctricos utilizados en el sistema BES están dimensionados para potencias, corrientes y voltajes específicos. Estos equipos están diseñados para operar dentro de un rango de temperatura determinado, y su refrigeración se logra mediante la circulación interna del aceite dieléctrico y el paso de los fluidos del pozo alrededor de la parte externa del motor (anular).

En el contexto de los motores utilizados en el sistema BES, existen dos tipos comunes: los motores de inducción y los motores de imanes permanentes, también conocidos como PMM (Permanent Magnet Motor) en inglés. Ambos tipos de motores son utilizados en la industria y se seleccionan en función de las características específicas del sistema y los requisitos de operación.

Es importante tener en cuenta que los motores eléctricos utilizados en el sistema BES desempeñan un papel fundamental en la conversión de energía y en el funcionamiento eficiente del sistema de levantamiento artificial³⁰.

4.1. MOTORES DE INDUCCIÓN (IM)

Dentro del sistema ESP se instala entre los sellos (Protectores) y el sensor de fondo. Eléctricamente son trifásicos, por lo general de dos polos y rellenos con aceite dieléctrico.

³⁰ Ivanov, S. (2017). ESP Permanent Magnet Motor Product Bulletin. Schlumberger..

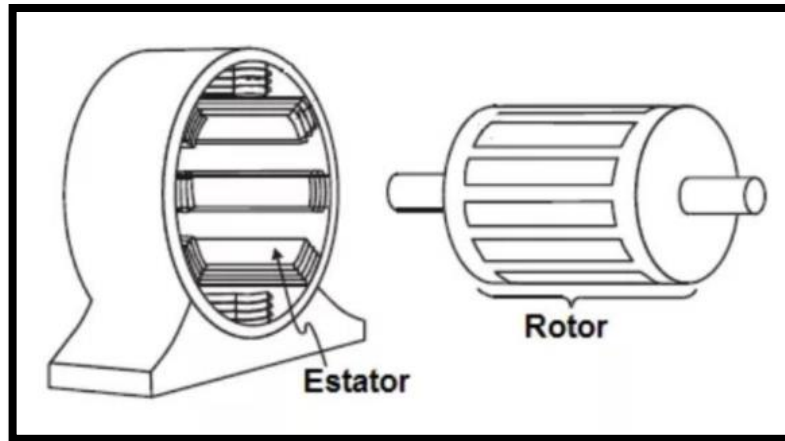
Los motores asincrónicos trifásicos, también llamados “de inducción” son los más baratos de construir, los de menor mantenimiento y los más confiables para aplicaciones industriales. Existen dos tipos, según que el rotor sea bobinado (motor de anillos rozantes) o en cortocircuito (motor de jaula de ardilla). Los motores de tipo jaula de ardilla son los más usados en la industria por ser los más baratos en su mantenimiento, ya que no posee anillos rozantes que estén sujetas a permanente desgaste.

4.1.1. Principio de funcionamiento

Cuando a los bobinados del estator se aplica la Corriente Alterna trifásica, debido a la forma en la que están dispuestos y a las variaciones de la corriente, se produce un campo magnético “giratorio”, cuya dirección cambia constantemente y se mueve a una velocidad que depende de la frecuencia de la tensión y de la cantidad de bobinados. Este campo magnético induce una corriente en el rotor que también produce un campo magnético. La interacción de ambos campos hace que el rotor sea “arrastrado” por el campo magnético giratorio y también gire.

La velocidad de giro del rotor es ligeramente inferior a la del campo giratorio. Esto se debe a que, si fuera igual, no se induciría corriente en el rotor y no habría interacción entre los campos. Por esta razón el motor se llama asíncrono.

Figura 13. Partes de un motor IM.



FUENTE: Tolocka, E. (2014). Profe Tolocka. Recuperado el 01 de junio de 2023, de <https://www.profetolocka.com.ar/2014/10/23/motores-de-induccion-trifasicos-funcionamiento/>

4.2. Motor de Imanes permanentes (PMM)

Este tipo de motores también utilizan alimentación de corriente alterna, (AC) trifásica para energizar los devanados del estator. La diferencia entre Los PMM y los IM están en el diseño del rotor esto se puede observar en la figura 2-8. En los rotores PMM, las barras de cobre se reemplazan imanes permanentes. Estos imanes pueden montarse en la superficie de los rotores o instalarse en el interior de los rotores. la implementación de estos imanes en el interior les permite superar las fuerzas centrífugas a altas velocidades de rotación. A medida que la corriente alterna trifásica se alimenta a los devanados del estator de un PMM, los campos magnéticos giratorios se generan como en el caso de los Mis. Sin barras de cobre ni circuitos eléctricos en los rotores de los PMM, no hay voltaje ni corriente inducidos, ni campo magnético inducido En cambio, los rotores adquieren el campo magnético requerido gracias a los fuertes imanes permanentes instalados. Los campos magnéticos giratorios generados con los devanados del estator interactúan con los imanes permanentes para que el rotor y el eje comiencen a moverse. Los rotores giran a una velocidad idéntica a la velocidad de los campos magnéticos giratorios de los devanados del estator.

4.2.1. Sistemas ESP con motores PMM

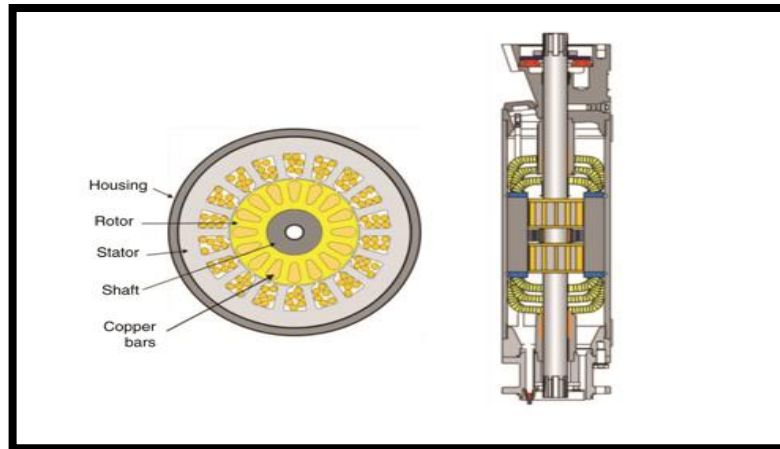
En la actualidad se han desarrollado nuevas tecnologías para la industria petrolera, múltiples compañías sobre todo de origen Ruso y desde el año 2010 han puesto a prueba su avance más reciente hasta perfeccionarlo hoy en día, el cual consiste en colocar motores con imanes permanentes en la configuración de los sistemas BES, esta nueva tecnología se implementó de tal manera que supere la anterior, con el objetivo principal de reducir los costos de producción e incremental la rentabilidad, ahorro de energía y mayor run-life. Estos equipos han sido probados de manera satisfactoria en diferentes pozos petroleros de todo el mundo generando entre un 25% y 37% de ahorro en producción.

4.2.1.1. Diferencias de diseño entre motores de inducción y de imanes permanentes

Los motores de inducción son comúnmente descritos como trifásicos, dos polos, motores tipo jaula de ardilla. Estos motores dentro de su carcasa están contruidos con un estator.

Para tener un mejor entendimiento el motor de inducción se divididos en dos esquemas, el primero hace referencia a las partes básicas el cual se muestra a continuación.

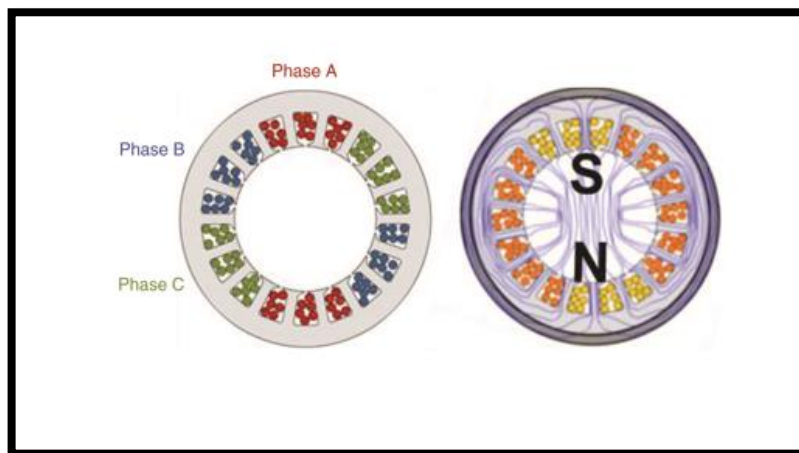
Figura 14. Esquemas de partes básicas de un motor IM.



FUENTE: Modificado de Induction vs. Permanent-Magnet Motors for ESP Applications³¹.

El segundo esquema muestra la actuación del campo magnético en el estator

Figura 15. Esquema de fases y campo magnético un motor IM.



FUENTE: Modificado de Induction vs. Permanent-Magnet Motors for ESP Applications³².

³¹ Xiao, J., & Lastra, R. (2018). Induction vs. Permanent-Magnet Motors for ESP Applications. Vol. 34, No. 22.

³² Ibid. p.2.

Cuando el voltaje trifásico es aplicado al devanado del estator, un campo magnético rotativo será generado dependiendo de la forma en la cual el estator este instalado, dos, cuatro, seis o más polos magnéticos podrán ser generados.

Dependiendo de la separación de estos campos magnéticos dependerá el número de polos, dos polos equivalen a una separación de 180°, 4 polos 90°, 6 polos 60° y así. Un diseño de 2 polos permite al sistema operar con una alta velocidad rotacional a una determinada frecuencia, lo que se reduce en menores requisitos para motor y bomba. Esta es una de las razones por las que los motores de dos polos han sido el diseño preferido para los motores ESP, adicionalmente la construcción de motores con mayor cantidad de polos es un diámetro pequeño es bastante desafiante, la ecuación 1 describe la relación entre la velocidad rotacional del campo magnético del estator y el número de polos magnéticos y a frecuencia de entrada AC.

$$\omega = 120f/p \quad (1)$$

- ω : es rev/min
- f es la frecuencia AC (Hz)
- p es el número de polos.

“Jaula de ardilla” hace referencia a la configuración del rotor. El rotor este hecho de láminas de acero apiladas con espacios cortados para la instalación de las barras de cobre. El número de ranuras del rotor se elige para que sea un múltiplo no integral de las ranuras del estator y así evitar el enclavamiento magnético del rotor y el estator cuando arranca el motor. Las largas barras de cobre están conectadas en cada extremo con un anillo de cobre, cerrando el circuito eléctrico en el rotor para la circulación de corriente³³.

El rotor también se puede construir utilizando devanados de cobre en lugar de barras de cobre, pero en comparación, un rotor de jaula de ardilla es más eficiente

³³ Ibid. p.3

y resistente. Debido a las limitaciones de diámetro del motor, los rotores son largos y delgados; los rotores muy largos tienden a tambalearse, lo que aumenta las posibilidades de que el rotor golpee el interior del estator y provoque una falla del motor.

Se prefiere un diseño de motor de varias secciones, con la instalación de rodamientos radiales entre secciones para soportar y centralizar el rotor en medio del estator. Cada cojinete radial tiene un elemento rotatorio enchavetado al eje del motor y montado en una pista exterior estacionaria. Cada sección del rotor produce caballos de fuerza proporcionales a su longitud. Se utilizan varias secciones de rotor dentro de un motor para lograr la potencia requerida, y este número debe diseñarse equilibrando la necesidad de potencia y la longitud del motor dictada por la practicidad y la confiabilidad³⁴.

Hay un espacio delgado denominado "espacio de aire" entre el diámetro interior (ID) del estator y el diámetro exterior (OD) de los rotores. Se utiliza aceite de alta dieléctricidad para llenar el espacio de aire y todos los vacíos dentro del motor. El eje del motor es hueco, con orificios perforados en cruz en las ubicaciones de los cojinetes para la circulación, refrigeración y lubricación del aceite del motor. Además, cada motor está diseñado con un cojinete de empuje en la cabeza del motor. El cojinete de empuje soporta el peso de los rotores y proporciona una acción de bombeo para la circulación del aceite del motor.

Los campos magnéticos giratorios se generan a medida que los devanados del estator se energizan con corriente alterna trifásica de amplitud y polaridad de voltaje variable. Las barras de cobre de los rotores se romperán a través de las líneas del flujo del campo magnético del estator y se inducirá un voltaje bajo y una corriente alta en los circuitos eléctricos del rotor, como se describe en la ley de inducción de Faraday. La corriente inducida en el rotor producirá un campo magnético correspondiente dentro del rotor. Un polo magnético en el estator induce un polo magnético opuesto en el rotor. El campo magnético del rotor es atraído y sigue los

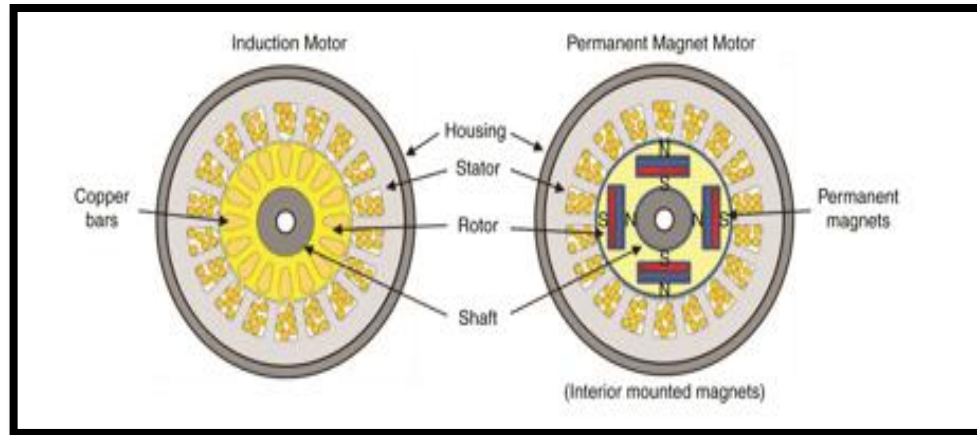
³⁴ Ibid. p.3

campos magnéticos giratorios del estator, creando la rotación del rotor y el eje. El campo del rotor siempre va a la par del campo del estator en cierta medida, por lo que las barras de cobre pueden romper continuamente el flujo del campo magnético del estator e inducir voltaje y corriente en el rotor. El rotor gira a una velocidad que es de 2% a 3% más lenta que la de los campos magnéticos giratorios del estator. Esta diferencia de velocidad, denominada deslizamiento, es la razón por la que un motor de inducción se denomina motor asíncrono. La cantidad de deslizamiento es una función de la carga puesta en el motor. Ninguna condición de carga tiene el deslizamiento más pequeño. A medida que se coloca carga en el motor, los rotores se ralentizan. Esto hace que los rotores rompan aún más líneas de flujo del campo magnético del estator, induzcan un campo magnético más fuerte en el rotor y produzcan más potencia para que el motor supere la carga³⁵.

El PMM también utiliza energía de CA trifásica para energizar los devanados del estator. La diferencia entre los PMM y los IM está en el diseño del rotor. En los rotores PMM, las barras de cobre se reemplazan con potentes imanes permanentes de tierras raras. Estos imanes pueden montarse en la superficie de los rotores o instalarse en el interior de los rotores. En este último caso, se mecanizan ranuras en las láminas de acero para aceptar imanes permanentes conformados. Retener u ocultar los imanes en el interior les permite superar las fuerzas centrífugas a altas velocidades de rotación. La Fig. 4 muestra las áreas transversales de un IM y un PMM.

³⁵ Ibid. 3

Figura 16. Esquema de un motor PMM.



FUENTE: Modificado de Induction vs. Permanent-Magnet Motors for ESP Applications³⁶

Para aplicaciones en fondo de pozo, la elección de los imanes permanentes se limita a dos comunes: Samario cobalto, una aleación de samario y cobalto (SmCo), e imán de neodimio, una aleación de neodimio, hierro y boro que también se conoce como imán de neodimio (NdFeBr). El material del imán se selecciona según la fuerza magnética y la resistencia termomagnética. Las pruebas muestran que la fuerza magnética del imán de neodimio disminuye con la temperatura, y se debilita después de los 150°C, lo que convierte al imán de Samario cobalto (SmCo) como el más utilizado para la aplicación de motores de fondo de pozo³⁷.

En la Figura 17, se observa que el Motor Magnético Permanente (PMM, por sus siglas en inglés) posee cuatro polos, designados como norte, sur, norte y sur en el rotor, respecto al estator. Esta estructura se conoce como configuración de cuatro polos.

Es crucial recordar que se precisa un número igual de polos magnéticos en el estator y el rotor para garantizar un funcionamiento adecuado del motor PMM. En el caso de los PMM, la incorporación y ubicación de imanes permanentes en el rotor genera dos, cuatro, seis, o incluso, más polos magnéticos.

³⁶ Ibid p.3

³⁷ Ibid p.3

El desafío reside en diseñar el devanado del estator de tal manera que el número de polos magnéticos en los campos magnéticos del estator coincida con el número de polos magnéticos del rotor. En la Figura 5, se presenta un ejemplo de cómo se establece el devanado del estator para crear un PMM de cuatro polos.

En la actualidad, los PMM que se emplean para aplicaciones de Bombas Electrosumergibles (ESP, por sus siglas en inglés) son mayormente de cuatro polos. Por otra parte, los PMM de dos polos de alta frecuencia se están desarrollando para aplicaciones de alta velocidad, cuyo objetivo es la compresión centrífuga de gas húmedo³⁸.

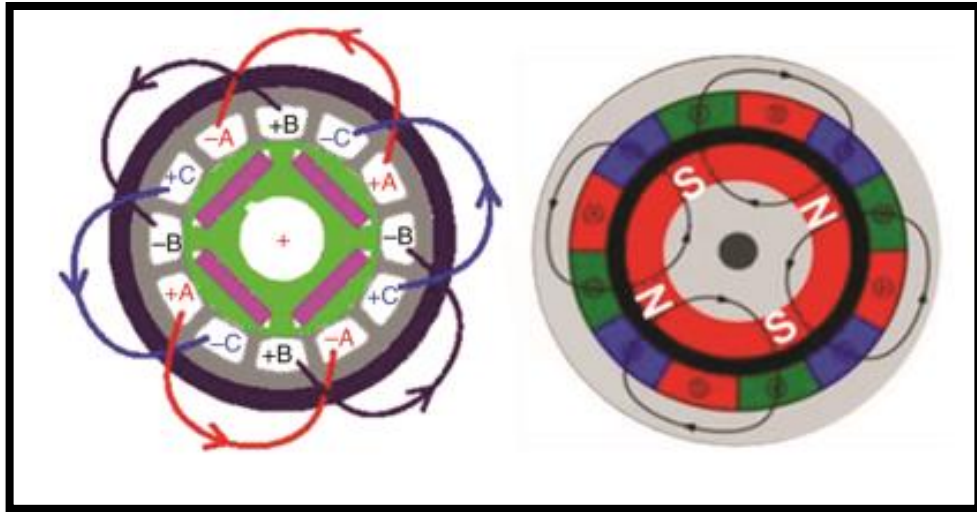
Se discutirá más adelante en este documento que los PMM con seis o más polos se emplean para aplicaciones de Sistemas Electrosumergibles de Bombeo Progresivo de Cavidades (ESPCP). La cantidad de polos magnéticos, la complejidad constructiva, la velocidad operativa, la eficiencia del motor y la longitud del cable de alimentación (relacionado con la profundidad de instalación del sistema) son factores interrelacionados.

Las aplicaciones particulares demandan la optimización de estos parámetros. A modo de ejemplo, los PMM de dos polos son más sencillos de construir, pero se debe diseñar cuidadosamente para minimizar el par de arranque y la fluctuación de la velocidad. Aumentar el número de polos beneficia en una operación del motor más suave; sin embargo, si la velocidad operativa requerida es alta, la fuente de alimentación de CA debe manejarse a una frecuencia mayor.

Por ejemplo, para que un PMM de seis polos opere a 10 000 rev/min, la frecuencia de CA necesaria es de 500 Hz. Incrementar la frecuencia de CA puede derivar en una mayor pérdida de energía en los variadores de velocidad (VSD), transformadores elevadores y cables de alimentación. Por tanto, el equilibrio de estos parámetros es esencial al diseñar para una aplicación específica.

³⁸ Ibid p.3

Figura 17. Motor PMM de 4 polos.



FUENTE: Modificado de Induction vs. Permanent-Magnet Motors for ESP Applications.³⁹

A medida que se alimenta corriente alterna trifásica a los devanados del estator de un PMM, se generan campos magnéticos giratorios, como en el caso de los motores de inducción convencionales. Sin barras de cobre ni circuitos eléctricos en los rotores de los PMM, no hay ni voltaje, corriente ni campo magnético inducido. Para los PMM los rotores ya tienen instalados los campos magnéticos con los potentes imanes permanentes. Con los mecanismos de control adecuados (que se analizarán en una sección posterior de este documento), los campos magnéticos giratorios generados con los devanados del estator interactúan con los imanes permanentes para producir la rotación del eje y del rotor. Los rotores giran a una velocidad idéntica a la velocidad de los campos magnéticos giratorios de los devanados del estator. Los PMM son motores síncronos. La Tabla 1 resume algunas diferencias clave entre los IM y los PMM⁴⁰

³⁹ Ibid p.4

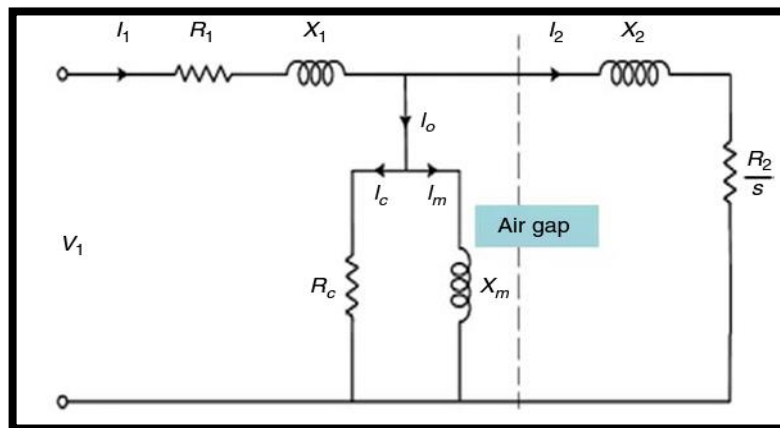
⁴⁰ Ibid p.4

Cuadro 9. Diferencias clave entre los Motores IM y PMM⁴¹

	Motor de Inducción	Motor de imanes permanentes
Numero de polos	2	2, 4, 6, 10, 12 (ESP/ESPCP)
Frecuencia	40 @ 90 Hz	10 @ 550, 750 Hz
Rev/min	2,400 a 5,400 (deslizamiento)	50 a 500, 720, 3,600, 6,000, 10,000, 12,000, 45,000
Eficiencia	80 al 83%	90 al 93%
Factor de potencia	0.8-0.9	≥0.9
Corriente de operacion	Media – Alta	Baja – Media
Longitud	Alta	Corta
Peso	Alto	Ligero
Perdidas por temperature	Medio – Alto	Bajo

Es importante tener en consideración la importancia del factor de potencia, para facilitar el entendimiento, la a continuación muestra un circuito equivalente de un motor IM por cada fase del motor.

Figura 18. Circuito equivalente de un motor IM por fase.



FUENTE: Modificado de Induction vs. Permanent-Magnet Induction vs. Permanent-Magnet⁴².

Donde:

I1: Corriente del estator

X1: Reactancia de fuga del estator

R1: Resistencia efectiva del estator

I2: Corriente del rotor

⁴¹ Ibid p.4

⁴² Ibid. p.4

X2: Reactancia de fuga del rotor

Xm: Reactancia de magnetización

V1: Voltaje en los terminales del estator

R2: Resistencia del bobinado del rotor.

Rc: Resistencia del núcleo

S: Deslizamiento

Ic: Componente de pérdidas en el núcleo de la corriente de excitación

Io: Corriente de excitación

Im: Corriente de magnetización

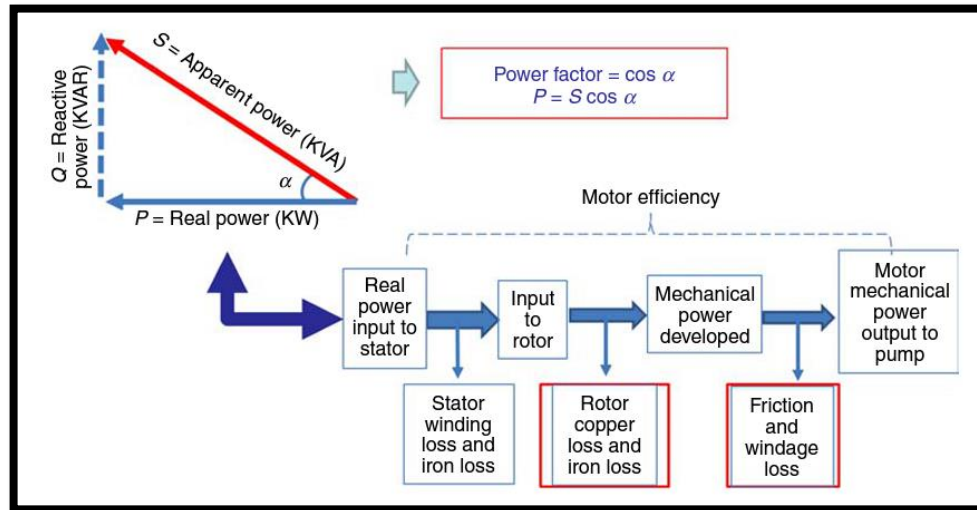
Como se describió anteriormente, cuando se energiza un motor de corriente alterna trifásica, se crean campos magnéticos giratorios en el estator. A medida que el rotor comienza a girar, los campos magnéticos del rotor interactuarán con los campos magnéticos del estator, creando un voltaje llamado fuerza contra electromotriz (EMF) que se opone al voltaje aplicado. Debido a la EMF inversa, la corriente eléctrica se retrasa con respecto al voltaje aplicado. El componente de la corriente que está desfasado con el voltaje aplicado no proporciona trabajo útil. Aquí es donde entra en juego el concepto de factor de potencia.

La Fig. 19 muestra un circuito eléctrico equivalente para una fase de un motor de inducción en el que se muestra que la rama eléctrica del estator corre en paralelo con la rama eléctrica del rotor, separada por el entrehierro. La corriente total tiene dos componentes: la corriente de la rama del estator y la corriente de la rama del rotor. La corriente total no está en fase con el voltaje aplicado. Cuando se suministra corriente alterna al estator, parte de la corriente se utiliza para generar los campos magnéticos giratorios. Esta corriente es la corriente de magnetización (I_m). Esta corriente tiene un retraso del voltaje aplicado de aproximadamente 90° debido a la naturaleza inductiva del motor.

El otro componente de la corriente total es la corriente de carga o par (I_2). Esta corriente está en fase con el voltaje aplicado. En consecuencia, la potencia total consumida por el motor consta de dos componentes: potencia reactiva correspondiente a la corriente de magnetización y potencia real correspondiente a la corriente de carga. La suma vectorial de potencia real y reactiva es la potencia aparente.

La siguiente figura ilustra el triángulo de potencia, el factor de potencia y la eficiencia energética.

Figura 19. Factor de potencia y eficiencia en motores PMM.



FUENTE: Modificado de Induction vs. Permanent-Magnet Induction vs. Permanent-Magnet⁴³.

La potencia reactiva se requiere para magnetizar un motor y no se utiliza para realizar trabajo útil en la carga. En cambio, se almacena y se descarga en el motor. El aumento en la potencia reactiva necesaria por el motor incrementa la potencia aparente. La relación entre la potencia real y la potencia aparente se conoce como factor de potencia. De manera equivalente, el factor de potencia es el coseno del ángulo de fase eléctrica entre el voltaje y la corriente. La potencia reactiva hace que la potencia real sea menor que la potencia aparente, resultando en un factor de potencia inferior a la unidad en la carga eléctrica. Las compañías eléctricas necesitan construir, generar y distribuir la energía aparente, transfiriendo el costo adicional a los usuarios de los sistemas de bombeo electrosumergibles (ESP), a pesar de que no toda la energía se utiliza para realizar trabajo real. Cuando el factor de potencia es bajo, se requiere transmitir más potencia aparente a través del

⁴³ Ibid p.4.

sistema de energía para proporcionar la misma potencia real. Esto se traduce en un mayor flujo de corriente, una mayor caída de voltaje y una mayor pérdida de calor en el sistema. En el caso de los motores de imanes permanentes (PMM), no se requiere la magnetización del rotor y la potencia reactiva del motor se reduce considerablemente. Como resultado, los PMM tienen factores de potencia más altos en comparación con los motores de inducción.⁴⁴

La eficiencia del motor se refiere a la cantidad de potencia real suministrada al estator del motor que está disponible como potencia en el eje del motor para impulsar la bomba, después de tener en cuenta diversas pérdidas internas del motor. Estas pérdidas incluyen pérdidas en los devanados del estator y en el hierro, pérdidas en el cobre y en el hierro del rotor, así como pérdidas por fricción y resistencia al aire. En el caso de los motores de imanes permanentes (PMM), no hay pérdida de cobre en el rotor. Además, gracias a los imanes permanentes potentes, el tamaño del rotor puede hacerse más compacto, lo que resulta en un espacio de aire más amplio. Esto conlleva ventajas como la reducción de las pérdidas debidas al efecto del aire, la generación de calor y el impacto del rotor. La eliminación de las pérdidas de cobre en el rotor y la reducción de las pérdidas por efecto del aire hacen que los PMM sean más eficientes en comparación con los motores de inducción (IM). Además, los rotores compactos permiten el encapsulamiento del estator y el rotor, lo que da como resultado una arquitectura de motor completamente diferente en algunas aplicaciones.

Otra característica del PMM que vale la pena discutir es la relación carga/corriente y carga/eficiencia. Con carga baja, la corriente también es baja, por lo que es más fácil proteger el motor en situaciones de carga insuficiente, como bloqueos por gas. Para los motores de inducción, la corriente de carga baja es alta y puede ser difícil proteger el motor con control de corriente. También a baja carga, la eficiencia de los

⁴⁴ Ibid p.5

motores de inducción disminuye significativamente. En general, los motores de inducción no se deberían utilizar a menos del 50 al 60 % de sus capacidades de carga. Los PMM mantienen la eficiencia en una gama más amplia de cargas⁴⁵.

Estudios realizados por parte de las compañías proveedoras de equipos ESP La participación en la potencia neta total promedio es del 39% (potencia útil). El 61% restante son pérdidas que se transforman en calor y calientan el fluido de pozo; en otras palabras, se está desperdiciando mayoritariamente las pérdidas se presentan en dos componentes ESP:

- Bomba ESP (Por la transferencia de energía mecánica a energía hidráulica) – 29% del 61%.
- Motor ESP (Transferencia de energía eléctrica a energía mecánica) 13 % del 61%.

El restante 19% del total de las pérdidas están distribuidos en el cable, transformador, variador de velocidad y filtros.

Por lo tanto, la mejora en la eficiencia de la bomba y el motor es la medida técnica que puede brindar el mayor resultado. En términos técnicos, la mejora de la eficiencia se puede lograr de dos maneras, ya sea usando una de ellas o una combinación de ellas:

Diseño óptimo del punto de operación de la bomba durante la selección del equipo para el pozo o el Diseño del sistema ESP con una mayor eficiencia propia.

4.2.1.2. Conceptos de seguridad en la implementación de los PMM

Con la implementación de los motores PMM se han encontrado múltiples retos relacionado a la seguridad y salud en el trabajo, debido a esto las diferentes empresas de servicios han implementado estrategias y procedimientos que

⁴⁵ Ibid p.6

permitan reducir los diferentes riesgos relacionados a la operación de esta nueva tecnología y fomentar prácticas seguras y eficientes⁴⁶.

Los Motores de Imanes permanentes (PMM) son una fuente de generación de voltaje cuando el eje de estos presenta movimiento debido a factores externos. Alto voltaje resultante de la rotación del motor puede estar presente aun cuando la fuente de poder en superficie se encuentra aislada, inclusive cuando esta se encuentre desconectada⁴⁷

El voltaje generado es directamente proporcional a la frecuencia de rotación del eje y esta es usualmente entre el 80 % 90% de la placa nominal del motor. El alto voltaje estará presente en los terminales del bobinado del estator y respectivamente en los terminales del cable de potencia si este ya se encuentra conectado al motor⁴⁸. La rotación del eje puede ocurrir de múltiples maneras, así como el efecto rotativo de las turbinas en las bombas, por ejemplo:

1. Durante la circulación de fluido.
2. Pozos con flujo natural.
3. Pruebas de presión.
4. Operaciones de slickline o wireline dentro del pozo.
5. Corrida de tubería con equipo BES.
6. Extracción del equipo de fondo.
7. Actividades de recirculación.
8. Influjo debido a la detención del equipo BES.
9. Durante la operación del equipo BES en ausencia de válvulas check y de drenaje o por el mal funcionamiento de estas.

⁴⁶ Alviarez, H. D. (2019). Permanent Magnet Motor (PMM) Electrical Precautions and Procedures. Vol. 1, No. 1.

⁴⁷ Ibid. p.5

⁴⁸ Ibid. p.5

En general, es importante tener en cuenta el efecto de la turbina en cualquier operación que pueda resultar en la rotación del eje del equipo de bombeo electro sumergible (BES). Por lo tanto, es fundamental asegurarse de que no haya tensión presente y verificar las conexiones eléctricas antes de realizar cualquier tipo de manipulación. Además, es necesario utilizar correctamente los elementos de protección personal y utilizar herramientas y equipos certificados. No se debe llevar a cabo ninguna tarea hasta estar completamente seguro de cumplir con estas precauciones.

- **Precauciones eléctricas para tener en consideración con los PMM**

Discutir todos los riesgos asociados con los equipos PMM durante todas las reuniones preoperativas y de seguridad, es también necesario informar a todo el personal del RIG y todo el personal involucrado en la operación los riesgos asociados al trabajo con equipos PMM⁴⁹.

Incluir etiquetado de riesgo eléctrico a todos los equipos de superficie (Caja de venteo, Variadores de velocidad, transformadores, cabezales, sistemas de monitoreo, etc.). Alto voltaje puede estar presente inclusive si la fuente de alimentación se encuentra aislada o desconectada.

Antes y durante corrida o extracción de equipos PMM es necesaria la instalación de vallas, letreros y señalizaciones de peligro en los equipos (Spooler, rieles de cable, Mesa del taladro).

Instalar temporalmente barreras y cinta de peligro con el fin de asegurar el área de trabajo que involucre equipos PMM, adicionalmente prevenir el acceso no autorizado de personal.

Hay que asegurar que todos los equipos estén correctamente aterrizados, en Colombia se requiere cumplir con el RETIE que indica de una resistencia inferior a 10 Ohm.

⁴⁹ Ibid. p.6

Después del ensamble del equipo BES PMM y de la conexión del cable al motor es necesario el aseguramiento de los conductores del cable de potencia, instalando aisladores en cada fase del cable de potencia con el fin de evitar el contacto externo. Solo se pueden remover estos aisladores del cable de potencia cuando sea necesario tomar medición de parámetros eléctricos del equipo de fondo y datos de sensor. Se requiere el uso de los respectivos elementos de protección personal, utilizar los equipos de medición eléctricos para comprobar la ausencia de tensión, siempre realizar estas mediciones con el equipo estacionario, si se presenta alguna prueba hidrostática, inyección de fluidos, circulación u operaciones con slick line, estas deben realizarse inmediatamente después de la

- **Barreras en fondo**

La manera más efectiva de controlar y evitar el back spin es aplicar barreras mecánicas en el fondo del pozo que no permitan el contraflujo en el momento de realizar operaciones en los sistemas BES, muchas de estas barreras quedan en el fondo del pozo durante su etapa productiva y son tenidas en cuenta durante el diseño del BHA, mientras algunas otras son temporales y se deben remover o cerrar, únicamente luego de haber conectado todos los cables en superficie

A continuación, se relacionan las barreras en fondo normalmente utilizadas durante la corrida de equipo BES⁵⁰.

1. Check valve
2. Drain valve, landing nipple
3. Blanking plug.
4. Standing valve
5. Sliding sleeve

⁵⁰ Ibid p.7

4.2.1.3. Línea TPS de motores PMM de Schlumberger (VEPDMT)

TPS hace referencia a la manufactura de productos de Schlumberger en Tyumemn Rusia ("Tyumen Pumps Schlumberger"), los motores PMM (Motores de imanes permanentes, abreviación rusia "VPEDMT") es una nueva generación de motores electro sumergibles⁵¹.

Los motores PMM son trifásicos, rellenos con aceite dieléctrico con magnetos permanentes en el rotor. Esta tecnología alternativa es ensamblada y funciona de la misma manera que los motores electro sumergibles convencionales y se adapta a la mayoría de las aplicaciones. Su diseño de rotor único permite un mayor rendimiento, mejora en la eficiencia y factor de potencia comparado con los motores estándar de inducción.

Una buena perspectiva es el uso de motores PMM en vez de los de inducción convencionales, los PMM presentan varias ventajas como su alta eficiencia, mayor coeficiente de potencia, alta densidad de potencia de enfriamiento, así como un mayor rango de velocidades. Empresas de levantamiento artificial en su mayoría rusas han desarrollado y producido motores PMM. Las limitaciones de los PMM es que estos requieren el uso de un variador de velocidad con unas características especiales.

La base de diseño de los motores PMM es la línea TPS de motores de corriente alterna que ha sido comercializada desde 2010. Los motores PMM presentan ventajas técnicas significativas en comparación con los motores de inducción. La diferencia en la construcción radica en el diseño de los rotores. En el caso de los motores PMM, se optó por mantener el sistema magnético del estator igual al de los motores convencionales. Esta configuración permite minimizar el tiempo y costo de

⁵¹ Ivanov, S., Maxim, R., & Shirikov, D. (2021). TPS-Line Permanent Magnet Motor for ESP (VPEDMT). Schlumberger.

diseño, así como reducir el costo de producción en serie al utilizar las mismas piezas que se emplean en los motores de inducción convencionales.

Los motores PMM comparten los mismos atributos de diseño que sus contrapartes de inducción, tales como:

1. Conexión Plug-in.
2. Eje Sólido.
3. Estator barnizado (Aplicaciones estándar) y encapsulados para aplicaciones de alta temperatura.
4. Diseño de thrust bearing (Cámara de empuje) mejorado.
5. Eliminación de los sistemas de filtración de aceite.
6. Bases compatibles para la conexión de diferentes tipos de sensor.

Cuadro 10. Especificaciones de los motores TPS PMM de Schlumberger.

Especificaciones de los motores TPS PMM de Schlumberger	
Descripción	Valor / Rango
Serie	117 (461)
Configuración	Sencilla
Tipos de Base de motor	Compatible con sensores de fondo ESP
Diámetro externo del housing (OD)	117 mm (4.61 in)
Material de housing	Acero al carbón (CS) St35 o 22GU
Potencia Máxima	200 KW @ 50Hz 322 KW @ 60Hz
Temperatura máxima	Estándar 190 °C (374 °F) Alta Temperatura 220 °C (428 °F)
Longitud del rotor (mm/in)	340 mm (13.39 in)
Tipo de aceite dieléctrico	Reda #3,5,6.
Conexión del MLE	Plugin

FUENTE: Ivanov, S., Maxim, R., & Shirikov, D. (2021). TPS-Line Permanent Magnet Motor for ESP (VPEDMT). Schlumberger.

5. IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO.

5.1. CRITERIOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS

5.1.1. Consumo de energía total (KW/H)

Para evaluar el consumo eléctrico como el principal indicador, los datos de consumo de los equipos electro sumergibles fue determinado con el apoyo de algunos indicadores de los equipos de fondo y análisis de cargas y operatividad realizadas por el personal en campo de monitoreo y predictivos, sumado a los Match que se realizan de forma periódica a los pozos instalados por Schlumberger, adicionalmente como referencia se utilizaran los últimos Match realizados mediante el software de diseño, optimización y diagnóstico de Schlumberger – Designpro. Para el cálculo del consumo energético se utiliza la ecuación a continuación.

$$P = \frac{\sqrt{3} * V * I * \cos\phi}{1000} \left(\frac{kW}{h} \right) \quad (2)$$

P=Potencia activa, consumo eléctrico (kw(h))

V= Voltaje (V)

I= Corriente (A)

Cos(ϕ)= Factor de potencia

5.1.2. Consumo energético (USD)

Este parámetro permitió el cálculo del ahorro económico de la implementación del equipo PMM en el pozo, por cada kilovatio hora (kw(h)) que consume la empresa

Ecopetrol S.A en campo rubiales se utilizara como referencia 232 COP/KWh o 0.052 USD a la tasa representativa fijada por el Banco de la Republica.

5.1.3. Tasa de ahorro energético (kw/(h))

La tasa de ahorro energético se obtendrá a partir de los resultados con los motores PMM instalados según los pozos seleccionados, diferentes pruebas y estudios de motores PMM realizadas en otros campos han arrojados una tasa de ahorro entre el 10 al 20%.

5.1.4. Potencia total de los motores implementados

Esta potencia total hace referencia a la capacidad de cada motor PMM instalado en cada uno de los pozos y esta está directamente relacionada al potencial del pozo y de la bomba instalada.

5.1.5. Índice de Consumo Energético

Esta es la relación entre la potencia y la producción, este índice nos suministra la información de cuantos vatios necesita el motor electro sumergible generar para que le bomba BES produzca un barril de fluido.

$$ICE = \frac{\text{Consumo Energetico}}{\text{Producción}} \quad (3)$$

Donde:

ICE= Índice de consumo energético (KW/Barril).

Consumo Energético: Dado en KW/h o en KW/d.

Producción: Equivalente de la producción de fluido por hora (BFPh) o en producción día (BFPd).

5.1.6. Tasa de Cambio representativa (COP – USD)

La tasa de cambio fue fijada en 4461.66 pesos colombianos (COP) por cada dólar de los estados unidos (USD), tomando como referencia el sitio web del banco de la

república relacionada a la tasa representativa del mercado para el dólar de los estados unidos para la fecha establecida 27 de mayo de 2023.

5.1.7. Run Life y selección de pozos

El Run life se obtuvo de acuerdo con el contrato de suministro de equipos electro sumergibles firmado entre SLB y Ecopetrol de 1300 días, el criterio para la selección de los pozos se dio de manera aleatoria, pero cumpliendo criterios a continuación:

1. Pozo instalado con mínimo 180 días de run life y que se encuentre activo.
2. Que cuente con data de producción y parámetros eléctricos tomados durante los predictivos realizados por el personal en campo.

Por lo cual se procedió a seleccionar los pozos; Pozo A-1H, Pozo B-1H, Pozo C-1H y Pozo D-1H

5.2. CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE PRODUCCIÓN DE LOS POZOS SELECCIONADOS

5.2.1. Pozo A-1H

El pozo A1-H fue completado inicialmente el 16 de mayo de 2021 y durante este tiempo no ha tenido ningún tipo de intervención para mantenimiento o reacondicionamiento, se toma la data de los últimos 3 meses donde el pozo ha tenido un comportamiento estable en producción debido a que no ha sufrido cambios en su frecuencia de operación, este es un pozo horizontal. A continuación, se describe el equipo instalado.

Cuadro 11. Equipo Instalado pozo A-1H

Sensor	XT 150 Tipo 0
Motor	117, 20, VPEDMT, 200KW, 2600V, 51.4A, 50HZ, (321 HP-3120V-51.4 A @ 60 Hz)
Protectores	Tándem BPBSL
Intake	Estándar BOI
Bomba	S11000N – 45 Etapas

A continuación, se presenta el registro de producción del pozo durante los últimos 4 meses:

Cuadro 12. Histórico producción pozo A-1H (Últimos 4 meses).

Pozo	Fecha	Frecuencia de Operación Hz	Caudal Medido BFPD	BSW	Producción de Aceite BOPD	Producción de Agua BWPD
A-1H	Ene-2023	50.4	10953	97.7	254	10699
	Feb-2023	50.4	11124	98	222.5	10901.6
	Mar-2023	50.4	11155	98.5	167	10987
	Abr-2023	50.4	11033	98.6	158	10876

Se obtuvieron los siguientes resultados al realizar las mediciones eléctricas y predictivos por parte del personal de campo.

Cuadro 13. Datos eléctricos históricos pozo A-1H (Últimos 4 meses).

Fecha	Pozo	Frecuencia de operación	Motor					Consumo Eléctrico (kw/h)
			Voltaje promedio	Corriente de trabajo promedio	Corriente de placa	Porcentaje de carga en corriente	Factor de potencia	
Ene-23	A-1H	50.4 Hz	2645.3 V	37.3 A	51.4 A	72.6%	0.96	162.2
Feb-23		50.4 Hz	2642 V	38.1 A	51.4 A	74.1%	0.96	165.4
Mar-23		50.4 Hz	2640 V	37.5 A	51.4 A	72.9%	0.96	162.7
Abr-23		50.4 Hz	2643.3 V	37.9 A	51.4 A	73.7%	0.96	164.6

Los datos del pozo utilizados para el diseño del sistema BES fueron los siguientes:

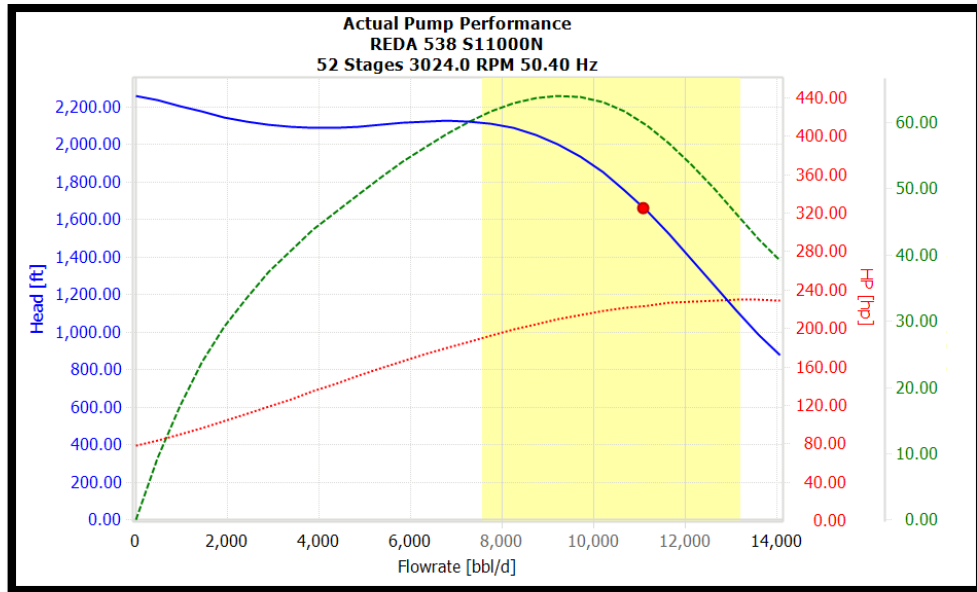
Cuadro 14. Data del pozo A-1H.

POZO A-1H	
Pr (psi)	916
IP (STB/D/PSI)	64.64
BSW (%)	97.69
GOR (SCF/STB)	10
API (°)	12.8
Pb (psi)	80
Q (STB/D)	10953.0
Tr (°F)	145
Asentamiento Intake (FT) MD	4045

5.2.1.1. Análisis del equipo BES pozo A-1H

La bomba del equipo BES instalado en el pozo presenta una eficiencia del 59.9% operando dentro del rango, según la simulación el nivel de fluido se encuentra a 980.18 ft con una columna sobre la bomba de 3064.82 ft. La potencia requerida es de 223.8 Hp.

Figura 20. Curva de desempeño bomba A-1H @ 50.4 Hz.



FUENTE: Artificial Lift design and analysis software Designpro. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por autor.

5.2.1.2. Cálculo de Eficiencia Eléctrica pozo A-1H

Debido a que el pozo no ha tenido incrementos de frecuencia durante el periodo de enero-abril de 2023 operando a 50.4 Hz, para el cálculo del rendimiento eléctrico teórico del equipo PMM se utilizó el promedio de las mediciones de corriente y voltaje para el cálculo de potencia y el caudal seleccionado fue el registrado en el mes de enero de 10953 BFPD. Para poder obtener un comparativo se utilizaron tándem de motores de inducción con el fin de alcanzar una potencia similar a la del motor PMM instalado en el pozo, esta configuración de motores logra 322.5 HP-4055 V-52 A al 100% por lo cual no fue necesario realizar ningún tipo de de rateo.

Cuadro 15. Valores eléctricos arrojados por ®DesignPro pozo A-1H.

	Valores
--	---------

Voltaje requerido en superficie	2707.3 V
Potencia aparente	199.54 KVA
Corriente de motor	42.6 A
Factor de potencia	0.96
Potencia activa	191.56 KW

El siguiente cuadro muestra una comparación de los consumos obtenidos mediante simulación entre el motor PMM actualmente instalado en el pozo y un motor de inducción con características similares al instalado.

Cuadro 16. Comparativo de consumos eléctricos motor PMM e IM en ®DesignPro Pozo A-1H.

Simulación/Designpro		Motor PMM Resultados según software de diseño	Motor de Inducción Resultados según software de diseño	Mejoras de la implementación
BOMBA				
Caudal	Bbl/d	10953	10944.8	
Presión de intake	Psi	718.8	718.4	
Presión de descarga	Psi	1430.4	1430.1	
Velocidad de operación	RPM	3024	3023.1	
Potencia requerida	HP	223.8	223.8	
MOTOR		Características		
		Serie 117 mm VEPDMT (321.8 HP/3120V/51.4A)	Serie 456 Tándem Motores Maximus (322.5 HP/4055 V/52 A)	
Diámetro (OD)	In	4.6	4.56	0.87%
Frecuencia de operación	Hz	50.4	53.7	-6.1%

Corriente	A	42.6	42	
Voltaje	V	2620.8	3629.5	
Longitud del motor	Ft	27.23	43.8	-37.8%
Eficiencia	%	89.44	84.12	5.9%
Factor de potencia		0.96	0.75	21.8%
POTENCIA REQUERIDA EN SUPERFICIE				
Voltaje	V	2707.3	3715	
Potencia aparente	KVA	199.54	270.22	-26.16%
Potencia reactiva	KVAR	55.87	178.70	-68.73%
Potencia activa	KW	191.56	202.67	-5.48%

- Ahorro del 26.16% en la potencia aparente en superficie y del 68.73% de la potencia reactiva.
- Se logra una disminución del 5.48% en el consumo de potencia real.
- Incremento en la eficiencia del motor en un 5.9%.
- Mejora en el factor de potencia del 21.8%.
- Disminución en la longitud del motor a instalar en el pozo del 37.15%
- Ambos motores presentan diámetros externos similares con un ligero incremento del 0.87% en el motor PMM.

Estos resultados iniciales fueron realizados utilizando el software de simulación y diseño de Schlumberger ®DesignPro, una comparación adicional se realizó tomando las lecturas reales tomadas por el personal en campo durante los predictivos periódicos que se realizan.

Cuadro 17. Comparativo de consumos eléctricos simulados en ®DesignPro y valores reales, Pozo A-1H.

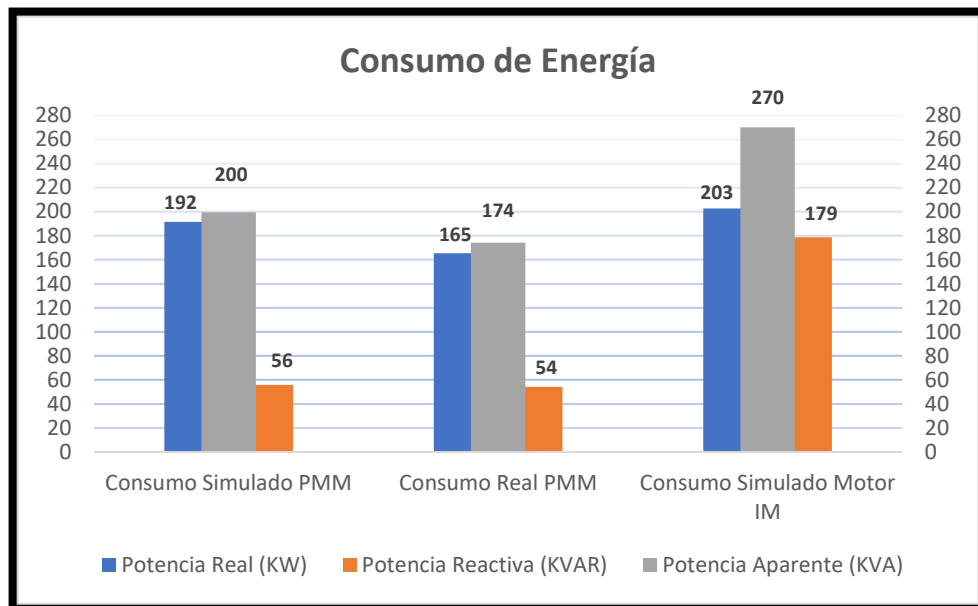
Simulación/Designpro		Motor PMM	Motor PMM	Motor de Inducción	Mejoras de la implementación
Medidas Eléctricas Reales		Resultados según software de diseño	Resultados con medidas eléctricas reales	Resultados según software de diseño	
BOMBA					
Caudal	Bbl/d	10953	19053	10944.8	
Presión de intake	psi	718.8	745	718.4	
Presión de descarga	psi	1430.4	ND	1430.1	
Velocidad de operación	RPM	3024	3024	3023.1	
Potencia requerida	HP	223.8	223.8	223.6	
MOTOR		Características			
		Serie 117 mm VEPDMT (321.8 HP/3120V/51.4A)		Serie 456 Tándem Motores Maximus (322.5 HP/4055 V/52 A)	
Diámetro	in	4.6	4.56	4.56	0.87%
Frecuencia de operación	Hz	50.4	50.4	53.7	-6.1%
Corriente	A	42.6	37.5	42	
Voltaje	V	2620.8	2645.3	3629.5	
Longitud del motor	ft	27.23	27.23	43.8	-37.8%
Eficiencia	%	89.44	88	84.12	4.4%
Factor de potencia		0.96	0.95	0.75	21%
POTENCIA REQUERIDA EN SUPERFICIE					
Voltaje	V	2707.3	2643.3	3715	

Potencia aparente	KVA	199.54	174.10	270.22	-35.57%
Potencia reactiva	KVAR	55.87	54.36	178.70	-69.58
Potencia real	KW	191.56	165.40	202.67	-18.38

Al realizar la comparación con las medidas eléctricas realizadas en campo, se evidencian cambios tanto para los resultados obtenidos en la simulación de software tanto para el motor PMM y el de Inducción:

- Ahorro del 35.57% en la potencia aparente en superficie y del 69.58% de la potencia reactiva.
- Se logra una disminución del 18.38% en el consumo de potencia real.
- Mejora en el factor de potencia del 21%.

Figura 21. Comparación consumo de energía pozo A-1H @ 50.4 Hz.



5.2.2. Pozo B-1H

El pozo B-1H es un pozo horizontal el cual fue completado inicialmente el 30 de agosto de 2022 y no presenta ningún tipo de intervención por mantenimiento o

reacondicionamiento. A continuación, una descripción del equipo instalado actualmente en el pozo.

Cuadro 18. Equipo Instalado B-1H.

Sensor	XT 150i Tipo 1
Motor	117, 20, VPEDMT, 200KW, 2600V, 51.4A, 50HZ, (321 HP-3120V-51.4 A @ 60 Hz)
Protectores	Tándem BPBSL
Intake	Estándar BOI
Bomba	S11000N – 45 Etapas

En la siguiente table se muestra el historial de producción del pozo durante los últimos 4 meses:

Cuadro 19. Histórico producción pozo B-1H (Últimos 4 meses)

Pozo	Fecha	Frecuencia de Operación Hz	Caudal Medido BFPD	BSW	Producción de Aceite BOPD	Producción de Agua BWPD
B-1H	Ene-2023	40	8306	95.8	346	7960
	Feb-2023	41	8884.9	97.3	240	8645
	Mar-2023	42.5	9477	96.3	353	9124
	Abr-2023	44	10123	96.5	358	9765

Se obtuvieron los siguientes resultados al realizar las mediciones eléctricas y predictivos por parte del personal de campo.

Cuadro 20. Datos eléctricos históricos pozo B-1H (Últimos 4 meses).

Fecha	Pozo	Frecuencia de operación	Motor					Consumo Eléctrico (kw/h)
			Voltaje promedio	Corriente de trabajo promedio	Corriente de placa	Porcentaje de carga en corriente	Factor de potencia	
Ene-23	B-1H	40 Hz	2031.3 V	23.3 A	51.4 A	45.3%	0.95	77.8
Feb-23		41 Hz	2038.3 V	23.8 A	51.4 A	46.3%	0.95	79.7
Mar-23		42.5 Hz	2194.3 V	26 A	51.4 A	50.6 %	0.95	93.8
Abr-23		44	2312.7 V	29.3 A	51.4 A	57 %	0.95	111.4

Los datos del pozo utilizados para el diseño del sistema BES fueron los siguientes:

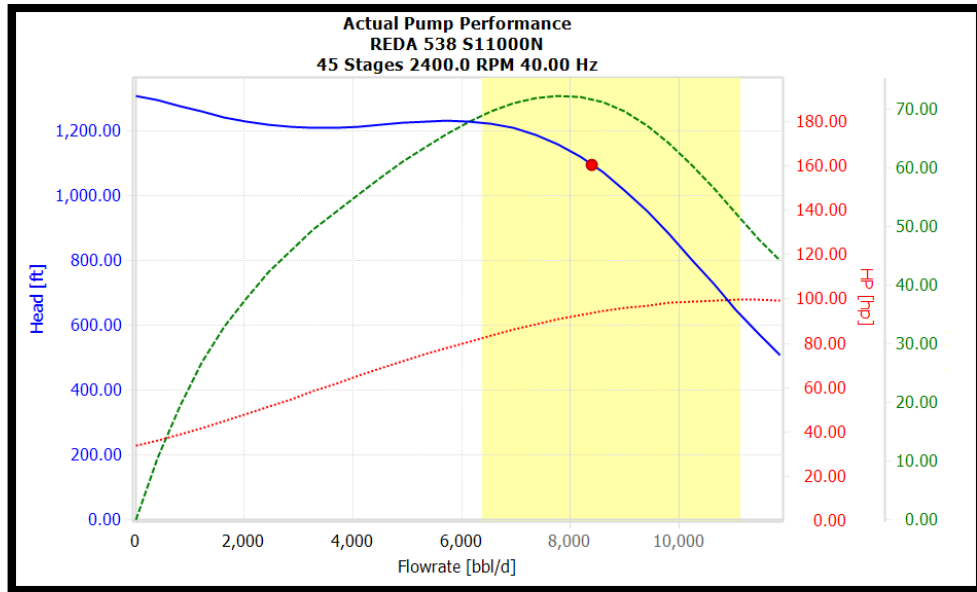
Cuadro 21. Datos del pozo B-1H @ 40 Hz

Pozo B-1H	
Pr (psi)	775.6
IP (STB/D/PSI)	123
BSW (%)	95.8
GOR (SCF/STB)	10
API (°)	12.8
Pb (psi)	80
Q (STB/D)	8306
Tr (°F)	145
Asentamiento Intake (FT) MD	2651

5.2.2.1. Análisis del equipo BES pozo B-1H

Operando a 40 Hz la bomba del equipo BES instalado en el pozo presenta una eficiencia del 71.7% operando dentro del rango, según la simulación el nivel de fluido se encuentra a 775.95 ft con una columna sobre la bomba de 1875.1 ft. La potencia requerida es de 93.6 Hp.

Figura 22. Curva de desempeño bomba B-1H @ 40 Hz.



FUENTE: Artificial Lift design and analysis software Designpro. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por autor.

5.2.2.2. Cálculo de Eficiencia Eléctrica pozo B-1H

Para el cálculo del rendimiento eléctrico teórico del equipo PMM de este pozo en particular fue necesario realizar un análisis adicional debido a que durante los meses de enero y abril de 2023 el pozo ha tenido incrementos desde 40 Hz hasta 44 Hz. El motor de inducción utilizado para la comparación es de rating variable y al 100% su potencia nominal es de 337.5 HP – 2324.1 V – 88.1 A, por lo cual fue necesario realizar un de-rateo del 95% para tener una potencia similar a la del motor PMM instalado en el pozo.

Cuadro 22. Valores eléctricos obtenidos mediante simulación del pozo B-1H a las frecuencias de 40 Hz y 44 Hz.

Simulación/Designpro	Valores @ 40 Hz	Valores @ 44 Hz
Voltaje requerido en superficie	2109.8 V	2314
Potencia aparente	83.17 KVA	118.08 KVA

Corriente de motor	22.8 A	28.9 A
Factor de potencia	0.96	0.96
Potencia activa	79.84 KW	113.36 KW

El siguiente cuadro muestra una comparación de los consumos obtenidos mediante simulación entre el motor PMM actualmente instalado en el pozo operando a 40 Hz y un motor de inducción con características similares al instalado.

Cuadro 23. Simulación/®DesignPro consumos eléctricos B-1H – 40 Hz.

Simulación/Designpro		Motor PMM	Motor de Inducción	Mejoras de la implementación
		Resultados según software de diseño	Resultados según software de diseño	
BOMBA				
Caudal	Bbl/d	8306	8304	
Presión de intake	psi	691.8	681.8	
Presión de descarga	psi	1162.1	1162.1	
Velocidad de operación	RPM	2400	2417.6	
Potencia requerida	HP	93.6	95.4	
		Características		
MOTOR		Serie 117 mm VEPDMT (321.8 HP/3120V/51.4A)	Serie 562 Maximus (320.6HP/2293V/84.8A)	
Diámetro (OD)	In	4.6	5.62	-18.15%
Frecuencia de operación	Hz	40	41.8	-4.3%
Corriente	A	22.8	49.1	
Voltaje	V	2080	1597.1	

Longitud del motor	Ft	27.23	21.8	24.9%
Eficiencia	%	89.5	89.45	0%
Factor de potencia		0.96	0.59	62.7%
POTENCIA REQUERIDA EN SUPERFICIE				
Voltaje	V	2109.8	1663	
Potencia aparente	KVA	83.17	141.27	-41.13%
Potencia reactiva	KVAR	23.29	114.04	-75.58%
Potencia activa	KW	79.84	83.34	-4.2%

- Ahorro del 41.13% en la potencia aparente en superficie y del 75.58% de la potencia reactiva.
- Se logra una disminución del 4.2% en el consumo de potencia real.
- Ambos equipos presentan una eficiencia de motor similares.
- Mejora en el factor de potencia del 38.56%.
- Incremento en la longitud del motor a instalar en el pozo del 24.9%
- Reducción del 18.15% en el diámetro externo del motor (OD).

Estos resultados iniciales fueron realizados utilizando el software de simulación y diseño de Schlumberger @DesignPro, una comparación adicional se realizó tomando las lecturas reales tomadas por el personal en campo durante los predictivos periódicos que se realizan.

Cuadro 24. Simulación/®DesignPro Medidas Eléctricas Reales @ 40 Hz.

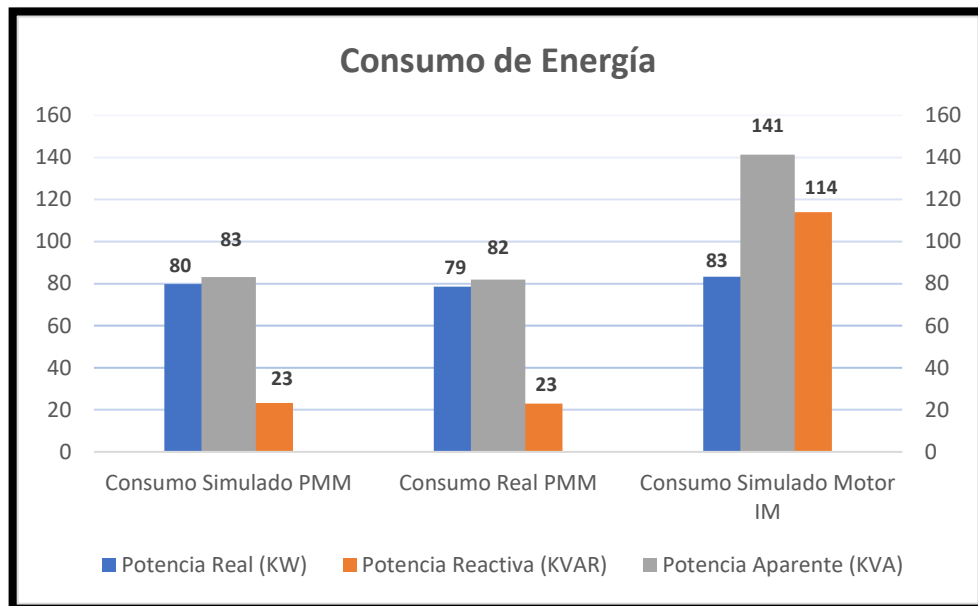
Simulación/Designpro Medidas Eléctricas Reales		Motor PMM Resultados según software de diseño	Motor PMM Resultados con medidas eléctricas reales	Motor de Inducción Resultados según software de diseño	Mejoras de la implementación
BOMBA					
Caudal	Bbl/d	8306	8306	8304	
Presión de intake	Psi	691.8	701.0	681.8	
Presión de descarga	Psi	1162.1	ND	1162.1	
Velocidad de operación	RPM	2400	2400	2417.6	
Potencia requerida	HP	93.6	93.6	95.4	
MOTOR		Características			
		Serie 117 mm VEPDMT (321.8 HP/3120V/51.4A)		Serie 562 Maximus (320.6HP/2293V/84.8A)	
Diámetro	In	4.6	4.6	5.62	-18.15%
Frecuencia de operación	Hz	40	40	41.8	-4.3%
Corriente	A	22.8	23.3	49.1	
Voltaje	V	2080	2001.3	1597.1	
Longitud del motor	Ft	27.23	27.23	21.8	24.9%
Eficiencia	%	89.5	89.5	89.45	0%
Factor de potencia		0.96	0.96	0.59	62.7%
POTENCIA REQUERIDA EN SUPERFICIE					
Voltaje	V	2109.8	2031.3	1663	
Potencia aparente	KVA	83.17	81.88	141.27	-42.04%

Potencia reactiva	KVAR	23.29	22.94	114.04	-79.88%
Potencia real	KW	79.84	78.6	83.34	-5.69%

Al realizar la comparación con las medidas eléctricas realizadas en campo, se evidencian cambios tanto para los resultados obtenidos en la simulación de software tanto para el motor PMM y el de Inducción:

- Ahorro del 42.04% en la potencia aparente en superficie y del 79.88% de la potencia reactiva.
- Se logra una disminución del 5.69% en el consumo de potencia real.
- Mejora en el factor de potencia del 62.7%.

Figura 23. Consumo energético pozo B-1H @ 40 Hz.



A continuación, los resultados obtenidos mediante simulación del pozo a una frecuencia operativa de 44 Hz.

Cuadro 25. Simulación/@DesignPro B-1H – 44 Hz.

Simulación/Designpro		Motor PMM	Motor de Inducción	Mejoras de la implementación
		Resultados según software de diseño	Resultados según software de diseño	
BOMBA				
Caudal	Bbl/d	10141.5	10100.2	
Presión de intake	Psi	676.1	663.3	
Presión de descarga	Psi	1182.7	1182	
Velocidad de operación	RPM	2640	2654.7	
Potencia requerida	HP	128.6	130.4	
MOTOR		Características		
		Serie 117 mm VEPDMT (321.8 HP/3120V/51.4A)	Serie 562 Maximus (320.6HP/2293V/84.8A)	
Diámetro (OD)	In	4.6	5.62	-18.15%
Frecuencia de operación	Hz	44.5	46.8	-4.91%
Corriente	A	28.9	50.64	
Voltaje	V	2314	1788.2	
Longitud del motor	Ft	27.23	21.8	24.9%
Eficiencia	%	89.6	89.6	0%
Factor de potencia		0.96	0.65	47.7%
POTENCIA REQUERIDA EN SUPERFICIE				
Voltaje	V	2352.1	1867.8	
Potencia aparente	KVA	114.03	180.56	-36.84%
Potencia reactiva	KVAR	31.92	138.74	-77%
Potencia activa	KW	109.47	117.36	-5.27%

- Ahorro del 36.84% en la potencia aparente en superficie y del 77% de la potencia reactiva.
- Se logra una disminución del 5.27% en el consumo de potencia real.
- Ambos equipos presentan una eficiencia de motor similares.
- Mejora en el factor de potencia del 47.7%.
- Incremento en la longitud del motor a instalar en el pozo del 24.9%
- Reducción del 18.15% en el diámetro externo del motor (OD).

Estos resultados iniciales fueron realizados utilizando el software de simulación y diseño de Schlumberger Designpro, una comparación adicional se realizó tomando las lecturas reales tomadas por el personal en campo durante los predictivos periódicos que se realizan.

Cuadro 26. Simulación/©DesignPro Medidas Eléctricas Reales B-1H – 44 Hz.

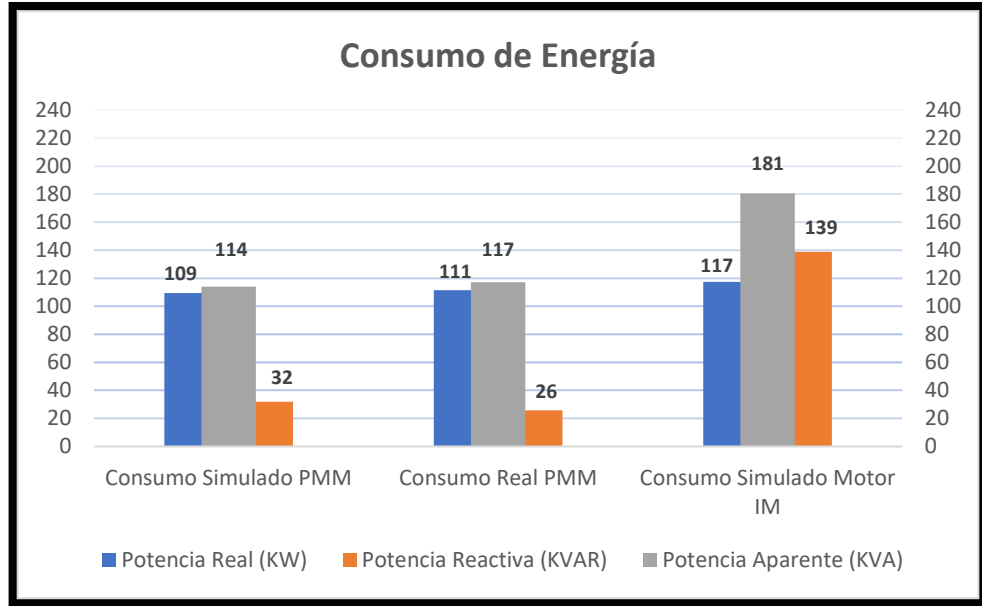
Simulación/Designpro Medidas Eléctricas Reales		Motor PMM Resultados según software de diseño	Motor PMM Resultados con medidas eléctricas reales	Motor de Inducción Resultados según software de diseño	Mejoras de la implementación
BOMBA					
Caudal	Bbl/d	10141.5	10123	10100.2	
Presión de intake	Psi	676.1	689	663.3	
Presión de descarga	Psi	1182.7	ND	1182	
Velocidad de operación	RPM	2670	2670	2706.8	
Potencia requerida	HP	128.6	128.6	130.4	
Características					

MOTOR		Serie 117 mm VEPDMT (321.8 HP/3120V/51.4A)		Serie 562 Maximus (320.6HP/2293V/84.8A)	
Diámetro	In	4.6	4.6	5.62	-18.15%
Frecuencia de operación	Hz	44	44	46.8	-4.91%
Corriente	A	28.9	29.3	57	
Voltaje	V	2314	2275.4	1753.8	
Longitud del motor	Ft	27.23	27.23	21.8	24.9%
Eficiencia	%	89.6	89.6	89.6	0%
Factor de potencia		0.96	0.95	0.65	-31.6%
POTENCIA REQUERIDA EN SUPERFICIE					
Voltaje	V	2352.1	2312.7	1867.8	
Potencia aparente	KVA	114.03	117.26	180.56	-35.1%
Potencia reactiva	KVAR	31.92	25.75	138.74	-81.44%
Potencia real	KW	109.47	111.4	117.36	5.1%

Al realizar la comparación con las medidas eléctricas realizadas en campo, se evidencian cambios tanto para los resultados obtenidos en la simulación de software tanto para el motor PMM y el de Inducción:

- Ahorro del 35.1% en la potencia aparente en superficie y del 81.44% de la potencia reactiva.
- Se logra una disminución del 5.1% en el consumo de potencia real.
- Mejora en el factor de potencia del 31.6%.

Figura 24. Consumo energético pozo B-1H @ 44 Hz.



5.2.3. Pozo C-1H

El pozo C-1H es un pozo horizontal, fue completado inicialmente el 4 de enero de 2022 y no presenta ningún tipo de intervención por mantenimiento o reacondicionamiento.

Cuadro 27. Equipo Instalado C-1H.

Sensor	XT 150 Tipo 0
Motor	117, 20, VPEDMT, 200KW, 2600V, 51.4A, 50HZ, (321 HP- 3120V-51.4 A @ 60 Hz)
Protectores	Tándem BPBSL
Intake	Estándar BOI
Bomba	S11000N – 45 Etapas

A continuación, se muestra el historial de producción del pozo durante los últimos 4 meses:

Cuadro 28. Histórico producción pozo C-1H (Últimos 4 meses).

Pozo	Fecha	Frecuencia de Operación Hz	Caudal Medido BFPD	BSW	Producción de Aceite BOPD	Producción de Agua BWPD
C-1H	Ene-2023	55.1	10353	96.8	332	10020
	Feb-2023	55.1	10710	97.5	265	10445.3
	Mar-2023	55.1	10642	97.2	301	10341
	Abr-2023	55.1	10373	97.4	273	10100

Se obtuvieron los siguientes resultados al realizar las mediciones eléctricas y predictivos por parte del personal de campo.

Cuadro 29. Datos eléctricos históricos pozo C-1H (Últimos 4 meses).

Fecha	Pozo	Frecuencia de operación	Motor				Consumo Eléctrico (kw/h)	
			Voltaje promedio	Corriente de trabajo promedio	Corriente de placa	Porcentaje de carga en corriente		Factor de potencia
Ene-23	C-1H	55.1 Hz	2927.7 V	40.7 A	51.4 A	79.2%	0.96	197.9
Feb-23		55.1 Hz	2927.7 V	40.7 A	51.4 A	79.2%	0.96	197.9
Mar-23		55.1 Hz	2950.7 V	41.3 A	51.4 A	80.4 %	0.96	202.4
Abr-23		55.1 Hz	2976 V	40.7 A	51.4 A	79.2 %	0.96	201.2

Los datos del pozo utilizados para el diseño del sistema BES fueron los siguientes:

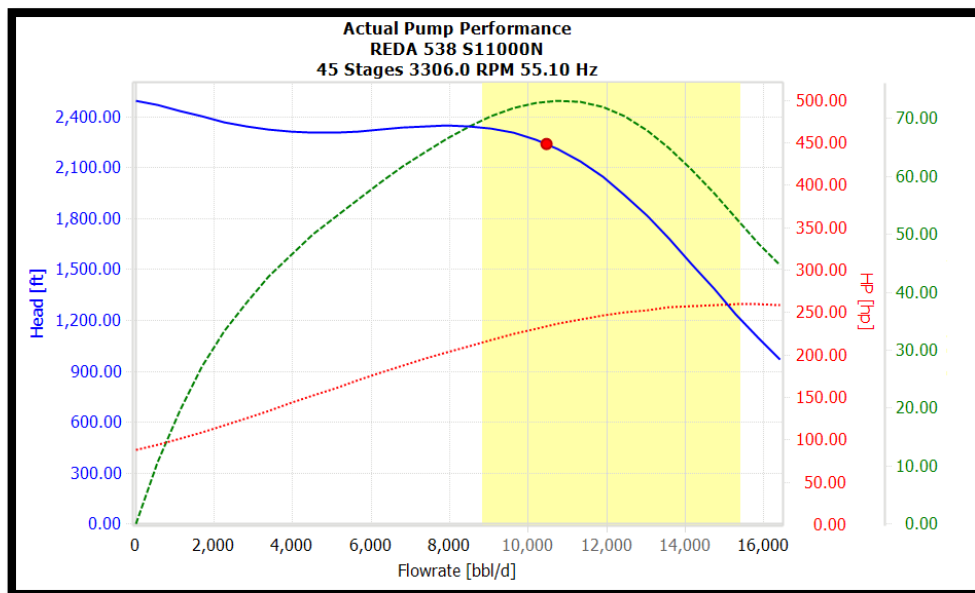
Cuadro 30. Data del pozo C-1H.

Pozo C-1H	
Pr (psi)	908.9
IP (STB/D/PSI)	123
BSW (%)	96.8
GOR (SCF/STB)	10
API (°)	12.8
Pb (psi)	80
Q (STB/D)	10353
Tr (°F)	145
Asentamiento Intake (FT) MD	3312.7

5.2.3.1. Análisis del equipo BES pozo C-1H

Con una frecuencia de trabajo de 55.1 Hz, la bomba del equipo BES instalada en el pozo presenta una eficiencia del 72.9% dentro del rango de operación. Según la simulación, el nivel de fluido se encuentra a 1703.8 ft con una columna sobre la bomba de 1608.9 ft. La potencia requerida es de 234 Hp.

Figura 25. Curva de desempeño bomba pozo C-1H @ 55.1 Hz



FUENTE: Artificial Lift design and analysis software Designpro. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por autor.

5.2.3.2. Cálculo de Eficiencia Eléctrica pozo C-1H

Esta simulación se realizó con el pozo operando a una frecuencia de 55.1 Hz, y debido a que este no ha tenido incrementos de frecuencia durante el periodo de enero-abril de 2023, para el cálculo del rendimiento eléctrico teórico del equipo PMM se utilizó el promedio de las mediciones de corriente y voltaje para el cálculo de potencia y el caudal seleccionado fue el registrado en el mes de enero de 10353 BFPD. Para poder obtener un comparativo se utilizó un motor de inducción con el fin de alcanzar una potencia similar a la del motor PMM instalado en el pozo, este motor seleccionado brinda 321.8 HP- 3300 V – 61.4 A al 100%, este tipo de motores convencionales no permiten ningún tipo de de-rateo

Cuadro 31. Valores eléctricos del pozo C-1H a la frecuencia de 55.1 Hz.

	Valores
Voltaje requerido en superficie	2899.9 V
Potencia aparente	204.97 KVA
Corriente de motor	40.9 A
Factor de potencia	0.96
Potencia activa	196.77 KW

El siguiente cuadro muestra una comparación de los consumos obtenidos mediante simulación entre el motor PMM actualmente instalado en el pozo y un motor de inducción con características similares al instalado.

Cuadro 32. Simulación/@DesignPro C-1H @ 55.1 Hz.

Simulación/Designpro		Motor PMM Resultados según software de diseño	Motor de Inducción Resultados según software de diseño	Mejoras de la implementación
BOMBA				
Caudal	Bbl/d	10353	10322	
Presión de intake	Psi	448.1	445.7	
Presión de descarga	Psi	1407.2	1406.6	
Velocidad de operación	RPM	3306	3306.8	
Potencia requerida	HP	234	234	
MOTOR		Características		
		Serie 117 mm VEPDMT (321.8 HP/3120V/51.4A)	Serie 130 mm PEDMT (321.8 HP/3300 V/61.4A)	
Diámetro	In	4.6	5.12	-10.15%
Frecuencia de operación	Hz	55.1	57.2	-3.7%
Corriente	A	40.9	49.9	
Voltaje	V	2899.9	3146	
Longitud del motor	Ft	27.23	27.1	-9.23%
Eficiencia	%	89.16	84.71	5%
Factor de potencia		0.96	0.8	16.7%
POTENCIA REQUERIDA EN SUPERFICIE				
Voltaje	V	2899.9	3188.7	
Potencia aparente	KVA	204.97	275.2	-25.5%
Potencia reactiva	KVAR	57.4	165.12	-65.23
Potencia real	KW	196.77	220.16	-10.62%

- Ahorro del 25.5% en la potencia aparente en superficie y del 65.23% de la potencia reactiva.

- Se logra una disminución del 10.62% en el consumo de potencia real.
- Incremento en la eficiencia del motor en un 5%.
- Mejora en el factor de potencia del 16.7%.
- Disminución en la longitud del motor a instalar en el pozo del 9.23%
- Reducción del 10.15% en el diámetro externo del motor (OD).

Estos resultados iniciales fueron realizados utilizando el software de simulación y diseño de Schlumberger @DesignPro, una comparación adicional se realizó tomando las lecturas reales tomada en campo.

Cuadro 33. Simulación/@DesignPro Medidas Eléctricas Reales C-1H @ 55.1 Hz.

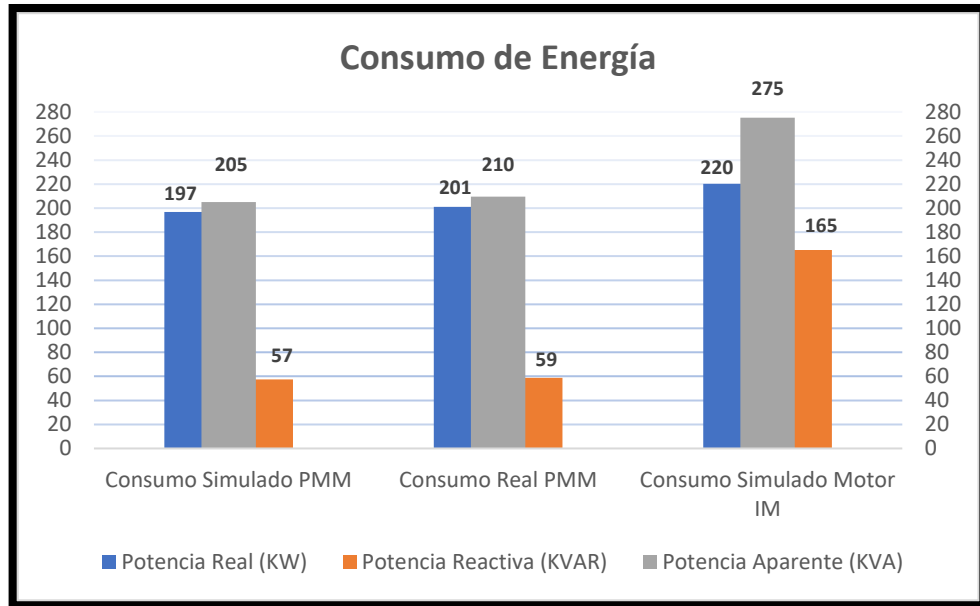
Simulación/Designpro Medidas Eléctricas Reales		Motor PMM Resultados según software de diseño	Motor PMM Resultados con medidas eléctricas reales	Motor de Inducción Resultados según software de diseño	Mejoras de la implementación
BOMBA					
Caudal	Bbl/d	10353	10353	10322	
Presión de intake	Psi	448.1	507	445.7	
Presión de descarga	Psi	1407.2	ND	1406.6	
Velocidad de operación	RPM	3306	3306	3306.8	
Potencia requerida	HP	234	234	234	
Características					
MOTOR		Serie 117 mm VEPDMT (321.8 HP/3120V/51.4A)		Serie 130 mm PEDMT (321.8 HP/3300 V/61.4A)	
		4.6		4.6	
Diámetro	In	4.6	4.6	5.12	-10.15

Frecuencia de operación	Hz	55.1	55.1	57.2	-3.7%
Corriente	A	40.9	40.7	49.9	
Voltaje	V	2865.2	2941.3	3146	
Longitud del motor	Ft	27.23	27.23	30	-9.23%
Eficiencia	%	89.16	87	84.71	2.63%
Factor de potencia		0.96	0.96	0.8	16.7%
POTENCIA REQUERIDA EN SUPERFICIE					
Voltaje	V	2899.9	2976	3188.7	
Potencia aparente	KVA	204.97	209.54	275.2	-23.86%
Potencia reactiva	KVAR	57.4	58.7	165.12	-64.45%
Potencia real	KW	196.77	201.16	220.16	-8.63%

Al realizar la comparación con las medidas eléctricas realizadas en campo, se evidencian cambios tanto para los resultados obtenidos en la simulación de software tanto para el motor PMM y el de Inducción:

- Ahorro del 23.86% en la potencia aparente en superficie y del 64.45% de la potencia reactiva.
- Se logra una disminución del 8.63% en el consumo de potencia real.
- Mejora en el factor de potencia del 16.7%.

Figura 26. Consumo energético pozo C-1H @ 55.1 Hz



5.2.4. Pozo D-1H

El pozo D-1H es un pozo horizontal, fue completado inicialmente el 12 de marzo de 2021 y no presenta ningún tipo de intervención por mantenimiento o reacondicionamiento.

Cuadro 34. Equipo Instalado pozo D-1H

Sensor	XT 150 Tipo 0
Motor	117, 20, VPEDMT, 200KW, 2600V, 51.4A, 50HZ, (321 HP-3120V-51.4 A @ 60 Hz)
Protectores	Tándem BPBSL
Intake	Estándar BOI
Bomba	S11000N – 52 Etapas

A continuación, se presenta el registro histórico de producción del pozo durante los últimos 4 meses:

Cuadro 35. Histórico producción pozo D-1H (Últimos 4 meses)

Pozo	Fecha	Frecuencia de Operación Hz	Caudal Medido BFPD	BSW	Producción de Aceite BOPD	Producción de Agua BWPD
D-1H	Ene-2023	46.2	10181	97.2	287	9894
	Feb-2023	46.2	10329.5	97.4	271.9	10057.6
	Mar-2023	46.2	10161	97.2	285	9877
	Abr-2023	46.2	10279	98.2	189	10090

Se obtuvieron los siguientes resultados al realizar las mediciones eléctricas y predictivos por parte del personal de campo.

Cuadro 36. Datos eléctricos históricos pozo D-1H (Últimos 4 meses).

Fecha	Pozo	Frecuencia de operación	Motor					Consumo Eléctrico (kw/h)
			Voltaje promedio	Corriente de trabajo promedio	Corriente de placa	Porcentaje de carga en corriente	Factor de potencia	
Ene-23	D-1H	46.2 Hz	2396 V	36 A	51.4 A	70%	0.96	143.3
Feb-23		46.2 Hz	2396 V	36 A	51.4 A	70%	0.96	143.3
Mar-23		46.2 Hz	2396 V	35.8 A	51.4 A	69.6%	0.96	142.5
Abr-23		46.2 Hz	2390 V	35.9 A	51.4 A	69.8%	0.96	142.5

Los datos del pozo utilizados para el diseño del sistema BES fueron los siguientes:

Cuadro 37. Data del pozo D-1H.

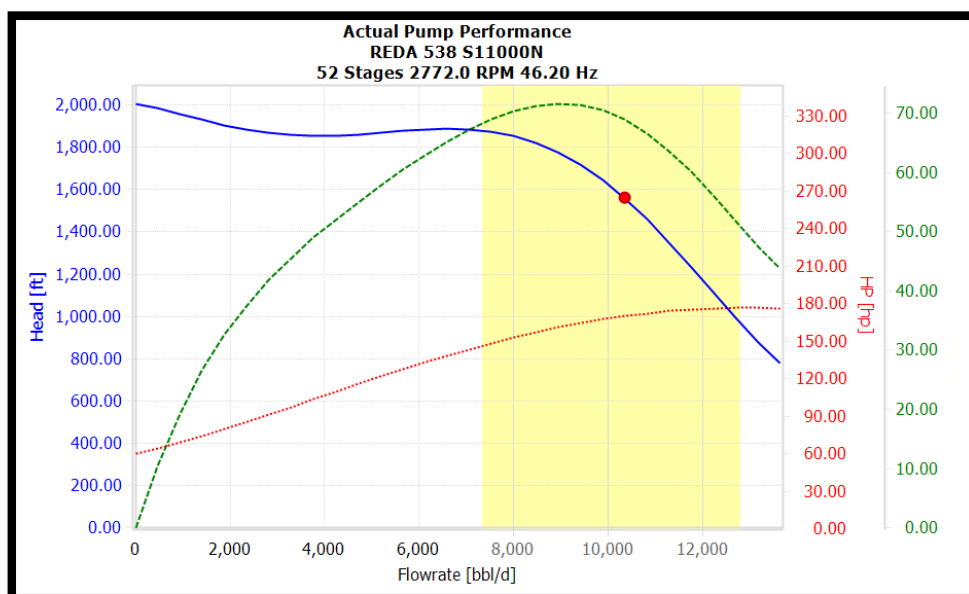
D-1H	
Pr (psi)	965.1
IP (STB/D/PSI)	97.83
BSW (%)	97.2
GOR (SCF/STB)	10

API (°)	12.8
Pb (psi)	80
Q (STB/D)	10181
Tr (°F)	145
Asentamiento Intake (FT) MD	3409.4

5.2.4.1. Análisis del equipo BES pozo D-1H

Con una frecuencia de trabajo de 46.2 Hz, la bomba del equipo BES instalada en el pozo presenta una eficiencia del 68.9% dentro del rango de operación. Según la simulación, el nivel de fluido se encuentra a 954.18 ft con una columna sobre la bomba de 2455.22 ft. La potencia requerida es de 170 Hp.

Figura 27. Curva de desempeño bomba D-1H @46.2 Hz.



FUENTE: Artificial Lift design and analysis software Designpro. Property of Schlumberger. All rights reserved. Modificada por autor.

5.2.4.2. Cálculo de Eficiencia Eléctrica pozo D-1H.

Esta simulación se realizó cuando el pozo se encontraba operando a una frecuencia de 46.2 Hz, y debido a que el pozo no ha tenido incrementos de frecuencia durante

el periodo de enero-abril de 2023 para el cálculo del rendimiento eléctrico teórico del equipo PMM se utilizó el promedio de las mediciones de corriente y voltaje para el cálculo de potencia y el caudal seleccionado fue el registrado en el mes de enero de 10181 BFPD Debido a que el pozo no ha tenido incrementos de frecuencia se utilizó el promedio de las mediciones de corriente y voltaje para el cálculo de potencia. Para poder obtener un comparativo se utilizó un motor de inducción con el fin de alcanzar una potencia similar a la del motor PMM instalado en el pozo, este motor seleccionado brinda 321.8 HP- 3600 V – 56.3 A al 100%, este tipo de motores convencionales no permiten ningún tipo de de-rateo.

Cuadro 38. Valores eléctricos arrojados mediante simulación en el pozo D-1H @ 46.2 Hz.

	Valores
Voltaje requerido en superficie	2463.6 V
Potencia aparente	151.75 KVA
Corriente de motor	35.6 A
Factor de potencia	0.96
Potencia activa	145.68 KW

El siguiente cuadro muestra una comparación de los consumos obtenidos mediante simulación entre el motor PMM actualmente instalado en el pozo y un motor de inducción con características similares al instalado.

Cuadro 39. Simulación/®DesignPro D-1H @ 46.2 Hz.

Simulación/Designpro		Motor PMM Resultados según software de diseño	Motor de Inducción Resultados según software de diseño	Mejoras de la implementación
BOMBA				
Caudal	Bbl/d	10181	10170.8	

Presión de intake	psi	734.9	726.7	
Presión de descarga	psi	1402	1401.8	
Velocidad de operación	RPM	2772	2781	
Potencia requerida	HP	170	170	
MOTOR		Características		
		Serie 117 mm VEPDMT (321.8 HP/3120V/51.4A)	Serie 130 mm PEDMTS (321.8 HP/3600 V/56.3)	
Diámetro (OD)	in	4.6	5.12	-10.15%
Frecuencia de operación	Hz	46.2	47.8	-3.35%
Corriente	A	35.6	42	
Voltaje	V	2402.4	2868	
Longitud del motor	ft	27.23	30.1	-9.5
Eficiencia	%	88.5	83.4	5.76%
Factor de potencia		0.96	0.75	21.88%
POTENCIA REQUERIDA EN SUPERFICIE				
Voltaje	V	2463.6	2940.7	
Potencia aparente	KVA	151.75	213.63	-28.97%
Potencia reactiva	KVAR	42.49	141.3	-70%
Potencia real	KW	145.68	160.22	-9%

- Ahorro del 28.97% en la potencia aparente en superficie y del 70% de la potencia reactiva.
- Se logra una disminución del 9% en el consumo de potencia real.
- Incremento en la eficiencia del motor en un 5.76%.
- Mejora en el factor de potencia del 21.88%.
- Disminución en la longitud del motor a instalar en el pozo del 9.5%
- Reducción del 10.15% en el diámetro externo del motor (OD).

Estos resultados iniciales fueron realizados utilizando el software de simulación y diseño de Schlumberger®DesignPro, una comparación adicional se realizó tomando las lecturas reales tomada en campo.

Cuadro 40. Simulación/®DesignPro Medidas Eléctricas Reales D-1H @ 46.2 Hz.

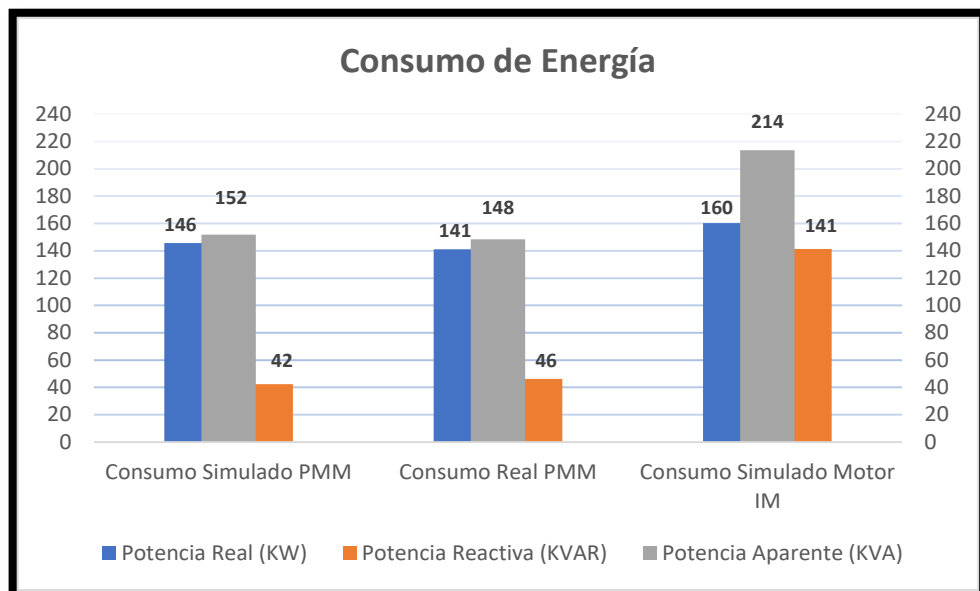
Simulación/Designpro Medidas Eléctricas Reales		Motor PMM Resultados según software de diseño	Motor PMM Resultados con medidas eléctricas reales	Motor de Inducción Resultados según software de diseño	Mejoras de la implementación
BOMBA					
Caudal	Bbl/d	10181	10181	10170.8	
Presión de intake	psi	734.9	734.9	726.7	
Presión de descarga	psi	1402	1402	1401.8	
Velocidad de operación	RPM	2772	2772	2781	
Potencia requerida	HP	170	170	170	
		Características			
MOTOR		Serie 117 mm VEPDMT (321.8 HP/3120V/51.4A)		Serie 130 mm PEDMT (321.8 HP/3600 V/56.3)	
Diámetro	in	4.6	4.6	5.12	-10.15%
Frecuencia de operación	Hz	46.2	46.2	47.8	-3.35%
Corriente	A	35.6	35.9	42	
Voltaje	V	2402.4	2328.8	2868	
Longitud del motor	ft	27.23	27.23	30.1	9.5%
Eficiencia	%	88.5	87	83.4	4.14%

Factor de potencia		0.96	0.95	0.75	21%
POTENCIA REQUERIDA EN SUPERFICIE					
Voltaje	V	2463.6	2390	2940.7	
Potencia aparente	KVA	151.75	148.43	213.63	-30.52%
Potencia reactiva	KVAR	42.49	46.37	141.3	-67.18%
Potencia real	KW	145.68	141	160.22	-12%

Al realizar la comparación con las medidas eléctricas realizadas en campo, se evidencian cambios tanto para los resultados obtenidos en la simulación de software tanto para el motor PMM y el de Inducción:

- Ahorro del 30.52% en la potencia aparente en superficie y del 67.18% de la potencia reactiva.
- Se logra una disminución del 12% en el consumo de potencia real.
- Mejora en el factor de potencia del 21%.

Figura 28. Consumo energético pozo D-1H @ 46.2 Hz



6. BENEFICIOS ECONÓMICOS E IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE

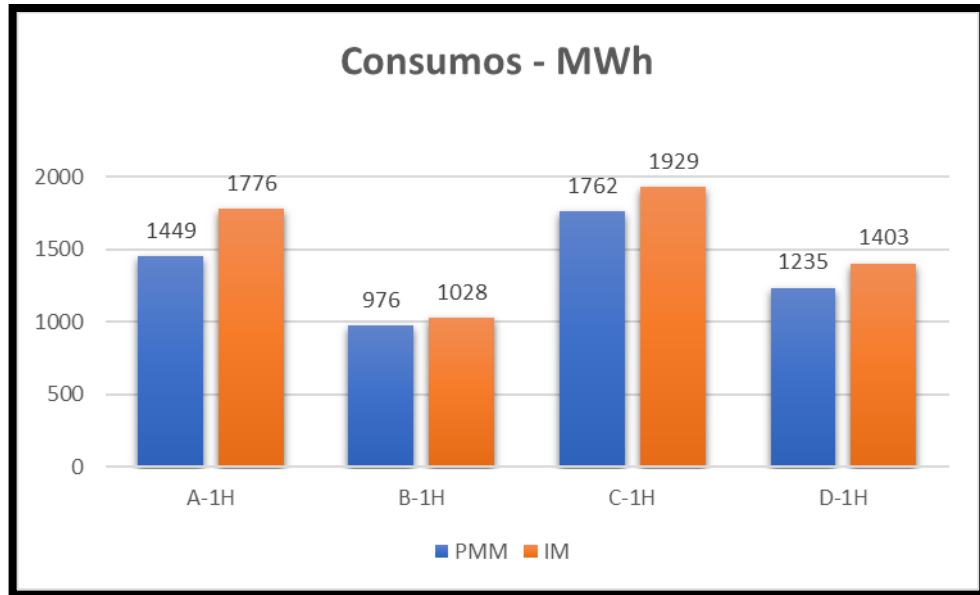
6.1. BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MOTORES PMM

Para este cálculo se utilizará el valor de KWh de 231.45 COP/KWh o 0.052 USD/KWh que fue el precio ponderado de bolsa de energía eléctrica en Colombia para el mes de abril de 2023 según la comisión de energía y gas CRE [15]. Para cada pozo se utilizará el consumo eléctrico medido en KWh anual y se comparará con el consumo eléctrico promedio teórico KWh por año obtenido luego de la simulación por software en ®DesignPro utilizando un motor de inducción de características similares en potencia a los motores PMM instalados en los pozos del campo de estudio. Debido a los cambios de frecuencia que el pozo B-1H ha experimentado, esta evaluación se realizó con el pozo operando a la frecuencia de 44 Hz.

Cuadro 41. Costos de energía eléctrica Motor PMM vs Motor de inducción.

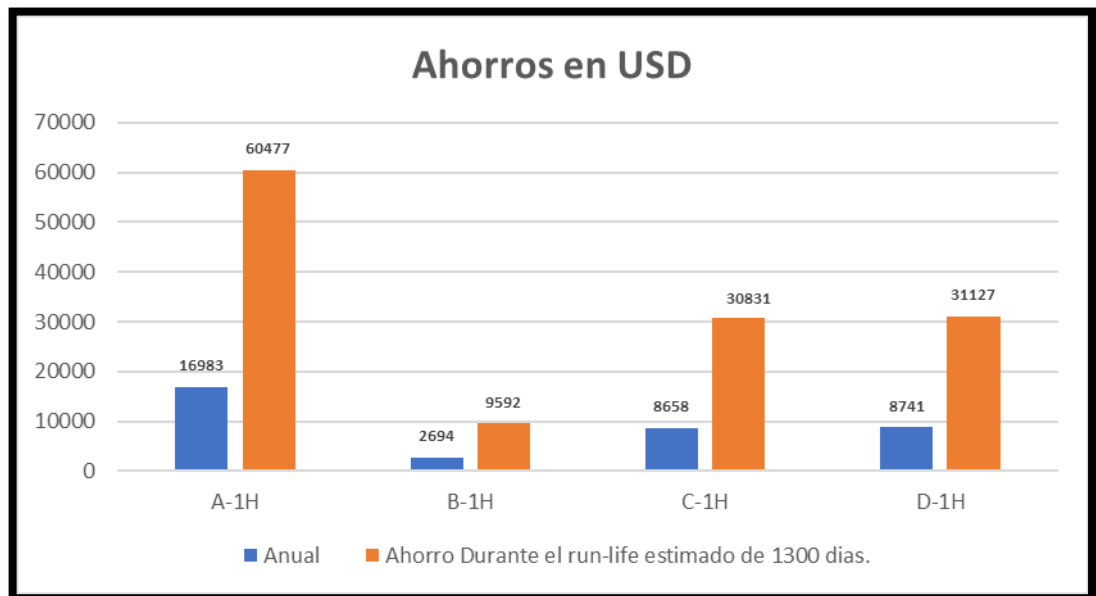
Pozo	Costos de Energía Eléctrica			
	Motor PMM <i>MWh/año</i>	Motor de Inducción <i>MWh/año</i>	Ahorro Anual USD	Ahorro durante el run-life estimado (1300 días). USD
A-1H	1448.9	1775.5	16983.2	60477.2
B-1H	976.2	1028	2693.6	9592
C-1H	1762.2	1928.7	8658	30831.1
D-1H	1235.3	1403.4	8741	31127.4

Figura 29. Comparativo de consumos Motor PMM vs Motor de Inducción.



La siguiente gráfica muestra el ahorro económico anual, así como un análisis adicional que especifica el tiempo de vida útil aproximado de cada pozo, equivalente a 1300 días.

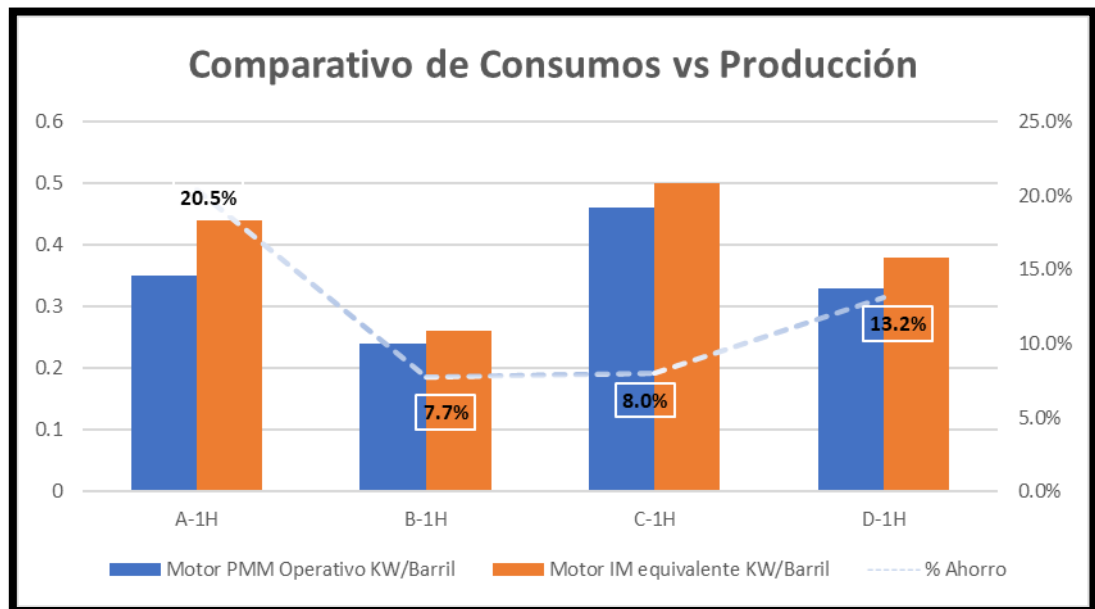
Figura 30. Ahorro económico anual (USD).



6.2. RELACIÓN DE CONSUMO ELÉCTRICO Y PRODUCCIÓN

Al dividir el consumo de energía (medido en kilovatios-hora o kilovatios-día) por la producción (medida en barriles por hora o barriles por día), el Índice de Consumo de Eléctrico proporciona un indicador de la eficiencia energética del sistema. Ayuda a determinar los requisitos de energía por unidad de producción, permitiendo comparaciones y seguimiento de las tendencias de consumo de energía.

Figura 31. Índice de consumo eléctrico ICE de los pozos seleccionados.



El gráfico anterior nos muestra el índice de consumo eléctrico de cada pozo con equipo PMM y su respectivo comparativo si la implementación se hiciera con un motor de inducción de características de potencia similares al instalado actualmente, este índice nos muestra que tanta potencia real se utiliza para producir un barril de fluido. Para este cálculo se utilizó el promedio ponderado de la producción y el consumo eléctrico de cada pozo.

6.3. IMPACTO AMBIENTAL Y HUELLA DE CARBONO

Para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero, se utilizaron dos factores de emisión basados en fuentes específicas:

El primer factor utilizado para este análisis fue el factor de emisión promedio en Colombia. Según la Resolución No. 000320 de 2022 de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)⁵² en Colombia, el factor de emisión promedio de la red eléctrica es de 126 g de CO₂ por kWh emitido. Este factor de emisión se utilizó para calcular la reducción de la huella de carbono en relación con la disminución del consumo de energía lograda mediante la implementación de la tecnología PMM}

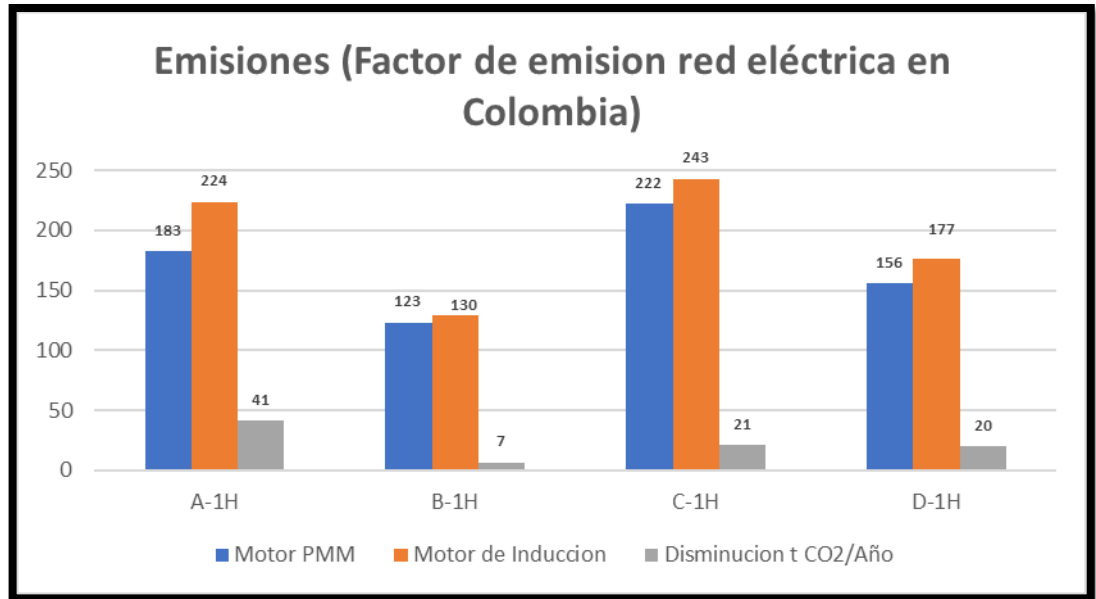
Cuadro 42. Emisiones de CO₂ con factor de emisión red eléctrica colombiana.

Pozo	Emisiones (Factor de emisión red eléctrica en Colombia)		
	Motor PMM	Motor de Inducción	Disminución
	t CO ₂ /Año		
A-1H	183	224	41
B-1H	123	130	7
C-1H	222	243	21
D-1H	156	177	20

A continuación, se muestra la disminución de la huella de carbono obtenida después de la implementación de la tecnología PMM.

⁵² Unidad de Planeación Minero Energetica. (2022, 5 de agosto). UPME. Recuperado de https://www1.upme.gov.co/Normatividad/320_2022.pdf

Figura 32. Emisiones de CO2 con factor de emisión red eléctrica colombiana.



El segundo factor utilizado para el análisis del impacto ambiental positivo al implementar la tecnología PMM fue el factor de emisión de la Administración de Información de Energía de los Estados Unidos (EIA)⁵³. Según la EIA, este factor de emisión es de 387.2 g de CO2 por kWh. Se utilizó este factor de emisión para realizar un cálculo adicional, posiblemente como una comparación o punto de referencia, con el objetivo de evaluar la huella de carbono.

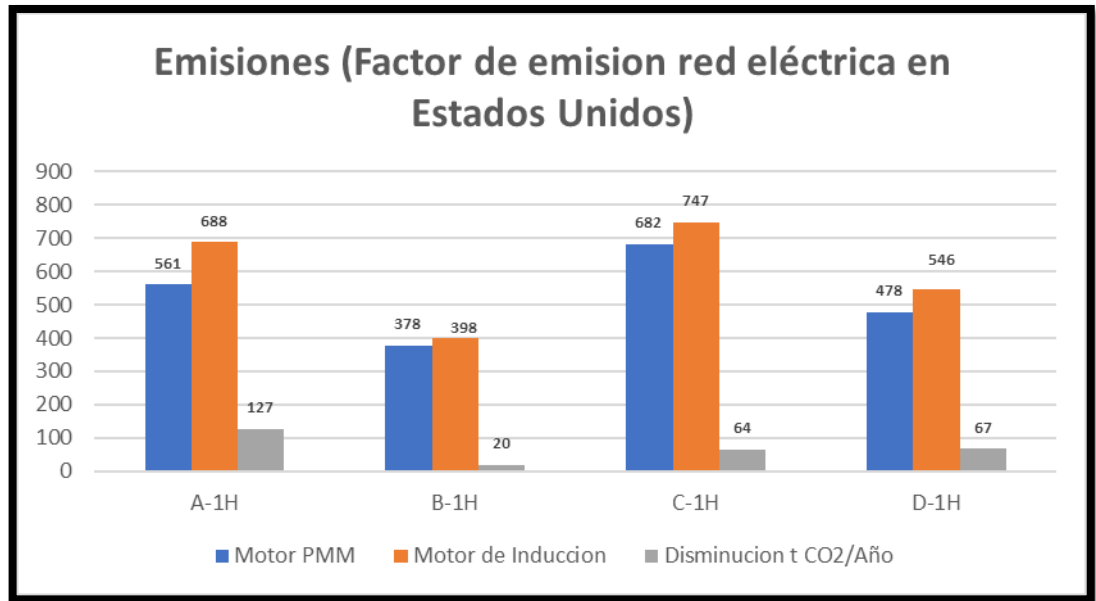
Cuadro 43. Emisiones de CO2 con factor de emisión red eléctrica de EEUU.

Pozo	Emisiones (Factor de emisión red eléctrica en Estados Unidos)		
	Motor PMM	Motor de Inducción	Disminución
	t CO2/Año		
A-1H	561	688	127
B-1H	378	398	20
C-1H	682	747	64
D-1H	478	546	67

⁵³ U.S. Energy Information Administration. (2023). eia. Recuperado de <https://www.eia.gov/>

Utilizando un factor de emisiones de la red eléctrica de Estados Unidos, a continuación, se muestra la reducción de las emisiones de CO2 al implementar la tecnología PMM.

Figura 33. Emisiones de CO2 con factor de emisión red eléctrica en Estados Unidos.



Al utilizar estos factores de emisión, es posible cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la reducción del consumo de energía lograda mediante la implementación de la tecnología PMM. Esto permite una evaluación integral del impacto ambiental y proporciona una base para comparar las emisiones en diferentes regiones. Los factores de emisión específicos utilizados dependen de la ubicación geográfica y de las características de emisión de las respectivas redes eléctricas.

7. CONCLUSIONES

- Se obtuvo una disminución en el consumo eléctrico promedio del 9.96% (KWh), 72.5% en la potencia reactiva (KVAR), 34% en la potencia aparente (KVA), mejora en el factor de potencia promedio del 30.6% y en la eficiencia del motor del 3%.
- Debido a que los motores PMM no presentan deslizamiento se logra una disminución en la frecuencia de operación del equipo BES al implementarse la tecnología de imanes permanentes en los motores electro sumergibles, equivalente a un 4.5%.
- El ahorro total obtenido luego de la implementación de motores PMM en 4 pozos con sistema de levantamiento artificial ESP fue de 37075.8 USD en un año, un cálculo adicional se realiza tomando como referencia el run-life estimado de cada equipo BES que se instala en campo rubiales y se obtiene un ahorro total de 132027.7 USD.
- Con la implementación de motores PMM en los 4 pozos del campo de estudio se dejaron de emitir 88.51 tCo₂/año, equivalente a una disminución del 11.61% en la huella de carbono. Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística Colombiano DANE un hogar promedio colombiano (cuyo tamaño promedio es de 3 y 4 personal) genera una huella de 1.1 t CO₂/Año, utilizando como referencia y en base a los resultados obtenidos de la disminución de huella de carbono al implementar motores PMM en 4 pozos en campo rubiales, esta disminución equivale a la huella de carbono de 80 hogares en Colombia.
- En el campo de estudio, en su mayoría se completan los pozos con revestidores de 7" in y peso de 23 lbs/ft con drift de 6.241", por lo cual el OD de los equipos a bajar en el pozo son de suma importancia para evitar posibles atascamientos durante la bajada del equipo BES, de acuerdo con los resultados obtenidos se obtiene una disminución del diámetro externo (OD) instalando motores PMM serie 117 mm de 9.4%.

8. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos y al análisis detallado realizado en esta monografía sobre la implementación de motores PMM, a continuación, se presentan las siguientes recomendaciones para la industria y futuros trabajos relacionados con este tema:

- Dado que se ha demostrado una significativa disminución en el consumo eléctrico promedio cercano al 10% (KWh), así como una mejora en el factor de potencia alrededor del 30%, es recomendable extender la implementación a más pozos en el campo de estudio. Esto permitirá maximizar los beneficios económicos y ambientales obtenidos hasta ahora. Para llevar a cabo esta expansión, se debe realizar una evaluación detallada de los futuros pozos candidatos en términos de su producción, condiciones operativas y características técnicas. Se deben priorizar aquellos pozos que presenten mayores consumos energéticos y altos niveles de potencia reactiva, ya que serán los más beneficiados con la tecnología de motores PMM.
- Monitoreo y Diagnostico Continuo: Para asegurar que los equipos sigan operando en su máximo rendimiento, se debe implementar un programa de monitoreo y diagnostico continuo. Esto ayudará a detectar y abordar posibles problemas a tiempo, garantizando una operación eficiente y prolongada de los equipos.
- Evaluación de la Factibilidad en Otros Campos Petroleros: Dado que la tecnología de motores PMM ha demostrado su eficacia en el campo de estudio, se recomienda realizar una evaluación de su factibilidad en otros campos petroleros con características similares. Esto podría abrir oportunidades para mejorar la eficiencia y reducir costos en una escala más amplia.
- Promover Incentivos Ambientales: Considerando que la implementación de motores PMM ha llevado a una significativa reducción de emisiones de CO₂, una buena alternativa sería promover incentivos ambientales para alentar a otras

compañías petroleras a adoptar esta tecnología. Estos incentivos podrían ser tanto a nivel gubernamental como de tipo privado. Las entidades gubernamentales pueden desempeñar un papel importante al establecer políticas y regulaciones que incentiven la implementación de tecnologías de que disminuyan el impacto ambiental, como los motores PMM, esto puede incluir la creación de programas de beneficios múltiples como lo pueden ser los beneficios fiscales o certificaciones verdes que estimulen la adopción de estas tecnologías y que apuesten por la reducción de la huella de carbono. La colaboración también puede extenderse a proyectos conjuntos de investigación y desarrollo entre la industria y las instituciones académicas para abordar los desafíos técnicos y ambientales específicos del sector petrolero.

- **Capacitación del Personal en Motores PMM:** Con la implementación de motores PMM, el personal encargado de operar y mantener los equipos electro sumergibles deberá recibir capacitación especializada en esta tecnología desde el punto de vista operativo como de seguridad en el trabajo. Esto garantizará que puedan aprovechar al máximo sus beneficios y operar los equipos de manera segura y eficiente.

Estas recomendaciones tienen como objetivo promover el uso responsable de recursos energéticos y reducir el impacto ambiental en la industria petrolera. La implementación efectiva de los motores PMM puede representar una oportunidad para mejorar la sostenibilidad y eficiencia en la producción de petróleo y gas natural. Adicionalmente pueden servir como punto de partida para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos que continúen impulsando el progreso en la industria petrolera hacia un futuro más sostenible y eficiente.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2012). Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Bogotá, Colombia.

Alarcón, J. D. O. (2016). Diseño del equipo de bombeo electrosumergible para un campo colombiano ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales mediante la herramienta Designpro 9.02 [Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander].

Alba Cárdenas, M. F. Q. V. Daniela. (2019). Optimización del consumo energético de pozos con sistema de levantamiento artificial PCP y ESP de la troncal siete de Campo Rubiales mediante simulación [Tesis de grado, Fundación Universidad de América].

Arteaga, A. K., Montero, G., & Collins, C. E. (2020). Recommended Safety Practices for Permanent Magnet Motors in Artificial Lift Operations. Society of Petroleum.

Dasilva, Á. G. Y., Villa, M. Y., Morales, D. F., & Danel, D. (2014). Oil distribution in the Carbonera Formation, Arenas Basales unit: A case study in the Quifa and Rubiales fields. En AAPG International Conference & Exhibition (pp. 1-10). Cartagena, Colombia.

Fleshman, R. A. H. O. L. (1999). Artificial Lift for High-Volume Production. Schlumberger Oilfield Review, 49–63.

Fonseca, J. (2013, 26 de marzo). Scribd. Pacific. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/273949834/Mapa-Actualizado-Del-Campo-Rubiales>

Harris, D., English, J., & Leemasawatdigul, J. (2017). Leveraging BES Energy Efficiency with Permanent Magnet Motors. Society of Petroleum Engineers (SPE).

Ivanov, S., Maxim, R., & Shirikov, D. (2021). TPS-Line Permanent Magnet. Schlumberger.

Lea, J. F., & Nickens, H. V. (1999). Selection of Artificial Lift. Society of Petroleum Engineers, Inc, Oklahoma.

Ríos, M. M. C. (2016). Evaluación técnico-financiera del rendimiento de los motores de imanes permanentes con bombas electrosumergibles de alta eficiencia del campo A ubicado en la cuenca Llanos Orientales [Tesis de grado, Universidad de Bogotá].

Runza Buitrago, S. (2021). Evaluación de factibilidad técnica y económica de la implementación en campo de equipos de imanes permanentes (PMM) para bombeo electrosumergible (BES) [Tesis de grado, Universidad Surcolombiana].

Sandoval, Y. (18 de mayo de 2023). Valora analitik. Recuperado de <https://www.valoraanalitik.com/2023/05/18/el-precio-de-energia-en-bolsa-de-colombia-esta-indicando-escasez/>

SLB. (2021, 2 de enero). Energy Glossary. Recuperado de <https://glossary.slb.com/en/terms/w/waterdrive>

SLB. (2023, 1 de enero). Bomba de balancín. Recuperado de https://glossary.slb.com/es/terms/b/beam_pump

Solano Giraldo, S. V. L. Branderley. (2019). Evaluación del caso de negocio para un piloto de bombeo electrosumergible con motor de imanes permanentes (PMM) para la reducción de consumo energético y el aumento de la eficiencia en un campo de Ecopetrol [Tesis de grado, Fundación Universidad de América].

U.S. Energy Information Administration. (2023). eia. Recuperado de <https://www.eia.gov/>

Unidad de Planeación Minero Energetica. (2022, 5 de agosto). UPME. Recuperado de https://www1.upme.gov.co/Normatividad/320_2022.pdf

ANEXOS

Anexo A. Abreviaturas.

- AC: Corriente alterna
- ACP: Asociación Colombiana del petróleo
- ANH: Agencia nacional de hidrocarburo
- API: Instituto americano del petróleo (por sus siglas en inglés American)
- Bbl: Barriles
- BES: Bombeo electrosumergible
- BFPD: Barriles de fluido por día
- BOPD: Barriles de aceite por día
- BSW: Porcentaje de agua y sedimentos (por sus siglas en inglés Basic)
- CC: corriente continúa.
- COP: peso colombiano.
- e.a: efectivo anual.
- ECP: Ecopetrol.
- EMF: Fuerza electromotriz (por sus siglas en inglés electromotive force)
- EPP: Elementos de protección personal.
extensión).
- ft: pie (por sus siglas en inglés Feet).
- GOR: Relación gas-aceite (por sus siglas en inglés Gas-oil ratio)
- HP: Potencia.
- Hz: Hertz.
- I: Corriente.
- IM: Motor de inducción (por sus siglas en inglés Induction motor).
- In: Pulgada (por sus siglas en inglés Inch).
intake pump).
- IP: índice de productividad.
- Km: kilómetros.

KVA: Kilovoltiamperio.

KW: Kilowatt.

KWh: Kilowatt hora.

Lb: libras.

MD: profundidad medida (por sus siglas en inglés Measured Depth).

MLE: Extensión del cable del motor (por sus siglas en inglés Motor lead

mm: milímetros.

motor magnet).

MW: megawatts.

OD: Diámetro externo (por sus siglas en inglés Outside or outer diameter).

Petroleum Institute).

PF: Factor de potencia.

PIP: presión a la entrada de la bomba (Por sus siglas en inglés Pressure

PMM: Motores de imanes permanentes (por sus siglas en inglés Permanent

ppm: parte por millón.

Psi: libras por pulgada cuadrada (por sus siglas en inglés Pound square inch)

RPM: Revoluciones por minutos.

Scf: Pies cúbicos estándar (por sus siglas en inglés Standart cubic feet).

sediments and water)

SG: Gravedad específica.

STB: Barriles de tanque de almacenamiento (por sus siglas en inglés Stock

SUT: Transformador elevador (por sus siglas en inglés Step up

Tank Barrels).

TRM: Tasa representativa del mercado.

TVD: Altura vertical verdadera (por sus siglas en ingles True Vertical Deep),

USD: Dólar de los Estados Unidos de Norteamérica (por sus siglas en inglés United States Dólar).

V: voltaje.

Vol: Volumen.

VSD: Variador de frecuencia (por sus siglas en inglés Variable speed drive).