

**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**

**BRANDERLEY SOLANO GIRALDO  
SANTIAGO VARGAS LÓPEZ**

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

**BRANDERLEY SOLANO GIRALDO  
SANTIAGO VARGAS LÓPEZ**

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

**Director:  
JORGE IVÁN SALAZAR AGUDELO  
Ingeniero de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C  
2019**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
Firma del jurado

Ing. Manuel Guillermo Aldana Arevalo

\_\_\_\_\_  
Firma del jurado

Ing. Angie Tatiana Ortega Ramírez

Bogotá D.C, Agosto de 2019

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente institucional y Rector Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCIA PEÑA

Vicerrector de desarrollo y recursos humanos

Dr. LUÍS JAIME POSADA GARCÍA PENA

Vicerrectora académica y de posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano facultad de ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director programa de ingeniería de petróleos

Ing. JUAN CARLOS RODRÍGUEZ ESPARZA

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

Se autoriza a los usuarios interesados para consultar y reproducir parcial o totalmente este trabajo de grado con fines académicos y de investigación, siempre y cuando se haga la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y sus autores.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a Dios por darme a mí y a mi familia la fuerza, la voluntad, la salud y la capacidad para sacar este proyecto adelante.

A mis amigos de la universidad que de una u otra forma estuvieron ayudándome en todo este proceso.

Al grupo de taekwondo y al profesor Dubeimar por brindarme ese apoyo y confianza para todas las actividades que desempeñamos como equipo.

A mi papá Brando Solano por apoyarme en ciertos momentos de la carrera y de mi vida.

A los asesores de la universidad por guiarnos y ayudarnos en todo el proceso para el desarrollo de este trabajo de grado.

A los ingenieros Oscar Anaya, Johanna Forero y María Angélica Valencia quienes nos guiaron, nos ayudaron y nos brindaron todo lo necesario para desarrollar de la mejor manera este trabajo.

A mi compañero de trabajo de grado Santiago Vargas, quien me dio la confianza para desarrollar este proyecto junto a él, doy gracias a Dios por darme a una excelente persona y espero que éste no sea el último proyecto que desarrollemos juntos. Le deseo lo mejor en su proyecto de vida.

A mis tíos, mis tías, mis primos, mis primas, mi hermano y demás familiares que siempre estuvieron pendientes de mí, por darme ese apoyo incondicional en todas mis actividades.

Por último, pero más importante, quiero agradecerle a mi mamá Claudia Milena Giraldo y a mis abuelos, María Serna y Julio César Giraldo. Ellos fueron las personas que siempre estuvieron a mi lado, siempre me apoyaron en todos los sentidos y siempre dieron todo para sacarme adelante, me faltará tiempo para devolverles todo que hicieron por mí.

Branderley Solano Giraldo

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mi familia ya que ellos siempre fueron ese motor para salir adelante, ellos siempre me apoyaron en cada decisión de mi vida y sin ellos esto no hubiese sido posible. Todo lo que soy se lo debo a ustedes, gracias por todo.

**BRANDERLEY SOLANO GIRALDO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi familia personas en las cuales siempre he podido apoyarme y confiar, me llenaron de energía durante todo este proceso para poder culminarlo de la mejor manera.

A mi mamá Esmeralda López, porque siempre estuvo al frente del cañón levantándome cada vez que caía, porque ha vivido mis alegrías como si fueran suyas.

A mi papá William Vargas, por ser esa persona única que me sube el ánimo, me llenaba el tanque para seguir el camino hacia esta meta.

A mi hermana Mary, siempre me das el extra de calma que necesitaba en momentos límites.

A mi tío Henry López, porque he tenido su consejo y asesoría, siempre siguiéndome los pasos dándome la guía para poder culminar mis objetivos.

A Claus, sin tus asesorías con paciencia y cariño no hubiese tenido bases para disfrutar la carrera como lo hice.

A Oneia Guarín, eres un apoyo constante, gracias por brindarme todo tu cariño.

A Branderley Solano, Gracias, no pude contar con un mejor compañero, mi amigo, aliado de batalla, esta no será la primera ni la última, espero que la vida le depara lo mejor siempre.

A la Ing. María Angélica Valencia, por darme la oportunidad de vincularme y conocer la vida dentro de la industria de hidrocarburos.

Al Ing. Óscar Anaya, por ser un excelente guía a través de este proyecto, asesorarnos técnicamente con la mayor claridad, una disposición única y la mejor actitud para que este proyecto fuese una sinergia absoluta.

Al Ing. Sebastián Gómez Por asesorarnos académicamente durante todo el desarrollo del proyecto.

Santiago Vargas López



## DEDICATORIA

Este trabajo de grado lo dedico a mi núcleo familiar, mi madre, Esmeralda, mi padre, William y mi hermana Valentina porque gracias a ellos, su compañía constante, su amor y su incondicionalidad he podido conseguir un objetivo más.

**SANTIAGO VARGAS LÓPEZ**

## CONTENIDO

	pag.
INTRODUCCIÓN	23
OBJETIVOS	24
1. GENERALIDADES, SISTEMAS DE PRODUCCIÓN Y GEOLOGÍA DE CAMPO RUBIALES	25
1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE CAMPO RUBIALES	25
1.2 LOCALIZACIÓN	26
1.3 MARCO GEOLÓGICO	28
1.3.1 Estratigrafía.	28
1.3.1.1 Formación Une.	30
1.3.1.2 Formación Gacheta.	30
1.3.1.3 Formación Guadalupe.	30
1.3.1.4 Formación Barco	30
1.3.1.5 Formación Los Cuervos.	31
1.3.1.6 Formación Mirador.	31
1.3.1.7 Formación Carbonera.	31
1.3.1.8 Formación León.	32
1.3.1.9 Formación Guayabo	33
1.3.2 Geología estructural.	33
1.3.3.1 Roca generadora.	35
1.3.3.2 Roca Reservorio.	35
1.3.3.3 Migración	35
1.3.3.4 Roca sello	35
1.3.3.5 Mecanismo de entrampamiento.	36
1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO	36
1.4.1 Método de producción	36
1.4.2 Tiempo de producción.	37
1.4.3 Numero de pozos.	37
1.4.4 Características del yacimiento.	37
1.4.5 Curva de producción.	37
1.5 SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	40
1.5.1 Bombeo electrosumergible (BES)	41
1.5.1.1 Equipos en superficie	42
1.5.1.2 Equipos en fondo	44
1.5.2 Motor de inducción.	47
1.5.3 Motor de Imanes permmanentes	48
1.5.3.1 Ventajas del motor con imanes permanentes.	49

2. DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE LA PRUEBA EN BANCO	50
2.1 OBJETIVOS DE LA PRUEBA EN BANCO	50
2.2 COMPROMISOS	51
2.2.1 Compromiso de la empresa mediadora	51
2.2.2 Compromiso de las empresas proveedoras	51
2.2.3 Compromiso de Ecopetrol S.A	52
2.3 DESARROLLO DE LA PRUEBA	52
2.3.1 Instrumentación y puntos de medición	53
2.3.1.1 PQM (medidor de calidad de Red)	54
2.3.1.2 Analizador de energía	54
2.3.1.3 Osciloscopio	55
2.3.1.4 Multímetro con divisor de Voltaje	55
2.3.1.5 Pinza Volti-amperimétrica	55
2.3.1.6 Cámara termográfica 1 y 2	55
2.3.1.7 Encoder	55
2.3.1.8 Alineador de ejes	56
2.3.1.9 Comprobador de aislamiento	56
2.3.2 Formato a utilizar en la prueba.	56
3. PRUEBAS EN BANCO.	59
3.1 PRUEBAS REALIZADAS POR LAS EMPRESAS OPERADORAS A Y B	61
3.1.1 Pruebas realizadas por la empresa A.	61
3.1.1.1 Resultados PMM vs IM, motor 330 HP.	61
3.1.1.2 Resultados PMM vs IM, motor 925 HP.	63
3.1.1.3 Conclusiones pruebas empresa A.	65
3.1.2 Pruebas realizadas por la empresa B.	66
3.2 PRUEBAS SIMULADAS DE ACUERDO A POZO TIPO 5.	66
3.2.1 Pozo tipo 5.	66
3.2.2 Descripción pozo tipo 5 para pruebas simuladas.	69
3.2.2.1 Survey	69
3.2.2.2 Estado mecánico.	70
3.2.2.3 Viscosidad de la mezcla de acuerdo al corte de agua.	71
3.2.2.4 Información PVT.	72
3.2.2.5 Información adicional.	73
3.2.3 Simulación de las pruebas.	74
3.2.3.1 Parámetros constantes dentro de la simulación.	74
3.2.3.2 Pruebas compañía A.	76
3.2.3.3 Pruebas compañía B.	80
3.2.3.4 Resultados compañía C.	84
3.2.4 Análisis de los resultados.	91
3.2.4.1 Análisis para motores de inducción (IM).	93
3.2.4.2 Análisis para motores de imanes permanentes (PMM)	93
3.2.4.3 Análisis para motores de inducción (IM) vs motores de imanes permanentes (PMM)	94

4. SIMULACION CON MOTOR DE IMANES PERMANENTES A 5 POZOS DE CAMPO RUBIALES.	97
4.1 SELECCIÓN DE 5 POZOS DE CAMPO RUBIALES.	97
4.2 SIMULACIONES.	98
4.2.1 Simulación motora PMM compañía B para el pozo SB01	98
4.2.1.1 Premisas SB01	98
4.2.1.2 Resultados simulación pozo SB01	99
4.2.2 Simulación del motor PMM compañía B para el pozo SB02.	99
4.2.2.1 Premisas SB02	100
4.2.2.2 Resultados simulación pozo SB02	100
4.2.3 Simulación del motor PMM compañía B para el pozo SB03.	101
4.2.3.1 Premisa SB03	101
4.2.3.2 Resultados simulación pozo SB03	102
4.2.4 Simulación del motor PMM compañía B para el pozo SB04.	103
4.2.4.1 Premisas SB04	103
4.2.4.2 Resultados simulación SB04	103
4.2.5 Simulación del motor PMM compañía B para el pozo SB05.	104
4.2.5.1 Premisas SB05	104
4.2.5.2 Resultados simulación motor SB05	105
4.2.6 Análisis de resultados de las simulaciones.	106
5. ESTUDIO DE CASO DE NEGOCIO	108
5.1 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DEL CASO DE NEGOCIO	108
5.2 EVALUACIÓN FINANCIERA 1 POZO PILOTO	111
5.2.1 Evaluación a un pozo piloto con tarifa de red.	113
5.2.2 Evaluación a un pozo piloto con tarifa de red.	114
5.3 CASO DE NEGOCIO CAMPAÑA 2019 -2030	120
5.3.1 Evaluación de la implementación de PMM en las campañas de perforación del Campo Rubiales (2019-2025) y producción hasta el 2030 abastecida con energía proveniente de red	122
5.3.2 Evaluación de la implementación de PMM en las campañas de perforación del Campo Rubiales (2019-2025) y producción hasta el 2030 abastecida con energía proveniente de red y generación local (Tarifa ponderada).	129
6. CONCLUSIONES	133
7. RECOMENDACIONES	135
BIBLIOGRAFIA	136
ANEXOS	138

## LISTA DE FIGURAS

	pag.
Figura 1. a: mapa bloque correspondiente a campo rubiales. b: mapa de la ubicación de campo rubiales en Colombia. c: mapa ruta de acceso vehicular Bogotá d.c – campo rubiales	27
Figura 2. columna estratigráfica, cuenca de los llanos orientales	29
Figura 3. esquema cuenca de los llanos orientales	33
Figura 4. perfil a-a' correspondiente a la cuenca de los llanos orientales	34
Figura 5. perfil estructural cuenca llanos orientales, campo rubiales.	34
Figura 6. esquema del empuje por acuífero activo.	36
Figura 7. diseño básico de un bombeo electrosumergible	42
Figura 8. motor de inducción	47
Figura 9. motor de inducción vs motor de imanes permanentes	49
Figura 10. diagrama de flujo con los pasos a seguir en la prueba en banco.	53
Figura 11. gráfica: instrumentación y puntos de medición.	54
Figura 12. ahorro energético de acuerdo a los equipos puntuales en fondo y superficie para el sistema de levantamiento artificial de bombeo electrosumergible con motor pmm	60
Figura 13. grafica resultados motores pmm vs im - 330 hp	63
Figura 14. grafica resultados motores pmm vs im para motores de 925hp.	65
Figura 15. estado mecánico tipo pozo productor horizontal	71
Figura 16. cable de potencia para simulación	75
Figura 17. características de la bomba utilizada en la simulación	76
Figura 18. simulación del motor de inducción de la compañía A	77
Figura 19. estado mecánico del motor de inducción de la compañía A	78
Figura 20. simulación del motor de imanes permanentes de la compañía A	79
Figura 21. estado mecánico del motor de imanes permanentes de la compañía A	80
Figura 22. simulación del motor de inducción de la compañía B	81
Figura 23. estado mecánico del motor de inducción de la compañía B	82
Figura 24. simulación del motor de imanes permanentes de la compañía B	83
Figura 25. estado mecánico del motor de imanes permanentes de la compañía B	84
Figura 26. curvas de rendimiento del motor de inducción compañía C (factor de potencia)	85
Figura 27. curvas de rendimiento del motor de inducción compañía C (velocidad)	86
Figura 28. curvas de rendimiento del motor de inducción compañía C (eficiencia)	87
Figura 29. curvas de rendimiento del motor de imanes permanentes compañía C (factor de potencia)	88
Figura 30. curvas de rendimiento del motor de imanes permanentes (pmm) compañía C (velocidad)	89

Figura 31. curvas de rendimiento del motor de imanes permanentes compañía C (eficiencia)	90
Figura 32. simulación para el pozo SB01 con el motor PMM	99
Figura 33. simulación para el pozo SB02 con el motor PMM	101
Figura 34. simulación para el pozo SB03 con el motor PMM	102
Figura 35. simulación para el pozo SB04 con el motor PMM	104
Figura 36. simulación para el pozo SB05 con el motor PMM	105

## LISTA DE GRAFICAS

	pag.
Gráfica 1. Pozos perforados y producción entre 1981- 2017.	38
Gráfica 2. curva acumulada de producción de agua y producción de aceite en campo rubiales.	39
Gráfica 3. Porcentaje bsw entre años 2000-2019 para campo rubiales.	40
Gráfica 4. resultados del motor de inducción	93
Gráfica 5. Resultados del motor de imanes permanentes	94
Gráfica 6. Resultados de todos los motores	95
Gráfica 7. Ahorro de costos acumulados en consumo de energía IM vs PMM tarifa de red (2019 desde mitad de año- 2025)	113
Gráfica 8. Inversiones y ahorros - 1 pozo (\$kUSD). Tarifa red, reducción del 10%.	115
Gráfica 9. Ahorro en consumo energético acumulado. Sensibilidades en el rango de 9% a 13% de entre el pmm vs. Im, tarifa ponderada.	117
Gráfica 10. Inversión y ahorros para 1 pozo en \$kUSD, tarifa ponderada y con ahorro energético del 10%.	119
Gráfica 11. Ahorro de energía PMM @ 10% a 2030 tarifa red.	120
Gráfica 12. Ahorro en consumo energético acumulado con sensibilidades en el rango de 9% al 13% entre PMM vs IM a 2030, tarifas de red.	121
Gráfica 13. Reducción en potencia pmm v.s. Im con ahorro del 10% a 2030.	122
Gráfica 14. Inversión y ahorros para el total de la campaña en musd, ahorro energético del 10% y tarifa de red	123
Gráfica 15. Ahorros energéticos vs diferencia de capex con tarifa de red.	124
Gráfica 16. Punto de quiebre del proyecto con tarifa de red.	125
Gráfica 17. Ahorros anualizados sin diferencia de costos de adquisición de equipos pmm vs im, tarifa de red.	126
Gráfica 18. Ahorro de energía PMM @ 10% a 2030 con tarifa ponderada.	127
Gráfica 19. Ahorro en consumo energético acumulado con sensibilidades en el rango de 9% al 13% entre pmm vs im a 2030, tarifa ponderada.	128
Gráfica 20. Inversión y ahorros para el total de la campaña en musd, ahorro energético del 10% y tarifa ponderada.	129
Gráfica 21. Ahorros energéticos vs diferencia de capex con tarifa ponderada.	130
Gráfica 22. Punto de quiebre del proyecto con tarifa ponderada.	131
Gráfica 23. Ahorros anualizados sin diferencia de costos de adquisición de equipos PMM vs IM	132

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. diferentes secciones de un bombeo electrosomergible y sus respectivas partes.	41
Tabla 2. formato para la adquisición de datos (sección temperatura)	57
Tabla 3. formato para la adquisición de datos (sección variador de frecuencia)	57
Tabla 4. formato para la adquisición de datos (sección motor dc)	58
Tabla 5. resultados de las pruebas LY-180	62
Tabla 6. resultados de las pruebas LY-140	64
Tabla 7. características de acuerdo al tipo de pozo	66
Tabla 8. survey de un pozo tipo 5	70
Tabla 9. viscosidad de la mezcla en función del corte de agua	72
Tabla 10. información PVT	72
Tabla 11. información adicional	73
Tabla 12. resultados motor IM compañía C	91
Tabla 13. resultados motor PMM compañía C	91
Tabla 14. resultados de las diferentes compañías evaluadas	92
Tabla 15. porcentaje de ahorro y diferencial de eficiencia entre PMM VS IM	96
Tabla 16. parámetros de los pozos con motores IM	98
Tabla 17. resultados de las simulaciones con ahorro energético.	106
Tabla 18. diferencial de eficiencia entre PMM VS IM.	107
Tabla 19. pozos nuevos para campo rubiales 2019-2025 (pronóstico del área de yacimientos).	109
Tabla 20. costo de suministro de equipos de fondo y superficie por cada año (para un pozo).	109
Tabla 21. proyección de tarifas de energía y ponderación por tipo de fuente en campo rubiales	110
Tabla 22. ahorro de costos acumulados en consumo de energía IM VS PMM tarifa de red.	112
Tabla 23. flujo de caja abastecimiento energético de red (2019-2025).	114
Tabla 24. resumen de indicadores económicos para 1 pozo según % de ahorro energético, con tarifa de red.	115
Tabla 25. ahorro de costos acumulados en consumo de energía IM VS PMM tarifa de generación local.	116
Tabla 26. flujo de caja abastecimiento energético de generación local (2019-2025).	118
Tabla 27. resumen de indicadores económicos para 1 pozo según % de ahorro energético, con tarifa de generación local.	119
Tabla 28. resumen de indicadores económicos según % de ahorro energético, con tarifa de red.	123
Tabla 29. resumen de indicadores económicos de acuerdo al ahorro energético, utilizando tarifa ponderada.	130



## GLOSARIO

**ARCILLA:** partículas finas, generalmente de silicatos, de dimensiones menores de  $1/256 \text{ mm}^1$ . Provenientes de la alteración física y química de las rocas y minerales. Los principales tipos de arcilla son: el caolín, la bentonita, la montmorillonita.

**ARENA:** fragmentos de rocas de dimensiones comprendidas entre  $1/16$  y  $2 \text{ mm}^2$ . Están compuestas mayormente de cuarzo y feldespatos, conteniendo además otros minerales, tomando el nombre del mineral de predominio o de importancia económica.

**BARRIL:** es una unidad de volumen la cual equivale a 158,987 litros, 42 galones<sup>3</sup>, es utilizada como una medida particular de la industria del petróleo, logrando una estandarización a nivel mundial como medida parámetro.

**CAMPAÑA DE PERFORACIÓN:** es la planeación que se realiza para un proceso de perforación y producción de un campo petrolero con el fin de mejorar la producción del campo, vida útil y aumentar las reservas en un periodo de tiempo determinado.

**CAMPO:** es una zona delimitada geográficamente en la cual se encuentra abundancia de hidrocarburos en el subsuelo que se encuentran en procesos de perforación y producción.

**CASING:** (Tubería de revestimiento) es una tubería de gran diámetro la cual se baja en un agujero descubierto y se cementa en el lugar, es fabricada generalmente de acero al carbono que es tratado térmicamente para lograr resistencias variables.

**CUENCA SEDIMENTARIA:** región deprimida de la corteza terrestre limitada por arcos estructurales o cadenas montañosas, donde se produce la acumulación de materiales fragmentarios o la precipitación de sustancias disueltas en las aguas que cubre la mencionada región.

**DESLIZAMIENTO:** en un motor de inducción es la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor, expresada como un porcentaje (o por unidad) de la velocidad sincrónica.

---

<sup>1</sup> Dávila Burga, J. (2011). Diccionario geológico, p.67. recuperado de <http://biblioteca.ismm.edu.cu/wp-content/uploads/2017/06/Diccionario-geologico.pdf>.

<sup>2</sup> Ibid, p.69.

<sup>3</sup> Schlumberger. Barril equivalente, (Mayo, 2019). Lugar de publicación: Oilfield Glossary. [https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/b/barrel\\_equivalent.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/b/barrel_equivalent.aspx).

**ESTADO MECANICO:** son esquemas donde se visualizan los diámetros de tuberías que cumplen con los requerimientos técnicos establecidos después de realizar una ingeniería de detalle para la selección de las tuberías de revestimiento.

**ESTRATIGRAFIA:** es la ciencia que estudia la secuencia o sucesión de las capas o estratos que se han formado a través del tiempo geológico. La estratigrafía tiene dos bases fundamentales en el estudio de la secuencia: la de los fósiles que marca la edad relativa de las capas y de las facies que determina la naturaleza y el origen de los materiales.

**FACIE:** conjunto de caracteres y condiciones físicas, químicas, ambientales y paleontológicas, mediante las cuales se produjeron las deposiciones litológicas.

**FACTOR DE POTENCIA:** es el cociente de la relación entre potencia activa o real y la potencia aparente, este término es utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se convierte en trabajo.

**FORMACIÓN:** es una secuencia de rocas, generalmente de características semejantes, en cuanto a litología, fósiles y edad. Por lo tanto, poseen una facies semejante, cuencas de deposición semejantes y cercanas, y fuentes de aportes de materiales también semejantes. Algunas formaciones tienen gran extensión territorial.

**FRECUENCIA:** es una magnitud la cual permite medir el número de repeticiones de un suceso o fenómeno que se presenta periódicamente.

**INDICE DE PRODUCCIÓN:** (IP) es la razón de productividad en barriles por día a la presión diferencial, medida del potencial del pozo o de su capacidad de producir, es una propiedad importante a tener en cuenta en un pozo.

**INFRAYACENTE:** estrato o roca que reposa por debajo de otro superior.

**INTAKE:** (Entrada de la bomba), corresponde a la zona inferior de la bomba, es la zona más cercana, primera sección por la cual ingresa el fluido a la bomba.

**KERÓGENO:** materia orgánica contenida en sedimentos bituminosos y que por destilación produce aceites minerales.

**POLOS (MOTORES):** son el número de juegos de bobinados electromagnéticos de tres vías que tiene un motor. En el motor trifásico, existen 3 electroimanes separados formados por un solo juego de bobinados de tres vías.

**POTENCIA APARENTE INSTANTANEA:** es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores eficaces de tensión e intensidad. Se obtiene como la suma vectorial de las potencias activa y reactiva y representa la ocupación total de las instalaciones debidas a la conexión del receptor.

**POTENCIA ELECTRICA INSTANTANEA:** también llamada potencia activa es la que se aprovecha como potencia útil. También se llama potencia media, real o verdadera y es debida a los dispositivos resistivos. Su unidad de medida en el vatio (W).

**POZO:** es un agujero perforado que permite la conexión entre el yacimiento y la superficie, este puede tener diversas funciones como producir hidrocarburos o inyectar fluidos para propiciar la producción de estos recursos energéticos.

**POZO PILOTO:** es un pozo el cual se utiliza para poner a prueba el desarrollo de nuevas tecnologías propiciando que mejoren procesos y sean implementados al campo.

**PRESION:** es una magnitud física que mide la fuerza ejercida sobre determinada área, posee dirección perpendicular a la unidad de superficie.

**PRUEBA EN BANCO:** son pruebas que se realizan en un ambiente controlado y neutral, propiciando la medición de factores puntuales o específicos de un equipo.

**PUNTO BURBUJA:** condiciones de presión y temperatura a las cuales sale la primera burbuja del gas en solución del petróleo. Cuando se descubren, todos los petróleos de los yacimientos de petróleo contienen algún gas natural en solución.

**PUNTO DE QUIEBRE:** es el momento cuando en un proyecto desarrollado por medio de una inversión inicial, la cantidad de dinero que adeuda, comienza a ser superior al capital que posee.

**RUN LIFE:** es la vida de uso que se calcula tiene un motor durante su periodo de producción a un caudal constante.

**SUBPUMP:** es un software el cual permite realizar diseños para la optimización de los sistemas de bombeo electrosumergible, analizando el rendimiento de las bombas existentes en un campo o la unidad.

**SUPRAYACENTE:** material (estrato o roca) que reposa sobre otro material.

**SURVEY:** son un conjunto de datos medidos y registrados con referencia al pozo perforado, brindando claridad sobre las dimensiones y características de este.

**VARIADOR DE FRECUENCIA:** (VFD) es un sistema para el control de la velocidad de giro en motores de corriente alterna mediante el control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

## ABREVIATURAS

<b>AC:</b>	Corriente alterna
<b>ACP:</b>	Asociación Colombiana del petróleo
<b>ANH:</b>	Agencia nacional de hidrocarburo
<b>API:</b>	Instituto americano del petróleo (por sus siglas en inglés American Petroleum Institute).
<b>Bbl:</b>	Barriles
<b>BES:</b>	Bombeo electrosumergible
<b>BFPD:</b>	Barriles de fluido por día
<b>BOPD:</b>	Barriles de aceite por día
<b>BSW:</b>	Porcentaje de agua y sedimentos (por sus siglas en inglés Basic sediments and water)
<b>cc:</b>	centímetros cúbicos.
<b>CC:</b>	corriente continúa.
<b>COP:</b>	Peso Colombiano.
<b>cP:</b>	Centipoise.
<b>DC:</b>	Corriente directa.
<b>e.a:</b>	efectivo anual.
<b>ECP:</b>	Ecopetrol.
<b>EFF:</b>	Eficiencia.
<b>EPP:</b>	Elementos de protección personal.
<b>ft:</b>	pie (por sus siglas en inglés Feet).
<b>GOR:</b>	Relación gas-aceite (por sus siglas en inglés Gas-oil ratio)
<b>gr:</b>	gramos.
<b>HP:</b>	Potencia.
<b>Hz:</b>	Hertz.
<b>I:</b>	Corriente.
<b>IM:</b>	Motor de inducción (por sus siglas en inglés Induction motor).
<b>In:</b>	Pulgada (por sus siglas en inglés Inch).
<b>IP:</b>	índice de productividad.
<b>Km:</b>	kilómetros.
<b>KVA:</b>	Kilovoltiamperio.
<b>KW:</b>	Kilowatt.
<b>KWh:</b>	Kilowatt hora.
<b>Lb:</b>	libras.
<b>MD:</b>	profundidad medida (por sus siglas en inglés Measured Depth).
<b>MLE:</b>	Extensión del cable del motor (por sus siglas en inglés Motor lead extensión).
<b>mm:</b>	milímetros.

**MW:** megawatts.  
**N:** velocidad de sincronización.  
**OD:** Diámetro externo (por sus siglas en inglés Outside or outer diameter).  
**OOIP:** petróleo original in situ (por sus siglas en inglés Original oil in place).  
**OWOC:** Contacto original agua petróleo (original wáter oil contact).  
**PF:** Factor de potencia.  
**PIP:** presión a la entrada de la bomba (Por sus siglas en inglés Pressure intake pump).  
**PMM:** Motores de imanes permanentes (por sus siglas en inglés Permanent motor magnet).  
**ppm:** parte por millón.  
**PQM:** Medidor de calidad de frecuencia (por sus siglas en inglés Power quality meter).  
**Psi:** libras por pulgada cuadrada (por sus siglas en inglés Pound square inch)  
**PVT:** Presión volumen y temperatura.  
**RPM:** Revoluciones por minutos.  
**Scf:** Pies cúbicos estándar (por sus siglas en inglés Standart cubic feet).  
**SG:** Gravedad específica.  
**STB:** Barriles de tanque de almacenamiento (por sus siglas en inglés Stock Tank Barrels).  
**SUT:** Transformador elevador (por sus siglas en inglés Step up transformer).  
**TIO:** tasa interna de oportunidad.  
**TOC:** Carbón orgánico total (por sus siglas en inglés Total organic carbón).  
**TRM:** Tasa representativa del mercado.  
**USD:** Dólar de los Estados Unidos de Norteamérica (por sus siglas en inglés United States Dólar).  
**V:** voltaje.  
**Vol:** Volumen.  
**VPN:** Valor presente neto.  
**VSD:** Variador de frecuencia (por sus siglas en inglés Variable speed driver).

## RESUMEN

En este trabajo de grado se realizará un caso de negocio el cual permita vislumbrar la viabilidad al implementar motores de imanes permanentes en equipos de bombeo electro sumergible.

Se caracterizó de manera detallada las principales propiedades geológicas que involucran tanto la cuenca como el campo, entre estas se encuentran: estratigrafía, geología estructural y geología del petróleo; culminando con la introducción a los aspectos propios del bombeo electrosumergible como levantamiento artificial enfatizando en los motores de inducción y motores de imanes permanentes.

A continuación, se describe el banco en prueba, un procedimiento controlado el cual se desarrolla para evaluar y conocer el comportamiento de los motores de acuerdo a la variación de diferentes condiciones, (frecuencia, carga y temperatura) las cuales condicionan el desempeño de estos. En adición se resaltarán las funciones de las tres (3) tipos de empresa que se involucran para llevar a cabo la evaluación conjuntamente.

La evaluación de ahorro energético fue desarrollada al encausar 2 frentes de acción, el primero, comparar los resultados obtenidos por dos compañías las cuales registraron resultados comparativos para pozos pilotos en campo. El segundo, se estableció en el simulador un ambiente controlado donde se compararon motores de inducción y de imanes permanentes de 3 empresas proveedoras. A partir de los resultados se estableció un valor conservador de ahorro energético.

Por último, se llevó a cabo el análisis financiero mediante el cálculo de Valor presente neto (VPN). Este análisis consta de dos partes, la primera se compone del análisis financiero para un solo pozo teniendo en cuenta los costos de consumo energético (Red o generación local) y los costos del equipo; la segunda parte, incluye el análisis financiero para toda la campaña de perforación (700 pozos) para el periodo 2019 – 2025, haciendo énfasis igualmente en los costos de consumo energético y los equipos.

### PALABRAS CLAVE

- Campo Rubiales
- Bombeo Electrosumergible
- Motor de inducción
- Motor de imanes permanentes
- Eficiencia
- Ahorro energético
- Simulación

## INTRODUCCIÓN

El proyecto tiene como objetivo principal realizar un análisis financiero para evaluar la viabilidad de la implementación de motores de imanes permanentes (PMM) en los sistemas de bombeo electrosumergible en Campo Rubiales de Ecopetrol. Para ello, se compararán dichos motores PMM con los motores que operan actualmente en el campo (Motores de inducción, IM). Los criterios de comparación entre ambos motores son. Eficiencia, debido a que en los motores de inducción a menor carga este factor se reduce algo que con los motores PMM se esperaría no suceda. Factor de potencia, nos permitirá evaluar el correcto aprovechamiento de la energía por el motor, y ahorro energético, al utilizar PMM no se debe inducir electricidad a las bobinas propiciando el campo magnético, por ende, el consumo energético debería reducirse.

Para establecer los rangos operativos de los criterios de comparación previamente establecidos, se contó con el software SUBpump. Este programa poseía información de ambos motores para la compañía A y B. Para la compañía C, fue necesario obtener las curvas de desempeño de ambos motores. Con estos resultados será posible evaluar las características operativas de las diferentes opciones a condiciones controladas establecidas previamente, decantando cada uno de estos de acuerdo a los resultados y definiendo un valor conservador para posteriormente desarrollar el análisis financiero.

El análisis financiero permitirá establecer los valores económicos con los cuales se concluirá si el motor de imanes permanentes es una opción viable para implementar en Campo rubiales reduciendo el consumo energético y aumentando la eficiencia, Se tuvieron en cuenta los indicadores brindados por Ecopetrol referentes a: la tasa de cambio, la tasa de interés de oportunidad, (TIO) propia del campo, el consumo promedio de un pozo tipo 5 y el costo de los equipos.

El desarrollo de este trabajo aumentara la certidumbre frente al uso de motores de imanes permanentes y sus virtudes económicas frente a los motores de inducción usadas por el bombeo electrosumergible, teniendo en cuenta la relevancia de este tipo de levantamiento artificial dentro de las operaciones de campo rubiales y los demás campos de Ecopetrol S.A.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar el 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 S.A.

### **Objetivos específicos**

1. Describir generalidades, sistemas de producción y Geología del campo de Ecopetrol S.A.
2. Desarrollar el protocolo de prueba en banco para la evaluación de los motores de imanes permanentes y motores de inducción brindados por los proveedores.
3. Evaluar el comportamiento de los motores usados en la prueba en banco, entre motores de inducción y motores de imanes permanentes.
4. Seleccionar los motores de imanes permanentes con los mejores resultados de la prueba en banco.
5. Escoger 5 pozos candidatos con alto consumo energético en Campo Rubiales para el desarrollo de la simulación.
6. Simular para la obtención de la eficiencia y consumo energético de los pozos con el motor seleccionado a partir de un análisis nodal de fondo.
7. Realizar el análisis financiero a partir del cálculo del Valor presente neto (VPN) como indicador de acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación para la realización del caso de negocio.



## **1. GENERALIDADES, SISTEMAS DE PRODUCCIÓN Y GEOLOGÍA DE CAMPO RUBIALES**

Campo rubiales es uno de los campos más importantes de Colombia esto debido a su capacidad de producción y el desarrollo interno que ha tenido, a continuación, se expondrán temas de importancia para contextualizar este campo en temas como su historia, geología y producción.

### **1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE CAMPO RUBIALES**

Campo rubiales fue descubierto en el año 1981 por Intercol, una empresa subsidiaria de Exxon en Colombia, el desarrollo inicio con la perforación del pozo Rubiales-1 el cual a una profundidad de 3.100 pies dio muestras del hidrocarburo el cual presento una gravedad API de 13,5 , de acuerdo con la Asociación Colombiana del Petróleo, (ACP) la complejidad del yacimiento, las dificultades de acceso, los precios del petróleo del momento y la situación de inseguridad dificultaron su crecimiento a pesar de que varias compañías apostaron a su desarrollo.

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 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 logró reiniciar las actividades operacionales del campo, un año después, Tethys Petroleum fue asignada como la empresa que operaria 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 llego 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 este tipo de pozos.<sup>4</sup>

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 registró la mayor producción en la historia del campo 212.115 barriles diarios producidos.

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.

Actualmente se desarrolla un plan de acción el cual consiste en la perforación de 700 pozos productores este plan se ve condicionado por la problemática social, economía mundial y precio del barril, dicho plan está contemplado entre el 2019 y el 2025.

## 1.2 LOCALIZACIÓN

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 rubiales<sup>5</sup>, esta ruta se

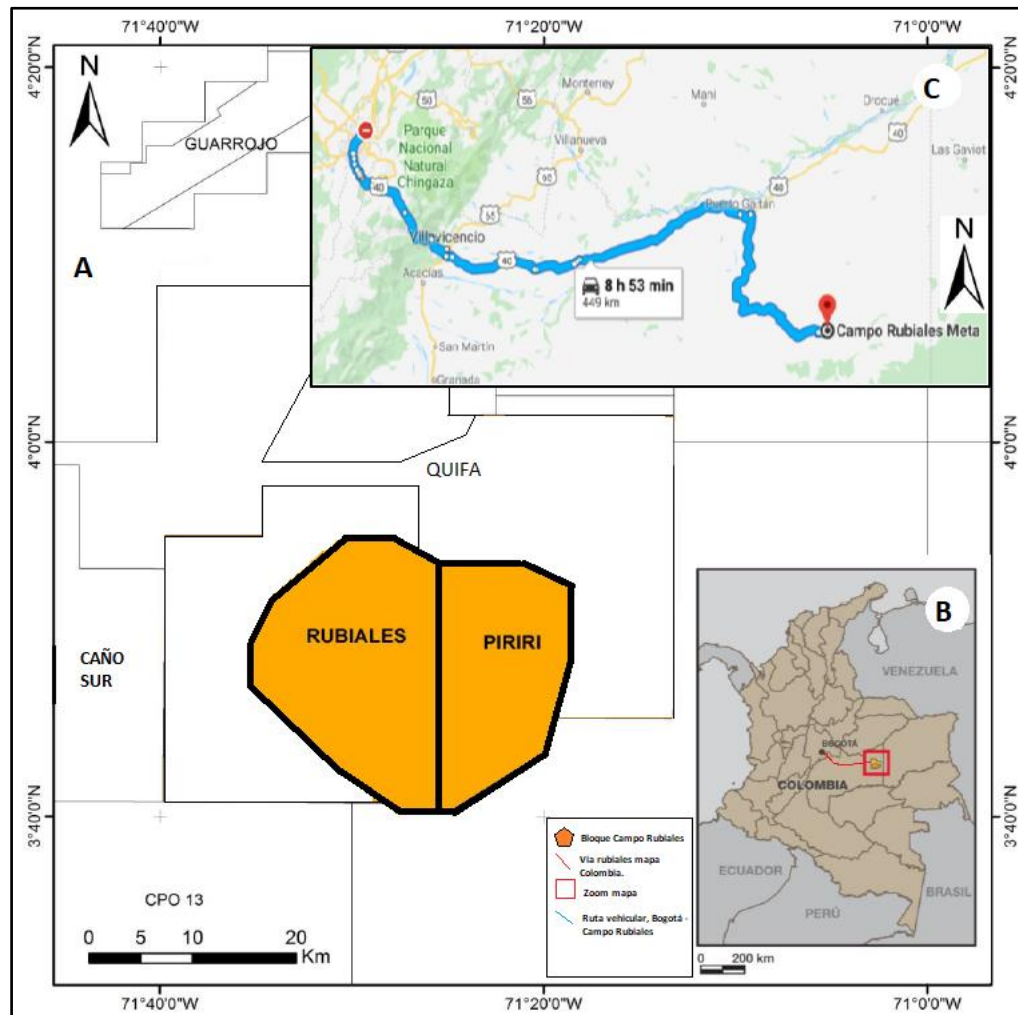
---

<sup>4</sup> Flórez Anaya, A., Araujo, Y. E., Uzcategui Rivas, M. E., Parra Moreno, W., & Lavado Quiñones, R. (2012, January 1). Improved Heavy Oil Recovery by Drilling Horizontal Wells in Rubiales Field, Colombia. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/153581-MS

<sup>5</sup> GOOGLE MAPS. Indicaciones Bogota - Campo Rubiales, Puerto Gaitan, Meta [en línea]. [Consultado: 15 de marzo de 2019]. Disponible en: <http://shorturl.at/gimqu>.

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 lluvia.

**Figura 1. A: Mapa bloque correspondiente a Campo Rubiales. B: Mapa De la ubicación de Campo Rubiales en Colombia. C: Mapa Ruta de acceso vehicular Bogotá D.C – Campo Rubiales.**



**Fuente:** DASILVA, Ángel., GOMEZ, Yohaney., VILLA, María., YORIS, Franklin., MORALES, Diego, Oil distribution in the Carbonera Formation, Arenas Basales unit. A case study in the Quifa and Rubiales fields, Eastern Llanos Basin, Colombia, Enero 2014, pp 5. Mapa C: Google

Internamente campo rubiales tiene un área de 56.900 hectáreas dentro de las cuales cuenta con cerca de 436 km vías internas las cuales permiten el tránsito y la interconexión entre los pozos facilitando la accesibilidad para llevar acabo cualquier tipo de intervención técnica.

### 1.3 MARCO GEOLÓGICO

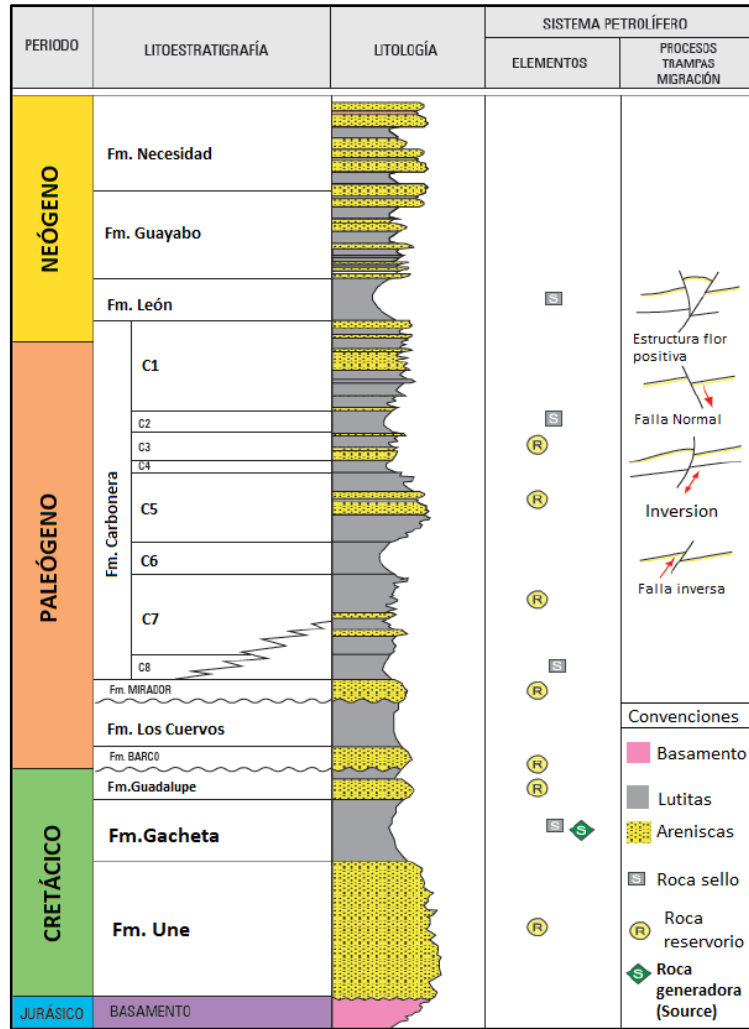
La geología es de suma importancia en la industria petrolera dado que gracias a esta es posible conocer el reservorio, sus características, el ambiente en el cual se generó el hidrocarburo, su migración y entrapamiento. Para campo Rubiales estos aspectos toman relevancia dado que a nivel regional el reservorio se 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 continuación, se expondrán las características más relevantes a nivel geológico del yacimiento.

**1.3.1 Estratigrafía.** Se constituye por rocas que van desde el paleozoico inferior (541 millones de años) hasta el terciario las secuencias se encuentran separadas por discordancias regionales.

El yacimiento corresponde a la formación Carbonera la cual pertenece al Eoceno Tardío-oligoceno temprano, en su mayoría formado de arenas basales, se ha enfatizado en que el ambiente deposicional se retribuye a la predominancia de una zona fluvial sus capas reposan sobre rocas paleozoicas denotando una discordancia, entre los 2400 y 2900 pies de profundidad se encuentra la zona de interés, debido a la poca presión litostática que sufre esta zona la región se encuentra relativamente inconsolidada lo cual beneficia su porosidad que se encuentra en proporciones entre el 25 y 33% y la permeabilidad que se encuentra en el rango entre 3 y 5 Darcys evidenciando la calidad del reservorio, Gómez. Et al. (2009)

A continuación, se presentará una breve descripción de las formaciones geológicas que pertenecen a la estratigráfica de la cuenca de los llanos orientales. **Figura 2.**

**Figura 2. Columna estratigráfica, Cuenca de los Llanos Orientales**



**Fuente:** ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos), Cuenca Llanos Orientales, Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos, Colombia, Diciembre 2012. Modificado por VARGAS, Santiago., SOLANO, Branderley.

**1.3.1.1 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 ANH<sup>6</sup> 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 meandricos 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 Gacheta.

**1.3.1.2 Formación Gacheta.** Esta formación se depositó en el Cretácico entre el Turoniano y el Coniacense 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 permeabilidad.

**1.3.1.3 Formación Guadalupe.** Según la ANH<sup>7</sup> 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 reservorio.

**1.3.1.4 Formación Barco.** Según la ANH<sup>8</sup> esta formación se depositó durante el Paleogeno 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 reservorio.

---

<sup>6</sup> ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos), Cuenca Llanos Orientales, Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos, Colombia, Diciembre 2012, pp 48.

**1.3.1.5 Formación Los Cuervos.** Según la ANH<sup>9</sup> 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 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 discordante.

**1.3.1.6 Formación Mirador.** Según la ANH<sup>10</sup> 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 Carbonera.

**1.3.1.7 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 habían 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 a la información geológica y geofísica de la ANH<sup>11</sup>:

- **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<sup>12</sup>.
- **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<sup>13</sup>.

---

<sup>7</sup> Ibid., p 48.

<sup>8</sup> Ibid., p 49.

<sup>9</sup> Ibid., p 49.

<sup>10</sup> Ibid., p 49.

<sup>11</sup> Ibid., p 50.

<sup>12</sup> Ibid., p 51.

<sup>13</sup> Ibid., p 51.

- **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<sup>14</sup>.
- **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 pies<sup>15</sup>.
- **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<sup>16</sup>.
- **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<sup>17</sup>.
- **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<sup>18</sup>.
- **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<sup>19</sup>.

**1.3.1.8 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 sello<sup>20</sup>.

---

<sup>14</sup> *Ibíd.*, p 51.

<sup>15</sup> *Ibíd.*, p 51.

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p 51.

<sup>17</sup> *Ibíd.*, p 51.

<sup>18</sup> *Ibíd.*, p 52.

<sup>19</sup> *Ibíd.*, p 52.

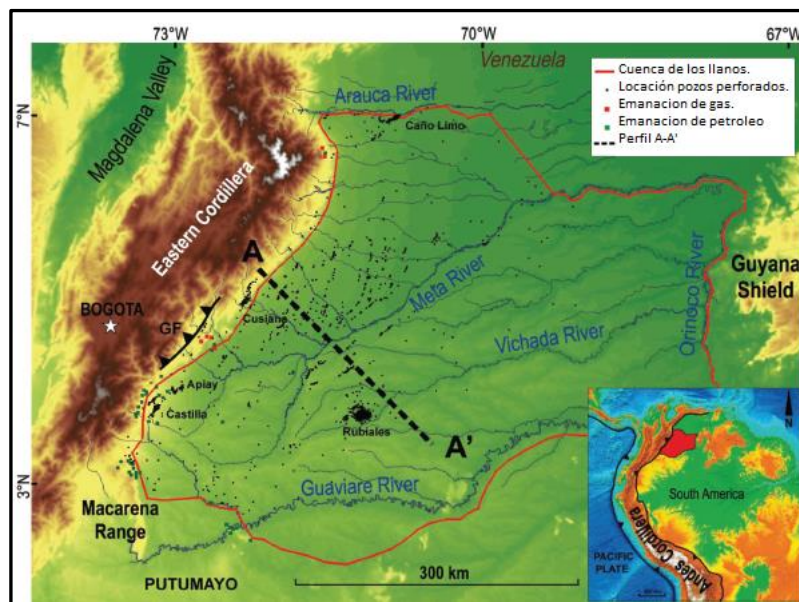
<sup>20</sup> *Ibíd.*, p 52.



**1.3.1.9 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 Guayabo<sup>21</sup>.

**1.3.2 Geología estructural.** La cuenca de los Llanos orientales, Figura 3, en su configuración se puede dividir en dos secciones con dominio estructural: El dominio del piedemonte y el dominio de los llanos lo cual se puede observar en el corte A-A', Figura 4, donde se observa que la zona comprendida por campo Rubiales es predominante el subdominio de los llanos del meta. La acreción de la Cordillera Oriental en Suramérica durante en cretácico propicio el espacio para la depositación de sedimentos en una denominada Cuenca Antepaís, el proceso termino con un evento tectónico en el Eoceno dando la posibilidad a la reactivación de la sedimentación en la cuenca especialmente en la cordillera oriental y los llanos generando depósitos de llanuras costeras y fluviales.

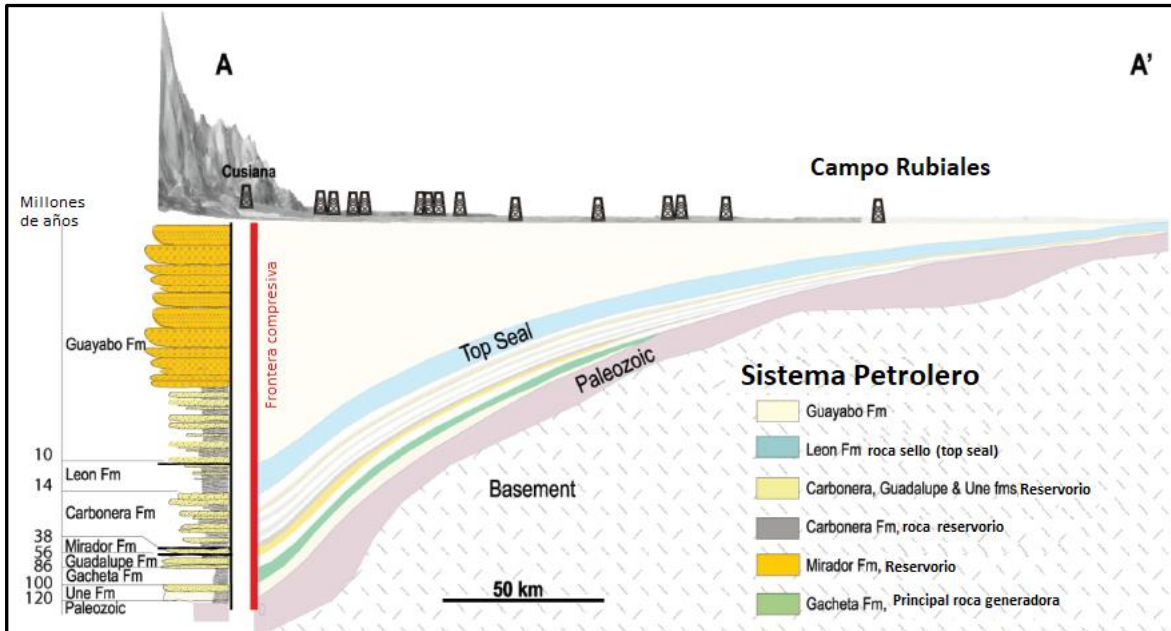
**Figura 3. Esquema Cuenca de los Llanos Orientales**



**Fuente:** GONZALEZ-PENAGOS, Felipe., MORETTI, Isabelle., GUICHET, Xavier. Fluid Flow Modeling in the Llanos Basins, Caso de estudio: AAPG memories, pp 192, Colombia, 2017. Modificado por VARGAS, Santiago. SOLANO, Branderley.

<sup>21</sup> Ibid., p 52.

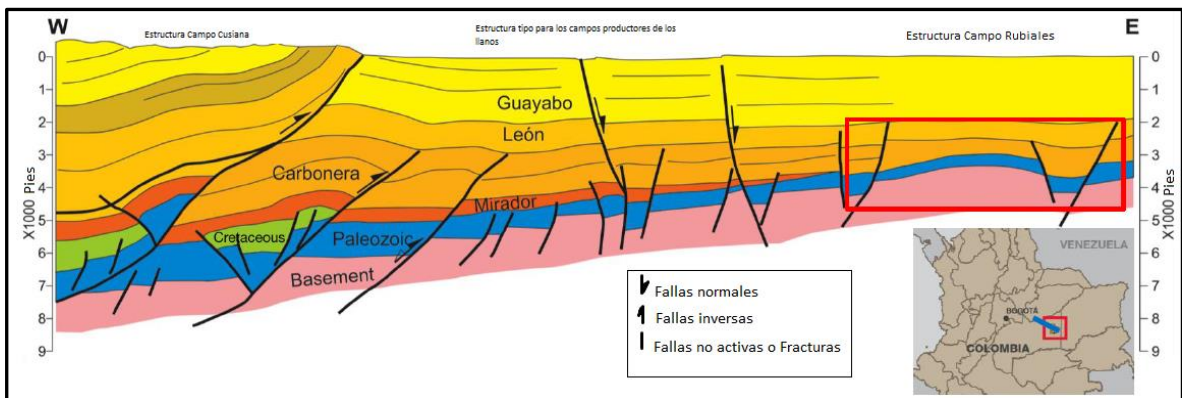
**Figura 4. Perfil A-A' Correspondiente a la Cuenca de los Llanos Orientales**



**Fuente:** GONZALEZ-PENAGOS, Felipe., MORETTI, Isabelle., GUICHET, Xavier. Fluid Flow Modeling in the Llanos Basins, Caso de estudio: AAPG memories, pp 193, Colombia, 2017. Modificado por VARGAS, Santiago. SOLANO, Branderley.

La flexión de la litosfera por sobrecarga, es decir la carga tectónica impuesta por la cordillera oriental propicia el predominio de fallas normales, **Figura 5**, en la configuración. Derivado de lo anterior se identificó que Campo rubiales se encuentra ubicado sobre un gran monoclinal el cual posee rumbo NNE-SSW.

**Figura 5. Perfil estructural Cuenca Llanos Orientales, Campo Rubiales.**



**Fuente:** DASILVA, Ángel., GOMEZ, Yohaney., VILLA, María., YORIS, Franklin., MORALES, Diego, Oil distribution in the Carbonera Formation, Arenas Basales unit. A case study in the Quifa and Rubiales fields, Eastern Lanos Basin, Colombia, Enero 2014, pp 6. Modificado por VARGAS, Santiago. SOLANO, Branderley.

**1.3.3 Geología del petróleo.** Las arenas productoras en el campo poseen entre 40 y 80 pies, se encuentran a profundidades entre 2.400 y 3.000 pies de profundidad vertical, por medio de un acuífero se genera su mecanismo de producción, su OWOC posee inclinación hacia el piedemonte, en el yacimiento la presión es de 1.170 psi a 2.700 pies de profundidad. Campo Rubiales posee un OOIP de 4.608 millones de STB, las reservas probadas se han estimado en 370 millones de STB.

**1.3.3.1 Roca generadora.** La roca generadora es la formación Gacheta, según la ANH<sup>22</sup> la materia orgánica corresponde a kerógeno tipo II (potencial generador de aceite) y tipo III (potencial generador de gas condensado), con valores buenos en promedio de riqueza orgánica (1 - 2 % TOC) en la zona comprendida por Campo Rubiales.

**1.3.3.2 Roca Reservorio.** Dentro de la formación Carbonera que presenta intercalaciones de lutitas y areniscas se encuentra la unidad C7, la cual al componerse de sedimentos con varios tamaños de grano se convierte en el reservorio ideal con permeabilidad entre 5 y 13 Darcy y porosidad entre 25% y 32% para que la migración emplace el hidrocarburo en dicha zona<sup>23</sup>.

**1.3.3.3 Migración.** De acuerdo a Dasilva (2009) <sup>24</sup>las trampas presentes en la cuenca de los llanos orientales está definida como una serie de monoclinales que se encuentran en el bloque yacente de una falla normal, las arenas del bloque levantado se enfrenta a niveles arcillosos que actúan como sellos efectivos, de no existir intercalaciones en el tipo de roca como en la formación Carbonera y las fallas el hidrocarburo seguiría migrando buzamiento arriba, es decir hacia la zona sureste de la Cuenca de los Llanos Orientales.

**1.3.3.4 Roca sello.** Dentro de la estratigrafía es posible identificar dos unidades, C8 y C6, las cuales funcionan como roca sello, esto debido a que su composición principal es de lutitas, estas evitan la permeabilidad del hidrocarburo, el ambiente de depósito predominantemente deltaico con periodos de transgresión y regresión marina comprendidos por la Formación Carbonera, propician la intercalación se componen litológicamente de lutitas y limolitas.

---

<sup>22</sup> *Ibíd.*, p 180.

<sup>23</sup> ARAUJO, Ysidro, GÓMEZ, Yohaney; RODRIGUEZ, Javier; PORTILLO, Fredy; YORIS, Franklin. Aspectos hidrodinámicos, estructurales y estratigráficos del Campo Rubiales. Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. Pacific Rubiales Energy. 2009., pp 2

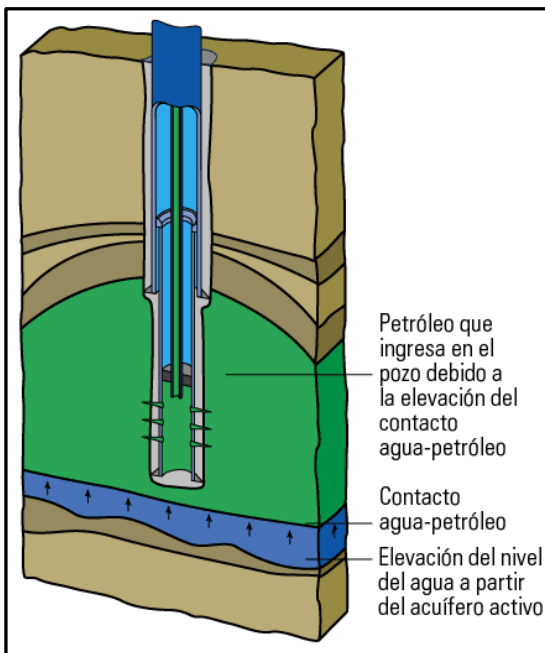
<sup>24</sup> DASILVA, Ángel., GOMEZ, Yohaney., VILLA, María., YORIS, Franklin., MORALES, Diego, Oil distribution in the Carbonera Formation, Arenas Basales unit. A case study in the Quifa and Rubiales fields, Eastern Lanos Basin, Colombia, Enero 2014, pp 3.

**1.3.3.5 Mecanismo de entrapamiento.** Para Campo rubiales según Dasilva (2019)<sup>25</sup> se define en 2008 un amplio monoclinal con una serie de ondulaciones, este monoclinal tiene un rumbo NNE -SSW, buzamiento de entre 1 y 2 grados y un área de 11.600 acres, sin embargo no se evidenciaba ninguna falla, en búsqueda de tener mayor certidumbre a finales de ese mismo año se realizan 325km<sup>2</sup> de sísmica 3D permitiendo la cartografía, corroborando las características ya conocidas y añadiendo la presencia de fallas normales con saltos entre 10 y 20 pies con lo cual se explica la variación del contacto agua petróleo y define el entrapamiento en campo rubiales como una trampa estratigráfica-estructural.

## 1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO

**1.4.1 Método de producción.** El mecanismo de producción en Campo Rubiales es empuje por acuífero activo Figura 6, 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.

**Figura 6. Esquema del empuje por acuífero activo.**



**Fuente:** Drenaje por agua. (2019, Marzo 20). Recuperado de [https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/w/water\\_drive.aspx?p=1](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/w/water_drive.aspx?p=1).

La etapa comercial inicio con la producción de pozos verticales, esto continuo hasta el 2005 cuando se inició la perforación de pozos horizontales con el fin de aumentar

<sup>25</sup> Ibíd., p 3.

la producción y vida útil de los pozos al favorecer el transporte del crudo con alta viscosidad y baja movilidad, dando solución a retos como la cercanía del contacto agua petróleo, la alta presión ejercida por el acuífero y finalmente la gran cantidad de arena friable la cual afectaría el gravel pack.

**1.4.2 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 día.

**1.4.3 Numero 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 Ecopetrol.

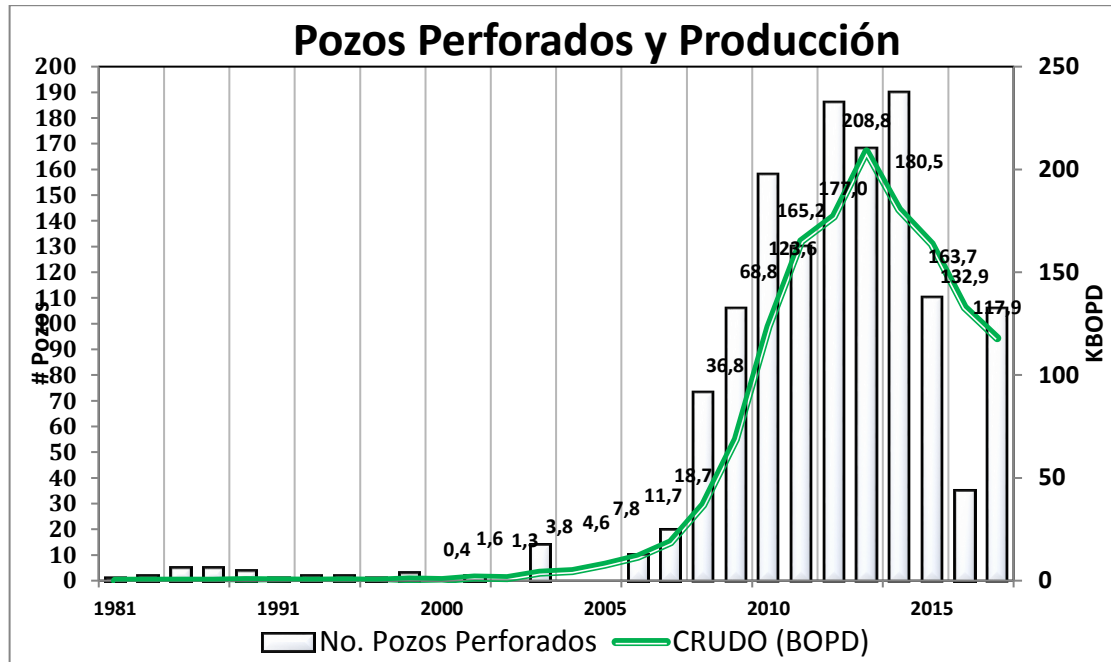
**1.4.4 Características del yacimiento.** De acuerdo a Gómez. Y (2009)<sup>26</sup> el yacimiento está compuesto por las areniscas del tercio inferior de la Formación Carbonera conocidas como “arenas basales”, las cuales fueron depositadas en un ambiente fluvial, la zona de interés se encuentra entre 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.

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

---

<sup>26</sup> ARAUJO, Ysidro, GÓMEZ, Yohaney; RODRIGUEZ, Javier; PORTILLO, Fredy; YORIS, Franklin. Aspectos hidrodinámicos, estructurales y estratigráficos del Campo Rubiales. Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. Pacific Rubiales Energy. 2009., pp 2.

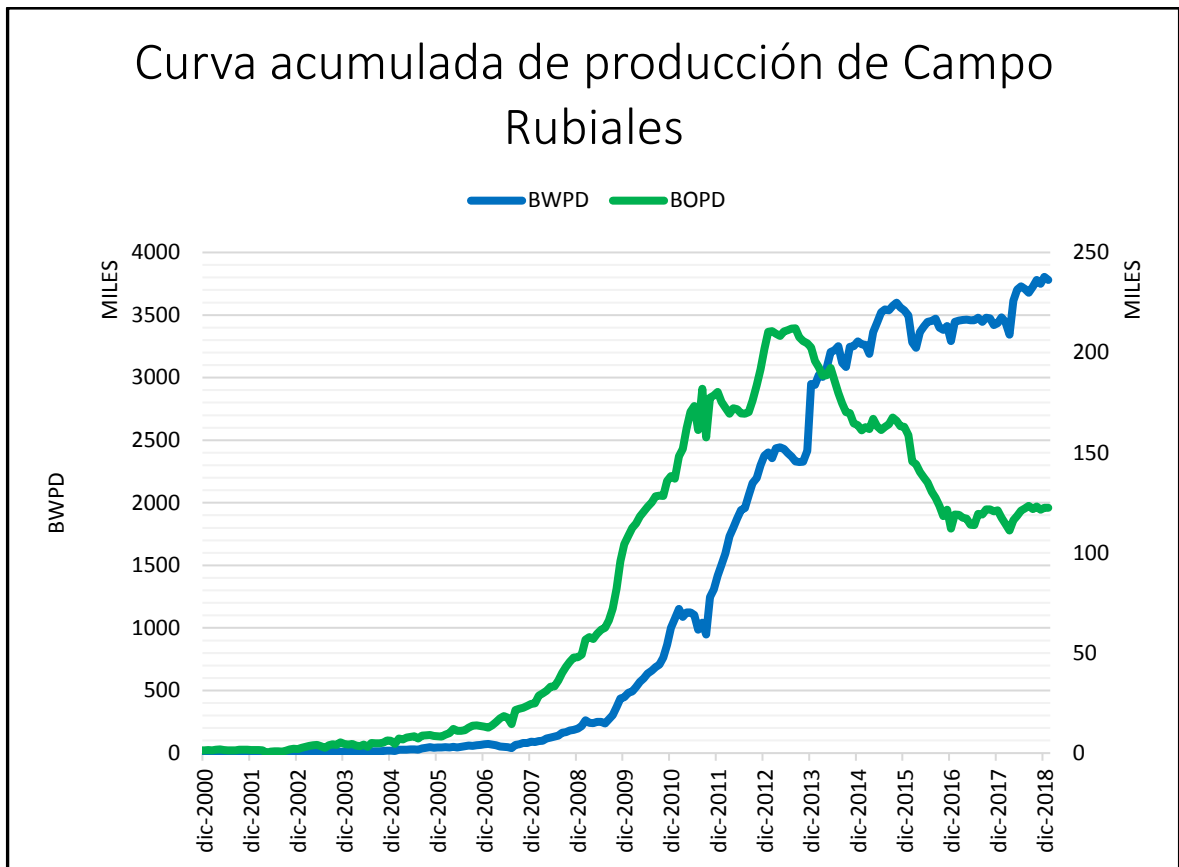
**Gráfica 1. Pozos perforados y producción entre 1981- 2017.**



**Fuente:** Valencia. M. A, Copia de Curva Histórica Producción RB v 3, Departamento de tecnologías de producción, Vicepresidencia técnica, Ecopetrol S.A, Colombia, 2019, Hoja 2. Modificado por Solano. B, Vargas. S) 2019.

A continuación, se presenta la curva acumulada de producción en Campo Rubiales, es posible segmentar las curvas de acuerdo a 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 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 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 limitó.

**Gráfica 2. Curva acumulada de producción de agua y producción de aceite en Campo Rubiales.**



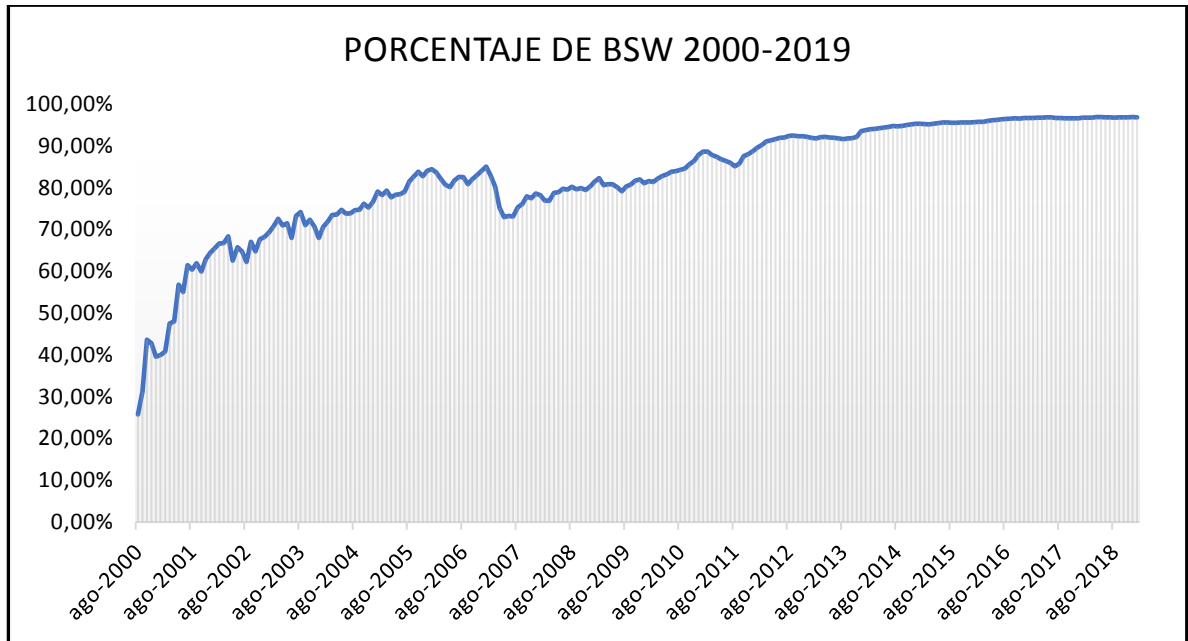
**Fuente:** Valencia. M. A, Copia de Curva Histórica Producción RB v 3, Departamento de tecnologías de producción, Vicepresidencia técnica, Ecopetrol S.A, Colombia, 2019, Hoja 2. Modificado por Solano. B, Vargas. S) 2019.

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 aceite.<sup>27</sup>

<sup>27</sup> Valencia.M. A, Copia de Curva Histórica Producción RB v 3, Departamento de tecnologías de producción, Vicepresidencia técnica, Ecopetrol S.A, Colombia,2019, Hoja 2.



**Gráfica 3. Porcentaje BSW entre años 2000-2019 para Campo Rubiales.**



**Fuente:** Valencia.M. A, Copia de Curva Histórica Producción RB v 3, Departamento de tecnologías de producción, Vicepresidencia técnica, Ecopetrol S.A, Colombia,2019, Hoja 2. Modificado por Solano. B, Vargas. S) 2019.

## 1.5 SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

Un sistema de levantamiento artificial tiene la función de brindar al yacimiento la energía necesaria para transportar los fluidos desde el fondo del pozo hacia la superficie. Dicha falta de energía se puede dar debido al poco efecto que da el mecanismo de producción al yacimiento evitando que los fluidos puedan llegar hasta la superficie. Por otra parte, también se puede dar el caso en el que el yacimiento ha sido producido por un tiempo prolongado puede causar la depletación del mismo dando como resultado que éste ya no posea la energía necesaria para seguir llevando los fluidos hasta la superficie.

Hay diferentes sistemas de levantamiento artificial, cada uno posee características propias que los vuelven especiales para ciertos casos específicos. Los sistemas de levantamiento artificial que actualmente son usados por la industria son: Bombeo mecánico, bombeo electrosumergible, bombeo por cavidades progresivas, gas lift y bombeo hidráulico. Para el desarrollo de este proyecto se hará énfasis en el bombeo electrosumergible ya que es el sistema que predomina en el campo a trabajar, además, su motor de inducción será parte del objetivo a tratar.



**1.5.1 Bombeo electrosumergible (BES).** El sistema de levantamiento artificial tiene como principio llevar el fluido del reservorio hacia la superficie utilizando la rotación centrífuga de la bomba a través de sus etapas, en otras palabras, transforma la energía cinética en potencial. La potencia necesaria por dicha bomba es suministrada por el motor eléctrico ubicado en el fondo del pozo. La corriente eléctrica es suministrada a través de un cable de potencia que va desde la superficie hasta el motor.

Este sistema es uno de los más utilizados en este campo debido a su capacidad de manejar altos volúmenes de fluidos con grandes cortes de agua. Además de esto, otras ventajas que posee este sistema son que puede utilizarse para inyectar fluidos en la formación, su vida útil puede ser muy larga dependiendo de las condiciones en las que opera, trabaja bien en pozos desviados, su funcionamiento es exclusivamente eléctrico y suele ser altamente eficiente contra la corrosión y formación de escamas.

En cuanto a sus desventajas podemos encontrar que su inversión inicial es muy alta, no es rentable en pozos con producción baja, los cables pueden deteriorarse al estar expuestos a temperaturas excesivas, requieren de un monitoreo constante debido a fallas en el motor o la bomba y es muy susceptible a la producción de gas y arena.

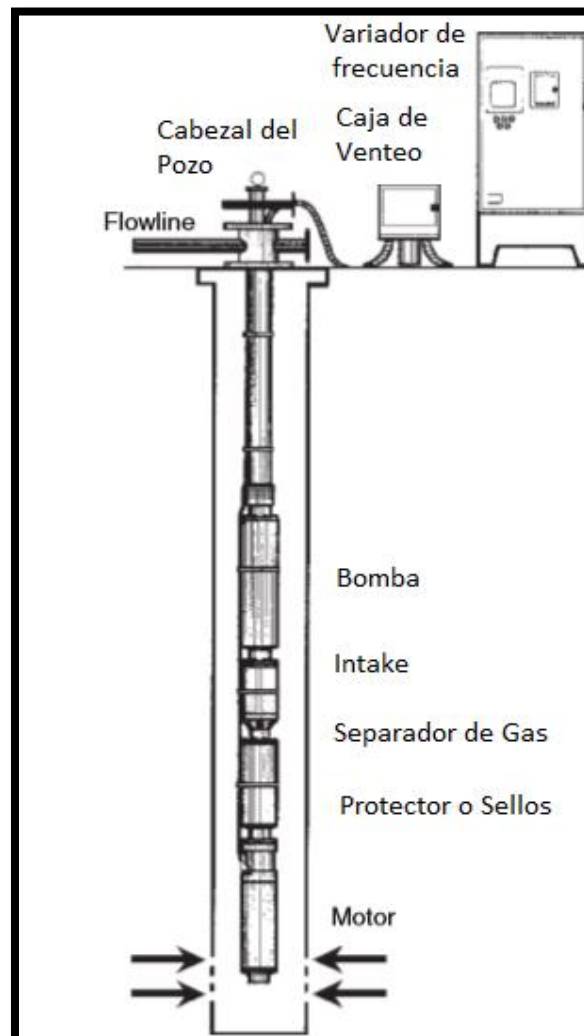
El diseño básico de un bombeo electrosumergible consta de dos secciones, una en fondo y otra en superficie. (**Ver tabla 1**), en la **Figura 7** es posible conocer la ubicación y disposición de cada una de las partes que compone un equipo completo.

**Tabla 1. Diferentes secciones de un bombeo electrosumergible y sus respectivas partes.**

<b>Equipo en fondo</b>	<b>Equipo en superficie</b>
<b>Motor eléctrico sumergible</b>	Cabezal de pozo
<b>Sello o protector</b>	Generadores
<b>Entrada a la bomba (intake)</b>	Transformadores
<b>Bomba centrífuga</b>	Variadores de frecuencia
<b>Cable de potencia</b>	Caja de venteo
<b>Separador de gas</b>	Tablero de control

Fuente: elaboración propia.

**Figura 7. Diseño Básico de un Bombeo Electrosumergible**



**Fuente:** TAKACS, Gabor. Electrical submersible pumps manual: design, operation and maintenance. Burlington: Elsevier Inc., 2009. 52 p. ISBN: 978-1-85617-557-9.

### 1.5.1.1 Equipos en superficie

- **Cabezal del pozo:** Para las instalaciones de BES, los cabezales de pozo se utilizan para soportar el peso del equipo de superficie y para mantener el control anular. Tienen que proporcionar un sello positivo no solo alrededor de la tubería sino también alrededor del cable<sup>28</sup>.

<sup>28</sup> TAKACS, Gabor. Electrical submersible pumps manual: design, operation and maintenance. Burlington: Elsevier Inc, 2009. 115 p. ISBN: 978-1-85617-557-9.

- **Generadores:** Si en la zona donde esté ubicado el pozo no hay fuente de energía local se requiere del uso de los generadores los cuales producen la corriente necesaria para el funcionamiento de todos los equipos.
- **Transformadores:** En la mayoría de los casos, el voltaje de superficie disponible no es compatible con el voltaje del motor requerido y se deben usar transformadores para proporcionar el nivel de voltaje correcto en la superficie. La distribución de energía en el campo petrolífero es de 6.000 voltios o más, mientras que el equipo BES funciona a voltajes entre 250 y 4.000 voltios. Los transformadores para instalaciones BES están llenos de aceite, unidades de auto enfriamiento y están disponibles en configuraciones trifásicas, autotransformadoras trifásicas o se puede usar un banco de tres convertidores de una sola fase<sup>29</sup>.

La selección de estos equipos se realiza evaluando los niveles de voltaje y las relaciones de potencia. El voltaje de superficie requerido depende en gran medida de la profundidad de configuración del equipo BES ya que la caída de voltaje en el cable de alimentación aumenta con la longitud del cable. Esta caída de voltaje más el voltaje del motor seleccionado proporciona el voltaje de superficie necesario<sup>30</sup>.

- **Variadores de Frecuencia:** Para optimizar las condiciones de operación de los motores eléctricos, el uso de fuentes de alimentación de AC con frecuencias variables es un método ampliamente utilizado en muchas industrias. Dichas fuentes de alimentación vienen en dos versiones: inversores de fuente de voltaje o corriente<sup>31</sup>.

La tarea de la unidad variable speed drive, (VSD), es convertir la frecuencia de entrada (generalmente 60 Hz) en cualquier frecuencia en su rango de operación. Todos los VSD contienen los siguientes tres componentes básicos<sup>32</sup>:

- ✓ la sección del rectificador convierte la tensión y la corriente de 60 Hz AC en una tensión y corriente de DC,
- ✓ La sección de control de DC proporciona una forma de onda de DC suave a la siguiente sección.
- ✓ La sección del inversor convierte el voltaje de DC de nuevo a un voltaje de AC en una frecuencia seleccionada.

---

<sup>29</sup> *Ibíd.*, p.117.

<sup>30</sup> *Ibíd.*, p.117.

<sup>31</sup> *Ibíd.*, p.171.

<sup>32</sup> *Ibíd.*, p.171.

- **Tablero de Control:** El cuadro de distribución es el centro de control de una instalación de BES convencional y actúa como un controlador de motor y, en consecuencia, controla el funcionamiento de toda la instalación. Tiene las siguientes funciones<sup>33</sup>:
  - ✓ Proporciona un interruptor controlado de encendido / apagado desde el equipo BES a la fuente de alimentación.
  - ✓ Protege los equipos de superficie y de fondo de pozo de una amplia variedad de problemas.
  - ✓ Supervisa y registra los parámetros operativos más importantes. Los tableros de control estándar funcionan bajo una frecuencia eléctrica constante y varían en tamaño, diseño y clasificación de potencia.
  
- **Caja de venteo:** El cable de potencia que proviene del pozo debe estar conectado a un cable eléctrico de superficie que conduce al tablero de distribución. Los dos cables están unidos en la caja de conexiones, también llamada "caja de venteo". Es una caja ventilada e impermeable que cumple las siguientes tres funciones importantes<sup>34</sup>:
  - ✓ Proporciona la conexión eléctrica entre el fondo de pozo y los cables eléctricos de superficie.
  - ✓ Ventila cualquier gas a la atmósfera que pueda llegar a este punto debido a la migración de gases de pozo por el cable de alimentación BES. La ventilación del gas elimina el peligro de incendio o explosión debido a que no se permite que el gas viaje en el cable al tablero de distribución.
  - ✓ Actúa como un punto de prueba de fácil acceso para verificar eléctricamente el equipo del pozo.

#### 1.5.1.2 Equipos en fondo

- **Bomba centrífuga:** Las bombas sumergibles en servicio BES operan con sus ejes en posición vertical y son bombas centrífugas con las siguientes características principales<sup>35</sup>:
  - ✓ son bombas de varias etapas con varias decenas o cientos de etapas conectadas en serie
  - ✓ Sus impulsores son de diseño cerrado.
  - ✓ tienen un solo lado de succión.
  - ✓ Se autoalimentan.
  - ✓ Tienen configuraciones de flujo radial o mixto.

---

<sup>33</sup> *Ibíd.*, p. 116.

<sup>34</sup> *Ibíd.*, p. 114.

<sup>35</sup> *Ibíd.*, p. 23.

Una bomba centrífuga de una sola etapa es una máquina simple accionada por un motor primario que proporciona un movimiento giratorio y consta de dos componentes básicos: (a) el rotor, un conjunto giratorio de paletas, y (b) el estator, la parte estacionaria que contiene la carcasa del rotor, así como los cojinetes y sellos necesarios para un funcionamiento adecuado. Las paletas en las bombas BES están contenidas en impulsores cerrados, y la parte estacionaria se llama "difusor"<sup>36</sup>.

Las conversiones de energía dentro de la bomba centrífuga se rigen por la ecuación de energía general que describe la conservación de energía entre dos puntos en un fluido que fluye. Esto indica que el cambio en el contenido de energía del fluido es igual al trabajo realizado en el fluido. El fluido que fluye en la bomba puede tener tres formas de energía: potencial, cinética y energía de presión; de los cuales se omite el cambio en la energía potencial debido al cambio de elevación debido a las distancias verticales despreciables en la etapa de la bomba. Por lo tanto, la suma de la presión y las energías cinéticas deben ser constantes y la energía que se pone desde el motor primario se convierte finalmente en un aumento de la presión del fluido.<sup>37</sup>.

- **Entrada a la bomba (intake):** Recibe los fluidos del separador de gas a través de un ensamblaje mecánico, y los transmite a la bomba. También sirve como soporte al rodamiento ya que recibe los esfuerzos axiales que transmite el eje.
- **Sello o protector:** Un protector BES realiza las siguientes funciones cruciales y al hacerlo garantiza el funcionamiento correcto de toda la instalación<sup>38</sup>:
  - ✓ Asegura que no se transmita al eje del motor ninguna carga de empuje axial en las etapas de la bomba BES durante el funcionamiento.
  - ✓ El protector aísla el aceite dieléctrico limpio con el que se llena originalmente el motor a partir de fluidos de pozo que generalmente están cargados de suciedad, agua y otras impurezas. Debe asegurarse de que ningún fluido del pozo entre en el motor durante la operación. Este es un requisito básico porque la contaminación del aceite de motor limpio puede causar fallas prematuras del motor debido a: la pérdida de lubricación en los cojinetes estructurales y, en consecuencia, un mayor desgaste en las superficies de los cojinetes, y la disminución de la resistencia del aislamiento eléctrico del aceite del motor que causa cortocircuitos en los devanados del estator o del rotor del motor.
  - ✓ Permite la expansión y contracción del aceite de alta calidad con el que se llena el motor. Dado que el protector está conectado directamente al motor, el aceite del motor se expande debido a la temperatura del pozo y debido al calor

---

<sup>36</sup>Ibíd., p. 23.

<sup>37</sup>Ibíd., p. 24.

<sup>38</sup>Ibíd., p. 85.

generado en el motor puede ingresar al protector durante el funcionamiento normal. De manera similar, durante las paradas, el aceite contenido en el motor se contrae debido a la disminución de la temperatura del motor y parte del mismo almacenado previamente en el protector puede ser aspirado al espacio del motor.

- ✓ Al proporcionar comunicación entre los fluidos del pozo y el aceite dieléctrico contenido en el motor, el protector iguala la presión interna con la presión circundante en el anillo del pozo. Las presiones internas y externas son aproximadamente iguales, se elimina la fuga de fluidos de pozo que pasan por las uniones selladas y hacia el motor. Esta característica permite el uso de sellos de baja presión y, por consiguiente, de menor costo, y Aumenta enormemente la fiabilidad del sistema BES.
- ✓ Proporciona la conexión mecánica entre el motor y la bomba ESP y transmite el par desarrollado por el motor al eje de la bomba. Los acoplamientos en los extremos del eje del protector deben ser capaces de transmitir no solo los pares de operación normales, sino también los pares mucho mayores que se producen durante el arranque del sistema.
- **Separador de Gas:** Actúa como un alimentador para la bomba centrífuga y puede separar cantidades bajas a moderadas de gas con una eficiencia limitada. El separador está conectado entre el protector y la bomba y dirige el gas separado hacia el interior del casing / anular<sup>39</sup>.

Funciona según el principio de separación gravitacional al forzar el flujo de fluido a cambiar de dirección y permitir que el gas libre escape al anillo del pozo. El fluido que contiene burbujas de gas libre entra en el separador a través del casing perforado. El impulsor de aspiración aspira el líquido que contiene una cantidad reducida de gas libre y se transfiere a la bomba BES conectada a la cima<sup>40</sup>.

- **Cable de potencia:** La energía eléctrica de la superficie se transmite al motor ESP a través de un cable de alimentación eléctrica trifásico especial que conduce desde la superficie a la conexión del motor<sup>41</sup>.

Los cables BES están disponibles en dos configuraciones: redondas y planas. Los cables redondos generalmente se usan a lo largo de la línea de tubería donde el espacio anular no es demasiado crítico y el cable puede encajar entre el diámetro externo de la tubería y el diámetro del casing. Por otro lado, los cables planos son

---

<sup>39</sup> *Ibíd.*, p. 99

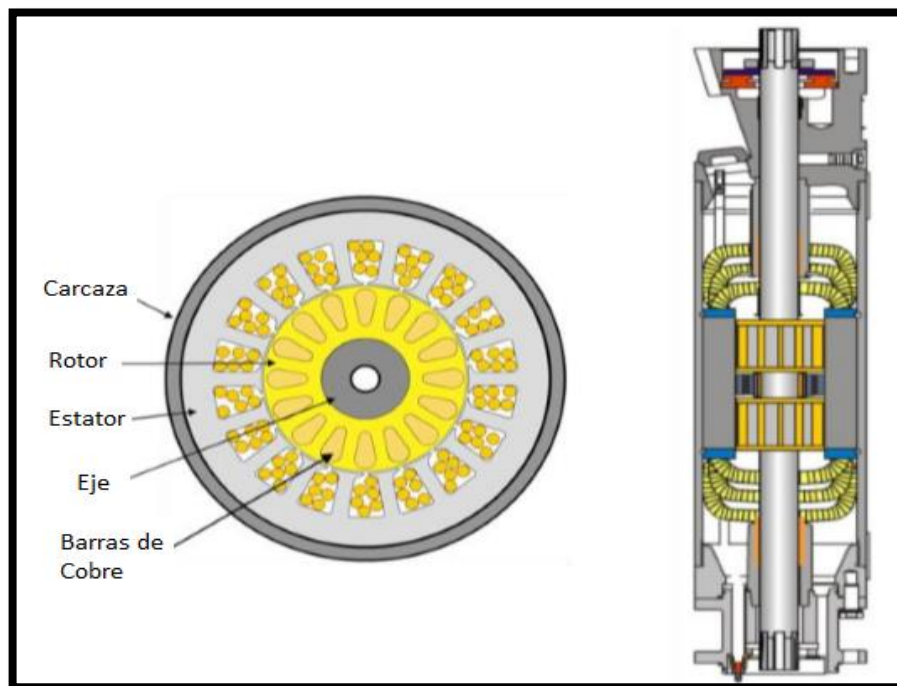
<sup>40</sup> *Ibíd.*, p. 100.

<sup>41</sup> *Ibíd.*, p.101.

necesarios para pequeñas configuraciones anulares a lo largo de la unidad BES cuyo diámetro externo es considerablemente mayor<sup>42</sup>.

**1.5.2 Motor de inducción.** Los motores eléctricos utilizados en el servicio BES pertenecen al tipo más común de motores de inducción de jaula de ardilla, trifásicos y de dos polos. Estos motores están compuestos de carcasa, rotor, estator, eje y barras de cobre, partes que se pueden visualizar en la **figura 8**. Estos funcionan según el principio de la inducción electromagnética que establece que una corriente eléctrica se induce en cualquier conductor que se mueve en relación con un campo magnético. El campo magnético se genera en el estator, la parte estacionaria del motor que contiene una bobina para cada fase. Este campo gira con los cambios de dirección de la corriente alterna (AC) porque los electroimanes cambian sus polos magnéticos dos veces para cada ciclo de la corriente alterna<sup>43</sup>.

**Figura 8. Motor de Inducción**



**Fuente:** Xiao.J, Lastra.R. Induction versus permanent magnet motors for ESP applications, SPE-192177-MS, Arabia Saudita, pag 2, 2018.

Cuando se aplica una corriente alterna trifásica a los devanados del estator, se generarán campos magnéticos giratorios. Dependiendo de la forma en que se instale el devanado en el estator, se pueden generar dos, cuatro, seis e incluso un

<sup>42</sup> *Ibíd.*, p. 104.

<sup>43</sup> *Ibíd.*, p. 41.

mayor número de polos magnéticos<sup>44</sup>. Trifásico se refiere a la corriente alterna trifásica (AC) aplicada a los devanados del estator. Utilizando uno trifásico en lugar de uno monofásico o bifásico permitirá que el motor genere más caballos de fuerza para una longitud determinada y también hay un beneficio de menos vibración eléctrica con un sistema trifásico. Otra ventaja clave de un sistema trifásico es que el motor puede cambiar fácilmente la dirección de rotación, mientras que el bifásico y el monofásico no pueden<sup>45</sup>.

Dentro del estator, unido al eje del motor, se encuentra el rotor tipo jaula de ardilla que consiste en barras de cobre cortocircuitadas que no están conectadas a la fuente de energía. El campo magnético giratorio mantenido por los devanados del estator induce el flujo de una corriente alterna en el rotor, por lo que el rotor se convierte en un conjunto de electroimanes. Los polos magnéticos del campo del rotor son atraídos y repelidos por los polos desiguales y similares del estator, respectivamente, y el rotor mantiene la rotación continua del eje del motor. Dado que el funcionamiento del motor depende de la inducción electromagnética que requiere un movimiento relativo entre el campo magnético (primario) del estator y los cables del rotor, debe quedar claro que el rotor siempre debe girar a una velocidad menor que la velocidad síncrona del motor. La diferencia de velocidad se llama el "deslizamiento" del motor<sup>46</sup>.

**1.5.3 Motor de Imanes permmanentes.** 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 9**. 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<sup>47</sup>.

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

---

<sup>44</sup> Xiao.J, Lastra.R. Induction versus permanent magnet motors for ESP applications, SPE-192177-MS, Arabia Saudita, pag 2, 2018.

<sup>45</sup> *Ibíd.*, p. 2

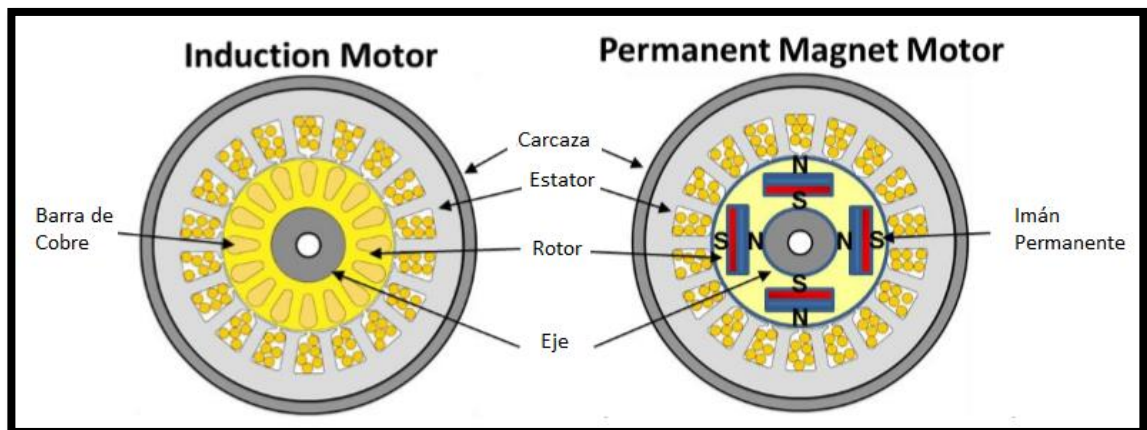
<sup>46</sup> TAKACS. *Op. cit.*, p. 42

<sup>47</sup> XIAO. LASTRA. *Op. cit.*, p. 3.



a moverse. Los rotores giran a una velocidad idéntica a la velocidad de los campos magnéticos giratorios de los devanados del estator<sup>48</sup>.

**Figura 9. Motor de inducción vs Motor de imanes permanentes**



**Fuente:** Xiao.J, Lastra.R. Induction versus permanent magnet motors for ESP applications, SPE-192177-MS, Arabia Saudita, pag 14, 2018.

**1.5.3.1 Ventajas del motor con imanes permanentes.** Los PMM de acuerdo a su funcionamiento ofrecen ventajas como: mayor factor de potencia, esto debido a que los imanes permanentes proporcionan un mayor flujo magnético, lo que aumenta la densidad de potencia. La capacidad del motor se beneficia al utilizar el doble de caballos de fuerza por volumen del motor, duplicando lo utilizado por los motores IM, añadido a esto, evaluando requerimientos de potencia y estado mecánico es posible reducir el OD (sistemas delgados), reducir su longitud y disminuir el peso en relación a los motores IM. La eficiencia aumenta dado que, sin circuitos eléctricos, barras de cobre y anillos finales, no existe voltaje inducido ni corriente, no se requiere potencia para magnetizar el rotor y no hay pérdida por el efecto Joule, permitiendo disminuir el aumento de la temperatura aumentando la vida útil del motor<sup>49</sup>.

<sup>48</sup> *Ibíd.*, p. 2.

<sup>49</sup> *Ibíd.*, p. 5.

## 2. DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE LA PRUEBA EN BANCO

Las pruebas en banco son pruebas que se llevan a cabo en ambientes controlados con el fin de evaluar equipos o sistemas de acuerdo a variables de funcionamiento que sean posible cambiar, partiendo de esto Ecopetrol S.A posee interés en evaluar los motores de imanes permanentes y motores de inducción de diferentes empresas proveedoras, evaluando principalmente el ahorro energético y eficiencia de los equipos ya que la información que provee y promete cada una de las empresas proveedoras frente a sus productos contrastan con los datos obtenidos de otras compañías que han evaluado esta tecnología, para esto es necesario que una compañía mediadora adecue en sus instalaciones un banco en el cual sea posible realizar las pruebas para cada uno de los motores que provean.

La ejecución y éxito de las pruebas radicara en el cumplimiento de los compromisos de cada una de las partes previamente mencionadas.

### 2.1 OBJETIVOS DE LA PRUEBA EN BANCO

Las pruebas tienen como finalidad comparar los IM y los PMM respecto a:

- Eficiencia de los motores, ligado principalmente a la carga de los motores se busca cuantificar el diferencial de eficiencias al uso de motores de imanes permanentes a cargas bajas.
- Factor de Potencia (PF) de los motores, dado que este parámetro evalúa la cantidad de energía que es transformada a trabajo, por ende, a mayor factor de potencia el motor tendrá mayor capacidad de trabajo.
- Generación y disipación de temperatura, registrando esta magnitud se busca evaluar los efectos de la temperatura como un indicador de perdidas energéticas frente al trabajo a diferentes condiciones del motor, así mismo la velocidad de disipación permite conocer cuál de los motores auto regula la perdida energética correspondiente al calor emitido.
- Ahorro energético, a nivel económico es de suma importancia dado que el ahorro es directamente proporcional a la inversión energética que se realiza lo cual resulta en el aumento o reducción del precio de levantamiento del crudo.

Cada uno de estos objetivos se desarrollarán a medida que se van cumpliendo los pasos del protocolo de prueba, además, se utilizará un formato, (**Tabla 3**) que se explicará en la sección 2.3.2, en este se ingresará la información para así obtener de manera más rápida y sencilla los cálculos y las gráficas correspondientes a los motores IM y PMM para su posterior comparación.

## 2.2 COMPROMISOS

Las empresas que hagan parte de la prueba en banco, de acuerdo a su rol, (empresa mediadora, proveedora u operadora), deberán cumplir con un mínimo de requisitos necesarios para el desarrollo de ésta. Si alguno de estos requisitos no se cumple es probable que uno o varios objetivos, entre los cuales se encuentran: probar los motores al 100% de su carga, vincular los motores al variador, vincular los motores a las fuentes energéticas, realizar las mediciones en los puntos del sistema deseados. Evitando el desarrollo apropiado, dando como resultado una prueba poca exitosa.

**2.2.1 Compromiso de la empresa mediadora.** La empresa mediadora es un ente encargado de velar por la imparcialidad de las pruebas, de esta manera serán ellos quienes regulen las condiciones del banco en prueba y proveerán de un sitio adecuado, privacidad y equipos adecuados, permitiendo que cada proveedor disponga de sus equipos para lograr la disposición adecuada del equipo para su correcto funcionamiento.

- Proveer las facilidades para el desarrollo de la prueba, incluyendo taller, banco de pruebas, personal, herramientas, equipos de carga.
- Proveer un variador de velocidad (VSD) capaz de controlar todos los PMM que se vayan a probar.
- Proveer un transformador elevador (SUT) con rango de voltajes que cubran los voltajes necesarios para los motores a probar.
- Instrumentos de medición eléctrica y calidad de energía debidamente certificados.
- Instrumento para la medición de temperatura externa, cámara termográfica
- 1.500 pies de cable.
- Personal técnico para realizar la prueba con su EPP completo para las pruebas propuestas.
- Sensor de fondo y panel de lectura en superficie. Marca Zenith
- Caja de venteo

**2.2.2 Compromiso de las empresas proveedoras.** Las empresas proveedoras son en su mayoría prestadoras de servicio, las cuales dentro de su portafolio poseen BES con motores de imanes permanentes y motores de inducción, estas deben contar con la disponibilidad y disposición para probar dentro de unas condiciones dadas sus equipos, al vincularse en este tipo de pruebas podrán conocer y contrastar únicamente los valores resultantes de la prueba con los de placa o generados por la misma empresa.

- Proveer dos motores serie 400, uno IM y otro PMM, con capacidad nominal de carga de 100HP@60hz con la menor corriente posible.

- Los motores deben tener termocupla conectada al embobinado y deben especificar a qué parte del embobinado están conectadas.
- Los motores y sellos deben tener aceite tipo ISO 220
- Un sello de tres cámaras para ser conectado a los dos motores durante las pruebas
- Aceite extra para poder llenar los motores y sellos antes de las pruebas, con su respectiva bomba de llenado y aceite.
- Parámetros del motor PMM para lograr control con el variador disponible
- Proveer MLE para cada uno de sus motores. Longitud estimada de 60 pies de acuerdo a las longitudes disponibles en sus inventarios.
- Herramientas de mano y consumibles para realizar las conexiones del motor a sensor, motor a sellos, y motor a MLE
- Coupling de motor a sello y de sello a adaptador (coupling a ser especificado por empresa del bando de pruebas)
- Personal técnico para asistir durante la prueba con su EPP completo para las pruebas propuestas

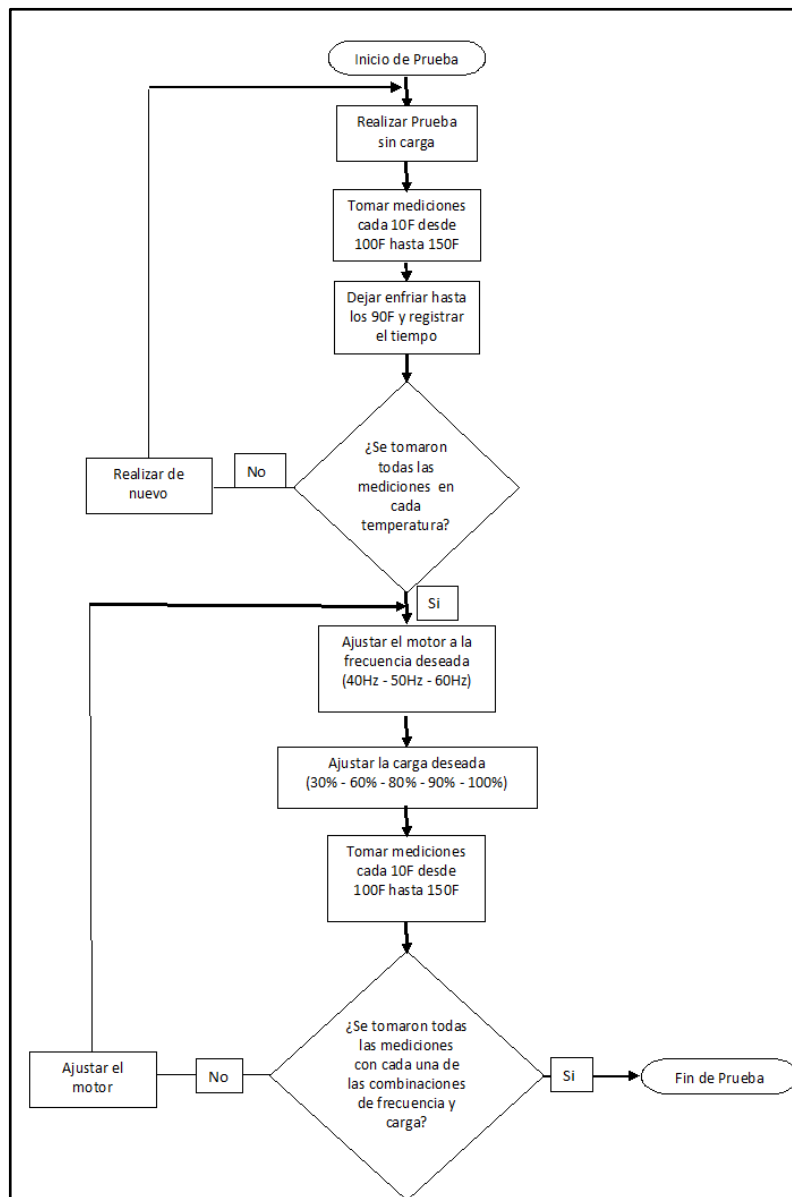
**2.2.3 Compromiso de Ecopetrol S.A.** Ecopetrol S.A es la empresa operadora, desea conocer las facultades de cada motor que brinden las empresas proveedoras, cada uno de los resultados será tenido en cuenta para seleccionar el equipo adecuado que se usara en el plan de desarrollo. Poseerá toda la información de las pruebas en banco, establecerá los parámetros prioritarios dentro de la medición y validará cada procedimiento dentro de la prueba.

- Crear el protocolo de prueba de los PMM y acordarlo con el proveedor del banco de pruebas y con las empresas proveedoras de los motores
- Ser testigo en la realización de las pruebas. El personal debe siempre portar su EPP completo.
- Manejar la información de manera exclusiva.
- Realizar análisis de los resultados de las pruebas
- Entregar los resultados a cada una de las empresas de sus equipos propios junto con una evaluación comparativa contra los demás proveedores, pero sin aportar el nombre.

## **2.3 DESARROLLO DE LA PRUEBA**

De acuerdo a los requerimientos de Ecopetrol S.A. se diseñó un paso a paso el cual debe cumplirse para cada uno de los motores a evaluar dentro de la prueba en banco, de esta manera los momentos y puntos de medida serán los mismos para todos y la comparación se realizará por medición. En la **figura 10** por medio de un diagrama de flujo es posible conocer el orden de cada procedimiento establecido para evaluar las maquinas.

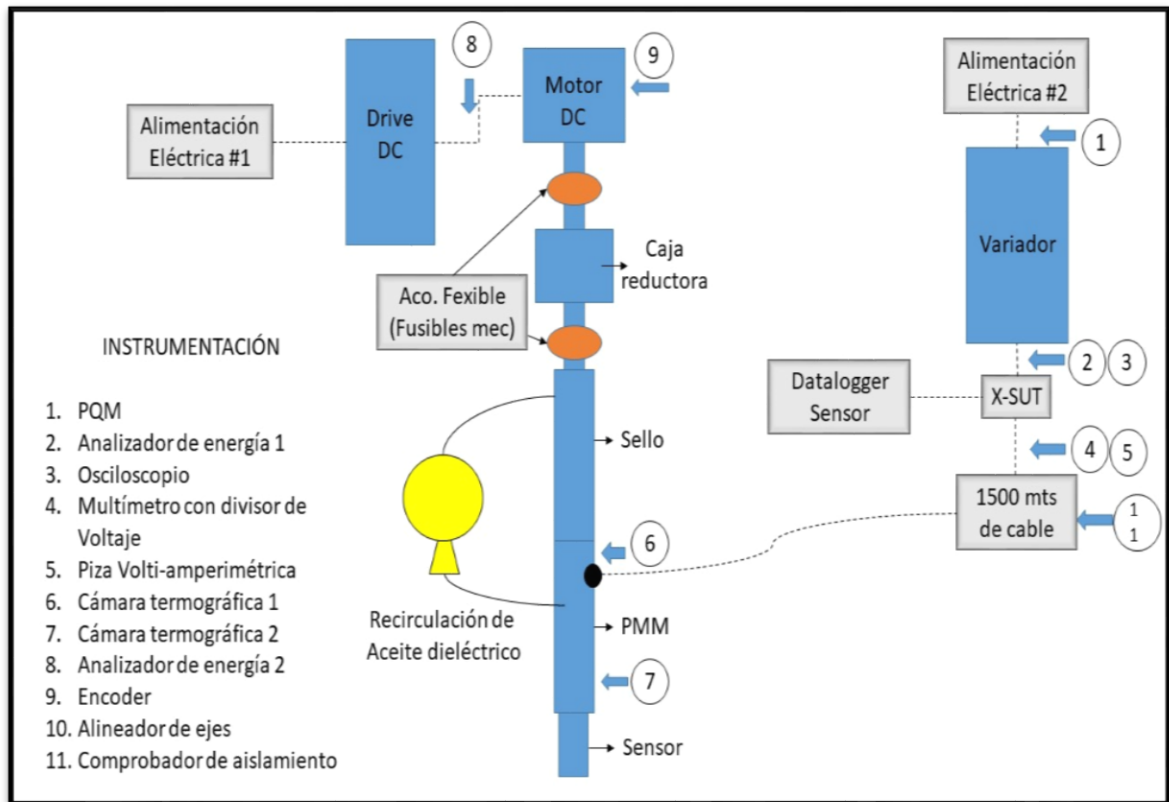
**Figura 10. Diagrama de flujo con los pasos a seguir en la prueba en banco.**



Fuente: elaboración propia.

**2.3.1 Instrumentación y puntos de medición.** En la figura 11 es posible observar el diseño general de la prueba en banco y sus correspondientes mediciones, para dichas mediciones también se muestran los diferentes equipos a utilizar y los diferentes puntos en los que se van a tomar mediciones.

**Figura11. Instrumentación y puntos de medición.**



**Fuente:** elaboración propia.

**2.3.1.1 PQM (medidor de calidad de Red).** El equipo ofrece medida de intensidad, tensión, potencia real y reactiva, uso de energía, coste de la energía, factor de potencia y frecuencia. Sus ajustes programables y sus cuatro salidas configurables permiten añadir funciones de control para aplicaciones específicas<sup>50</sup>.

El PQM puede utilizarse como dispositivo de recogida de datos para un sistema de automatización de planta que integre requisitos de proceso, instrumentación y eléctricos<sup>51</sup>.

**2.3.1.2 Analizador de energía.** Su función es medir con gran precisión la corriente continua, la corriente alterna, la intensidad de corriente DC, la intensidad de corriente AC y la potencia a la salida del variador de frecuencia. El resultado de la medición de la potencia AC se considera como el valor real.

<sup>50</sup> Grid Solutions. PQM medidor de calidad de Red. {En línea}. Citado el 19 de Febrero del 2019. Disponible en <http://www.gegridsolutions.com/products/brochures/pqmosp.pdf>.

<sup>51</sup> Ibíd.

**2.3.1.3 Osciloscopio.** Un osciloscopio es un instrumento de prueba electrónico que muestra señales eléctricas de forma gráfica, normalmente como una relación entre una tensión (eje Y o vertical) y un tiempo (eje X u horizontal). La intensidad o brillo de la forma de onda se considera en ocasiones el eje Z. Existen algunas aplicaciones en las que se emplean otros ejes verticales (como la corriente), otros ejes horizontales (como la frecuencia) u otra tensión<sup>52</sup>.

Los osciloscopios también sirven para medir las señales eléctricas que se generan en respuesta a determinados estímulos físicos, como sonido, tensión mecánica, presión, luz o calor<sup>53</sup>.

**2.3.1.4 Multímetro con divisor de Voltaje.** El multímetro es un aparato eléctrico que posee un selector el cual permite trabajar como voltímetro, ohmímetro y amperímetro. Su función principal es medir diferentes magnitudes eléctricas como: resistencias, capacidades, corrientes, potenciales y otras. La función del divisor de voltaje es reducir un voltaje de entrada por medio de unas resistencias.

**2.3.1.5 Pinza Volti-amperimétrica.** La pinza es un instrumento de medida completamente portátil. Está diseñada para su uso en los lugares en los cuales se requiera realizar una buena medida de corriente AC, voltaje AC y DC, resistencia, continuidad y frecuencia<sup>54</sup>.

**2.3.1.6 Cámara termográfica 1 y 2.** Las cámaras termográficas tienen la función de medir la temperatura que desprenden los cuerpos por medio de un sensor térmico, su principio se basa en medir la radiación liberada por los cuerpos al calentarse, esta radiación causa un cambio en la resistencia eléctrica del sensor que puede ser representado por un cambio en el color de la imagen. En la prueba se usarán para medir el incremento de la temperatura del motor durante las pruebas.

**2.3.1.7 Encoder.** Estos encoders miden la posición de los ejes directamente, sin ningún elemento mecánico intermedio. Los errores producidos en la mecánica de la máquina se evitan porque el encoder está unido a la guía de la máquina y envía el dato real del desplazamiento al controlador; algunas de las fuentes de error potenciales, como las producidas por el comportamiento térmico de la máquina o los errores de paso del husillo, pueden ser minimizadas con el uso de los encoders<sup>55</sup>.

---

<sup>52</sup> Tecktronix. Introducción a los osciloscopios; guía del instructor. {En línea}. Citado el 19 Febrero de 2019. Disponible en [http://electronica.ugr.es/~jmolinos/ci\\_files/Oscs\\_Tek/resources/001155000-Scopes-Instructors-Guide-ES.pdf](http://electronica.ugr.es/~jmolinos/ci_files/Oscs_Tek/resources/001155000-Scopes-Instructors-Guide-ES.pdf).

<sup>53</sup> Ibíd

<sup>54</sup> EGAMASTER. Manual de instrucciones, Pinza Amperimétrica. {En línea}. Citado el 19 de Febrero del 2019. Disponible en <https://www.egamaster.com/phocadownload/manuales/65507.pdf>.

<sup>55</sup> FAGORAUTOMATION. Encoders lineales y angulares. {En línea}. Citado el 19 de Febrero del 2019. Disponible en <http://www.dmsncrouters.com/wp-content/uploads/2013/08/Fagor-CNC-Linear-and-Rotary-Encoders-Catalog-Spanish.pdf>.

**2.3.1.8 Alineador de ejes.** Estos permiten que las maquinas estén alineadas tanto en el eje vertical como en el horizontal<sup>56</sup>.

La desalineación puede causar:

- Aumento de la fricción y, por tanto, del consumo energético.
- Averías prematuras de rodamientos y retenes
- Averías prematuras de ejes y acoplamientos
- Fugas excesivas de lubricante por la obturación
- Fallos de los pernos de acoplamientos y fijaciones
- Aumento de la vibración y el ruido

**2.3.1.9 Comprobador de aislamiento.** La comprobación de resistencia de aislamiento añade un valor cualitativo sobre el estado de aislamiento del conductor y el aislamiento interno de diferentes componentes de un equipo eléctrico. Al empezar la prueba de resistencia de aislamiento, hay que aplicar tensión de corriente continua (CC) al conductor o equipo que va a probar. Parte de la corriente pasará del equipo de prueba al conductor y empezará a cargar el aislamiento. Esta corriente se denomina corriente de carga capacitiva y puede observarse en la superficie del medidor. El aislamiento se cargará rápidamente y, si es de alta calidad, la indicación del medidor se acabará estabilizando en un valor alto de megaohmios<sup>57</sup>.

**2.3.2 Formato a utilizar en la prueba.** A continuación, se mostrará el formato a utilizar para la recolección de datos con los cuales se podrán realizar las diferentes gráficas de incremento y disipación de la temperatura, factor de potencia, eficiencia y ahorro energético.

En la **Tabla 2** se ingresará la información correspondiente a la temperatura, estas estarán definidas de acuerdo a la frecuencia y carga a la cual se encuentre funcionando el motor. Los datos de temperatura se obtendrán mediante las cámaras termográficas y el datalogger, a partir de los intervalos de temperatura se llevará acabo el registro de los demás datos. Las columnas que se presentan resaltadas con color marrón indican información que se obtiene por medio de cálculos, es decir, no aparecen dentro del registro del panel de datos instantáneos.

---

<sup>56</sup> SKF. Alineadores de ejes SKF. {En línea}. Citado el 19 de febrero del 2019. Disponible en <http://www.dexis-iberica.com/ficheros/105.pdf>.

<sup>57</sup> FLUKE. Cómo elegir un comprobador de prueba de resistencia de aislamiento. {En línea}. Citado el 19 de Febrero del 2019. Disponible en <https://fluke.syncforce.com/efulfillment/13371-esp>.



**Tabla 2.Formato para la adquisición de datos (sección temperatura)**

Variables PMM --	FRECUENCIA:	__ Hz	% CARGA	__%
<b>Salida SUB</b>				
Temp Datalogger (F)	Temp cuerpo PMM (F)	Temp Datalogger ©	Temp cuerpo PMM ©	
100		37,778	-17,778	
110		43,333	-17,778	
120		48,889	-17,778	
130		54,444	-17,778	
140		60,000	-17,778	
150		65,556	-17,778	

Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 3** se diligenciarán los datos correspondientes a la entrada del variador por medio del PQM (medidor de calidad energética), y salida del variador mediante un analizador de energía y un osciloscopio.

**Tabla 3.Formato para la adquisición de datos (sección Variador de Frecuencia)**

Entrada CILA					Salida CILA		
voltaje (A)	corriente(I)	Kw	KVA	PF	Kw	KVA	PF
				#¡DIV/0!			#¡DIV/0!
				#¡DIV/0!			#¡DIV/0!
				#¡DIV/0!			#¡DIV/0!
				#¡DIV/0!			#¡DIV/0!
				#¡DIV/0!			#¡DIV/0!
				#¡DIV/0!			#¡DIV/0!

Fuente: elaboración propia.

Cada una de las variables que se van a medir son de importancia para la adquisición de datos y desarrollo de la prueba, en este caso el cálculo de las variables a la entrada y la salida del variador permiten conocer varios aspectos: el primero es el consumo eléctrico real de toda esta sección, el segundo es conocer la eficiencia del equipo al transformar la potencia aparente instantánea (KVA) en potencia eléctrica instantánea (Kw) lo cual se traduce en el cálculo del factor de potencia (PF). Por último, estas mediciones nos brindan información de la calidad de la energía que sale del variador lo cual es esencial para el funcionamiento adecuado del motor.

El PQM mediante la conexión del mismo a los cables que alimentan el variador permite determinar el voltaje, la corriente, la potencia eléctrica instantánea y la potencia aparente instantánea. De esta manera se puede saber la calidad y la cantidad de energía que se le suministra al variador. Por otra parte, en la salida del variador se tiene un analizador de energía y un osciloscopio, el primero cumple una

función similar a la del PQM en cuanto a medición de las variables ya mencionadas, con la diferencia de que este puede brindar el cálculo directo de factor de potencia del variador. El osciloscopio transforma esa información de salida en graficas que permiten conocer la longitud y la amplitud de onda de las variables medidas con el fin de conocer si el variador está liberando la frecuencia deseada para el desempeño óptimo del motor. Ambos equipos de medición van conectados a los cables que salen del variador.

**Tabla 4.Formato para la adquisición de datos (sección Motor DC)**

variables DC							
voltaje (A)	corriente (I)	velocidad(RPM)	KVA	Eficiencia (K	Torque	KW	HP
				0			0
				0			0
				0			0
				0			0
				0			0
				0			0

**Fuente:** elaboración propia.

En la **tabla 4** se medirán, por medio del analizador de energía, las variables de voltaje y corriente mediante la conexión de este equipo al cable que alimenta el motor DC. Por otra parte, el encoder cumple con la función de medir la posición de los ejes transformándolo en una señal eléctrica que puede ser leída como velocidad (RPM). A partir de estas variables podremos determinar la potencia aparente instantánea y la potencia eléctrica instantánea. Mediante el cociente entre Kw y la velocidad y todo multiplicado por 9,5488 podremos determinar el torque, y mediante la división del Kw sobre 0,746 podremos determinar la potencia del motor (HP). Todos estos datos nos permiten saber cuánto será el consumo y la energía requerida para el funcionamiento de todo el sistema exceptuando el motor de fondo. Por último, se calculará la eficiencia representada en Kw, para ello se realiza la división del dato de los Kilowatts que entran al variador y el dato de los Kilowatts que entra al motor DC.

### 3. PRUEBAS EN BANCO

Como se mencionó en el capítulo 2, la prueba en banco depende de 3 partes, la empresa operadora (Ecopetrol), la cual se encarga del diseño y plan de acción para la prueba, las empresas prestadoras de servicio, las cuales proveerán los motores PMM, y la empresa mediadora a la cual le compete tener el banco de prueba listo de acuerdo a los requerimientos.

De acuerdo a la información brindada por Ecopetrol se presentaron 2 problemas esenciales los cuales concluyeron en la cancelación de las pruebas en banco:

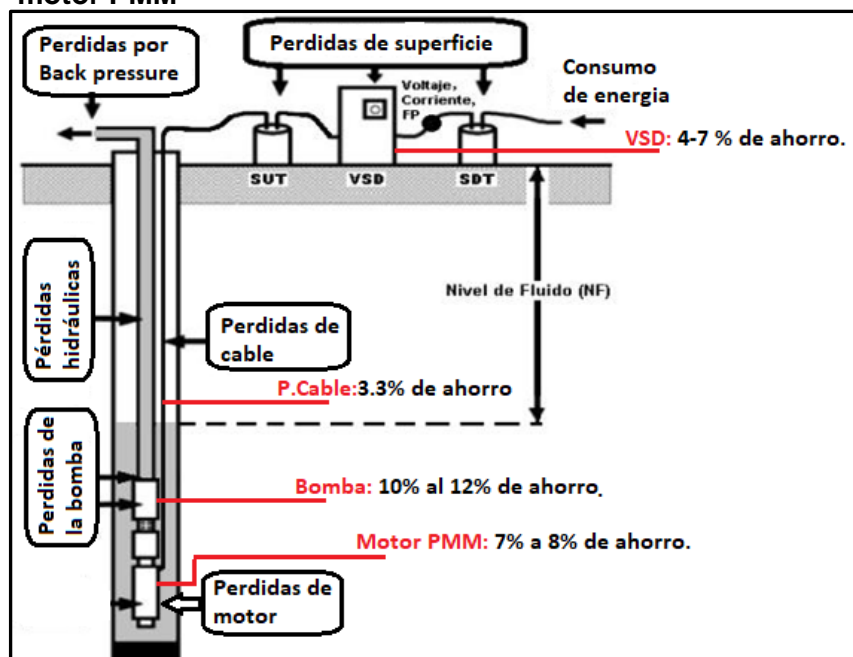
- No se lograron acuerdos de confidencialidad entre la empresa mediadora y las empresas proveedoras. El motivo principal fue no haber establecido un manejo adecuado de la información que se iba a obtener en la prueba en banco.
- No se logró tener listo el banco según los parámetros predeterminados para su evaluación. Dentro de los requerimientos era necesario que el banco tuviese la capacidad energética para llevar los motores al 100% de la carga, pero dado que la compañía únicamente contaba con la capacidad energética para llevar los motores a un 30%, fue necesario recalcar la necesidad de tramitar la solicitud a la empresa local de generación eléctrica para que se pudiese aumentar los voltajes de la línea a los niveles requeridos, lastimosamente después de 4 meses la empresa mediadora no llevo a cabo la diligencia con lo cual no se cumpliría la capacidad para llevar a cabo la prueba.

La finalidad principal de la prueba en banco para Ecopetrol era limitar el rango de ahorro porcentual gracias al uso de motores de imanes permanentes (PMM), ya que en un comienzo se tenía un rango que variaba desde el 8% hasta el 65%, este rango comprendía pruebas desarrolladas en campo donde se evaluaba el ahorro energético total, es decir, se incluía el equipo de fondo y superficie con elementos como el variador (VSD), los cables de conexión, la bomba, los sellos, etc. La empresa A<sup>58</sup> realizó una prueba piloto en el pozo R-1 donde implementó el motor PMM, sin embargo, se debió cambiar el sistema completo dado que las condiciones del campo no permitían el funcionamiento de este tipo de tecnologías. Al comparar con el sistema previo y el actual se concluyó que el ahorro fue del 27%. En la siguiente grafica se dividen los porcentajes ahorrados de acuerdo al equipo evaluado:

---

<sup>58</sup> Valencia.M. A, Departamento de tecnologías de producción, Vicepresidencia técnica, Ecopetrol S.A, Colombia,2018.

**Figura 12. Ahorro energético de acuerdo a los equipos puntuales en fondo y superficie para el sistema de levantamiento artificial de bombeo electro sumergible con motor PMM**



Fuente: Valencia.M. A, Copia de Pruebas PMM anterior operador, Departamento de tecnologías de producción, Vicepresidencia técnica, Ecopetrol S.A, Colombia, 2019, Hoja 6., modificado por Vargas.S y Solano B.

Como se logra observar en la **Figura 12** se encuentra segmentado el ahorro energético al implementar equipos de fondo y de superficie BES con PMM totalmente nuevos, de estas secciones únicamente entre el 7% y 8% corresponde a ahorros derivados al uso del motor PMM, por ende, el restante 20% no es de valor para el caso ya que actualmente los sistemas de superficie en Campo Rubiales tendrán la capacidad de manejar motores de inducción y de imanes permanentes. En el equipo de fondo, la bomba para pozos que se deban intervenir será la misma dejando como única variable energética el cambio del tipo de motor, concluyendo en que el rango no sea el idóneo o el verdadero para desarrollar un caso de negocio en búsqueda de la mejora energética gracias al motor que se utilizara para el levantamiento artificial.

Para cumplir con el objetivo y obtener un rango porcentual aceptable se llevarán a cabo dos acciones con diferentes enfoques:

- Se evaluarán los resultados brindados por dos (2) empresas operadoras las cuales en los últimos años han realizado pruebas piloto las cuales brindan resultados reales y tangibles con respecto al ahorro energético que se genera,

de acá se logrará analizar factores que perturben los resultados y se concluirá con la selección de un rango aproximado.

- Se desarrollará la simulación de acuerdo a un pozo tipo 5, con seis motores diferentes correspondientes a 3 empresas proveedoras (de estos equipos la mitad serán motores de inducción y la otra mitad motores de imanes permanentes), se obtendrá un rango de ahorro energético porcentual entre estos.

### **3.1 PRUEBAS REALIZADAS POR LAS EMPRESAS OPERADORAS A Y B**

A continuación, se describirá de manera general y se expondrán los resultados de las pruebas realizadas por dos empresas operadoras. Las pruebas se efectuaron entre el año 2016 y 2018, con lo cual se puede afirmar que son recientes. Estas permitirán reducir el rango de ahorro energético gracias al uso de motores PMM.

**3.1.1 Pruebas realizadas por la empresa A.** La empresa A realizó pruebas desde 2016 al 2018 a condiciones reales de campo con dos empresas proveedoras EP-1 y EP-2 las cuales brindaron 2 motores diferentes. EP-1 dispuso de un motor PMM de 330 HP y EP-2 dispuso de un motor PMM de 925 HP en un Campo ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales, las pruebas se realizaron con un protocolo de prueba que se dividía en 2 fases, en la fase I se instalaron los equipos PMM con un variador de frecuencia (VSD), es de resaltar que el proveedor del variador no fue el proveedor del motor. Por tanto, en ambos (EP-1 y EP-2) el variador con el cual funcionaron sus equipos fue el mismo. Para la fase II se instalaron los motores de inducción contando con la misma bomba e igual modelo de sellos de la fase I.

En ambos casos se mantuvieron las condiciones de yacimiento y de pozo tales como: diámetro de la tubería y presiones de cabeza. Para las dos fases se controlaron aspectos como Velocidad (RPM), llevando los equipos a 3.000, 3.500 y 3.800 RPM con lo que se garantizó el comportamiento análogo en las bombas con los motores PMM. Las mediciones fueron realizadas a 3 caudales diferentes, en cada uno de estos se tomó la información eléctrica en completamientos con IM y PMM.

**3.1.1.1 Resultados PMM vs IM, motor 330 HP.** A continuación, se observan los resultados obtenidos en las pruebas desarrolladas para un motor de imanes permanentes y un motor de inducción con 330 HP, donde se registraron variables como la frecuencia en superficie, las revoluciones por minuto (RPM) del motor, la energía consumida en unidades de KWh, la presión a la cual ingresa el fluido a la bomba (PIP - pump intake pressure) y BFPD (barriles de fluido por día).

**Tabla 5.Resultados de las pruebas LY-180**

LY-180( bajo promedio de flujo)											
Paso	Fase I PMM					Fase II IM					PMM ahorro de energía
	Motor RPM	Surface Hz	BFPD	KWh	PIP (psi)	Motor RPM	Surface Hz	BFPD	KWh	PIP	
1	3.298	110	3.630	64,5	955	3.298	55,8	3.660	78	934	-17%
2	3.509	117	4.070	77,3	933	3.509	59,5	4.120	91,5	920	-16%
3	4.018	134	5.040	108,4	889	4.018	68,3	5.020	131	885	-17%

**Fuente:** Anaya O.E, (2019), LY-180 – PMM vs Inducción, Grafica resultados motores PMM vs IM - 330 HP, recuperado de <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/KtbxLxgKGMHtLKbfVFpzncsGVtpgfRJJNV>.

Por medio de los datos de la tabla 5 se concluye que para llevar a superficie la misma cantidad de barriles de fluido los motores de inducción requieren de mayor energía, a pesar del aumento de las RPM y frecuencia, para cada paso estos consumen entre 16% y 17% más, quiere decir que el consumo en superficie KWh se reduce al implementar esta tecnología a su vez reduciendo los gastos energética.

La frecuencia es un parámetro a tener en cuenta ya que a pesar que el PMM duplica este valor para alcanzar las RPM requeridas, esto no se refleja en el consumo energético, ya que el aumento de la frecuencia es necesario al conocer que el motor PMM posee 2 pares de polos mientras que el motor de inducción tiene un solo par, en la siguiente ecuación se observa la relación existente entre RPM, pares de polos y frecuencia.

#### Ecuación 1.Pares de polos

$$P = \frac{60 \times f}{N}$$

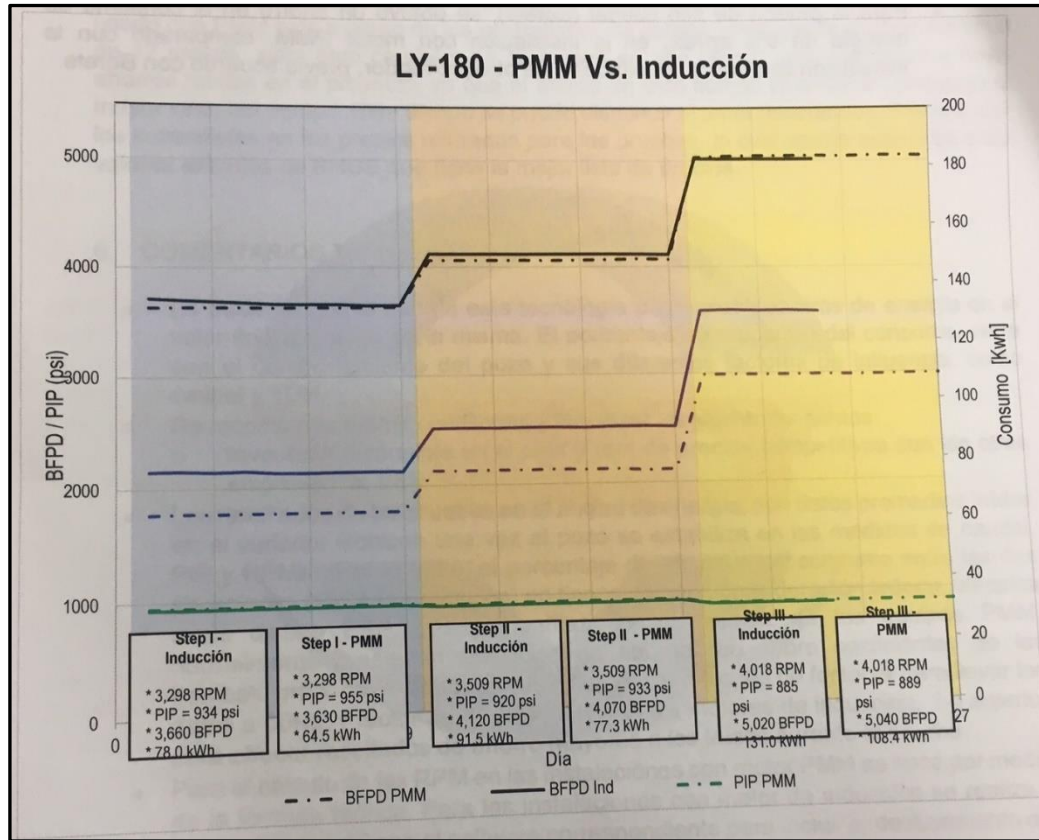
*Fuente:* P. Lynn. (2014). Electricity from wave and tide. USA. primera edición. (pp 144). Jhon Wiley and Sons Ltd.

P: pares de polos

f: Frecuencia (Hz)

N: Velocidad de sincronización (RPM)

**Figura 13. Grafica resultados motores PMM vs IM - 330 HP**



**Fuente:** Anaya O.E, (2019), LY-180 – PMM vs Inducción, Grafica resultados motores PMM vs IM - 330 HP, recuperado de <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/KtbxLxgKGMHtLKbfVFpzncsGVtpgfRJJNV>.

En la **Figura 13** se puede observar el comportamiento de ambos motores de acuerdo al tiempo (27 días), periodo en el cual ambos motores respondieron de la manera esperada llevando a superficie el caudal requerido durante los intervalos definidos ya que cada 10 días aumentaba de acuerdo a lo estipulado dentro de las premisas.

**3.1.1.2 Resultados PMM vs IM, motor 925 HP.** A continuación, se observan los resultados obtenidos en las pruebas desarrolladas para un motor de imanes permanentes y un motor de inducción con 925 HP, donde se registraron variables como la frecuencia en superficie, las revoluciones por minuto (RPM) del motor, la energía consumida en unidades de KWh, la presión a la cual ingresa el fluido a la bomba (PIP - pump intake pressure) y BFPD (barriles de fluido por día).

**Tabla 6. Resultados de las pruebas LY-140**

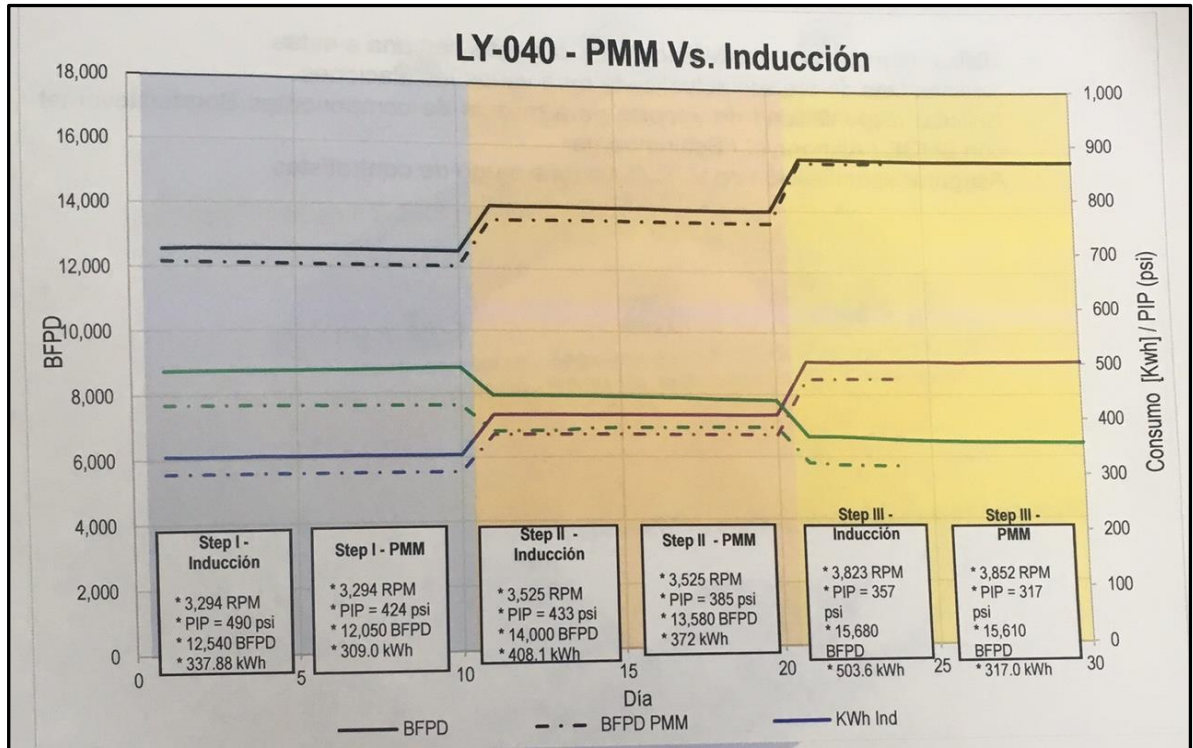
LY-140 (bajo promedio de flujo)											PMM ahorro de energía
Step	Fase I PMM					Fase II IM					
	Motor RPM	Surface Hz	BFPD	KWh	PIP (psi)	Motor RPM	Surface Hz	BFPD	KWh	PIP	
1	3.294	109,8	12.050	309	424	3.294	55,9	12.540	337,9	490	-9%
2	3.525	117,5	13.580	372	385	3.525	60	14.000	408,1	433	-9%
3	3.852	128,4	15.610	472.8	317	3.823	65	15.680	503,6	357	-6%

**Fuente.** Anaya O.E, (2019), LY-180 – PMM vs Inducción, Grafica resultados motores PMM vs IM - 330 HP, recuperado de <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/KtbxLxgKGMHtLKbfVFpzncsGVtpgfRJJNV>.

Se logra observar en la tabla que a pesar de contar con condiciones similares en términos de velocidad del motor (RPM), PIP y barriles de fluido por día (BFPD), el motor de imanes permanentes reduce el consumo energético entre un 6% y un 9%. Es de resaltar, como se realizó en la anterior prueba, que el cambio en la frecuencia responde a la cantidad de pares de polos, en este caso el motor PMM posee 2 pares de polos mientras que el motor de inducción tan solo un par de polos requiriendo menos frecuencia para su trabajo.



**Figura 14. Grafica resultados motores PMM vs IM para motores de 925HP.**



**Fuente:** Anaya O.E, (2019), LY-140 – PMM vs Inducción, Grafica resultados motores PMM vs IM - 925 HP, recuperado de <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/KtbxLxgKGMHtLKbfVFpzncsGVtpgfRJJNV>.

En la **Figura 14** se evidencia una pendiente negativa dado que a medida que se aumentan las RPM de cada motor el PIP disminuye.

### 3.1.1.3 Conclusiones pruebas empresa A.

- De acuerdo a los resultados expuestos para motores de 330HP y 925HP se puede concluir que el uso de PMM genera un ahorro energético para la producción.
- Mientras más potencia genere el motor, menor ahorro energético.
- Es necesario duplicar la frecuencia en los motores PMM para poder obtener la misma velocidad de sincronización que de un motor IM, esto debido a la cantidad de polos de cada motor.
- El pump intake pressure (PIP) a iguales condiciones de velocidad es mayor para los motores de imanes permanentes permitiendo aumentar los barriles llevados a superficie.

**3.1.2 Pruebas realizadas por la empresa B.** La empresa B realizó la inversión de 294 equipos de bombeo electro sumergible (BES), la mitad de los equipos de la EP-1 y el restante con la EP-3. Se midió el ahorro energético tanto en los equipos de fondo como de superficie, sin embargo, el detalle de las mediciones permitió conocer el ahorro energético generado por los motores, en promedio la reducción de consumo osciló entre el 10% y el 15%.

### 3.2 PRUEBAS SIMULADAS DE ACUERDO A POZO TIPO 5.

A continuación, se muestran las características del pozo tipo 5 y los resultados de las pruebas simuladas de acuerdo a una serie de premisas las cuales permiten una comparación cercana a la realidad.

**3.2.1 Pozo tipo 5.** En Campo Rubiales existen 5 tipos de pozos, desde tipo 1 hasta tipo 5, los cuales poseen características especiales que son consideradas para evaluar los requerimientos del sistema de levantamiento artificial, añadido a estas características, la mayoría de los pozos tendrán un survey similar el cual también se debe tener en cuenta al momento de escoger y asentar el sistema de levantamiento artificial<sup>59</sup>. A continuación, se observa la **tabla 7** con las características generales de cada uno de los tipos de pozos, donde características como el porcentaje de corte de agua, la viscosidad del fluido, la temperatura del reservorio, el índice de productividad, la tasa de flujo deseado, la presión del fondo fluyente y la temperatura en la cabeza del pozo serán patrones que permitirán segmentarlos. El tamaño del casing y tubing se encuentran denotados de la siguiente manera. El primer número hace referencia al diámetro externo (OD) mientras que el segundo número hace referencia al peso por longitud en este caso las unidades son libra/pie (Lb/ft).

**Tabla 7. Características de acuerdo al tipo de pozo**

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
<b>Tamaño Casing (lb/ft)</b>	7x23	7x23	7x23	7x23	7x23
<b>Tamaño Tubing (lb/ft)</b>	3½ x9,3	3 ½ x9,3	3 ½ x9,3	4 ½ x 11,6	4 ½ x 11,6

Fuente: elaboración propia.

<sup>59</sup> Mogollón, M., Arguelles, A., Rodríguez, A., Anaya, O., Miranda, S., Velásquez, E., & Villalobos, J. (2018, March 13). Lessons Learned from Extending Run Life for Hundreds of ESPs in a Heavy Oil Environment. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/189736-MS

**Tabla 7 (continuación)**

	<b>Tipo 1</b>	<b>Tipo 2</b>	<b>Tipo 3</b>	<b>Tipo 4</b>	<b>Tipo 5</b>
<b>Ubicación perforados (MD)</b>	4.150	3.554	3.554	3.554	3.554
<b>Gravedad aceite (API)</b>	14	13	13	13	13
<b>Gravedad del Agua (SG)</b>	1	1	1	1	1
<b>Porcentaje corte de agua (%)</b>	65	90	90	90	90
<b>GOR (scf/bbl)</b>	5	5	5	5	5
<b>Punto de burbuja (psi)</b>	80	80	80	80	80
<b>Viscosidad (mo 1)</b>	183	477	731	731	731
<b>Temperatura 1 (°F)</b>	146	140	145	145	145
<b>Viscosidad (mo 2)</b>	285	333			
<b>Temperatura 2 (°F)</b>	122	150			
<b>Presión estática (psi)</b>	1.100	1.000	1.000	1.000	1.000

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 7 (continuación)**

	<b>Tipo 1</b>	<b>Tipo 2</b>	<b>Tipo 3</b>	<b>Tipo 4</b>	<b>Tipo 5</b>
<b>Temperatura del reservorio (°F)</b>	150	130	145	145	145
<b>Índice de Productividad (stb/d/psi)</b>	3	5	9	16	22
<b>Tasa de Flujo Deseado (bbl/d)</b>	1.800	2.500	4.000	7.500	11.000
<b>Presión en la Cabeza de Pozo (psi)</b>	180	180	180	180	180
<b>Temperatura Cabeza de Pozo (°F)</b>	120	120	135	140	140
<b>Profundidad de ajuste deseado para la bomba (MD ft)</b>	2.700	2.600	2.600	2.600	2.600

Fuente: elaboración propia.

De esta información resalta la tasa de flujo deseado y la presión de fondo fluyente dado que es variable para cada tipo de pozo, con estos datos es posible conocer que pozo es, la nomenclatura es ascendente por tanto los valores más pequeños de tasa de flujo deseado y presión de fondo fluyente corresponderán al pozo tipo 1 a medida de estos valores crecen cambian de correspondencia a tipo 2, 3, 4 o 5; mientras el pozo tipo 1 posee una tasa de flujo deseado de 3 barriles por día, (bbl/d) , el tipo 5 tendrá una tasa de flujo de 22 bbl/d y mientras el pozo tipo 2 requiere una presión de fondo fluyente de 2.500 psi un pozo tipo 4 requerirá de una presión de 7.500 psi.

Ecopetrol S.A. brinda la información frente a la campaña de perforación entre 2019 a 2025 donde establecen que la totalidad de sus pozos perforados poseerán completamiento y características de pozo tipo 5, de esta forma la simulación que se realizará para evaluar los 6 motores de las empresas proveedoras tendrá premisas basadas en la información de la **tabla 7** e información adicional con mayor profundidad de acuerdo a la información brindada por la empresa.

**3.2.2 Descripción pozo tipo 5 para pruebas simuladas.** A continuación, se presentan los aspectos más importantes como: PVT, viscosidad de la mezcla a diferentes cortes de agua, estado mecánico y survey, los cuales permitirán conocer las condiciones requeridas para realizar el diseño del equipo de fondo y superficie que se utilizaron en las pruebas simuladas.

**3.2.2.1 Survey.** Este permite conocer las mediciones exactas para determinar la trayectoria del pozo. En este caso se tiene una profundidad medida (MD) de 4.148,1 ft, con una inclinación máxima de 90,35° y una profundidad vertical de 2.862,4 ft. Añadido a esto, en la Tabla 8 podemos observar el cambio de dirección o azimut a las diferentes profundidades en el pozo, también se pueden conocer las zonas donde se construye mayor ángulo, en este caso a 855 ft, 2.450,8 ft y 3.448,4 ft. Con esta información se puede localizar de manera exacta la trayectoria del pozo perforado hasta el target. Añadido a esto, en el Anexo A se adjunta el Survey completo del pozo.

**Tabla 8.Survey de un pozo tipo 5**

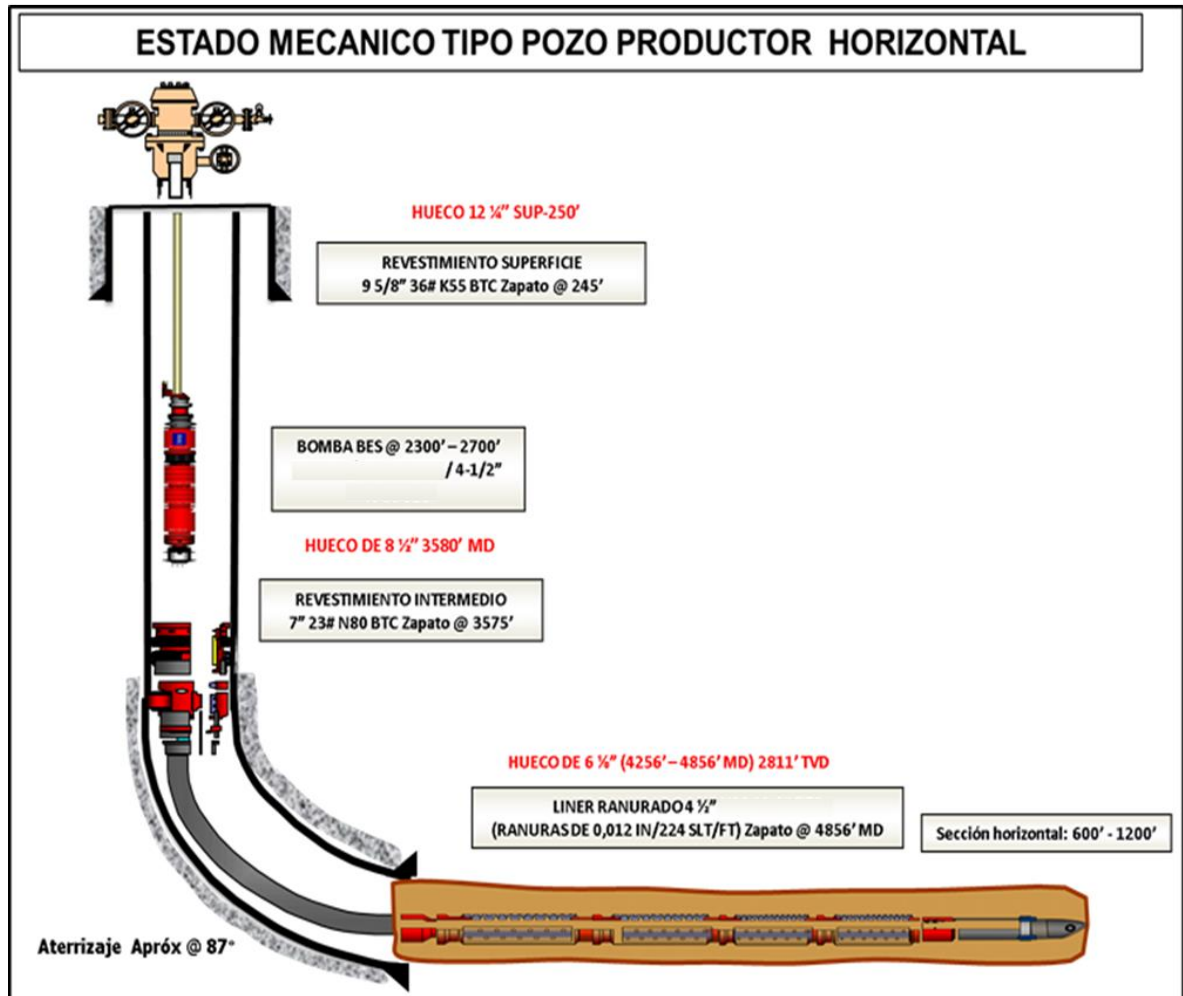
Mesure Depth (ft)	Inclinacion (*)	Azimuth (*)	Profundidad Vertical (ft)	+N/-S (ft)	+E/-W (ft)	Dogleg Rate (* /100ft)	Build Rate (* /100ft)	Turn Rate (* /100ft)	TFO(*)	Target
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
350	0	360	350	0	0	0	0	0	360	
850	10	202	847,5	-40,4	-16,3	2	2	0	202	
1810	10	202	1792,9	-194,9	-78,8	0	0	0	0	
2450,8	38,93	202,72	2370	-437,4	-179,5	4,51	4,51	0,11	0,94	
2605,1	38,93	202,72	2490	-526,8	-216,9	0	0	0	0	
3448,4	87	189,99	2863,4	-1230	-404	5,84	5,7	-1,51	-16,89	HINF2-313
3560,1	90,35	189,99	2866	-1340	-423,3	3	3	0	0	
4148,1	90,35	190	2862,4	-1919	-525,4	0	0	0	108,69	TINF2-313

**Fuente:** Anaya. O. Ecopetrol S.A. modificado por Vargas. S y Solano B.

También nos muestra los puntos más importantes de la perforación, en este caso se puede apreciar la profundidad medida y la profundidad vertical, se puede observar cómo cambia la inclinación del pozo a medida que se va perforando en donde a 850 ft se empieza a construir el ángulo. El dogleg rate y el build rate nos indican en que puntos se generaron grandes inclinaciones. El Azimuth nos indica la desviación en grados de mi pozo sobre nuestro norte verdadero. Por último, el target nos indica el punto(s) donde se desea llegar o donde se llegó.

**3.2.2.2 Estado mecánico.** Por medio de este recurso visual, (**figura 15**) se identifican las secciones que conforman el pozo con sus respectivos diámetros, los zapatos asentados a diferentes profundidades, la longitud de la sección horizontal y la ubicación de los diferentes equipos de completamiento y producción en fondo. La primera sección se perforo de la superficie a los 250 ft con un diámetro de 12,25 in, revestimiento de 9,625 in y con un asentamiento del zapato a 245 ft; la segunda sección se perforo hasta los 3.580 ft de profundidad medida (MD) con un diámetro de 8,5 in, revestimiento de 7 in y el zapato se asentó a 3.575 ft ; la sección productora tiene un diámetro perforado de 6,125 in, el zapato se asentó a 4.856 ft y se utilizó un liner ranurado de 4,5 in en la sección horizontal que posee una longitud de 600 ft a 1200 ft.

Figura 15. Estado Mecánico tipo pozo productor horizontal



Fuente: Anaya. O. Ecopetrol S.A. modificado por Solano. B y Vargas.S.

**3.2.2.3 Viscosidad de la mezcla de acuerdo al corte de agua.** Por medio de esta propiedad se puede observar la variación en la viscosidad de la mezcla de acuerdo al aumento en el corte del agua y la temperatura a la que se encuentren los fluidos.

**Tabla 9. Viscosidad de la mezcla en función del corte de agua**

corte de agua	100°F		150°F		180°F	
	Factor de viscosidad	Viscosidad de la mezcla	Factor de viscosidad	Viscosidad de la mezcla	Factor de viscosidad	Viscosidad de la mezcla
0%	1	3757	1	260	1	87
10%	1,379	5181	1,345	350	1,334	116
20%	1,728	6492	1,789	465	1,67	145
30%	3,102	11655	3,102	806	2,68	232
40%	5,25	19725	5,006	1301	4,569	396
50%	9,28	34866	7,03	1827	7,03	609

**Fuente:** Anaya. O. Ecopetrol S.A., GOR tipo 5, hoja 4, modificado por Solano. B y Vargas.S.

En la **tabla 9** se observa la variación de la viscosidad de acuerdo al corte de agua y temperatura de la mezcla, al aumentar el corte de agua se incrementa tanto el factor de viscosidad, este representa la resistencia interna de un fluido a fluir, a medida que este valor aumenta la resistencia será mayor, y la viscosidad de la mezcla. Otro factor del cual depende la viscosidad es la temperatura de la mezcla, analizando los valores a 100°F, 150°F y 180°F se concluye que a mayor temperatura menor viscosidad, este factor tiene mayor relevancia que el corte de agua, ejemplo de esto corresponde a que sus valores de viscosidad al 50% de corte de agua a 180°F son 6 veces menores que la viscosidad con un corte de agua de 0 a 100°F.

**3.2.2.4 Información PVT.** El PVT brinda la información de los fluidos presentes en el pozo, con esta información se pueden conocer los parámetros y metodologías para producir el yacimiento, además permite realizar el diseño adecuado de las diferentes instalaciones de los equipos de bombeo electrosumergible, análisis nodales y esquemas óptimos de producción.

**Tabla 10. Información PVT**

Parametro	Unidades	Referencia
Tipo de formación		Arenisca no consolidada
Temperatura de yacimiento promedio	°F	148,7
Presión de yacimiento promedio al datum	Psi	1080
Datum	ft	2716
Pb	Psi	80

**Fuente:** Anaya. O. modificado por Solano. B y Vargas S.



**Tabla 11 (continuación).**

<b>Parametro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Referencia</b>
Compresibilidad promedio @ Ty, (P1=Py P2=Pb)	psi <sup>-1</sup>	4,99E-06
Bod @ Pb	vol/vol	1,01254
Salinidad	ppm	830
Gravedad API	°API	12,5
Relación gas petróleo	SCF/STB	5
Densidad del petróleo @ Pb y Ty	gr/cc	0,919
Viscosidad del petróleo muerto @ 122°F	cP	762-1500
Viscosidad del petróleo muerto @ 150°F	cP	260
Viscosidad del petróleo muerto @ 210°F	cP	35-72
Viscosidad del petróleo vivo @ Ty y Py	cP	347

**Fuente:** Anaya. O. modificado por Solano. B y Vargas S.

**3.2.2.5 Información adicional.** Aparte de la información previamente mencionada, para realizar la simulación con los parámetros adecuados de los equipos es necesario conocer datos adicionales como: Presión estática, presión de fondo fluyente, índice de productividad, caudal de diseño, presión en cabeza, profundidad de asentamiento (MD) y temperatura de fluido en cabeza. **Tabla 11.**

**Tabla 12. Información adicional**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Referencia</b>
Presión estática	Psi	1.000
Presión de fondo fluyente.	Psi	615
Índice de productividad	BFPD/psi	20,78
Caudal de diseño	BFPD	8.000
Presión en cabeza	Psi	180
Profundidad de asentamiento	Ft	2.600
Temperatura de fluido en cabeza	°F	140

**Fuente:** elaboración propia.

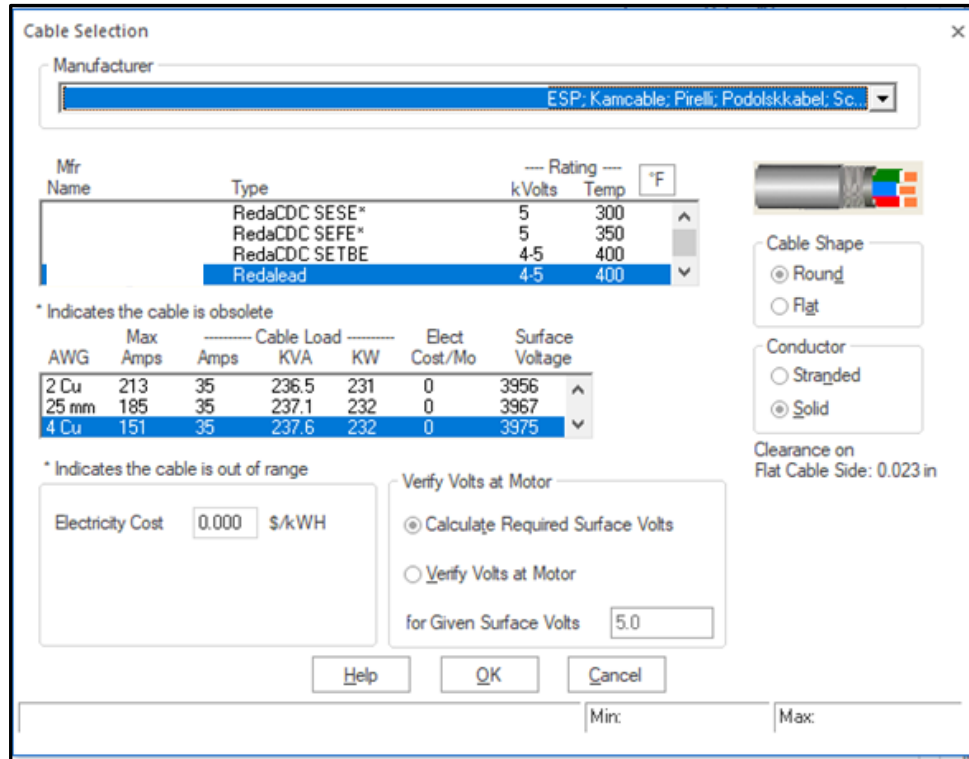
**3.2.3 Simulación de las pruebas.** La simulación de la prueba nos permite dar una aproximación real a los datos que se hubiesen podido obtener en la prueba en banco, el procedimiento que se llevara a cabo dentro de la simulación será una analogía a la prueba en banco de tal manera que se evaluaran 3 motores diferentes a los cuales se les medirá el ahorro energético, factor de potencia y eficiencia.

Se trabajó con los motores PMM e IM de las compañías A, B y C, de estas, las compañías A y B brindaron la información de sus motores para el simulador SUB-PUMP, este simulador fue escogido debido a que es una plataforma que permite diseñar sistemas BES, permite analizar el comportamiento de cada uno de los ítems del sistema y es el software que la empresa provee, mientras que la compañía C brindo las curvas de rendimiento de los motores con lo cual se pudo obtener los datos de ahorro, eficiencia y factor de potencia.

**3.2.3.1 Parámetros constantes dentro de la simulación.** Con el fin de realizar la simulación de la manera más equitativa y generar menos variables que puedan afectar los resultados, se establecieron parámetros operativos y equipos utilizados. A continuación, se presentarán los datos que permanecerán constantes en cada una de las simulaciones.

- **Cable:** Dentro de la interfaz para seleccionar el cable aparecen varias opciones, entre estas se encuentra el proveedor del cable, el tipo de cable de acuerdo a sus propiedades energéticas, la forma del cable, (si es redondo o plano), el costo energético por kWh consumida, el tipo de conductor y una opción para verificar el voltaje del motor. Para la simulación se utilizó un cable redondo (**Figura 16**), cuya máxima temperatura a tolerar es de 400°F, tolera un amperaje máximo de 151 Amperios y su tolerancia de voltaje oscila entre 4000-5000 Voltios.

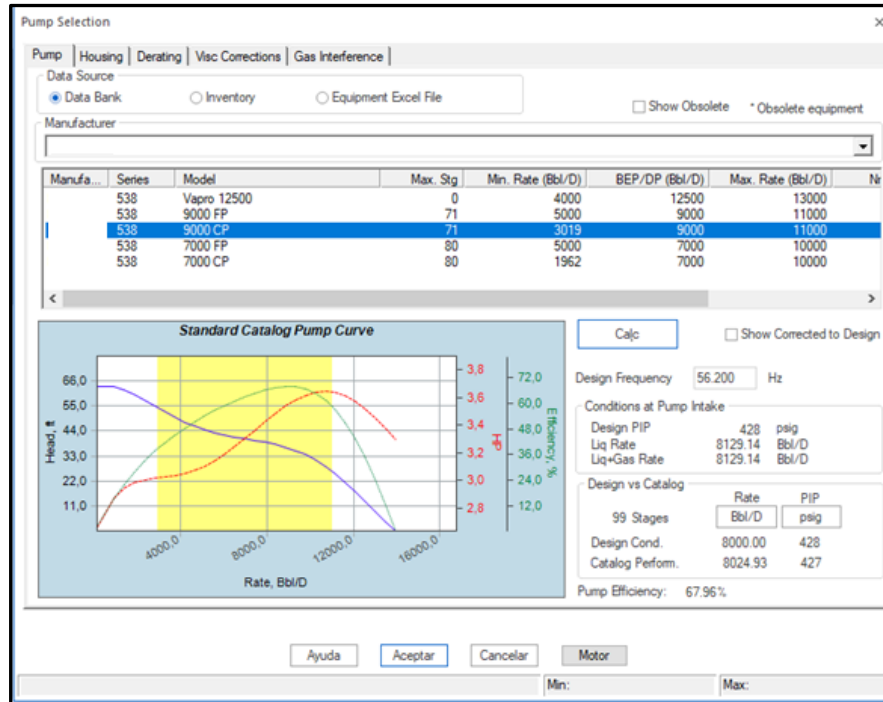
**Figura 16. Cable de potencia para simulación**



Fuente: elaboración propia.

- Bomba:** La bomba a utilizar en cada una de las pruebas (**Figura 17**), manejará los siguientes parámetros: Tasa mínima 3.019 bbl/d, tasa máxima 11.000 bbl/d, la presión de entrada a la bomba 428 psi. Para las simulaciones se mantuvo constante el número de etapas, por tanto, cada uno utilizó 99. La eficiencia de la bomba variara de acuerdo a las características operativas de cada uno de los motores a evaluar, estos parámetros fueron establecidos debido a requerimientos de Ecopetrol S.A.

**Figura 17.**Características de la bomba utilizada en la simulación



**Fuente:** elaboración propia.

En la **figura 17** es posible observar la interfaz de selección de la bomba, en la zona inferior izquierda, se ubican las curvas de rendimiento de la bomba, estas evalúan la cabeza (ft), la potencia (HP) y el porcentaje de eficiencia, añadido a esto es posible establecer la frecuencia, las condiciones en la entrada de la bomba para finalmente comparar las condiciones de diseño con las de rendimiento según el catálogo.

- **Caudal:** Para cada uno de los motores a evaluar se fijó un caudal de 8.000 BFPD. Dado que es un valor tolerado dentro de las características propias de pozo tipo 5.
- **Deslizamiento (slip):** Dado que es prioritario que la simulación sea lo más cercano a la realidad los motores de inducción cuentan con la función de deslizamiento (slip) activada evidenciando la necesidad de mayor energía para llevar a superficie el caudal de fluido requerido.

### 3.2.3.2 Pruebas compañía A.

- **Motor A-IM**

Bajo los parametros previamente establecidos se generaron los siguientes resultados: trabajando con una frecuencia de 58,5 Hz se logro llevar a superficie una tasa de 8.033 bbl/d de fluido ( aceite y agua), con una eficiencia del 84,74%, generado por una potencia de operación de 294,2 HP, con una carga de operación

del 91,45%, haciendo necesario 3.620,56 voltios para que el motor alcance una velocidad de rotación 3.331 RPM.(Figura 18).

**Figura 18. Simulación del motor de inducción de la compañía A**

Auto Select Equipment... Design Frequency: 58,500 Hz  Show Corrected to Design

**Pump Selection**

Configuration  Tapered pump  2 pumps  3 pumps

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer: SVL-BSG

The "Stages" option is for analyzing the pump performance. Rate will be calculated based on the fixed number of stages, which can be different from the design rate.

Mfr	Series	Model	BEP/DP Rate	Stages (Optional)	Show Obsolete
Pump	SVL-BSG	9000 CP	9000	99	<input checked="" type="checkbox"/>

\* Obsolete by Vendor

**Motor Selection**

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer: Compañía A

Mfr	Series	Type	HP	Volts	Catalog Amps	Nmpt Hz	Show Obsolete
Motor	Motor compañía A-IM		330.0	3895	51.0	60	<input type="checkbox"/>

**Cable Selection**

Cable-REDO

Split Cable

Back Help OK Cancel Next

**THEORETICAL PUMP PERFORMANCE**

Pump Data SVL-BSG

Number of Stages 99

Stages with Free Gas 0

Free Gas into Pump, % 0.0

	Design	Catalog
Total Dynamic Head (TDH), ft	3368.79	3499.49
Surface Rate (O+W), Bbl/D	8000.00	8416.05
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	N/A	8536.97
Pump Intake Pressure, psig	371.0	348.5
Operating Power, HP	N/A	313.7
Pump Efficiency, %	N/A	67.5

Motor Data **Mot-Com-A-IM**

Adjust for Motor Slip Yes

Operating Current, Amps 47.1

Operating Voltage, Volts 3620.56

Operating Motor Load HP 294.2

Operating Power Factor, frac 0.831

Operating Motor Load % 91.45

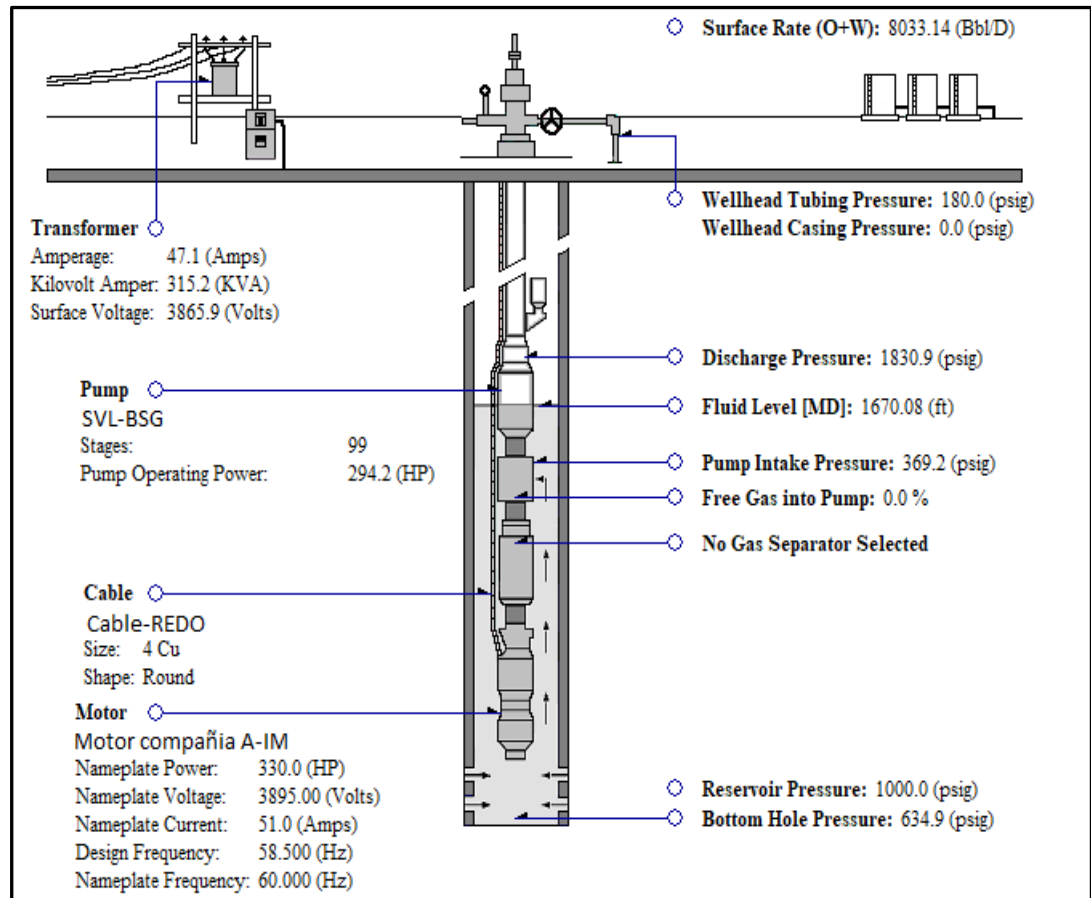
Operating Efficiency, % 84.74

	Catalog	Actual
Total Stages	99	99
Slip Stages	0	0
Total Dynamic Head (TDH), ft	3499.49	3381.89
Surface Rate (O+W), Bbl/D	8416.05	8033.14
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	8536.97	8148.56
Pump Intake Pressure, psig	348.5	369.2
Operating Power, HP	313.7	294.2
Operating Speed, RPM	3412	3331

**Fuente:** elaboración propia.

Según el estado mecánico brindado por el software, se obtuvo la potencia aparente instantánea requerida por el motor para su funcionamiento óptimo, este fue seleccionado luego de realizar iteraciones, en la potencia requerida, las cuales arrojaron resultados de menor potencia según las condiciones establecidas. Este parámetro será comparable con los demás motores para establecer el porcentaje de ahorro, ya que este valor y el factor de potencia, permitirán el cálculo de la potencia eléctrica la cual será de importancia al momento de contrastar el consumo real para un periodo de tiempo definido, añadido a este y como resultado de la información brindada por el software, será posible definir el factor de potencia del motor con el cual podemos describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo, de tal manera que a medida que el factor de potencia se acerque a 1 describirá una mayor eficiencia en el trabajo del motor.

**Figura 19. Estado mecánico del motor de inducción de la compañía A**



**Fuente:** elaboración propia.

Los datos obtenidos del estado mecánico para el motor de inducción (IM) de la compañía A (**Figura 19**) fueron los siguientes: La corriente eléctrica es de 47,1 Amperios, la potencia aparente instantánea es de 315,2 KVA, el nivel de fluido medido (MD) se encuentra a una profundidad de 1.670,08 ft y la presión de descarga es de 1.830,9 psig.

- **Motor A-PMM**

Bajo los parámetros previamente establecidos se generaron los siguientes resultados para el motor de imanes permanentes de la compañía A: trabajando con una frecuencia de 56 Hz se logró llevar a superficie una tasa de 8.022 bbl/d de fluido (aceite y agua), con una eficiencia del 90,69%, generado por una potencia de operación de 286,8 HP, con una carga de operación del 86,87%, haciendo necesario 2.328,93 voltios para que el motor alcance una velocidad de rotación 3.396 RPM. (**Figura 20**)

**Figura 20. Simulación del motor de imanes permanentes de la compañía A**

Auto Select Equipment...
Design Frequency: 56.600 Hz  Show Corrected to Design

**Pump Selection**

Configuration  Tapered pump  2 pumps  3 pumps

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer: SVL-BSG

The "Stages" option is for analyzing the pump performance. Rate will be calculated based on the fixed number of stages, which can be different from the design rate.

Pump	Mfr	Series	Model	BEP/DP Rate	Stages (Optional)	Show Obsolete
	SVL-BSG		9000 CP	9000	99 <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

\* Obsolete by Vendor

**Motor Selection**

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer: Compañía A

Motor	Mfr	Series	Type	HP	Volts	Catalog Amps	Nmpt Hz	Show Obsolete
	Motor compañía A-PMM			350.0	2664	68.0	60	<input type="checkbox"/>

**Cable Selection**

Split Cable

Cable-REDO

Back Help OK Cancel Next

Bottom Hole Pressure, psig 636.36

**THEORETICAL PUMP PERFORMANCE**

**Pump Data** **SVL-BSG**

Number of Stages 99

Stages with Free Gas 0

Free Gas into Pump, % 0.0

	Design	Catalog
Total Dynamic Head (TDH), ft	3297.41	3304.26
Surface Rate (O+W), Bbl/D	8000.00	8022.70
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	N/A	8138.55
Pump Intake Pressure, psig	401.9	400.7
Operating Power, HP	N/A	286.8
Pump Efficiency, %	N/A	67.9

**Motor Data** **Mot-Com-A-PMM**

Adjust for Motor Slip No

Operating Current, Amps 59.8

Operating Voltage, Volts 2328.93

Operating Motor Load HP 286.8

Operating Power Factor, frac 0.920

Operating Motor Load % 86.87

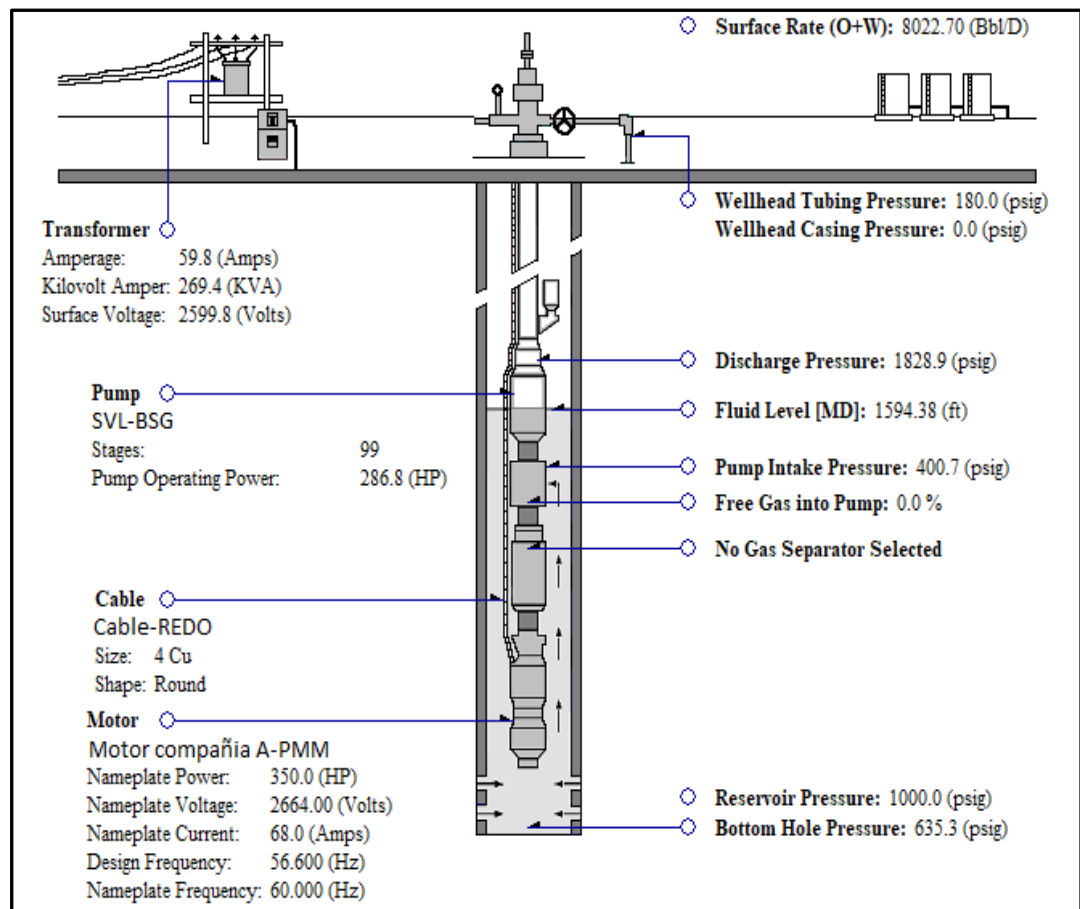
Operating Efficiency, % 90.69

	Catalog	Actual
Total Stages	99	99
Slip Stages	0	0
Total Dynamic Head (TDH), ft	3304.26	3304.26
Surface Rate (O+W), Bbl/D	8022.70	8022.70
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	8138.55	8138.55
Pump Intake Pressure, psig	400.7	400.7
Operating Power, HP	286.8	286.8
Operating Speed, RPM	3396	3396

**Fuente:** elaboración propia.

Los datos obtenidos del estado mecánico para el motor de imanes permanentes (PMM) de la compañía A (**Figura 21**) fueron los siguientes: La corriente eléctrica es de 59,8 Amperios, la potencia aparente instantánea es de 269,4 KVA, el nivel de fluido medido (MD) se encuentra a una profundidad de 1.594,38 ft y la presión de descarga es de 1.828,9 psi.

**Figura 21. Estado mecánico del motor de imanes permanentes de la compañía A**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2.3.3 Pruebas compañía B.

- **Motor B-IM**

Bajo los parámetros previamente establecidos se generaron los siguientes resultados para el motor de inducción (IM) de la compañía B: trabajando con una frecuencia de 57 Hz se logró llevar a superficie una tasa de 8.009 bbl/d de fluido (aceite y agua), con una eficiencia del 86,89%, generado por una potencia de operación de 292,3 HP, con una carga de operación del 86,92%, haciendo necesario 2.964 voltios para que el motor alcance una velocidad de rotación 3.325 RPM.(Figura 22)



**Figura 22. Simulación del motor de inducción de la compañía B**

Auto Select Equipment... Design Frequency: 57.000 Hz  Show Corrected to Design

Pump Selection

Configuration  Tapered pump  2 pumps  3 pumps

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer SVL-BSG

The "Stages" option is for analyzing the pump performance. Rate will be calculated based on the fixed number of stages, which can be different from the design rate.

Pump	Mfr	Series	Model	BEP/DP Rate	Stages (Optional)	Show Obsolete
	SVL-BSG		9000 CP	9000	99	<input checked="" type="checkbox"/>

\* Obsolete by Vendor

Motor Selection

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer Compañía B

Motor	Mfr	Series	Type	HP	Volts	Catalog Amps	Nmpt Hz	Show Obsolete
	Motor compañía B-IM			354.0	3120	65.0	60	<input type="checkbox"/>

Cable Selection

Cable-REDO

Split Cable

Bottom Hole Pressure, psig 636.36

THEORETICAL PUMP PERFORMANCE

Pump Data SVL-BSG

Number of Stages 99

Stages with Free Gas 0

Free Gas into Pump, % 0.0

	Design	Catalog
Total Dynamic Head (TDH), ft	3365.62	3367.85
Surface Rate (O+W), Bbl/D	8000.00	8009.22
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	N/A	8125.21
Pump Intake Pressure, psig	372.4	371.9
Operating Power, HP	N/A	292.3
Pump Efficiency, %	N/A	67.8

Motor Data Mot-Com-B-IM

Adjust for Motor Slip No

Operating Current, Amps 57.2

Operating Voltage, Volts 2964.00

Operating Motor Load HP 292.3

Operating Power Factor, frac 0.862

Operating Motor Load % 86.92

Operating Efficiency, % 86.89

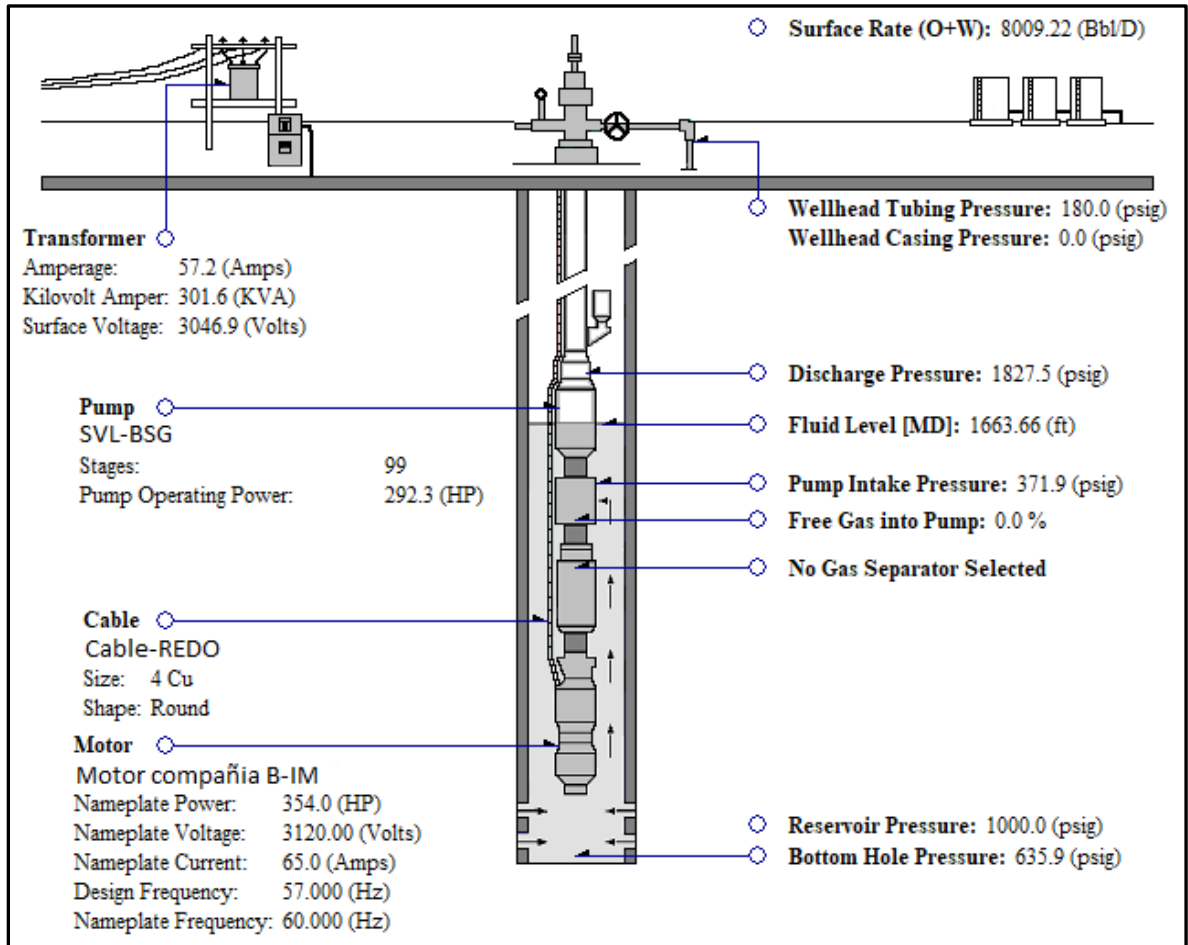
	Catalog	Actual
Total Stages	99	99
Slip Stages	0	0
Total Dynamic Head (TDH), ft	3367.85	3367.85
Surface Rate (O+W), Bbl/D	8009.22	8009.22
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	8125.21	8125.21
Pump Intake Pressure, psig	371.9	371.9
Operating Power, HP	292.3	292.3
Operating Speed, RPM	3325	3325

Back Help OK Cancel Next

Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos del estado mecánico para el motor de inducción (IM) de la compañía B (Figura 23) fueron los siguientes: La corriente eléctrica es de 57,2 Amperios, la potencia aparente instantánea es de 301,6 KVA, el nivel de fluido medido (MD) se encuentra a una profundidad de 1.663,66 ft y la presión de descarga es de 1.827,5 psi.

**Figura 23. Estado mecánico del motor de inducción de la compañía B**



Fuente: elaboración propia.

• **Motor B-PMM**

Bajo los parametros previamente establecidos se generaron los siguientes resultados para el motor de imanes permanentes (PMM) de la compañía B: trabajando con una frecuencia de 56,2 Hz se logro llevar a superficie una tasa de 8.024 bbl/d de fluido ( aceite y agua), con una eficiencia del 92,97%, generado por una potencia de operación de 281,3 HP, con una carga de operación del 87,06%, haciendo necesario 3.846,67 voltios para que el motor alcance una velocidad de rotacion 3.372 RPM.(Figura 24)

**Figura 24. Simulación del motor de imanes permanentes de la compañía B**

Auto Select Equipment... Design Frequency: 56.200 Hz  Show Corrected to Design

**Pump Selection**

Configuration  Tapered pump  2 pumps  3 pumps

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer SVL-BSG

The "Stages" option is for analyzing the pump performance. Rate will be calculated based on the fixed number of stages, which can be different from the design rate.

Mfr	Series	Model	BEP/DP Rate	Stages (Optional)	Show Obsolete
Pump	SVL-BSG	9000 CP	9000	99	<input checked="" type="checkbox"/>

\* Obsolete by Vendor

**Motor Selection**

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer Compañía B

Mfr	Series	Type	HP	Volts	Catalog Amps	Nmpt Hz	Show Obsolete
Motor	Motor Compañía B-PMM		345.0	4190	39.6	60	<input type="checkbox"/>

**Cable Selection**

Cable-REDO

Split Cable

Back Help OK Cancel Next

**Bottom Hole Pressure, psig** 636.36

**THEORETICAL PUMP PERFORMANCE**

Pump Data **SVL-BSG**

Parameter	Design	Catalog
Number of Stages	99	3243.87
Stages with Free Gas	0	
Free Gas into Pump, %	0.0	
Total Dynamic Head (TDH), ft	3237.04	3243.87
Surface Rate (O+W), Bbl/D	8000.00	8024.93
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	N/A	8140.53
Pump Intake Pressure, psig	427.9	426.8
Operating Power, HP	N/A	281.3
Pump Efficiency, %	N/A	68.0

**Motor Data** **Mot-Com-B-PMM**

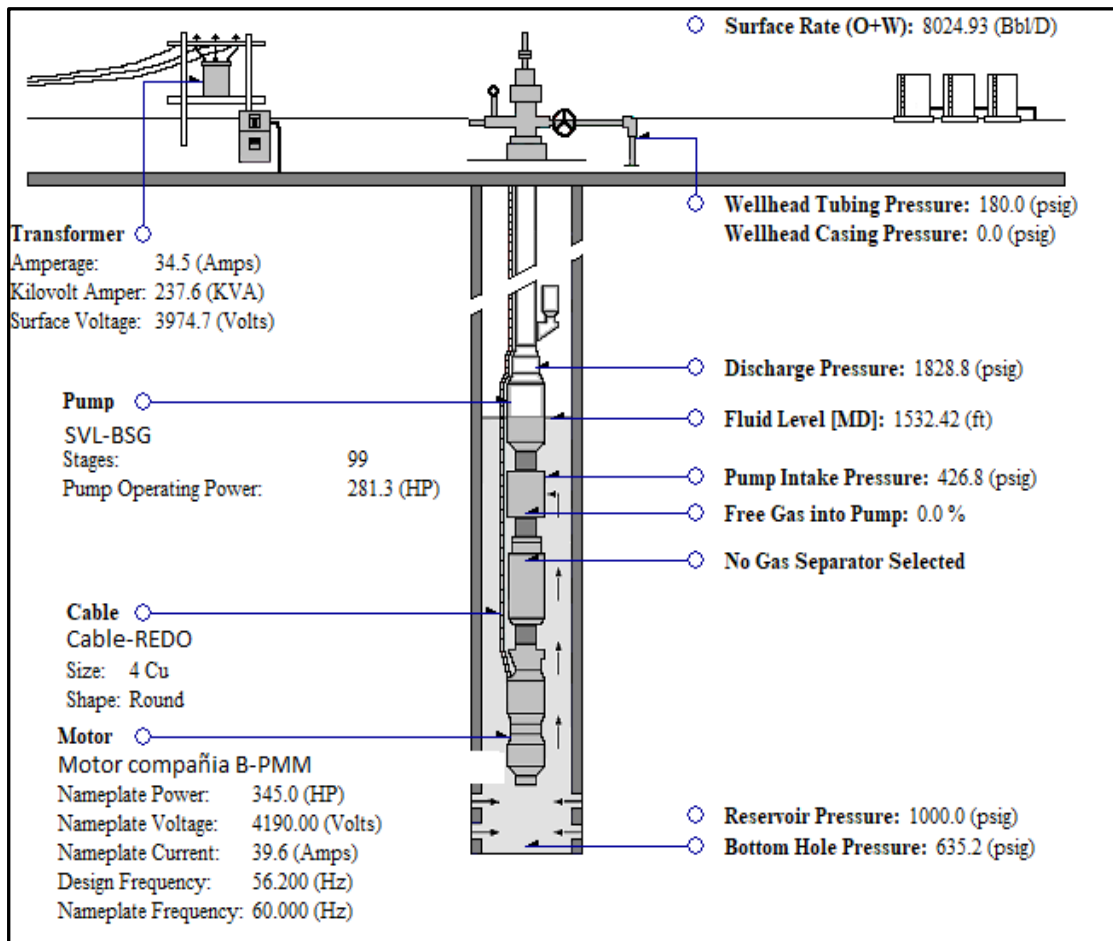
Parameter	Value
Adjust for Motor Slip	No
Operating Current, Amps	34.5
Operating Voltage, Volts	3846.67
Operating Motor Load HP	281.3
Operating Power Factor, frac	0.977
Operating Motor Load %	87.06
Operating Efficiency, %	92.97

Parameter	Catalog	Actual
Total Stages	99	99
Slip Stages	0	0
Total Dynamic Head (TDH), ft	3243.87	3243.87
Surface Rate (O+W), Bbl/D	8024.93	8024.93
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	8140.53	8140.53
Pump Intake Pressure, psig	426.8	426.8
Operating Power, HP	281.3	281.3
Operating Speed, RPM	3372	3372

**Fuente:** elaboración propia.

Los datos obtenidos del estado mecánico para el motor de imanes permanentes (PMM) de la compañía B (**Figura 25**) fueron los siguientes: La corriente eléctrica es de 34,5 Amperios, la potencia aparente instantánea es de 237,06 KVA, el nivel de fluido medido (MD) se encuentra a una profundidad de 1.532,42 ft y la presión de descarga es de 1.828,8 psi.

**Figura 25. Estado mecánico del motor de imanes permanentes de la compañía B**



Fuente: elaboración propia.

**3.2.3.4 Resultados compañía C.** Para la obtención de datos de esta compañía se brindaron las curvas de desempeño de los motores (IM y PMM). A partir de estas se calcularon los parámetros medidos en los proveedores previamente evaluados y se determinaron valores comparativos como eficiencia, potencia aparente instantánea y el factor de potencia.

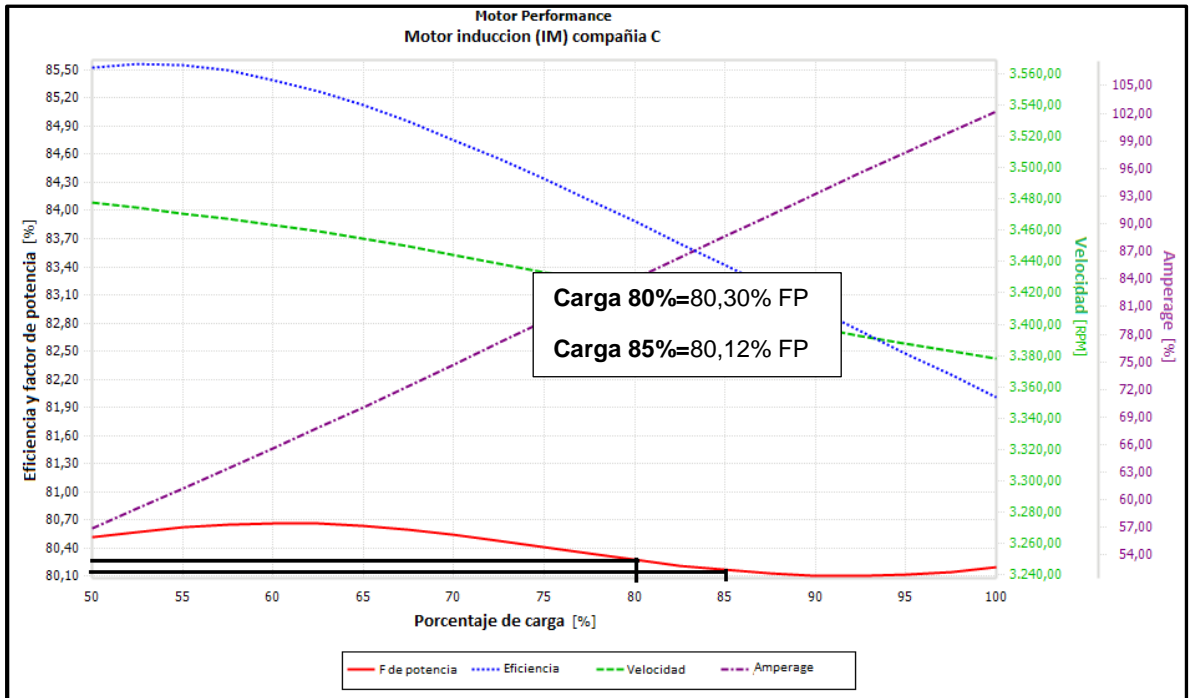
- **Motor C-IM**

Se evaluará el motor de inducción de la compañía C por medio de las gráficas de desempeño a una frecuencia de 60 Hz y de acuerdo a la compañía, este motor a esas condiciones proporciona una potencia de 293 HP.

Los cálculos se realizaron a partir de una carga del 80% y otra del 85%, con esta información se realizará una aproximación adecuada para establecer parámetros de KVA, Factor de Potencia y Eficiencia que permitan compararlo con los motores de las compañías A y B.

En las **Figuras 26, 27 y 28** se muestran la lectura de la gráfica para las cargas previamente definidas adquiriendo información correspondiente a la velocidad (RPM), eficiencia (%) y Factor de Potencia (%).

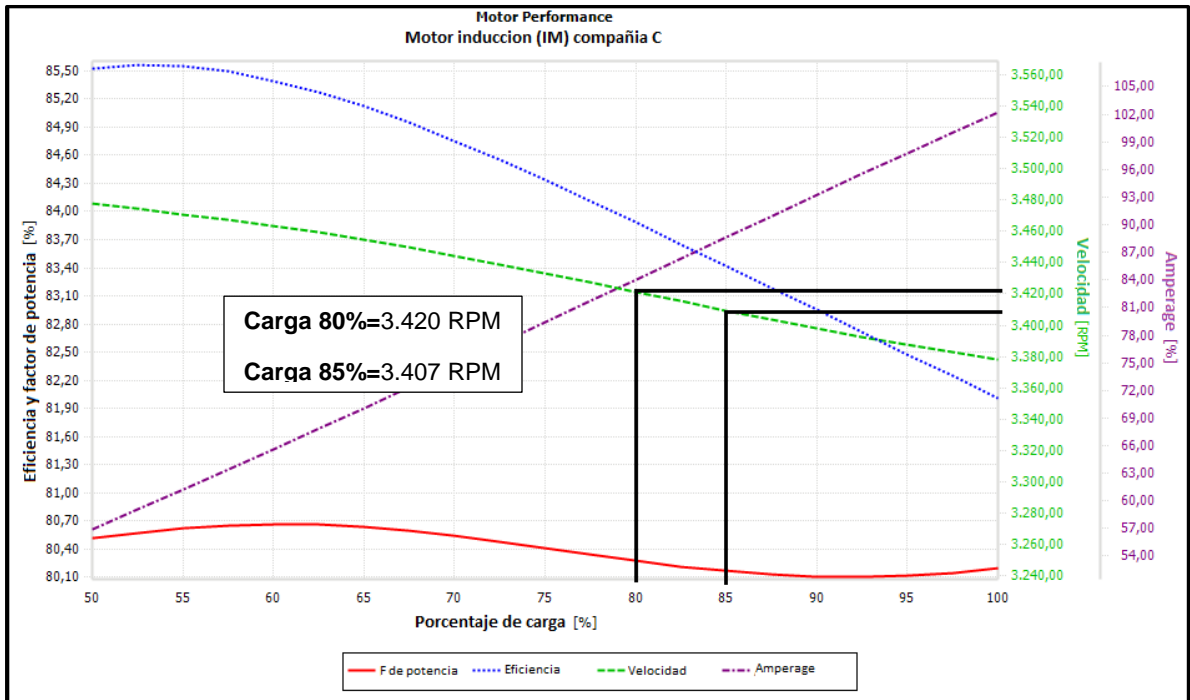
**Figura 26. Curvas de rendimiento del motor de inducción compañía C (Factor de Potencia)**



Fuente: elaboración propia.

Para leer esta gráfica se debe iniciar con el porcentaje de carga elegido en el eje X, se traza una línea recta vertical que finalice en la intersección con la línea de color rojo que corresponde al Factor de potencia, a partir de la intersección se traza otra línea, esta vez horizontal en dirección al eje Y correspondiente al porcentaje del factor de potencia, el lugar donde interseca la línea con el eje Y es el punto de lectura. Para una carga del 80% la lectura del Factor de potencia es de 80,30% y a una carga del 85% la lectura del factor de potencia es de 80,12%.

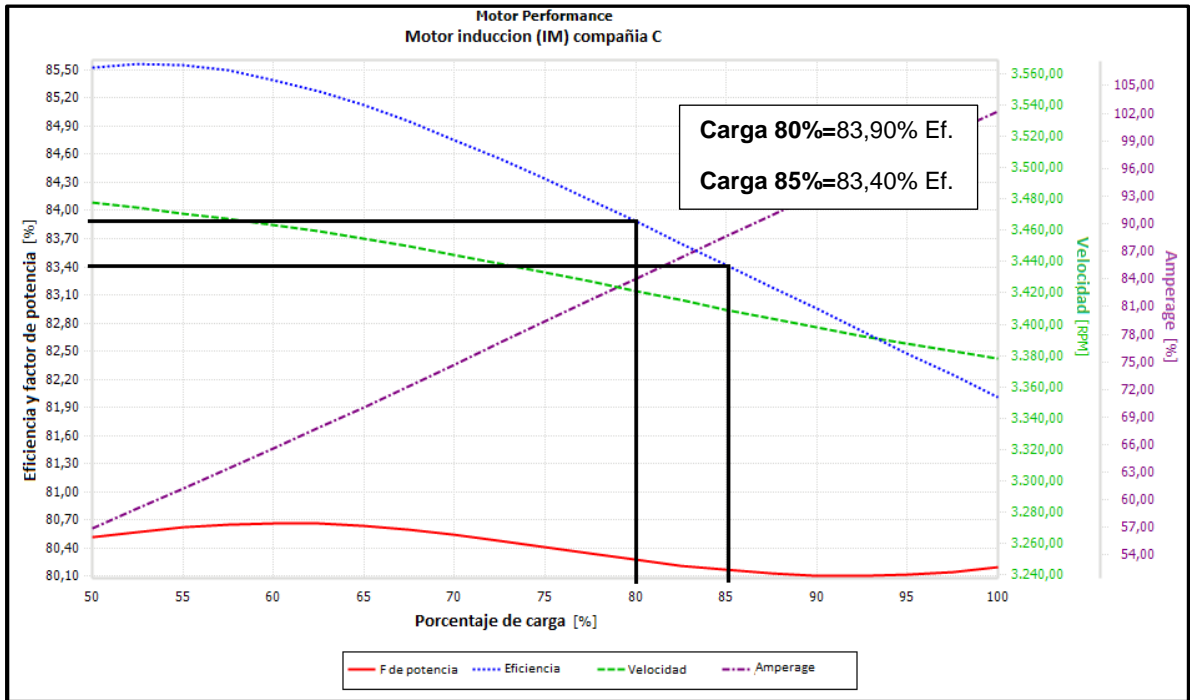
**Figura 27. Curvas de rendimiento del motor de inducción compañía C (Velocidad)**



**Fuente:** elaboración propia.

Para realizar la lectura de la gráfica se debe iniciar con el porcentaje de carga elegido en el eje X, se traza una línea recta vertical que finalice en la intersección con la línea de color verde que corresponde a la velocidad (RPM), a partir de la intersección se trazara otra línea, esta vez horizontal en dirección al eje Y correspondiente a la velocidad (RPM), el lugar donde interseca la línea con el eje Y es el punto de lectura. Para una carga del 80% la lectura de velocidad es de 3.420 RPM y a una carga del 85% la lectura de velocidad es de 3.407 RPM.

**Figura 28. Curvas de rendimiento del motor de inducción compañía C (Eficiencia)**



Fuente: elaboración propia.

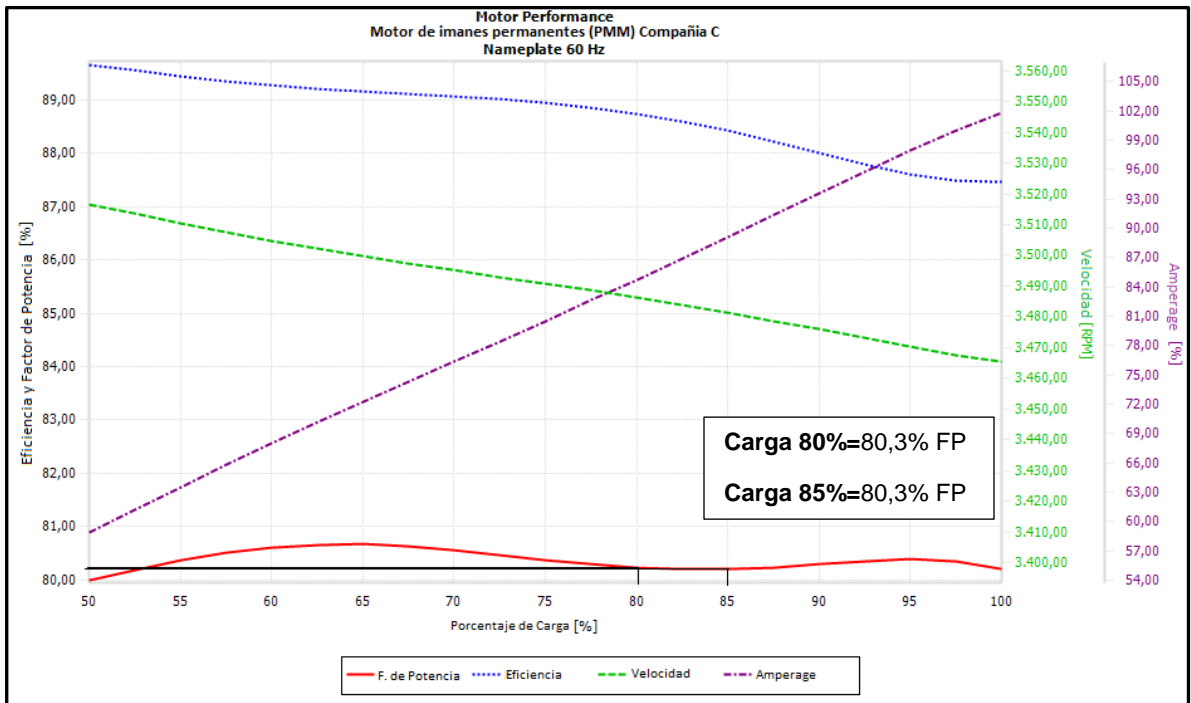
Para realizar la lectura de la gráfica se debe iniciar con el porcentaje de carga elegido en el eje X, se traza una línea recta vertical que finalice en la intersección con la línea de color Azul que corresponde al porcentaje de eficiencia (%), a partir de la intersección se trazara otra línea, esta vez horizontal en dirección al eje Y correspondiente a la eficiencia y factor de potencia (%), el lugar donde interseca la línea con el eje Y es el punto de lectura. Para una carga del 80% la lectura de eficiencia es de 83,90% y a una carga del 85% la lectura de eficiencia es de 83,40%.

- **Motor C-PMM**

Se evaluará el motor de imanes permanentes (PMM) de la compañía C por medio de las gráficas de desempeño a una frecuencia de 60 Hz y de acuerdo a la compañía, este motor a esas condiciones proporciona una potencia de 284 HP.

Los cálculos se realizaron a partir de una carga del 80% y otra del 85%, con esta información se realizará una aproximación adecuada para establecer parámetros de KVA, Factor de Potencia y Eficiencia que permitan compararlo con los motores de las compañías A y B. En las **Figuras 29, 30 y 31** se muestra la lectura de la gráfica para las cargas previamente definidas adquiriendo información correspondiente a la velocidad (RPM), eficiencia (%) y Factor de Potencia (%).

**Figura 29. Curvas de rendimiento del motor de imanes permanentes compañía C (Factor de potencia)**

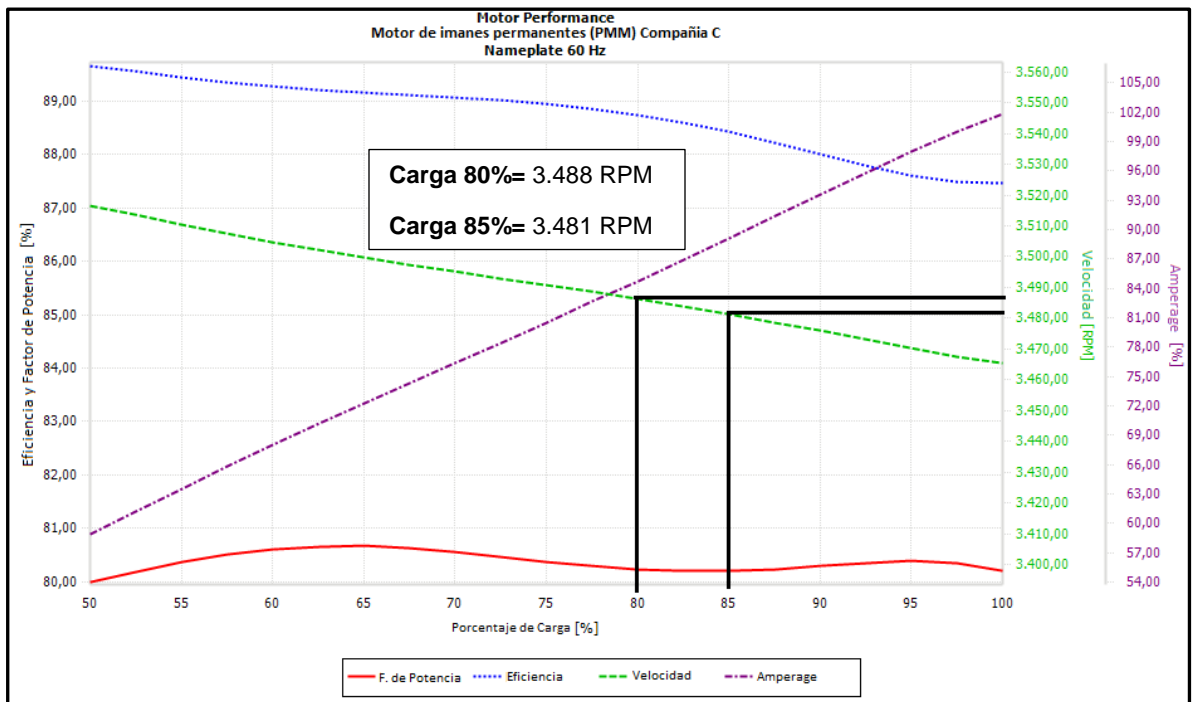


Fuente: elaboración propia.

Para leer esta grafica se debe iniciar con el porcentaje de carga elegido en el eje X, se traza una línea recta vertical que finalice en la intersección con la línea de color rojo que corresponde al Factor de potencia, a partir de la intersección se trazara otra línea, esta vez horizontal en dirección al eje Y correspondiente al porcentaje del factor de potencia, el lugar donde interseca la línea con el eje Y es el punto de lectura. Para una carga del 80% la lectura del Factor de potencia es de 80,30% y a una carga del 85% la lectura del factor de potencia es de 80,3%.



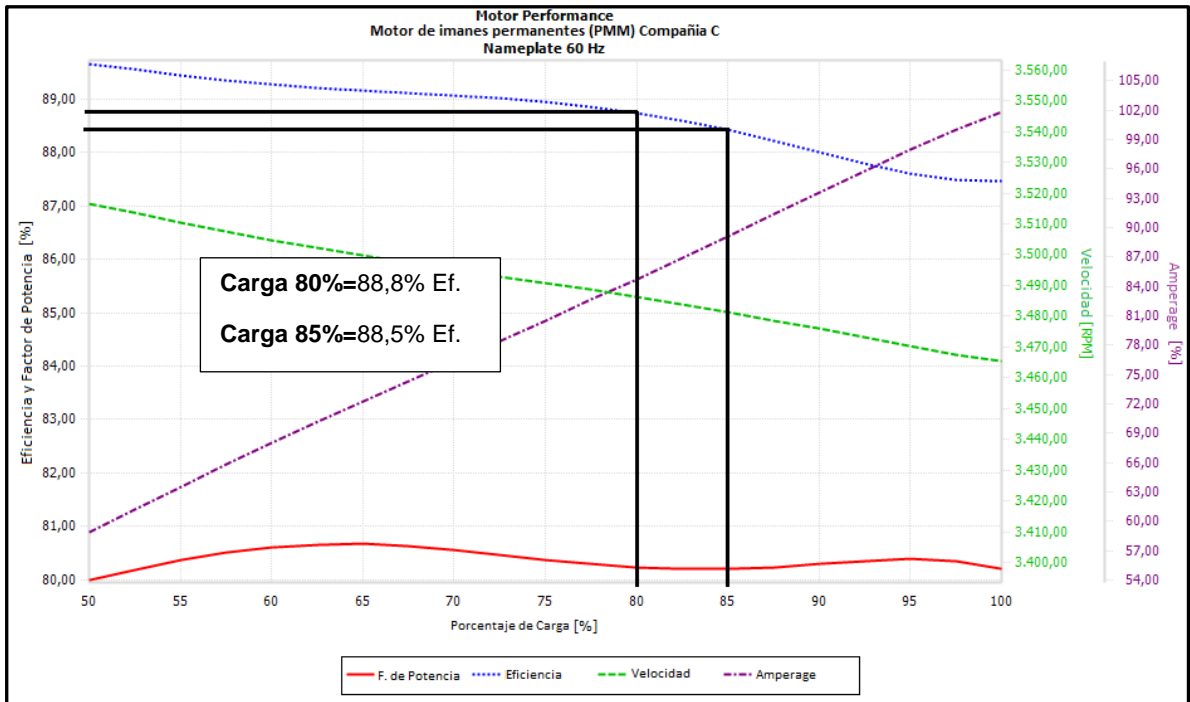
**Figura 30. Curvas de rendimiento del motor de imanes permanentes (PMM) compañía C (Velocidad)**



**Fuente:** elaboración propia.

Para realizar la lectura de la gráfica se debe iniciar con el porcentaje de carga elegido en el eje X, se traza una línea recta vertical que finalice en la intersección con la línea de color verde que corresponde a la velocidad (RPM), a partir de la intersección se trazara otra línea, esta vez horizontal, en dirección al eje Y correspondiente a la velocidad (RPM), el lugar donde interseca la línea con el eje Y es el punto de lectura. Para una carga del 80% la lectura de velocidad es de 3.488 RPM y a una carga del 85% la lectura de velocidad es de 3.481 RPM.

**Figura 31. Curvas de rendimiento del motor de imanes permanentes compañía C (Eficiencia)**



Fuente: elaboración propia.

Para realizar la lectura de la gráfica se debe iniciar con el porcentaje de carga elegido en el eje X, se traza una línea recta vertical que finalice en la intersección con la línea de color Azul que corresponde al porcentaje de eficiencia (%), a partir de la intersección se trazara otra línea, esta vez horizontal en dirección al eje Y correspondiente a la eficiencia y factor de potencia (%), el lugar donde interseca la línea con el eje Y es el punto de lectura. Para una carga del 80% la lectura de eficiencia es de 88,80% y a una carga del 85% la lectura de eficiencia es de 88,50%.

• **Potencia aparente instantánea motores compañía C**

Para determinar la potencia aparente instantánea (KVA) se utilizará la **ecuación 2** la cual permite a partir de términos conocidos como: Factor de potencia, eficiencia, potencia del motor y el factor de conversión 746, calcular la potencia aparente instantánea.

**Ecuación 2. Ecuación para el cálculo del KVA**

$$KVA = \frac{HP \times 746}{EFF \times PF}$$

Fuente: HDR Engineering Inc. (2001). Handbook of public water systems. Segunda edición. New York. USA. (pp1014) Wiley, J and Sons Ltd.

HP: Potencia del motor.  
 EFF: Eficiencia.  
 PF: Factor de Potencia.  
 KVA: Potencia Aparente Instantánea.

Con los resultados obtenidos a partir de las curvas de rendimiento de los motores PMM e IM de la compañía C es posible aplicar la **ecuación 2** para hallar el valor de la potencia aparente instantánea. En las **tablas 12 y 13** se resaltan las condiciones de carga del motor, en este caso entre 80% y 85%, y las variables adquiridas a esas condiciones las cuales permiten establecer valores de potencia, estos resultados serán comparados con los de las compañías A y B.

**Tabla 13. Resultados Motor IM Compañía C**

Carga del Motor (%)	Eficiencia (%)	Factor de potencia (%)	Potencia del Motor (HP)	Potencia aparente instantánea (KVA)
80	83,90	80,30	293	324,43
85	83,40	80,20	293	326,78

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 14. Resultados Motor PMM Compañía C**

Carga del Motor (%)	Eficiencia (%)	Factor de potencia (%)	Potencia del Motor (HP)	Potencia aparente instantánea (KVA)
80	88,80	80,30	284	297,11
85	88,50	80,30	284	298,12

Fuente: elaboración propia.

**3.2.4 Análisis de los resultados.** En la **Tabla 14** se observan los resultados obtenidos para cada una de las compañías proveedoras de motores IM y PMM, desglosado en ítems como Velocidad (RPM), Potencia aparente instantánea (KVA), Potencia Eléctrica instantánea (KW), Potencia del motor (HP), Factor de Potencia (%), carga del motor (%) y eficiencia (%). Con el fin de relacionar de manera adecuada el consumo energético con los costos posteriores se calculó la potencia eléctrica instantánea por medio de la ecuación 3.

**Ecuación 3. Cálculo de Potencia eléctrica instantánea.**

$$KW = KVA * PF$$

Fuente: Whitfield, J. (1995). Electrical craft principles. Cuarta edición. London.UK. (pp115) Institution of electrical engineers.

KW: potencia eléctrica instantánea.

KVA: potencia aparente instantánea.

PF: factor de potencia

Para iniciar la evaluación de los motores de cada compañía se debe partir por las condiciones de carga, la carga oscila entre 91% y 85%, esto equilibra la comparación dado que si la carga es menor al 50% la reducción en el rendimiento de los motores IM serían más notorios. A dichas condiciones la eficiencia de los motores es mayor al 83%, sin embargo, para los motores PMM la eficiencia no es menor al 88% denotando mejores resultados. El factor de potencia no es una variable muy diciente ya que tanto en las simulaciones como en la comparación de curvas de rendimiento sus cifras son iguales o cercanas, la única compañía que presenta diferencia es la compañía B, donde el motor PMM brinda un 11% más en su factor de potencia transformando en trabajo mucha más energía. La potencia es un factor a resaltar ya que, en la columna, potencia del motor (HP), los motores de inducción, sin importar la compañía, generan mayor potencia que los motores PMM esto se replica tanto en la potencia aparente instantánea como en la potencia eléctrica indicando un mayor consumo energético por parte de los motores de inducción , a pesar de ello, la velocidad en revoluciones por minuto es mayor en los motores PMM, en promedio realizan 63 revoluciones más por minuto, lo cual se traduce en mayor capacidad de levantamiento debido al funcionamiento de las bombas, estas transforman la energía cinética de la rotación en energía potencial propiciando el ascenso del fluido.

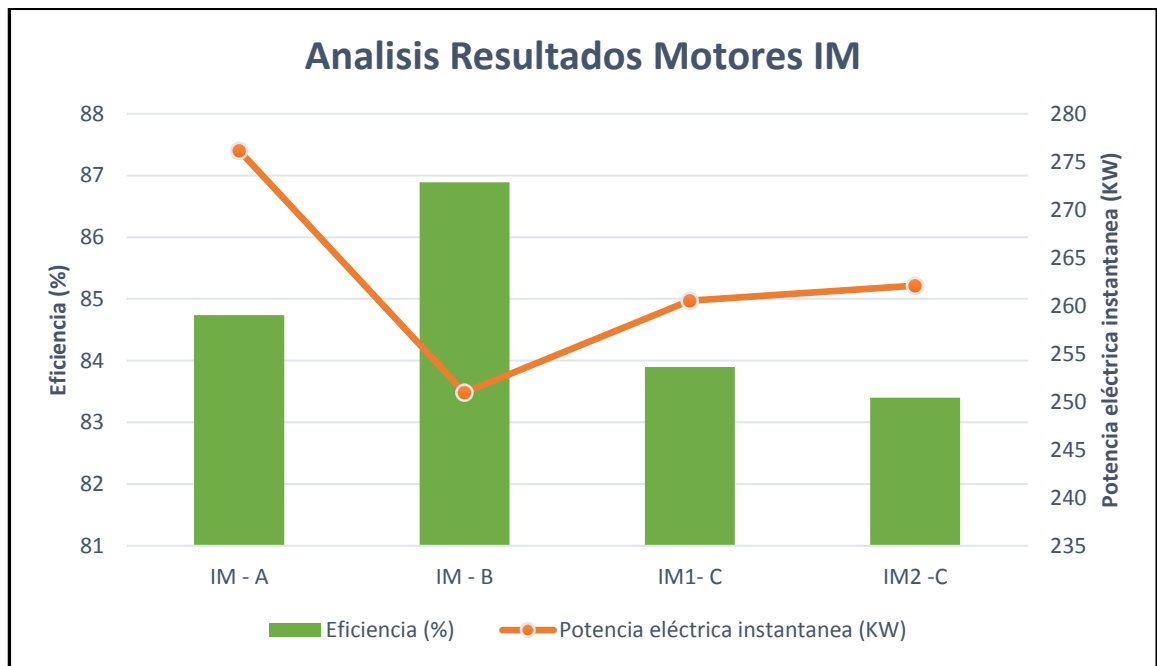
**Tabla 15.Resultados de las diferentes compañías evaluadas**

Compañía	Tipo de motor	Carga del Motor (%)	Eficiencia (%)	Factor de Potencia (%)	Potencia del Motor (HP)	Velocidad (RPM)	Potencia aparente instantánea (KVA)	Potencia eléctrica (KW)
A	IM - A	91,45	84,74	87,615	314	3331	315	276,162
	PMM - A	86,87	90,69	87,571	287	3396	269	235,916
B	IM - B	86,92	86,89	83,208	292	3325	302	250,956
	PMM - B	87,06	92,97	94,999	281	3372	238	225,717
C	IM1- C	80,00	83,90	80,300	293	3420	324	260,517
	PMM1 - C	80,00	88,80	80,300	284	3488	297,11	238,579
	IM2 -C	85,00	83,40	80,200	293	3407	327	262,077
	PMM2 - C	85,00	88,50	80,300	284	3481	298,12	239,390

Fuente: elaboración propia.

**3.2.4.1 Análisis para motores de inducción (IM).** La siguiente gráfica muestra los resultados obtenidos de los motores IM de las compañías A, B y C contrastando los dos factores que serán prioritarios para la evaluación (eficiencia (%) y potencia eléctrica instantánea (Kw)), buscando una relación adecuada donde la eficiencia obtenga los porcentajes más altos y de manera análoga que los valores de potencia eléctrica instantánea sean menores.

**Gráfica 4. Resultados del motor de inducción**

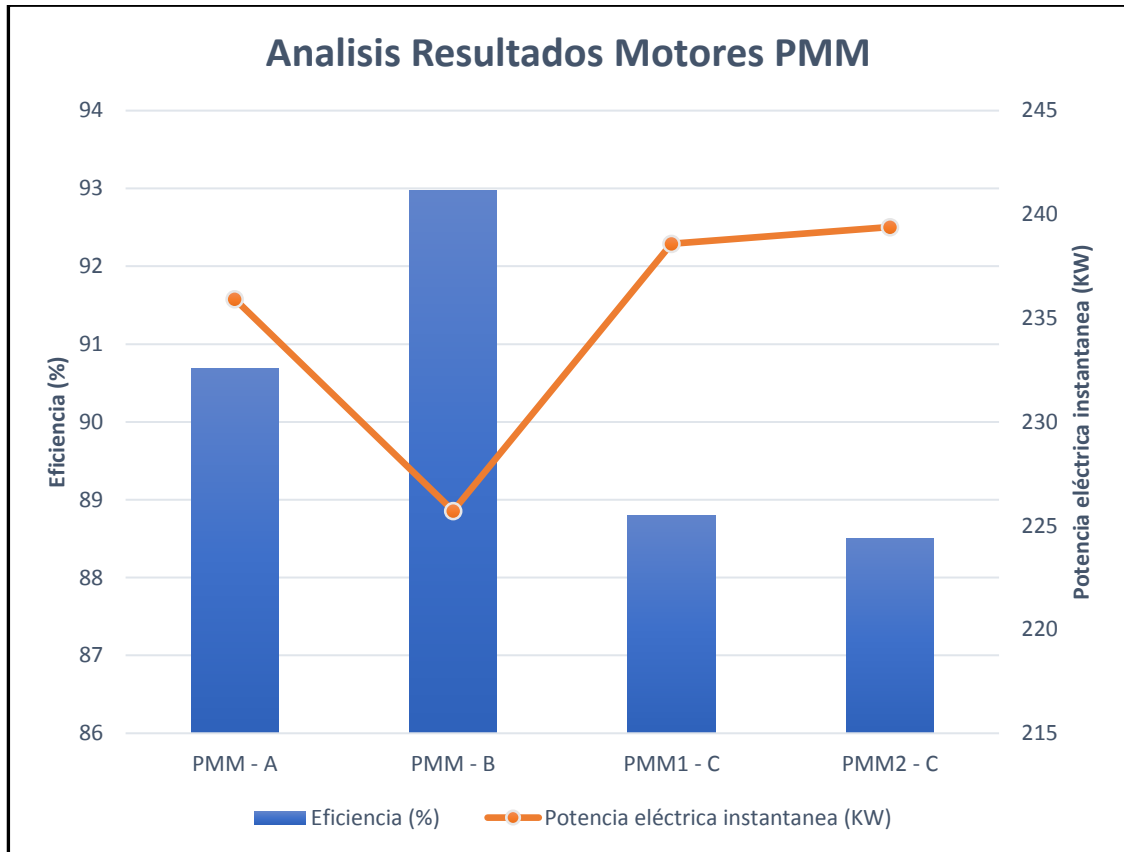


**Fuente:** elaboración propia.

El motor IM de la Compañía B muestra los valores más altos de eficiencia 86,89% (Columnas de color verde), y el menor consumo de potencia eléctrica instantánea 250,9 Kw (puntos de la línea color naranja), a este le sigue en la misma relación el motor IM de la Compañía A. Por último, los motores de mayor consumo energético y menor eficiencia son los 2 resultados de la compañía C (IM1-C e IM2-C).

**3.2.4.2 Análisis para motores de imanes permanentes (PMM).** La siguiente gráfica muestra los resultados obtenidos de los motores PMM de las compañías A, B y C contrastando los dos factores que serán prioritarios para la evaluación (eficiencia (%) y potencia eléctrica instantánea (KW)), buscando una relación adecuada donde la eficiencia obtenga los porcentajes más altos y de manera análoga que los valores de potencia aparente instantánea sean menores.

Gráfica 5. Resultados del motor de imanes permanentes

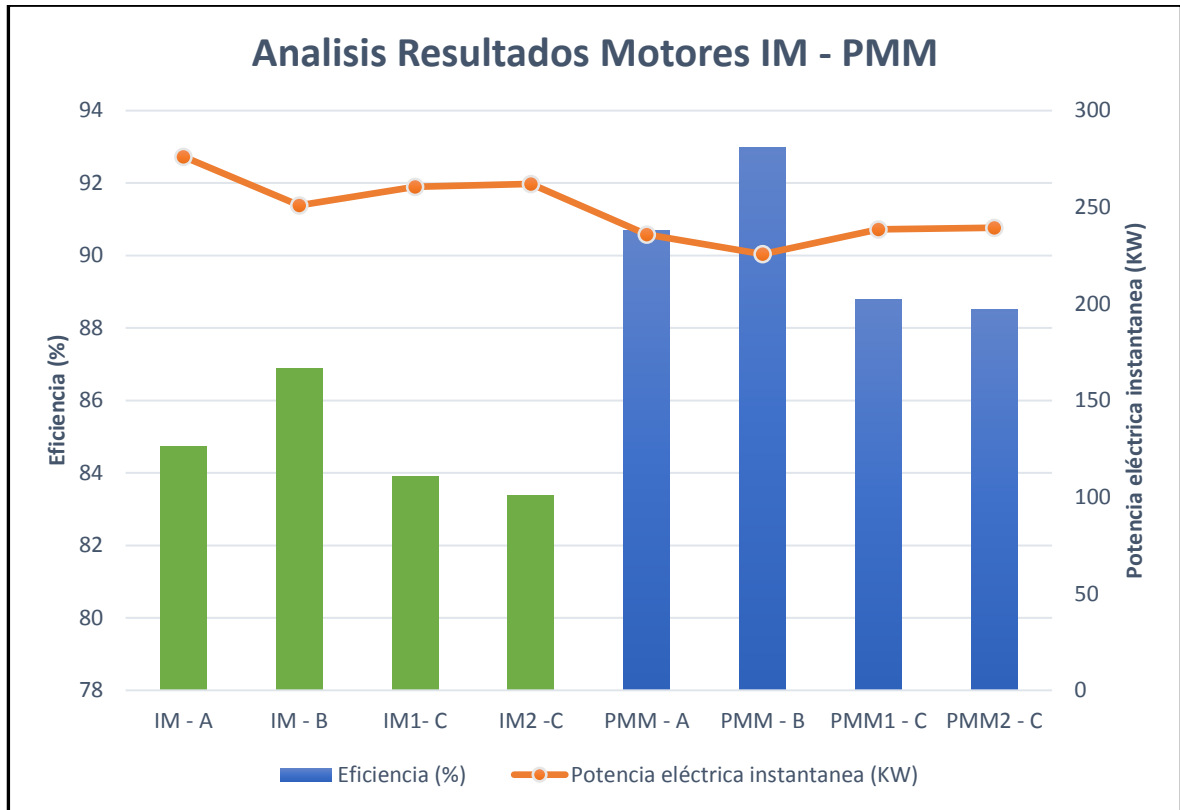


Fuente: elaboración propia.

El motor de imanes permanentes (PMM) de la compañía B con una eficiencia del 93% (reflejada en la columna azul) y un consumo de potencia eléctrica instantánea de 225,7 KW (puntos en la línea de color naranja) evidencio los mejores resultados, seguido del motor de la compañía A y finalmente, con los peores resultados se encuentra el equipo de la compañía C.

**3.2.4.3 Análisis para motores de inducción (IM) vs motores de imanes permanentes (PMM).** Para diferenciar tendencias de motores de imanes permanentes y motores de inducción en la gráfica 6 se muestra los resultados obtenidos de los motores IM vs PMM de las compañías A, B y C contrastando los dos factores que serán prioritarios para la evaluación (eficiencia (%) y potencia eléctrica instantánea (Kw)), buscando una relación adecuada donde la eficiencia obtenga los porcentajes más altos y de manera análoga que los valores de potencia aparente instantánea sean menores.

**Gráfica 6. Resultados de todos los motores**



**Fuente:** elaboración propia.

Es posible disgregar los resultados de acuerdo al tipo de motor ya que los motores de inducción presentan valores menores de eficiencia (columnas de color verde) con respecto a los motores de imanes permanentes (columnas color azul), además, se aprecia que el consumo energético de los motores de imanes permanentes es menor al de los motores de inducción.

Al realizar el cálculo podemos definir con precisión el ahorro energético brindado por cada uno de los motores de imanes permanentes y su eficiencia. Como se mencionó anteriormente los motores (IM y PMM) de la compañía B brindaron los mejores resultados, al compararlos se obtuvo que el porcentaje de ahorro energético por el uso del motor de imanes permanentes de la compañía B fue del 10% con un 6% más de eficiencia. Dicho porcentaje de ahorro no es el más alto según la **tabla 15** esto se explica al enfatizar que únicamente se evalúa la comparación con respecto al motor de inducción que brindo la misma empresa, en este caso, el motor IM de la empresa B cuyos resultados fueron los mejores al evaluar a sus similares. Esta tabla nos permite reafirmar las ventajas de los motores PMM sobre los IM ya que en ningún valor de porcentaje de ahorro y diferencial de eficiencia se observa un valor negativo, al contrario, nos permite sesgar un rango

positivo que oscila entre el 15% y el 8% de ahorro energético y entre 5% y 6% en un aumento de la eficiencia.

**Tabla 16. Porcentaje de ahorro y diferencial de eficiencia entre PMM vs IM**

<b>Compañía</b>	<b>Tipo de motor</b>	<b>Porcentaje de ahorro</b>	<b>Diferencial de eficiencia</b>
	IM - A		
<b>A</b>	PMM - A	<b>15%</b>	<b>6%</b>
	IM - B		
<b>B</b>	PMM - B	<b>10%</b>	<b>6%</b>
	IM1- C		
	PMM1 - C	<b>8%</b>	<b>5%</b>
	IM2 -C		
<b>C</b>	PMM2 – C	<b>9%</b>	<b>5%</b>

**Fuente:** elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados se hará uso del motor de imanes permanentes de la compañía B para realizar las simulaciones en los pozos que se escogieron de acuerdo a los parámetros evidenciados en el siguiente capítulo. Cabe resaltar que los porcentajes de referencia obtenidos, tanto en ahorro energético como en eficiencia, podrán variar a lo largo de las diferentes simulaciones ya que cada pozo presentara características particulares que pueden propiciar cambios en los resultados finales.



#### **4. SIMULACION CON MOTOR DE IMANES PERMANENTES A 5 POZOS DE CAMPO RUBIALES**

En este capítulo se realizará la selección de 5 pozos de acuerdo a factores como el consumo energético y fallas en su sistema de levantamiento artificial, estos dos parámetros priman debido a que la falla en el sistema propicia un proceso de workover lo que permitiría la implementación de un motor de imanes permanentes para comparar resultados, y el alto consumo energético debido a que la prioridad para Ecopetrol S.A. es reducir el gasto energético, realizando el cambio de abastecimiento en potencia, para posteriormente simular con el motor de la compañía B y así analizar el ahorro energético que estos presentarían, antes es necesario precisar la injerencia de un análisis nodal.

Un análisis nodal se realiza para identificar cual es el grado de energía que tiene el sistema en un punto dado y se utiliza cuando se va a realizar el diseño de la bomba electro sumergible, desarrollándolo en dos partes, de la bomba hacia abajo se tiene el yacimiento y la energía que esta brinda y la segunda parte de la bomba hacia arriba se tienen las restricciones que tiene el fluido para llegar a superficie y con más precisión a las facilidades de Campo Rubiales. La diferencia de dichas energías entre estas dos fases brindará el aumento en la presión que se necesita para que se pueda llevar a superficie el caudal requerido.

Para cada una de nuestras pruebas no hubo un cambio en las condiciones de la bomba, esto ya se realizó para cada uno de los pozos definiendo la bomba y el tamaño, esto se ve reflejado en los tipos de pozo que se han identificado en campo rubiales (tipo 1, tipo 2, tipo3, tipo 4, tipo 5 y tipo 6). Añadido a esto el punto de evaluación y única parte del ensamblaje que se cambiaría sería el motor de inducción a imanes permanentes, dado que no hay cambios en la bomba ni es el objeto de estudio, no se está modificando en ningún momento esta sección y por consiguiente el nodal no se vería afectado.

##### **4.1 SELECCIÓN DE 5 POZOS DE CAMPO RUBIALES**

De acuerdo a una base de datos brindada por Ecopetrol S.A y teniendo en cuenta los valores más altos de consumo energético se lograron escoger los pozos SB01, SB02, SB03, SB04 y SB05, los cuales poseen como sistema de levantamiento artificial, bombeo electrosumergible con motor de inducción. A continuación, se presentan las principales características de los pozos, estas serán de utilidad para realizar las simulaciones.

**Tabla 17. Parámetros de los pozos con motores IM**

POZOS	Frecuencia , Hz	Conductor Temp °F	Eficiencia (%)	Amperaje , Amps	Potencia aparente instantánea , KVA	Potencia eléctrica instantánea , kW
<b>SB01</b>	60	152,8	<b>86,54</b>	45,9	233,4	<b>203</b>
<b>SB02</b>	56	164,5	<b>85,66</b>	59,9	289,8	<b>253,3</b>
<b>SB03</b>	54	147,9	<b>82,24</b>	19,6	37,9	<b>28,2</b>
<b>SB04</b>	70	137,8	<b>81,32</b>	19,9	97,5	<b>68,5</b>
<b>SB05</b>	41	148,3	<b>81,26</b>	24,4	84	<b>56,8</b>

Fuente: elaboración propia.

Partiendo de esta información, se realizarán las respectivas simulaciones utilizando el motor de la compañía B. Se podrá comparar la información resultante de la simulación para determinar el porcentaje de ahorro energético brindado y el aumento de la eficiencia.

## **4.2 SIMULACIONES.**

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para los pozos SB01, SB02, SB03, SB04 y SB05, se analizará la información proporcionada por el software SubPump y se concluirá estableciendo un parámetro conservador de ahorro energético para desarrollar el análisis financiero.

**4.2.1 Simulación motora PMM compañía B para el pozo SB01.** A continuación, se enunciarán las premisas que se tuvieron en cuenta para la simulación y posteriormente los resultados de ésta para el pozo SB01.

**4.2.1.1 Premisas SB01.** Este es un pozo tipo 4, lo podemos saber debido a que el caudal requerido es de 6.958 bbl/d, valor que se encuentra inscrito en el máximo caudal de los pozos de este tipo (7.500 bbl/d), posee una presión de fondo fluyente aproximada de 500 psi, la presión de fondo es de 710 psig, el tamaño del tubing es de 4,5 in, el corte de agua es de 90%, el índice de productividad (IP) es de 16 bbl/d\*psi, la temperatura en la cabeza de pozo es de 140°F. Tanto la bomba como el cable no cambiarán, es decir, el equipo de fondo será el mismo que se utiliza actualmente con el motor de inducción, el único equipo que se modifica será el último mencionado al cambiarlo por el motor PMM de la compañía B.

Información como el Survey y PVT son confidenciales, estos parámetros serán tomados dentro del margen de error y como una de las posibilidades para evaluar la variación de los resultados futuros en los pozos analizados.

**4.2.1.2 Resultados simulación pozo SB01.** Para este pozo el equipo de fondo funcionara con una bomba de 68 etapas a una frecuencia de 60,5 Hz. La **figura 32** enseña los resultados obtenidos por el simulador los cuales son: Carga del motor 95,75%, la eficiencia fue de 92,54%, el factor de potencia (PF) 0,974, una potencia de operación de 225,5 HP, la presión en la entrada de la bomba 619,6 psig, requiriendo de 3.954 Voltios para lograr una velocidad de rotación de 3.630 RPM, llevando a superficie 6.958 bbl/d. También se obtuvo el valor de la potencia aparente instantánea (187,3 KVA), la cual junto al factor de potencia (PF), nos permite hallar la potencia eléctrica instantánea (182,43 Kw) de acuerdo a la **ecuación 3**.

**Figura 32. Simulación para el pozo SB01 con el motor PMM.**

**Pump Selection**

Design Frequency: 56.500 Hz  Show Corrected to Design

Configuration:  Tapered pump  2 pumps  3 pumps

Data Source:  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer: SVL-BSG

The "Stages" option is for analyzing the pump performance. Rate will be calculated based on the fixed number of stages, which can be different from the design rate.

Mfr	Series	Model	BEP/DP Rate	Stages (Optional)	Show Obsolete
Pump	SVL-BSG		9981	110	<input checked="" type="checkbox"/>

\* Obsolete by Vendor

**Motor Selection**

Data Source:  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer: Compañía B

Mfr	Series	Type	HP	Volts	Catalog Amps	Nmpt Hz	Show Obsolete
Motor	Motor Compañía B - PMM					60	<input type="checkbox"/>

**Cable Selection**

Cable-REDO

Split Cable

Buttons: Back, Help, OK, Cancel, Next

**THEORETICAL PUMP PERFORMANCE**

Parameter	Design	Catalog
Bottom Hole Pressure, psig	796.00	
Pump Data	SVL-BSG	
Number of Stages	110	
Stages with Free Gas	0	
Free Gas into Pump, %	0.0	
Total Dynamic Head (TDH), ft	1830.38	1830.12
Surface Rate (O+W), Bbl/D	11412.90	11414.59
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	N/A	11583.78
Pump Intake Pressure, psig	676.8	676.8
Operating Power, HP	N/A	285.6
Pump Efficiency, %	N/A	55.0
Motor Data	Mot-Com-B-PMM	
Adjust for Motor Slip	No	
Operating Current, Amps	38.2	
Operating Voltage, Volts	3618.67	
Operating Motor Load HP	288.7	
Operating Power Factor, frac	0.967	
Operating Motor Load %	95.80	
Operating Efficiency, %	92.54	
Total Stages	110	110
Slip Stages	0	0
Total Dynamic Head (TDH), ft	1830.12	1830.12
Surface Rate (O+W), Bbl/D	11414.59	11414.59
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	11583.78	11583.78
Pump Intake Pressure, psig	676.8	676.8
Operating Power, HP	285.6	285.6
Operating Speed, RPM	3390	3390

Fuente: elaboración propia.

**4.2.2 Simulación del motor PMM compañía B para el pozo SB02.** A continuación, se enunciarán las premisas que se tuvieron en cuenta para la simulación y posteriormente los resultados de ésta para el pozo SB02.

**4.2.2.1 Premisas SB02.** Este es un pozo tipo 5, lo podemos saber debido a que el caudal requerido es de 11.414 bbl/d, posee una presión de fondo fluyente aproximada de 500 psi, la presión de fondo es de 796 psig, el tamaño del tubing es de 4,5 in, el corte de agua es de 90%, el índice de productividad (IP) es de 22 bbl/d\*psi, la temperatura en la cabeza de pozo es de 140°F. Tanto la bomba como el cable no cambiarán, es decir, el equipo de fondo será el mismo que se utiliza actualmente con el motor de inducción, el único equipo que se modifica será el último mencionado al cambiarlo por el motor PMM de la compañía B.

Información como el Survey y PVT son confidenciales, estos parámetros serán tomados dentro del margen de error y como una de las posibilidades para evaluar la variación de los resultados futuros en los pozos analizados.

**4.2.2.2 Resultados simulación pozo SB02.** Para este pozo el equipo de fondo funcionara con una bomba de 110 etapas a una frecuencia de 56,5 Hz. La **figura 33** enseña los resultados obtenidos por el simulador los cuales son: Carga del motor 95,8%, la eficiencia fue de 92,54%, el factor de potencia (PF) 0,967, una potencia de operación de 285,6 HP, la presión en la entrada de la bomba 676,8 psig, requiriendo de 3.618 Voltios para lograr una velocidad de rotación de 3.390 RPM, llevando a superficie 11.414 bbl/d. También se obtuvo el valor de la potencia aparente instantánea (243,1 KVA), la cual junto al factor de potencia (PF), nos permite hallar la potencia eléctrica instantánea (235,07Kw) de acuerdo a la **ecuación 3**.

**Figura 33. Simulación para el pozo SB02 con el motor PMM.**

Auto Select Equipment...
Design Frequency: 56.500 Hz  Show Corrected to Design

**Pump Selection**

Configuration:  Tapered pump  2 pumps  3 pumps

Data Source:  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer: SVL-BSG

The "Stages" option is for analyzing the pump performance. Rate will be calculated based on the fixed number of stages, which can be different from the design rate.

Pump	Mfr	Series	Model	BEP/DP Rate	Stages (Optional)	Show Obsolete
	SVL-BSG			9981	110	<input checked="" type="checkbox"/>

\* Obsolete by Vendor

**Motor Selection**

Data Source:  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer: Compañía B

Motor	Mfr	Series	Type	HP	Volts	Catalog Amps	Nmpt Hz	Show Obsolete
	Motor Compañía B-PMM						60	<input type="checkbox"/>

**Cable Selection**

Cable-REDO

Split Cable

Back
Help
OK
Cancel
Next

Bottom Hole Pressure, psig: 796.00

**THEORETICAL PUMP PERFORMANCE**

Pump Data: SVL-BSG

Number of Stages: 110

Stages with Free Gas: 0

Free Gas into Pump, %: 0.0

	Design	Catalog
Total Dynamic Head (TDH), ft	1830.38	1830.12
Surface Rate (O+W), Bbl/D	11412.90	11414.59
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	N/A	11583.78
Pump Intake Pressure, psig	676.8	676.8
Operating Power, HP	N/A	285.6
Pump Efficiency, %	N/A	55.0

**Motor Data: Mot-Com-B-PMM**

Adjust for Motor Slip: No

Operating Current, Amps: 38.2

Operating Voltage, Volts: 3618.67

Operating Motor Load HP: 288.7

Operating Power Factor, frac: 0.967

Operating Motor Load %: 95.80

Operating Efficiency, %: 92.54

	Catalog	Actual
Total Stages	110	110
Slip Stages	0	0
Total Dynamic Head (TDH), ft	1830.12	1830.12
Surface Rate (O+W), Bbl/D	11414.59	11414.59
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	11583.78	11583.78
Pump Intake Pressure, psig	676.8	676.8
Operating Power, HP	285.6	285.6
Operating Speed, RPM	3390	3390

Fuente: elaboración propia.

### 4.2.3 Simulación del motor PMM compañía B para el pozo SB03.

A continuación, se enunciarán las premisas que se tuvieron en cuenta para la simulación y posteriormente los resultados de ésta para el pozo SB03.

**4.2.3.1 Premisa SB03.** Este es un pozo tipo 1, lo podemos saber debido a que el caudal requerido es de 740 bbl/d, posee una presión de fondo fluyente aproximada de 740 psi, la presión de fondo es de 349 psig, el tamaño del tubing es de 3,5 in, el corte de agua es de 65%, el índice de productividad (IP) es de 3 bbl/d\*psi, la temperatura en la cabeza de pozo es de 120°F. Tanto la bomba como el cable no cambiarán, es decir, el equipo de fondo será el mismo que se utiliza actualmente con el motor de inducción, el único equipo que se modifica será el último mencionado al cambiarlo por el motor PMM de la compañía B.

Información como el Survey y PVT son confidenciales, estos parámetros serán tomados dentro del margen de error y como una de las posibilidades para evaluar la variación de los resultados futuros en los pozos analizados.

**4.2.3.2 Resultados simulación pozo SB03.** Para este pozo el equipo de fondo funcionara con una bomba de 156 etapas a una frecuencia de 54,5 Hz. La **figura 34** enseña los resultados obtenidos por el simulador los cuales son: Carga del motor 64,81%, la eficiencia fue de 93,34%, el factor de potencia (PF) 0,99, una potencia de operación de 28,3 HP, la presión en la entrada de la bomba 234,1 psig, requiriendo de 1.253 Voltios para lograr una velocidad de rotación de 3.270 RPM, llevando a superficie 740,1 bbl/d. También se obtuvo el valor de la potencia aparente instantánea (25,9 KVA), la cual junto al factor de potencia (PF), nos permite hallar la potencia eléctrica instantánea (25,87Kw) de acuerdo a la **ecuación 3**.

**Figura 34. Simulación para el pozo SB03 con el motor PMM.**

Auto Select Equipment... Design Frequency: 54.500 Hz  Show Corrected to Design

Pump Selection

Configuration  Tapered pump  2 pumps  3 pumps

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer SVL-BSG

Mfr Series Model BEP/DP Rate Stages (Optional) Show Obsolete

Mfr	Series	Model	BEP/DP Rate	Stages (Optional)	Show Obsolete
Pump	SVL-BSG		702	156	<input checked="" type="checkbox"/>

\* Obsolete by Vendor

Motor Selection

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer Compañía B

Mfr	Series	Type	HP	Volts	Catalog Amps	Nmpt Hz	Show Obsolete
Motor	Motor Compañía B-PMM					60	<input type="checkbox"/>

Cable Selection

Cable-REDO

Split Cable

Bottom Hole Pressure, psig 349.89

THEORETICAL PUMP PERFORMANCE

Pump Data	SVL-BSG	
Number of Stages	156	
Stages with Free Gas	0	
Free Gas into Pump, %	0.0	
	Design	Catalog
Total Dynamic Head (TDH), ft	2039.65	2043.62
Surface Rate (O+W), Bbl/D	740.10	741.95
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	N/A	754.27
Pump Intake Pressure, psig	236.2	234.1
Operating Power, HP	N/A	28.3
Pump Efficiency, %	N/A	40.2
Motor Data	Mot-Com-B-PMM	
Adjust for Motor Slip	No	
Operating Current, Amps	11.0	
Operating Voltage, Volts	1253.87	
Operating Motor Load HP	30.3	
Operating Power Factor, frac	0.999	
Operating Motor Load %	64.81	
Operating Efficiency, %	93.34	
	Catalog	Actual
Total Stages	156	156
Slip Stages	0	0
Total Dynamic Head (TDH), ft	2043.62	2043.62
Surface Rate (O+W), Bbl/D	741.95	741.95
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	754.27	754.27
Pump Intake Pressure, psig	234.1	234.1
Operating Power, HP	28.3	28.3
Operating Speed, RPM	3270	3270

Back Help OK Cancel Next

Fuente: elaboración propia.

**4.2.4 Simulación del motor PMM compañía B para el pozo SB04.** A continuación, se enunciarán las premisas que se tuvieron en cuenta para la simulación y posteriormente los resultados de ésta para el pozo SB04.

**4.2.4.1 Premisas SB04.** Este es un pozo tipo 3, lo podemos saber debido a que el caudal requerido es de 3.856 bbl/d, valor que se encuentra inscrito en el máximo caudal de los pozos de este tipo (4.000 bbl/d), posee una presión de fondo fluyente aproximada de 529 psi, la presión de fondo es de 935 psig, el tamaño del tubing es de 3,5 in, el corte de agua es de 90%, el índice de productividad (IP) es de 9 bbl/d\*psi, la temperatura en la cabeza de pozo es de 135°F. Tanto la bomba como el cable no cambiarán, es decir, el equipo de fondo será el mismo que se utiliza actualmente con el motor de inducción, el único equipo que se modifica será el último mencionado al cambiarlo por el motor PMM de la compañía B.

Información como el Survey y PVT son confidenciales, estos parámetros serán tomados dentro del margen de error y como una de las posibilidades para evaluar la variación de los resultados futuros en los pozos analizados.

**4.2.4.2 Resultados simulación SB04.** Para este pozo el equipo de fondo funcionara con una bomba de 67 etapas a una frecuencia de 70 Hz. La **figura 35** enseña los resultados obtenidos por el simulador los cuales son: Carga del motor 53,81%, la eficiencia fue de 94,17%, el factor de potencia (PF) 0,998, una potencia de operación de 70,2 HP, la presión en la entrada de la bomba 838,6 psig, requiriendo de 3.203 Voltios para lograr una velocidad de rotación de 4.200 RPM, llevando a superficie 3.856 bbl/d. También se obtuvo el valor de la potencia aparente instantánea (60,5 KVA), la cual junto al factor de potencia (PF), nos permite hallar la potencia eléctrica instantánea (60,37 Kw) de acuerdo a la **ecuación 3**.

**Figura 35. Simulación para el pozo SB04 con el motor PMM**

Auto Select Equipment...
Design Frequency:  Hz  Show Corrected to Design

---

**Pump Selection**

Configuration  Tapered pump  2 pumps  3 pumps

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer

The "Stages" option is for analyzing the pump performance. Rate will be calculated based on the fixed number of stages, which can be different from the design rate.

Mfr	Series	Model	BEP/DP Rate	Stages (Optional)	Show Obsolete
Pump	SVL-BSG		2391	67	<input checked="" type="checkbox"/>

\* Obsolete by Vendor

Bottom Hole Pressure, psig 935.00

**THEORETICAL PUMP PERFORMANCE**

Pump Data SVL-BSG

Number of Stages 67

Stages with Free Gas 0

Free Gas into Pump, % 0.0

	Design	Catalog
Total Dynamic Head (TDH), ft	995.64	995.22
Surface Rate (O+W), Bbl/D	3856.90	3857.44
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	N/A	3903.50
Pump Intake Pressure, psig	838.6	838.6
Operating Power, HP	N/A	70.2
Pump Efficiency, %	N/A	41.1

**Motor Data** Mot-Com-B-PMM

Adjust for Motor Slip No

Operating Current, Amps 10.0

Operating Voltage, Volts 3203.90

Operating Motor Load HP 72.2

Operating Power Factor, frac 0.998

Operating Motor Load % 53.81

Operating Efficiency, % 94.17

	Catalog	Actual
Total Stages	67	67
Slip Stages	0	0
Total Dynamic Head (TDH), ft	995.22	995.22
Surface Rate (O+W), Bbl/D	3857.44	3857.44
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	3903.50	3903.50
Pump Intake Pressure, psig	838.6	838.6
Operating Power, HP	70.2	70.2
Operating Speed, RPM	4200	4200

---

**Motor Selection**

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer

Mfr	Series	Type	HP	Volts	Catalog Amps	Nmpt Hz	Show Obsolete
Motor	Motor Compañía B-PMM					60	<input type="checkbox"/>

Operating Motor Load % 53.81

Operating Efficiency, % 94.17

---

**Cable Selection**

Cable-REDO

Split Cable

Operating Motor Load % 53.81

Operating Efficiency, % 94.17

Back Help OK Cancel Next

Fuente: elaboración propia.

**4.2.5 Simulación del motor PMM compañía B para el pozo SB05.** A continuación, se enunciarán las premisas que se tuvieron en cuenta para la simulación y posteriormente los resultados de ésta para el pozo SB05.

**4.2.5.1 Premisas SB05.** Este es un pozo tipo 4, lo podemos saber debido a que el caudal requerido es de 4.500 bbl/d, valor que se encuentra inscrito en el máximo caudal de los pozos de este tipo (7.500 bbl/d), posee una presión de fondo fluyente aproximada de 500 psi, la presión de fondo es de 1088 psig, el tamaño del tubing es de 4,5 in, el corte de agua es de 90%, el índice de productividad (IP) es de 16 bbl/d\*psi, la temperatura en la cabeza de pozo es de 140°F. Tanto la bomba como el cable no cambiaran, es decir, el equipo de fondo será el mismo que se utiliza actualmente con el motor de inducción, el único equipo que se modifica será el último mencionado al cambiarlo por el motor PMM de la compañía B.

Información como el Survey y PVT son confidenciales, estos parámetros serán tomados dentro del margen de error y como una de las posibilidades para evaluar la variación de los resultados futuros en los pozos analizados.



**4.2.5.2 Resultados simulación motor SB05.** Para este pozo el equipo de fondo funcionara con una bomba de 68 etapas a una frecuencia de 41 Hz. La **figura 36** enseña los resultados obtenidos por el simulador los cuales son: Carga del motor 36,25 %, la eficiencia fue de 93,29%, el factor de potencia (PF) 0,996, una potencia de operación de 56,8 HP, la presión en la entrada de la bomba 979,7 psig, requiriendo de 2.539 Voltios para lograr una velocidad de rotación de 2.460 RPM, llevando a superficie 4.500 bbl/d. También se obtuvo el valor de la potencia aparente instantánea (49,2 KVA), la cual junto al factor de potencia (PF), nos permite hallar la potencia eléctrica instantánea (49,01 Kw) de acuerdo a la **ecuación 3**.

**Figura 36. Simulación para el pozo SB05 con el motor PMM**

Auto Select Equipment... Design Frequency: 41.000 Hz  Show Corrected to Design

**Pump Selection**

Configuration  Tapered pump  2 pumps  3 pumps

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer SVL-BSG

The "Stages" option is for analyzing the pump performance. Rate will be calculated based on the fixed number of stages, which can be different from the design rate.

Mfr	Series	Model	BEP/DP Rate	Stages (Optional)	Show Obsolete
Pump	SVL-BSG		4844	68 <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

\* Obsolete by Vendor

**Motor Selection**

Data Source  Data Bank  Inventory  Equipment Excel File

Manufacturer Compañía B

Mfr	Series	Type	HP	Volts	Catalog Amps	Nmpt Hz	Show Obsolete
Motor	Motor Compañía B-PMM					60	<input type="checkbox"/>

**Cable Selection**

Cable-REDO

Split Cable

Back Help OK Cancel Next

**THEORETICAL PUMP PERFORMANCE**

Bottom Hole Pressure, psig	1088.37
Pump Data	SVL-BSG
Number of Stages	68
Stages with Free Gas	68
Free Gas into Pump, %	0.6
	Design Catalog
Total Dynamic Head (TDH), ft	410.37 494.81
Surface Rate (O+W), Bbl/D	4500.00 5247.57
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	N/A 5356.47
Pump Intake Pressure, psig	983.9 979.7
Operating Power, HP	N/A 56.8
Pump Efficiency, %	N/A 61.1
Motor Data	Mot-Com-B-PMM
Adjust for Motor Slip	No
Operating Current, Amps	10.5
Operating Voltage, Volts	2539.43
Operating Motor Load HP	58.2
Operating Power Factor, frac	0.996
Operating Motor Load %	36.25
Operating Efficiency, %	93.29
	Catalog Actual
Total Stages	68 68
Slip Stages	0 0
Total Dynamic Head (TDH), ft	494.81 494.81
Surface Rate (O+W), Bbl/D	5247.57 5247.57
Avg. Rate per Stage (O+G+W), Bbl/D	5356.47 5356.47
Pump Intake Pressure, psig	979.7 979.7
Operating Power, HP	56.8 56.8
Operating Speed, RPM	2460 2460

Fuente: elaboración propia.

**4.2.6 Análisis de resultados de las simulaciones.** Al obtener los resultados de cada uno de los pozos, por medio de simulación, se les implemento motores de imanes permanentes (PMM) y dichos resultados fueron cotejados con la información disponible de la base de datos otorgada por Ecopetrol S.A donde podemos encontrar las siguientes variables: Potencia aparente instantánea (KVA), Factor de Potencia (FP) y eficiencia, y a través de estos, calcular la potencia eléctrica instantánea (Kw), ítem que permitió definir la reducción porcentual del consumo energético a los pozos SB01, SB02, SB03, SB04 y SB05.

En la **tabla 17** se encuentra el nombre de cada pozo simulado, el tipo de motor utilizado y el ahorro energético en porcentaje al comparar el motor PMM vs el motor IM. Cabe resaltar que el porcentaje de ahorro oscilo entre 7% y 14%, donde la reducción más alta se presentó en el pozo SB05, mientras que el menor ahorro se presentó en el pozo SB02.

La variabilidad del ahorro energético se debe a diversos factores como las condiciones del PVT y la variación en la frecuencia requerida para proveer al motor de las revoluciones necesarias para llevar a superficie el caudal deseado.

**Tabla 18. Resultados de las simulaciones con ahorro energético.**

Pozos	Tipo de motor	Potencia aparente instantánea (KVA)	Factor de potencia (FP)	Potencia eléctrica instantánea (KW)	Ahorro energético	Promedio
SB01	PMM	187,3	0,974	182,43		
	IM	233,4	0,862	201,1908	9%	
SB02	PMM	243,1	0,967	235,0777		
	IM	289,8	0,874	253,2852	7%	
SB03	PMM	25,9	0,999	25,8741		10%
	IM	37,9	0,743	28,1597	8%	
SB04	PMM	60,5	0,998	60,379		
	IM	97,5	0,702	68,445	12%	
SB05	PMM	49,2	0,996	49,0032		
	IM	84	0,677	56,868	14%	

**Fuente:** elaboración propia.

Para evaluar el aumento porcentual de la eficiencia se tomó como patrón la carga del motor ya que es posible corroborar, en la tabla 12 en la columna referente al ítem previamente mencionado, que para cada uno de los motores de cada pozo no hubo un margen excesivamente amplio, la diferencia más amplia fue de 3,87%, además, se evaluaron los pozos con cargas desde el 35,77% hasta el 99,9%,

parámetros particulares de cada una de las condiciones actuales de los pozos evaluados. En términos generales, comparando las cargas y la eficiencia de los motores PMM vs los motores IM, mientras mayor es la carga del motor, menor es el aumento porcentual de la eficiencia, sin embargo, sin importar la carga que presenten los dos motores, el motor de imanes permanentes tenderá a ser más eficiente, en este caso en un rango entre (6% y 13%).

**Tabla 19. Diferencial de eficiencia entre PMM vs IM.**

Pozos	Tipo de motor	Carga del motor (%)	Eficiencia (%)	Aumento de la Eficiencia (%)
<b>SB01</b>	PMM	95,75	92,54	<b>6%</b>
	IM	98,9	86,54	
<b>SB02</b>	PMM	95,8	92,54	<b>7%</b>
	IM	99,67	85,66	
<b>SB03</b>	PMM	64,81	93,34	<b>11%</b>
	IM	64,76	82,24	
<b>SB04</b>	PMM	53,81	94,17	<b>13%</b>
	IM	54,93	81,32	
<b>SB05</b>	PMM	36,25	93,29	<b>12%</b>
	IM	35,77	81,26	

**Fuente:** elaboración propia.

Finalmente, para la realización del caso de negocio se utilizará un porcentaje de ahorro promedio del 10%, este valor es la media del porcentaje de ahorro energético obtenido en los pozos simulados previamente.

## **5. ESTUDIO DE CASO DE NEGOCIO**

Actualmente Ecopetrol S.A busca implementar nuevas tecnologías para el plan de campaña de perforación comprendida en el periodo 2019 a 2025. La reducción de costos operacionales, enfocando los esfuerzos en aumentar la eficiencia y reducir el consumo energético, dio como resultado realizar una propuesta de acuerdo al uso de bombeo electrosumergible con motores de imanes permanentes (PMM) como una alternativa en busca del mejor rendimiento de este sistema en cuanto a los factores requeridos. De esta manera se propondrá evaluar financieramente este proyecto, tanto para la implementación de un equipo de fondo y superficie para el funcionamiento de un motor PMM, como con un equipo de fondo y superficie de un motor IM.

Para analizar el caso de negocio de manera correcta se estudiaron dos casos, el primero, los beneficios que acarrea la implementación de los equipos con imanes permanentes para un solo pozo, y en segundo lugar contrastar el beneficio para la campaña completa. Se practicó la siguiente metodología aclarando parámetros operacionales y financieros actuales. También es necesario tener claridad frente al abastecimiento energético el cual puede ser por medio de generación local o red local, la primera hace referencia a la energía que se produce internamente en el campo por medio de generadores que se pueden alimentar de diésel o gas, y la segunda es generada por la localidad, municipio o departamento en el cual se encuentra ubicado el campo, el costo energético por cada Kwh difiere por el uso de cada sistema de abastecimiento, las dos opciones para cada una de las evaluaciones.

### **5.1 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DEL CASO DE NEGOCIO**

Dentro de la metodología para el análisis costo-beneficio de la iniciativa de implementación de PMM para Ecopetrol, se tomaron las siguientes premisas:

El área de Yacimientos suministró el estimado de pozos nuevos (700 en total) que entrarían a producción anualmente en Campo Rubiales desde el año 2019 hasta el 2025, ver tabla 19. El número total de pozos nuevos puestos en línea se distribuye uniformemente durante el año al momento de hacer el análisis económico.

**Tabla 20. Pozos nuevos para Campo Rubiales 2019-2025 (pronóstico del área de Yacimientos).**

<b>Módulos in-fill</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>
<b>B4</b>	104	23					
<b>B5</b>		88	107	6			
<b>B6</b>				99	74		
<b>B7</b>					32	108	59
<b>Total</b>	104	111	107	105	106	108	59

Fuente. Área Yacimientos, Ecopetrol S.A.2019

De acuerdo a información suministrada por el área de yacimientos se estableció la vida útil del conjunto de pozos completados mensualmente, así:

- La mitad de los pozos serán apagados al cuarto año de estar activos.
- La totalidad de los pozos serán apagados desde el séptimo año.

El costo de los equipos de fondo y superficie para cada alternativa, IM y PMM, fueron tomados de acuerdo con el sondeo de mercado realizado con las compañías aliadas (diciembre, 2018). Los contratos que realiza Ecopetrol S.A. para la adquisición de equipos y en este caso para una campaña de perforación, que en este caso dura siete años, maneja variables especialmente en los costos de los equipos, la principal refiere que anualmente los precios se ajustan de acuerdo al modelo de indexación de los contratos vigentes de BES para la empresa. Para el presente modelo (**tabla 20**) se considera un incremento anual del 6% en los precios, para los años proyectados en que se realizaran las compras de equipos. La diferencia en promedio está alrededor de 18 \$KUSD (más costosa la solución PMM).

**Tabla 21. Costo de suministro de equipos de fondo y superficie por cada año (para un pozo).**

<b>Costo de equipos Superficie y Fondo (USD)</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>
<b>IM</b>	137.879	146.152	154.921	164.216	174.069	184.513	195.584
<b>PMM</b>	152.698	161.860	171.571	181.866	192.778	204.344	216.605

Fuente: Departamento de tecnologías de producción, Ecopetrol S.A.

Se utilizó la proyección del costo de energía (COP\$/KWh) de Campo Rubiales de acuerdo con la demanda energética que será cubierta por Generación Local o por Red, vista límite económico del activo: año 2030. (**Tabla 20**)

**Tabla 22. Proyección de tarifas de energía y ponderación por tipo de fuente en campo Rubiales**

Año	Proyección Tarifa Gen. Local	Proyección Tarifa Red	Porcentaje de pozos en Gen. Local	Porcentaje de pozos en Red	Ponderado Tarifas (Red y G. Local)
	COP \$ /KWh	COP \$ /KWh	%	%	COP \$ /KWh
<b>2019</b>	616,3	286,3	63	37	494,2
<b>2020</b>	652,2	342,4	61	39	531,4
<b>2021</b>	648,2	363,5	48	52	500,2
<b>2022</b>	647,5	305,3	41	59	445,6
<b>2023</b>	648,3	239,4	32	68	370,2
<b>2024</b>	648,4	229,0	26	74	338,0
<b>2025</b>	648,4	225,1	23	77	322,5
<b>2026</b>	648,4	232,8	24	76	332,5
<b>2027</b>	648,4	260,2	53	47	465,9
<b>2028</b>	648,4	275,9	53	47	473,3
<b>2029</b>	648,4	286,1	53	47	478,1
<b>2030</b>	648,4	303,8	53	47	486,4

**Fuente:** Visualización de Alternativas del Proyecto PMER – Plan Maestro de Electrificación Rubiales, Ene-19

Se tomó como referencia el consumo de energía de un pozo Tipo 5 (rango de fluido entre 8.000 y 11.000 bpd, y consumo promedio de energía = 157,5 KWh), con el fin de estimar la proyección en demanda energética para los 700 pozos (campañas de perforación 2019-2025).

A continuación, se presentan los criterios macroeconómicos y de disciplina de capital, los cuales fueron suministrados por el Departamento Financiero:

- TRM equivale a \$ 3.200 en COP/USD
- TIO de ECP del 10% e.a.
- Periodo de evaluación: 12 años (límite económico del activo).
- Las evaluaciones se realizan sin incluir el IVA.

Para desarrollar la evaluación se realizó un formato **Anexo B** en el cual en base a las premisas mencionadas se realiza el ingreso mes a mes de los pozos

correspondientes al total de la campaña de perforación, este formato se realizó para evaluar en periodos de tiempo cortos el comportamiento de la inversión necesaria, conocer el valor ahorrado y los valores económicos comparativos. Analógicamente se hizo un contraste entre la campaña de perforación llevada a cabo con equipos de fondo y superficie que utilizaran motores de inducción y equipos de fondo y superficie que utilizaran motores PMM, para esto el consumo energético pre establecido por la empresa Ecopetrol S.A. para un equipo con motor IM fue de 157,50 Kwh por tanto y de acuerdo a lo establecido en la selección del motor PMM se realizaron sensibilizaciones entre el 9% y el 12%, entre estos valores se encuentra el 10% patrón principal para realizar la evaluación y posterior análisis de la conducta económica.

## **5.2 EVALUACIÓN FINANCIERA 1 POZO PILOTO**

Se realizó el análisis de costos para evaluar el impacto que se tendría al instalar PMM en un pozo tipo 5 con un run life de 7 años.

Se generaron sensibilidades del porcentaje de ahorro en el consumo de energía logrado por el PMM que van desde el 9% hasta el 13%, considerando los dos casos: Tarifa Red y Tarifa generación local (**Tabla 21**).

**5.2.1 Evaluación a un pozo piloto con tarifa de red.** En esta evaluación se tomaron los valores de la tarifa de red presentes en la segunda columna de la tabla 21, de tal manera que se calculó el consumo a la tarifa correspondiente del año, y mediante la **ecuación 3** se evaluó el valor presente neto (VPN).

**Ecuación 4. Calculo VPN.**

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{VPN = VPI - VPE} \\
 VPI &= VPI_0 + \frac{VPI_1}{(1+i)} + \frac{VPI_2}{(1+i)^2} + \frac{VPI_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{VPI_T}{(1+i)^T} \\
 VPE &= VPE_0 + \frac{VPE_1}{(1+i)} + \frac{VPE_2}{(1+i)^2} + \frac{VPE_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{VPE_T}{(1+i)^T} \\
 VPN &= \sum_{T=0}^T \frac{VPI_T}{(1+i)^T} - \sum_{T=0}^T \frac{VPE_T}{(1+i)^T}
 \end{aligned}$$

**Fuente:** MIRANDA MIRANDA, JUAN., Gestión de proyectos (identificación- formulación evaluación financiera, económica, social y ambiental)., Bogotá: MM editores, sexta edición.2010., 17 pág.

Donde el VPI es el valor presente del ingreso neto del periodo T a una tasa de interes i, el VPE es el valor presente del egreso neto del periodo T, T es el numero de periodos, en este caso serian 7.

De acuerdo a los resultados obtenidos anualmente para diferentes porcentajes de ahorro energetico, se logra evidenciar el diferencial o ahorro que se obtiene al implementar el bombeo electrosumergible con motores de imanes permanentes como sistema de levantamiento artificial.

**Tabla 23. Ahorro de costos acumulados en consumo de energía IM vs PMM tarifa de red.**

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
<b>8%</b>	\$ 5.477	\$ 9.730	\$ 11.635	\$ 12.349	\$ 10.376	\$ 8.131	\$ 7.791
<b>9%</b>	\$ 6.162	\$ 10.946	\$ 13.089	\$ 13.893	\$ 11.673	\$ 9.147	\$ 8.764
<b>10%</b>	\$ 6.847	\$ 12.162	\$ 14.544	\$ 15.437	\$ 12.970	\$ 10.163	\$ 9.738
<b>12%</b>	\$ 8.216	\$ 14.595	\$ 17.452	\$ 25.728	\$ 15.564	\$ 12.196	\$ 11.686
<b>13%</b>	\$ 8.900	\$ 15.811	\$ 18.907	\$ 27.189	\$ 16.861	\$ 13.213	\$ 12.660

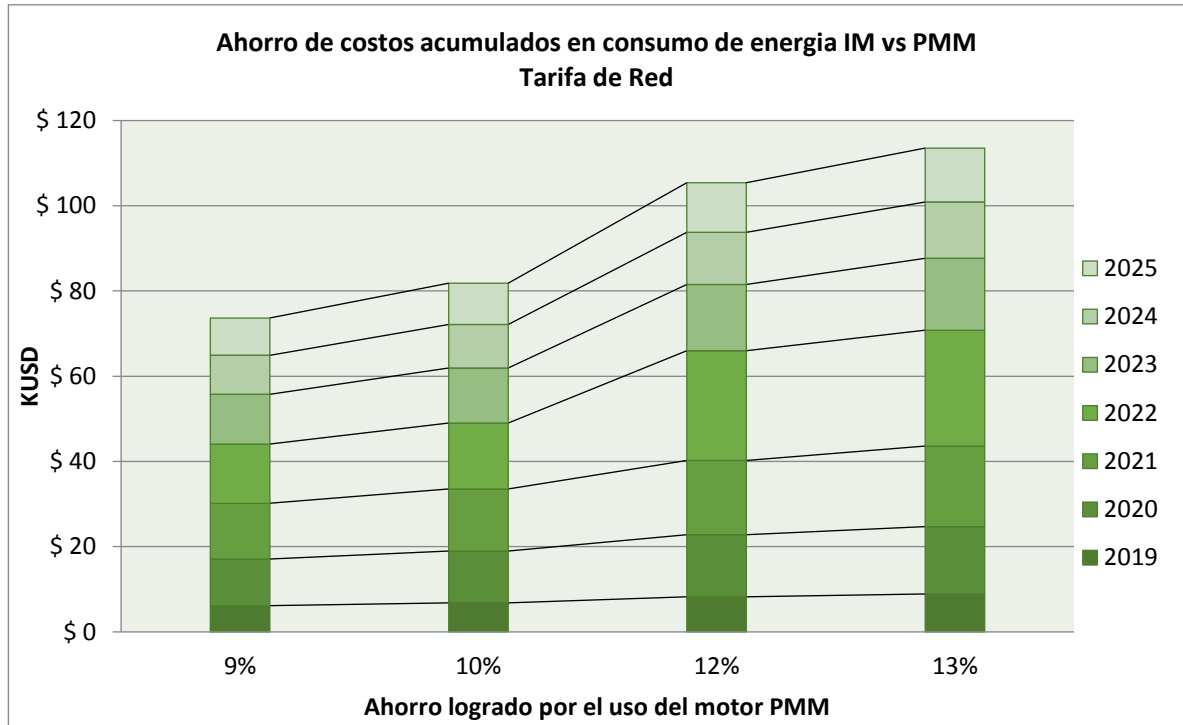
**Fuente:** elaboración propia.

Cabe resaltar, por medio de los resultados presentes en la tabla 22 y en la gráfica 7, que el ahorro aumenta con respecto al tiempo desde el primer año y es más evidente al evaluarlo a mayor porcentaje de ahorro, añadido a esto, el ahorro oscilara análogamente al valor de la tarifa de red (COP/KWh) correspondiente al año en curso. Al analizar exclusivamente el 10% de ahorro energético, el cual se



dispuso como rango traza para la evaluación, se obtuvo que el primer año se tendría un ahorro de \$6.847 USD, para el segundo año de \$12.162 USD, para el tercer año de \$14.544, para el cuarto año \$15.437 USD, para el quinto año de \$12.970, para el sexto año \$10.163 y para el último año \$9.738 USD, generando un ahorro económico energético de \$81.861 durante todo el run life del motor.

**Gráfica 7. Ahorro de costos acumulados en consumo de energía IM vs PMM Tarifa de Red (2019 desde mitad de año- 2025)**



**Fuente:** elaboración propia.

En la **tabla 23** se observan los datos correspondientes al flujo de caja realizado para un pozo para un periodo de tiempo delimitado entre 2019 y 2025, en esta se puede observar la inversión (Compra del equipo de fondo y superficie), el beneficio económico por el ahorro energético el cual corresponde a la diferencia entre los costos energéticos para el funcionamiento del motor de imanes permanentes (PMM) con respecto al motor de inducción. El VPN corresponde al valor presente de los flujos efectivos del ahorro energético evaluado en USD, con respecto a la inversión inicial (equipos de fondo y superficie)<sup>60</sup>, también encontramos el Payback que alude el tiempo requerido para que la inversión inicial sea pagada por completo, el cual es de 19 meses y 15 días, es decir, un año y 7 meses, a partir de ese momento el ahorro en costos será neto para este motor con tarifa de red. Finalmente

<sup>60</sup> Van Horne.J., Wachowicz.J.M.(2010). Fundamentos de Administración financiera, décima edición, México. Valor Presente Neto. (pp 327). Editorial Pearson Educación.

encontramos el EFI que representa la relación que hay entre inversión inicial y ahorros totales aduciendo que con el valor total ahorrado es posible invertir en cuatro equipos de fondo y superficie.

**Tabla 24. Flujo de caja abastecimiento energético de red (2019-2025).**

FLUJO DE CAJA RED				
Periodo	Año	Dif. Capex (KUSD)	Beneficio = Ahorro Energía (KUSD)	Flujo (KUSD)
0	2019	\$ 14,8	\$ 6,1	-\$ 8,7
1	2020	\$ -	\$ 14,5	\$ 14,5
2	2021	\$ -	\$ 15,4	\$ 15,4
3	2022	\$ -	\$ 13,0	\$ 13,0
4	2023	\$ -	\$ 10,2	\$ 10,2
5	2024	\$ -	\$ 9,7	\$ 9,7
6	2025	\$ -	\$ 9,6	\$ 9,6
VP =		\$ 14,8	\$ 60,19	\$ 45,4
				\$ 19,21
				1,60
				4,1

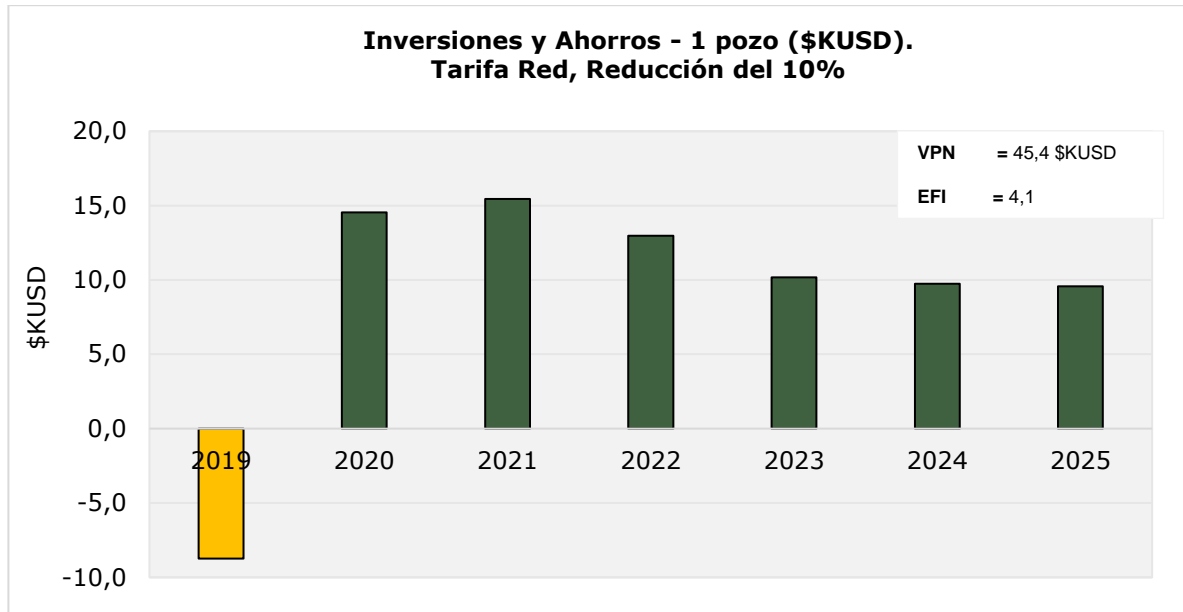
KUSD  
 meses  
 años  
 EFI

**VPN**  
**Payback**

**Fuente:** elaboración propia.

En la **Grafica 8** se logra plasmar la línea del tiempo que permite calcular el VPN para un pozo cuyo abastecimiento energético corresponde a tarifa de red, la primera columna (color amarillo) hace referencia a la diferencia entre los ahorros energéticos y la inversión inicial, por lo tanto, se asume como el tiempo 0 (2019). Las columnas de color verde representan el ahorro energético para los siguientes 6 años (2020-2025) de manera positiva dado que no se asumen gastos extra en ese periodo de tiempo.

**Gráfica 8. Inversiones y Ahorros - 1 pozo (\$KUSD). Tarifa Red, Reducción del 10%.**



**Fuente:** elaboración propia.

La **Tabla 24** resume los indicadores de la evaluación financiera para cada uno de los diferentes posibles valores de porcentaje de ahorro de energía para el caso de evaluación de un pozo con PMM con tarifa de Red.

**Tabla 25. Resumen de indicadores económicos para 1 pozo según % de ahorro energético, con tarifa de red.**

% de ahorro de energía	VPN (KUSD)	Retorno de la inversión (años)	EFI
9%	\$ 39,4	1,7	3,7
10%	\$ 45,4	1,6	4,1
12%	\$ 57,4	1,4	4,9
13%	\$ 63,5	1,37	5,3

**Fuente:** elaboración propia.

**5.2.2 Evaluación un pozo piloto con generación local.** Para la evaluación de un pozo con generación local es importante tener en cuenta que los costos por KWh son mucho mayores que la tarifa de red lo cual será contraproducente para el uso de motores de inducción, se evaluarán los costos y ahorros año a año a lo largo de la vida del motor.

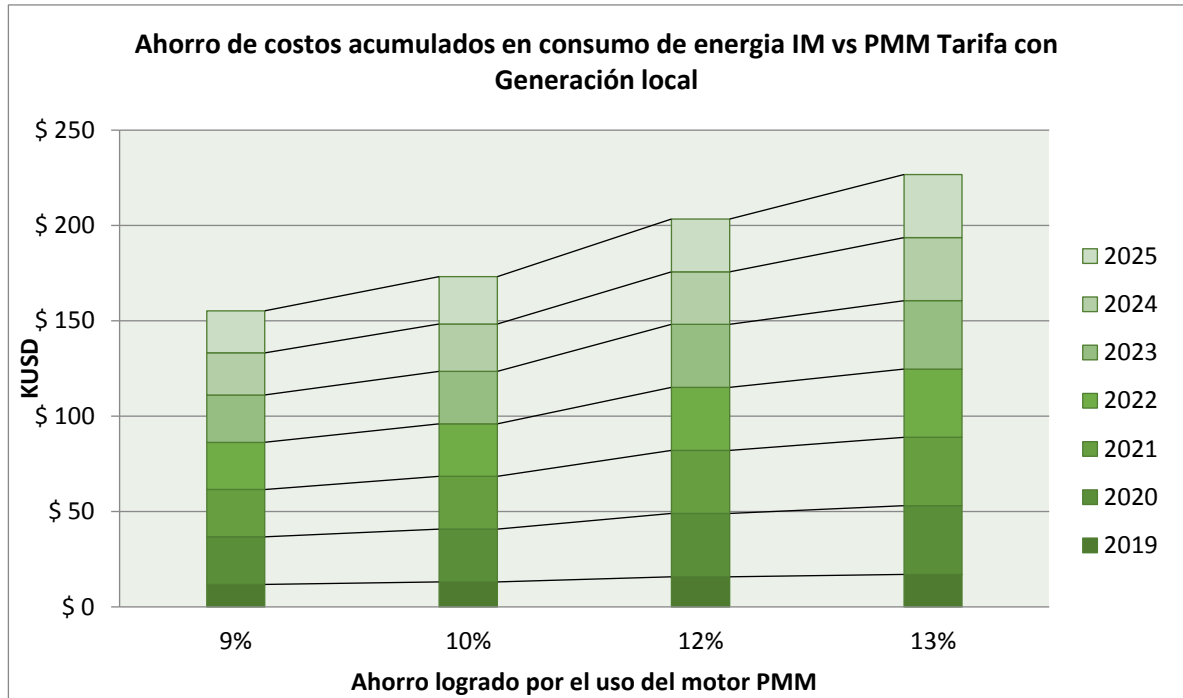
**Tabla 26. Ahorro de costos acumulados en consumo de energía IM vs PMM tarifa de generación local.**

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
<b>8%</b>	\$ 10.483	\$ 22.188	\$ 22.052	\$ 22.028	\$ 22.055	\$ 22.059	\$ 22.059
<b>9%</b>	\$ 11.794	\$ 24.961	\$ 24.808	\$ 24.781	\$ 24.812	\$ 24.816	\$ 24.816
<b>10%</b>	\$ 13.104	\$ 27.735	\$ 27.565	\$ 27.535	\$ 27.569	\$ 27.573	\$ 27.573
<b>12%</b>	\$ 15.725	\$ 33.282	\$ 33.078	\$ 33.042	\$ 33.083	\$ 33.088	\$ 33.088
<b>13%</b>	\$ 17.035	\$ 36.055	\$ 35.834	\$ 35.795	\$ 35.840	\$ 35.845	\$ 35.845

**Fuente:** elaboración propia.

Cabe resaltar, por medio de los resultados presentes en la **tabla 25** y en la **gráfica 9**, que el ahorro aumenta con respecto al tiempo desde el primer año y es más evidente al compararlo con los resultados del ahorro económico con el uso de tarifa de red donde se duplica en varios periodos de tiempo el costo de la energía en (COP/KWh). Al analizar exclusivamente el 10% de ahorro energético, el cual se dispuso como rango traza para la evaluación, se obtuvo que el primer año se tendría un ahorro de \$13.104 USD, para el segundo año de \$27.735 USD, para el tercer año de \$27.565, para el cuarto año \$27.535 USD, para el quinto año de \$27.569, para el sexto año \$27.573 USD y para el último año \$27.573 USD, generando un ahorro económico energético de \$178.654 durante todo el run life del motor. El ahorro energético evaluado en USD es aproximadamente el doble del ahorro que se presenta por el uso de generación por red.

**Gráfica 9. Ahorro en consumo energético acumulado. Sensibilidades en el rango de 9% a 13% de entre el PMM vs. IM, tarifa ponderada.**



**Fuente:** elaboración propia.

La **tabla 26** muestra el flujo neto resultante que incluye inversiones (diferencial de CAPEX PMM vs IM) y monetización de los ahorros de energía para un pozo, entre 2019 y 2025, periodo delimitado por el run life del motor que es de 7 años, con un porcentaje de ahorro de energía conservador del 10% y tarifa por generación local. Los resultados arrojan un VPN de 118,48 \$KUSD con un retorno de la inversión en 1,2 años. Evidenciando mayor viabilidad en la implementación de este tipo de motores cuando el abastecimiento energético proviene de la generación local del campo.

Tabla 27. Flujo de caja abastecimiento energético de generación local (2019-2025).

FLUJO DE CAJA GEN.LOCAL					
Periodo	Año	f. Capex (KUS	Beneficio = Ahorro Energía (KUSD)	Flujo (KUSD)	
0	2019	14,82	\$ 13,1	-\$ 1,7	
1	2020	0,00	\$ 27,7	\$ 27,7	
2	2021	0,00	\$ 27,6	\$ 27,6	
3	2022	0,00	\$ 27,5	\$ 27,5	
4	2023	0,00	\$ 27,6	\$ 27,6	
5	2024	0,00	\$ 27,6	\$ 27,6	
6	2025	0,00	\$ 27,6	\$ 27,6	
VP =		14,82	\$ 133,3	\$ 118,48	KUSD
				12,74	meses
				1,06	años
				9,0	EFI

Fuente: elaboración propia.

En la **Grafica 10** es posible observar el amplio margen que se genera en cada una de las columnas. En la línea del tiempo que permite calcular el VPN para un pozo cuyo abastecimiento energético corresponde a tarifa de red, la primera columna (color amarillo) hace referencia a la diferencia entre los ahorros energéticos y la inversión inicial donde se observa un valor mínimo a comparación del evidenciado al usar generación de red, \$1.700 USD, correspondiente al tiempo 0 (2019). Las columnas de color verde representan el ahorro energético para los siguientes 6 años (2020-2025) de manera positiva dado que no se asumen gastos extra en ese periodo de tiempo, añadido a esto es de resaltar que poseen valores cercanos, eso hace referencia a que el precio energético por generación local de acuerdo a las expectativas del plan de electrificación en Campo Rubiales no fluctúa como lo hace la tarifa de red.

**Gráfica 10. Inversión y ahorros para 1 pozo en \$KUSD, Generación local y con ahorro energético del 10%.**



**Fuente:** elaboración propia.

La **Tabla 27** resume los indicadores de la evaluación financiera para para 1 pozo, con los diferentes posibles valores de % de ahorro de energía, y para el caso de tarifa con generación local.

**Tabla 28. Resumen de indicadores económicos para 1 pozo según % de ahorro energético, con tarifa de generación local.**

% de ahorro de energía	VPN (KUSD)	Retorno de la inversión (años)	EFI
9%	\$ 105,15	1,12	11,1
10%	\$ 118,48	1,06	12,3
12%	\$ 145,14	0,97	14,8
13%	\$ 158,47	0,94	16

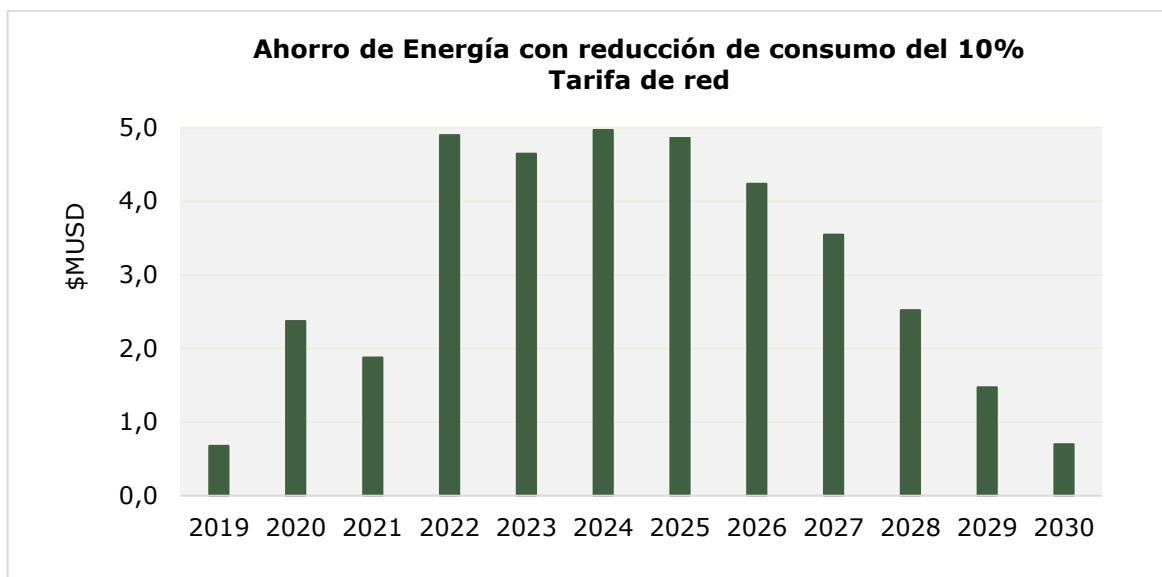
**Fuente:** elaboración propia.

### 5.3 CASO DE NEGOCIO CAMPAÑA 2019 -2030

En este capítulo se desarrollará la evaluación del caso de negocio de acuerdo a las premisas brindadas, mostrando 2 escenarios de abastecimiento energético, el primero con tarifa ponderada y otra con tarifa de red. Los resultados brindaran información respecto al ahorro para un porcentaje de ahorro conservador 10%.

**5.3.1 Evaluación de la implementación de PMM en las campañas de perforación del Campo Rubiales (2019-2025) y producción hasta el 2030 abastecida con energía proveniente de red.** La gráfica 11 muestra el ahorro en costo de energía proyectado si se implementaran los PMM en el período de evaluación 2019 a 2030, asumiendo una reducción del consumo de energía del 10% usando tarifa de red.

**Gráfica 11. Ahorro de Energía PMM @ 10% a 2030 Tarifa RED.**

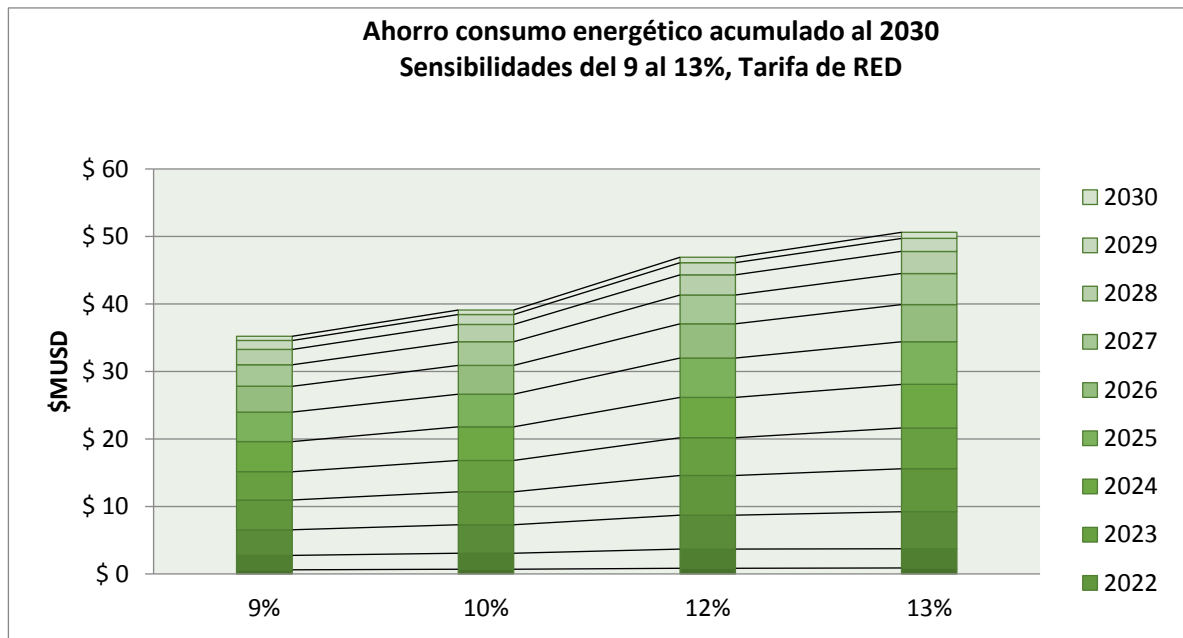


**Fuente:** elaboración propia.

La **gráfica 12** muestra los perfiles de ahorro acumulado en \$MUSD que se obtendrían con el uso de los PMM, vista límite económico del activo (2030), bajo las sensibilidades en porcentaje de ahorro de energía para valores dentro del rango establecido 9% al 13%, donde podemos observar ahorros totales acumulados a 2030 entre \$35MUSD y \$51MUSD.



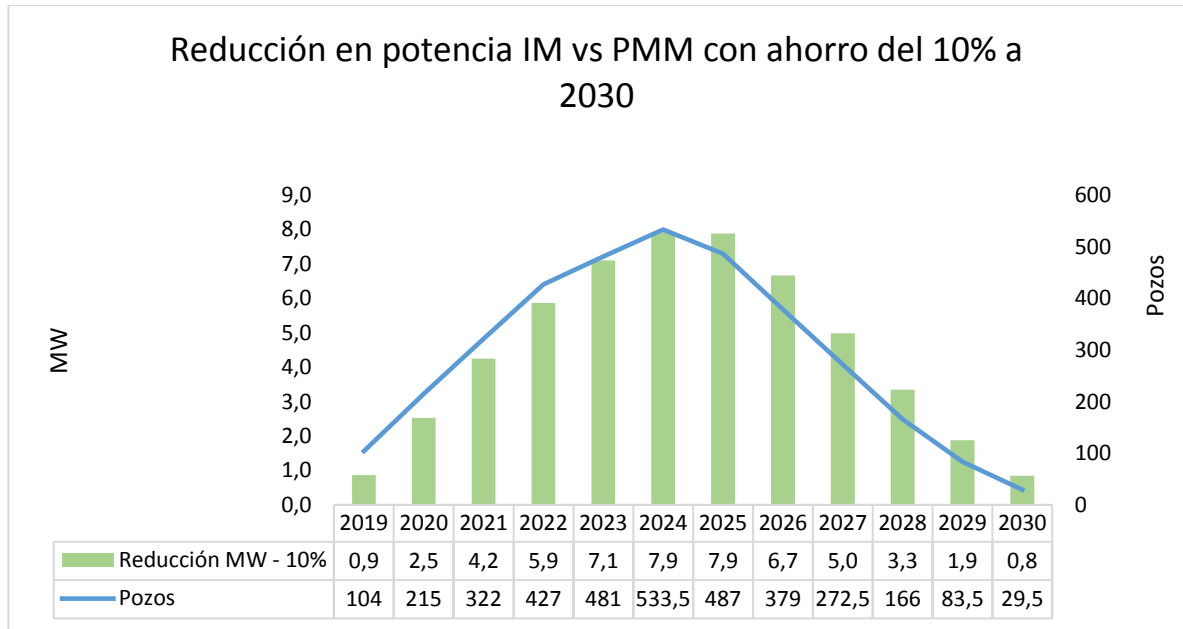
**Gráfica 12. Ahorro en consumo energético acumulado con sensibilidades en el rango de 9% al 13% entre PMM vs IM a 2030, tarifas de Red.**



**Fuente.** elaboración propia.

En la **gráfica 13** se puede identificar, en las barras de color verde, la reducción en potencia instantánea (MW), requerida para suministrar energía eléctrica a la totalidad de los pozos en el escenario con 10% de ahorro de energía brindado por los PMM, además, la línea azul corresponde a la cantidad de pozos que se pronostica estarían en funcionamiento anualmente de acuerdo a las premisas establecidas, generando una forma de campana, donde se puede diferenciar el tope máximo de pozos en funcionamiento (534) y la cantidad de pozos que habrán en el último año de la campaña (30).

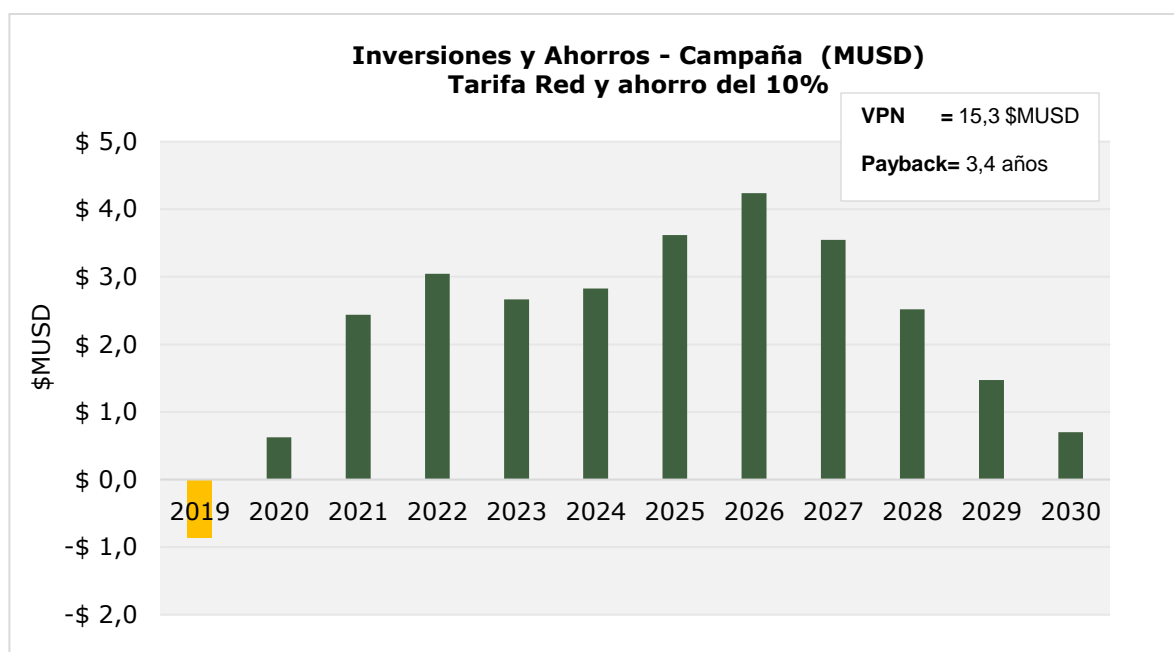
**Gráfica 13. Reducción en potencia PMM vs. IM con ahorro del 10% a 2030.**



**Fuente:** elaboración propia.

La **gráfica 14** muestra el flujo neto resultante que incluye inversiones (diferencial de CAPEX PMM vs IM) y monetización de los ahorros de energía, bajo el escenario de la campaña de perforación (2019-2025) y vista límite económico del activo (2030), para un ahorro de energía conservador del 10%. Los resultados arrojan un VPN de 15,3 \$MUSD con un retorno de la inversión en 3,4 años.

**Gráfica 14. Inversión y ahorros para el total de la campaña en MUSD, ahorro energético del 10% y tarifa de red**



**Fuente:** elaboración propia.

La **Tabla 28** resume los indicadores de la evaluación financiera para cada uno de los diferentes posibles valores de porcentaje de ahorro de energía.

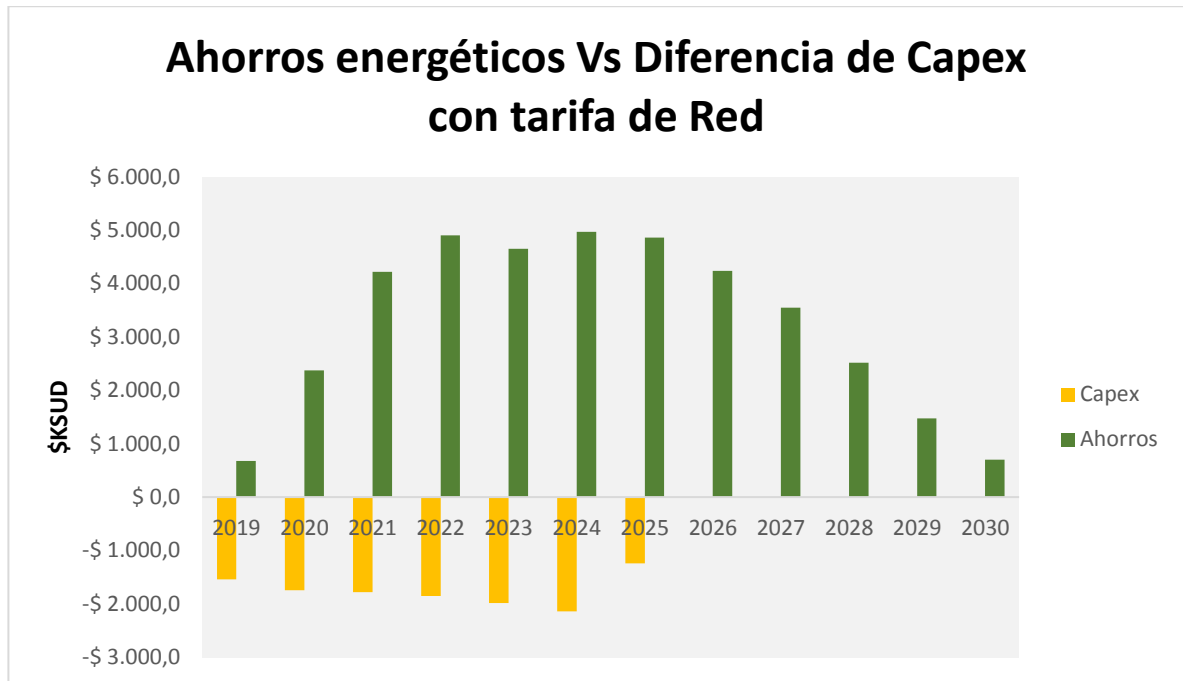
**Tabla 29. Resumen de indicadores económicos según % de ahorro energético, con tarifa de red.**

% de ahorro de energía	VPN (\$MUSD)	Retorno de la inversión (años)	EFI
9%	\$ 12.9	3,6	2,4
10%	\$ 15.3	3,4	2,6
12%	\$ 20.3	3,1	3,2
13%	\$ 22.5	3	3,4

**Fuente:** elaboración propia.

En la **gráfica 15** se observa la inversión en equipos de fondo y superficie año a año (columnas de color amarillo) y los ahorros energéticos en \$KUSD que se obtendrán en el mismo periodo de tiempo (columnas de color verde), al analizarlo se observa con claridad que el ahorro energético evaluado monetariamente genera cifras mayores las cuales contrarrestan la inversión realizada durante el total de la campaña de perforación, una vez finalizada la campaña el ahorro económico será neto.

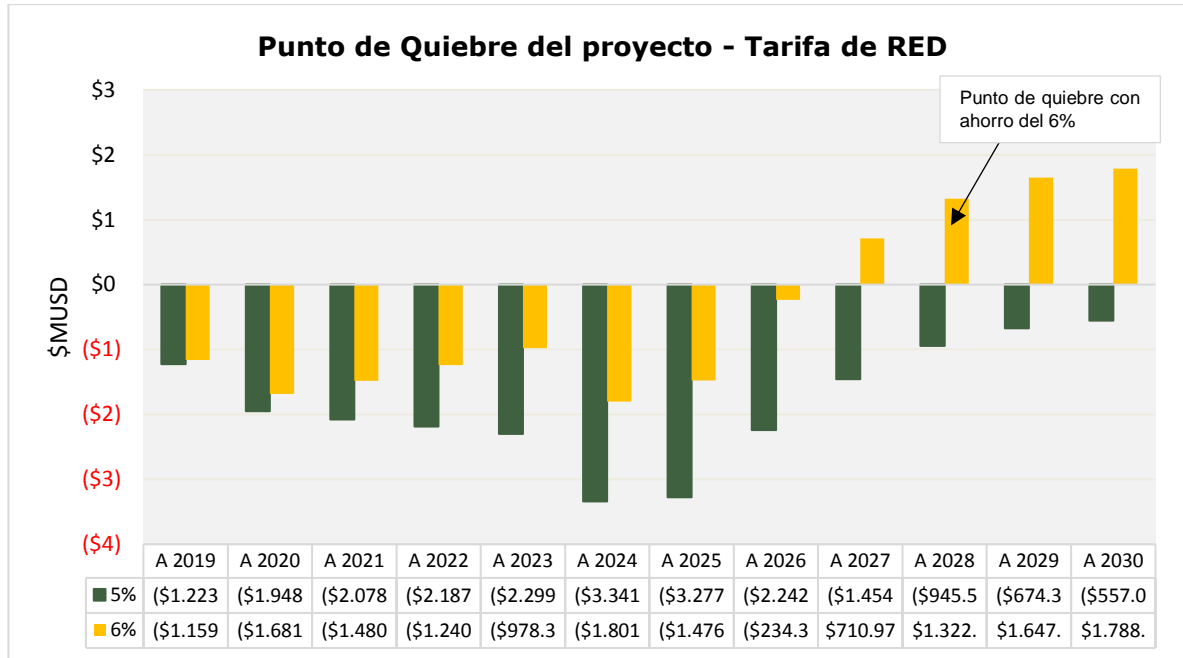
**Gráfica 15. Ahorros energéticos vs diferencia de Capex con tarifa de Red.**



**Fuente:** elaboración propia.

En la **gráfica 16** se puede observar dos tonalidades en las barras, amarillas, correspondientes a un ahorro energético del 6% y verde, correspondiente a un ahorro energético del 5%. El punto de quiebre, a partir del cual se comienza a obtener un flujo de caja positivo desde el año 2027 con un ahorro mínimo del 6% (por debajo del 6% no se tendrían beneficios económicos basados en las premisas usadas para este estudio). No obstante, como se mencionó anteriormente, el rango que delimita la expectativa de ahorro energético va del 9% al 13%.

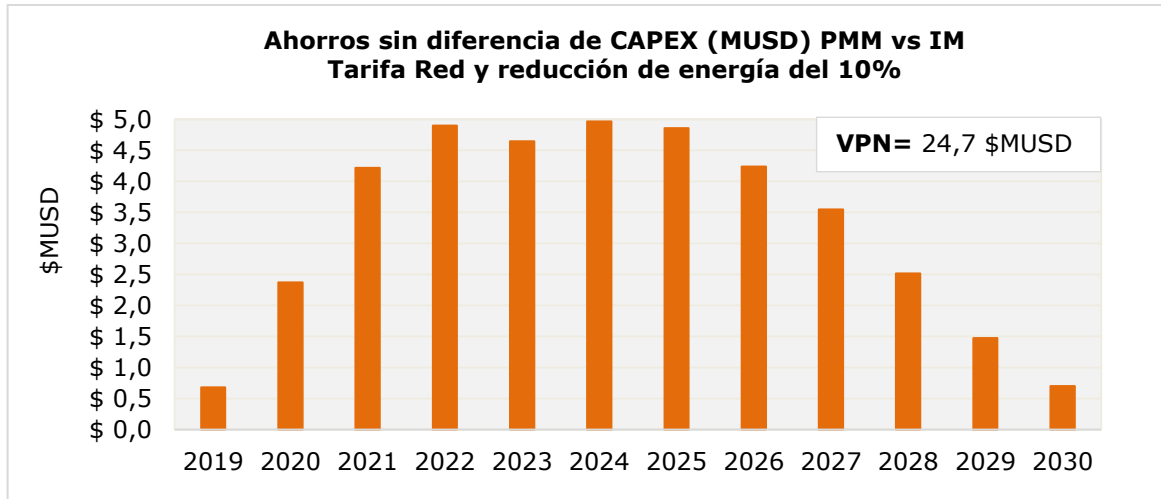
**Gráfica 16. Punto de quiebre del proyecto con tarifa de red.**



**Fuente:** elaboración propia.

Por otra parte, la **gráfica 17** muestra el perfil de ahorros que se obtendría considerando una diferencia “0” en CAPEX, es decir, con mismo precio de equipos de fondo y superficie para ambas soluciones IM y PMM (lo cual es posible obtener a través de negociaciones con los proveedores para compras por volumen, de acuerdo con el benchmarking realizado con las operadoras de asociadas).

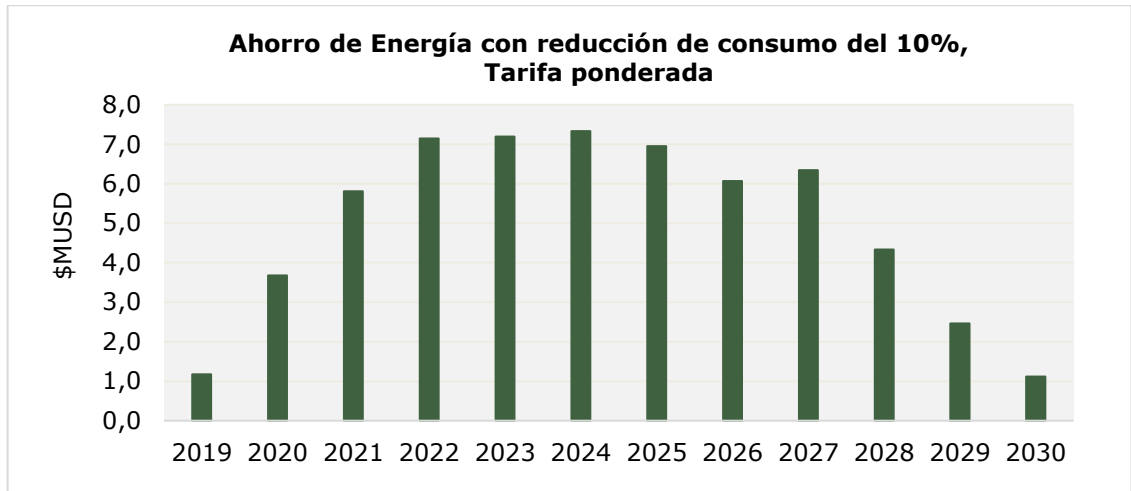
**Gráfica 17. Ahorros anualizados sin diferencia de costos de adquisición de equipos PMM vs IM, tarifa de Red.**



Fuente: elaboración propia.

**5.3.2 Evaluación de la implementación de PMM en las campañas de perforación del Campo Rubiales (2019-2025) y producción hasta el 2030 abastecida con energía proveniente de red y generación local (Tarifa ponderada).** La gráfica 18 muestra el ahorro en costo de energía proyectado si se implementaran los PMM en el período de evaluación 2019 a 2030, asumiendo una reducción del consumo de energía conservador del 10% y usando tarifa ponderada (Generación local y red).

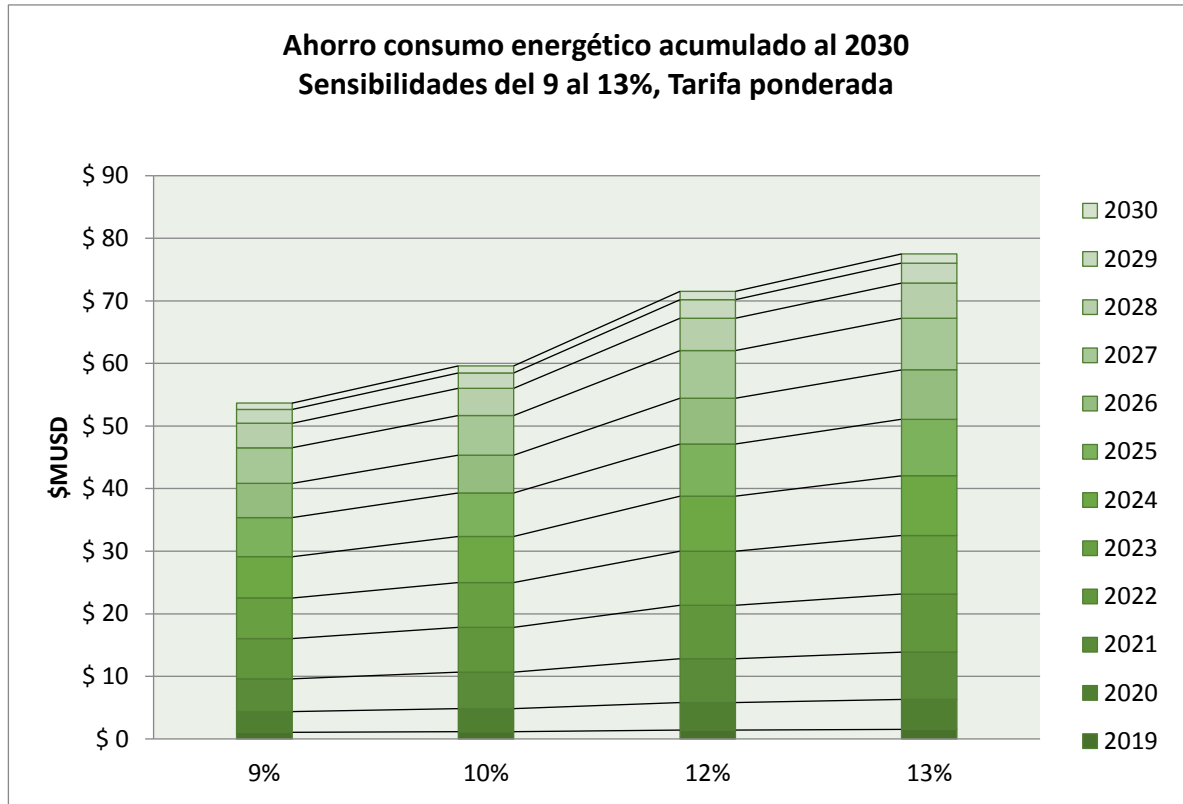
**Gráfica 18. Ahorro de energía PMM @ 10% a 2030 con Tarifa ponderada.**



**Fuente:** elaboración propia.

La **gráfica 19** muestra los perfiles de ahorro acumulado en \$MUSD que se obtendrían con el uso de los PMM, vista límite económico del activo (2030), bajo las sensibilidades en % de ahorro de energía por mejor eficiencia del PMM vs el IM, bajo el escenario de tarifa ponderada. Dando como proyecciones dentro de la sensibilización \$54MUSD para motores que generen un ahorro del 9% y \$77MUSD para motores que brinden ahorros del 13%.

**Gráfica 19. Ahorro en consumo energético acumulado con sensibilidades en el rango de 9% al 13% entre PMM vs IM a 2030, tarifa ponderada.**

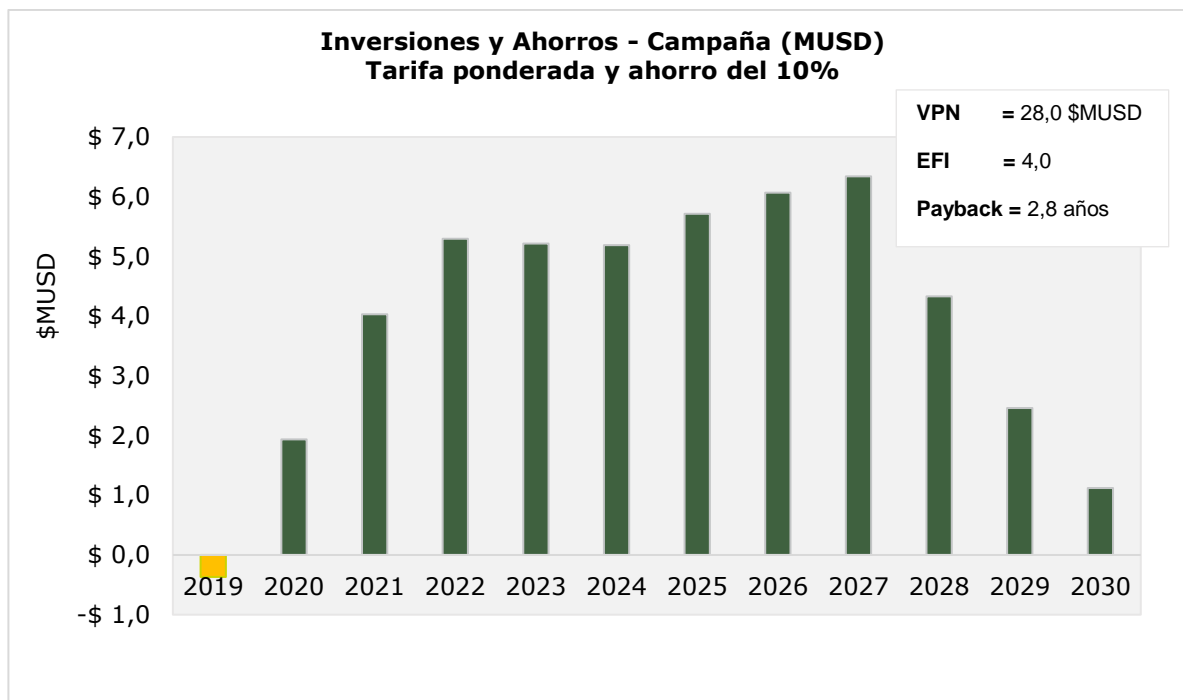


**Fuente:** elaboración propia.

La **gráfica 20** muestra el flujo neto resultante que incluye inversiones (diferencial de CAPEX PMM vs IM) y monetización de los ahorros de energía, bajo el escenario de la campaña de perforación (2019-2025) y vista límite económico del activo (2030), para un ahorro de energía conservador del 10% con tarifa ponderada. Los resultados arrojan un VPN de 28,0 \$MUSD con un retorno de la inversión en 2,8 años.



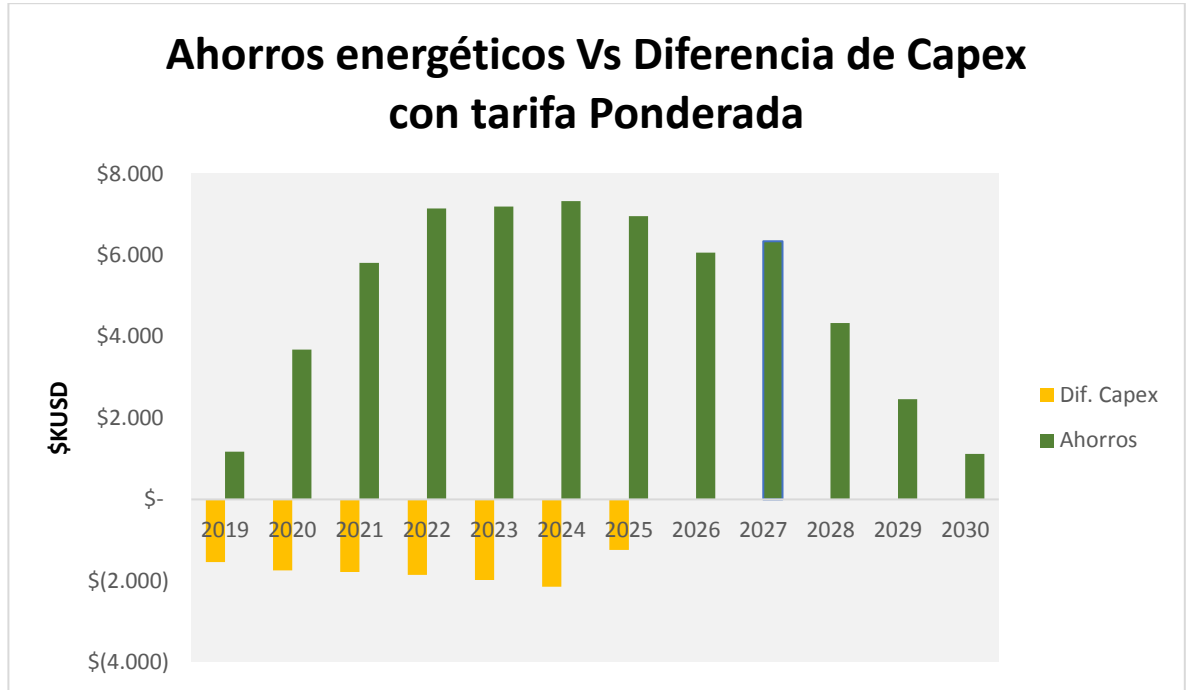
**Gráfica 20. Inversión y ahorros para el total de la campaña en MUSD, ahorro energético del 10% y tarifa ponderada.**



**Fuente:** elaboración propia.

En la **gráfica 21** se observa la inversión en equipos de fondo y superficie año a año (columnas de color amarillo) y los ahorros energéticos en \$KUSD que se obtendrán en el mismo periodo de tiempo (columnas de color verde), al analizarlo se observa con claridad que el ahorro energético evaluado monetariamente genera cifras mayores las cuales contrarrestan la inversión realizada durante el total de la campaña de perforación, una vez finalizada la campaña el ahorro económico será neto.

**Gráfica 21. Ahorros energéticos vs diferencia de Capex con tarifa ponderada.**



**Fuente:** elaboración propia.

La **Tabla 29** resume los indicadores de la evaluación financiera para cada uno de los diferentes posibles valores de porcentaje de ahorro de energía, para el caso de tarifa ponderada.

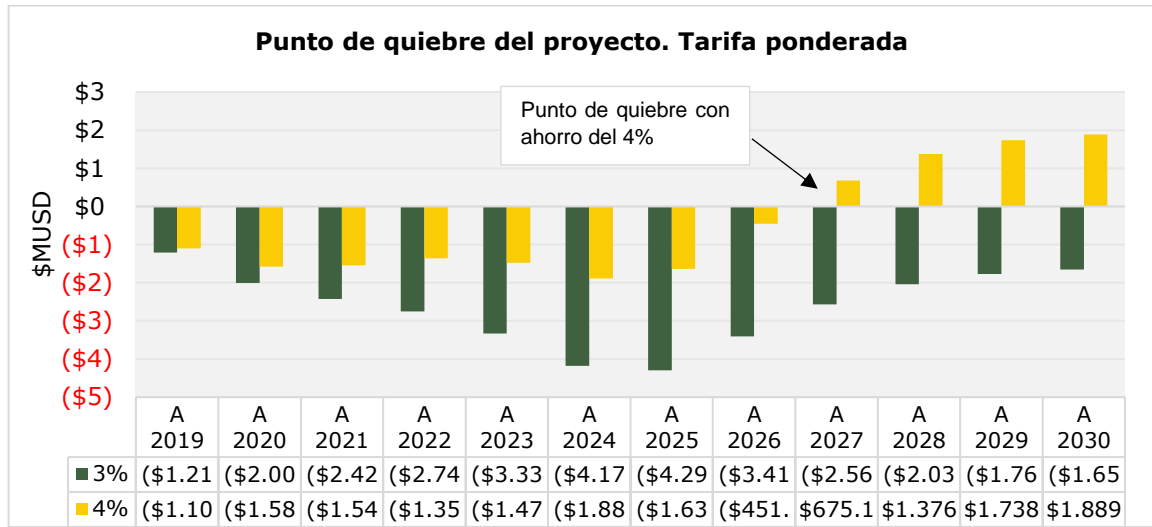
**Tabla 30. Resumen de indicadores económicos de acuerdo al ahorro energético, utilizando tarifa ponderada.**

% de ahorro de energía	VPN (\$MUSD)	Retorno de la inversión (años)	EFI
9%	\$ 24.2	3,0	3,6
10%	\$ 28.0	2,8	4.0
12%	\$ 35.4	2,5	4,8
13%	\$ 39.1	2,4	5,2

**Fuente:** elaboración propia.

En la **gráfica 22** se puede observar dos tonalidades en las barras, amarillas, correspondientes a un ahorro energético del 4% y verde, correspondiente a un ahorro energético del 3%. El punto de quiebre, a partir del cual se comienza a obtener un flujo de caja positivo desde el año 2027 con un ahorro mínimo del 4% (por debajo del 4% no se tendrían beneficios económicos basados en las premisas usadas para este estudio). No obstante, como se mencionó anteriormente, el rango que delimita la expectativa de ahorro energético va del 9% al 13%.

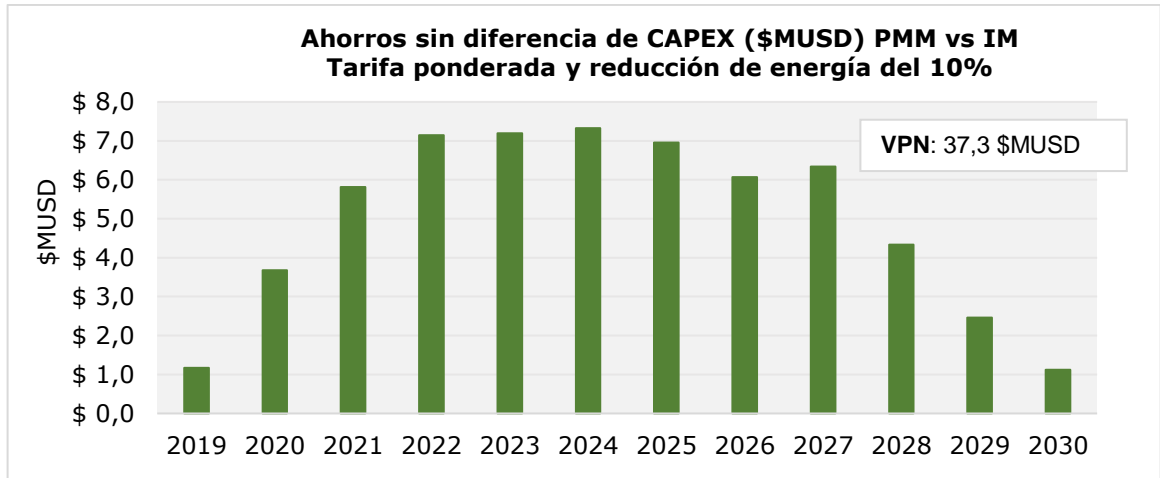
**Gráfica 22. Punto de quiebre del proyecto con tarifa ponderada.**



**Fuente:** Elaboración propia ,2019.

Por último, la **gráfica 23** muestra el perfil de ahorros que se obtendría considerando una diferencia “0” en CAPEX, es decir, con mismo precio de equipos de fondo y superficie para ambas soluciones IM y PMM, bajo el escenario de tarifa ponderada.

**Gráfica 23. Ahorros anualizados sin diferencia de costos de adquisición de equipos PMM vs IM**



**Fuente:** elaboración propia.

De acuerdo a los estudios realizados evaluando la campaña total y la inmersión de un solo pozo, se puede afirmar que la implementación de estos equipos es una opción válida y viable para optimizar los costos de producción en Campo Rubiales.

Dicha optimización debe estar ligada al porcentaje de ahorro generado por el motor (entre 9 y 14%), la diferencia entre el precio de los equipos y el porcentaje ponderado de abastecimiento energético (la relación tarifa de red vs generación local) para el número de pozos productores que ingresen en el periodo comprendido en la campaña de perforación (2019 a 2025).

## 6. CONCLUSIONES

- Se desarrolló el protocolo de prueba especificando cada uno de las herramientas y puntos de medición para una prueba en banco de motores delimitando las funciones y responsabilidades que debían cumplir las empresas proveedoras, veedoras y operadora.
- Los resultados de las pruebas simuladas para cada uno de los motores de las compañías A, B y C; indicaron que el desempeño y consumo energético de los motores PMM fue superior en comparación con los motores IM. El rango de eficiencia fue superior entre un 5% y un 6%, y el consumo energético entre 8% y 15%.
- Los resultados obtenidos en la simulación de los motores de imanes permanentes y motores de inducción para un pozo tipo 5, evidenciaron que la compañía B obtuvo el mejor desempeño de consumo energético y eficiencia del motor PMM y el motor IM. Para el primero, el consumo energético fue de 225,71KW y su eficiencia de 92,97%. Para el segundo, el consumo energético fue de 250,95 KW y su eficiencia de 86,89%.
- Se logró reducir la incertidumbre en cuanto al porcentaje real de ahorro en el consumo energético, para el motor PMM de la compañía B entre el 9% y el 14%, factor que reducirá costos, de manera proporcional al porcentaje de ahorro energético, en la producción de acuerdo al tipo de pozo, condiciones del fluido y caudal requerido.
- Mientras mayor sea el porcentaje de abastecimiento energético por generación local durante el periodo evaluado para el desarrollo productivo del campo, Los motores de imanes permanentes y su rango de ahorro energético (9% a 14%) tendrán más relevancia, evitando costos extras.
- De obtenerse igualdad entre los precios de los motores IM y PMM, los ahorros serán de \$37.7MUSD para toda la campaña. Los ahorros referentes a costos de energéticos se lograrán de manera inmediata y el nivel de beneficio dependerá del porcentaje de reducción de consumo de energía que se logre con el motor PMM.
- Con las premisas utilizadas para la formulación de la evaluación económica y manteniendo el diferencial de precios entre IM y PMM, a partir de una reducción del consumo energético superior al 6%, el proyecto llegará al punto de equilibrio dentro del rango de tiempo comprendido por la campaña de perforación (en 2027). Entre más alto sea el ahorro, más temprano será el punto de equilibrio.

- De acuerdo a los resultados en el caso de negocio, sin importar el tipo de abastecimiento energético para los 700 pozos de la campaña de perforación entre 2019 y 2030, la implementación de sistemas de levantamiento artificial con bombeo electrosumergible usando motores de imanes permanentes generarán ahorros en el consumo energético anual (entre 0,9 y 7,9 MW). Lo anterior se traduce en energía disponible para el desarrollo de otras operaciones o reducción en la inversión en equipos de generación local.

## 7. RECOMENDACIONES

- Realizar las pruebas en banco ya que se tendrá mayor conocimiento del rendimiento de cada uno de los motores de diferentes empresas proveedoras, información de la relación entre el aumento y disipación de la temperatura del motor para tener datos más precisos y de acuerdo con cada uno de los equipos evaluados.
- Realizar una comparación con un número de proveedores mucho más alta y con la información completa de sus equipos, con esto se logrará definir cuál es el equipo de mejores condiciones del mercado global.
- Se recomienda la implementación de PMM en Campo Rubiales en todos los pozos de la campaña de desarrollo (2019-2030) con los motores de imanes permanentes de la compañía B.
- Como se observó en el análisis económico, el costo de los equipos de fondo y superficie es otra sensibilidad en la ecuación. Es importante realizar una estrategia con el área de abastecimiento para mantener los precios de PMM lo más cercano posible o iguales a los IM.
- Realizar un estudio enfatizado en las características del fluido y su yacimiento, dando claridad a las condiciones operativas de los motores y la relación oprima para su buen funcionamiento.
- Obtener información frente a los costos de mano de obra y la distribución energética espacialmente dentro del campo, definiendo con mayor precisión el tipo de abastecimiento pozo a pozo y el costo de la implementación de nuevas tecnologías para cumplir el requerimiento energético.

## BIBLIOGRAFIA

ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos), Cuenca Llanos Orientales, Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos, Colombia, Diciembre 2012. pp 48.

ARAUJO, Ysidro, GÓMEZ, Yohaney; RODRIGUEZ, Javier; PORTILLO, Fredy; YORIS, Franklin. Aspectos hidrodinámicos, estructurales y estratigráficos del Campo Rubiales. Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. Pacific Rubiales Energy. 2009., pp 2

DASILVA, Ángel., GOMEZ, Yohaney., VILLA, María., YORIS, Franklin., MORALES, Diego, Oil distribution in the Carbonera Formation, Arenas Basales unit. A case study in the Quifa and Rubiales fields, Eastern Lanos Basin, Colombia, Enero 2014, pp 3.

EGAMASTER. Manual de instrucciones, Pinza Amperimétrica. {En línea}. Citado el 19 de Febrero del 2019. Disponible en <https://www.egamaster.com/phocadownload/manuales/65507.pdf>.

FAGORAUTOMATION. Encoders lineales y angulares. {En línea}. Citado el 19 de Febrero del 2019. Disponible en <http://www.dmscncrouters.com/wp-content/uploads/2013/08/Fagor-CNC-Linear-and-Rotary-Encoders-Catalog-Spanish.pdf>.

Flórez Anaya, A., Araujo, Y. E., Uzcategui Rivas, M. E., Parra Moreno, W., & Lavado Quiñones, R. (2012, January 1). Improved Heavy Oil Recovery by Drilling Horizontal Wells in Rubiales Field, Colombia. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/153581-MS

FLUKE. Cómo elegir un comprobador de prueba de resistencia de aislamiento. {En línea}. Citado el 19 de Febrero del 2019. Disponible en <https://fluke.syncforce.com/efulfillment/13371-esp>.

Grid Solutions. PQM medidor de calidad de Red. {En línea}. Citado el 19 de Febrero del 2019. Disponible en <http://www.gegridsolutions.com/products/brochures/pqmssp.pdf>.

HDR Engineering Inc. (2001). Handbook of public water systems. Segunda edición. New York. USA. (pp1014) Wiley, J and Sons Ltd.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166 Bogota D.C.: El instituto,2018.153p.

Mogollón, M., Arguelles, A., Rodríguez, A., Anaya, O., Miranda, S., Velásquez, E., & Villalobos, J. (2018, March 13). Lessons Learned from Extending Run Life for Hundreds of ESPs in a Heavy Oil Environment. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/189736-MS.



*P. Lynn. (2014). Electricity from wave and tide. USA. primera edición. (pp 144). Jhon Wiley and Sons Ltd.*

Revista ACP Hidrocarburos, edición # 17, junio a agosto de 2016, pág. 36-37, Campo Rubiales de regreso a Ecopetrol, Sharon Hernández.

SKF. Alineadores de ejes SKF. {En línea}. Citado el 19 de febrero del 2019. Disponible en <http://www.dexis-iberica.com/ficheros/105.pdf>.

TAKACS, Gabor. Electrical submersible pumps manual: design, operation and maintenance. Burlington: Elsevier Inc, 2009. 115 p. ISBN: 978-1-85617-557-9.

Tecktronix. Introducción a los osciloscopios; guía del instructor. {En línea}. Citado el 19 febrero de 2019. Disponible en [http://electronica.ugr.es/~jmolinoc/ci\\_files/Oscs\\_Tek/resources/001155000-Scopes-Instructors-Guide-ES.pdf](http://electronica.ugr.es/~jmolinoc/ci_files/Oscs_Tek/resources/001155000-Scopes-Instructors-Guide-ES.pdf).

Valencia.M. A, Departamento de tecnologías de producción, Vicepresidencia técnica, Ecopetrol S.A, Colombia,2018.

Whitfield, J. (1995). Electrical craft principles. Cuarta edición. London.UK. (pp115) Institution of electrical engineers.

Xiao.J, Lastra.R. Induction versus permanent magnet motors for ESP applications, SPE-192177-MS, Arabia Saudita, pag 2, 2018.

**ANEXOS**  
**ANEXO A**

**SURVEY COMPLETO POZO TIPO 5.**

Measured Depth (ft)	Inclination (°)	Azimuth (°)	Vertical Depth (ft)	+N/-S (ft)	+E/-W (ft)	Map Northing (m)	Map Easting (m)
0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	909,556.82	948,665.14
250.0	0.00	360.00	250.0	0.0	0.0	909,556.82	948,665.14
<b>9 5/8"</b>							
350.0	0.00	360.00	350.0	0.0	0.0	909,556.82	948,665.14
400.0	1.00	202.00	400.0	-0.4	-0.2	909,556.70	948,665.09
500.0	3.00	202.00	499.9	-3.6	-1.5	909,555.71	948,664.69
600.0	5.00	202.00	599.7	-10.1	-4.1	909,553.74	948,663.89
700.0	7.00	202.00	699.1	-19.8	-8.0	909,550.79	948,662.70
800.0	9.00	202.00	798.2	-32.7	-13.2	909,546.85	948,661.11
850.0	10.00	202.00	847.5	-40.4	-16.3	909,544.52	948,660.17
900.0	10.00	202.00	896.7	-48.4	-19.6	909,542.07	948,659.17
1,000.0	10.00	202.00	995.2	-64.5	-26.1	909,537.16	948,657.19
1,100.0	10.00	202.00	1,093.7	-80.6	-32.6	909,532.25	948,655.21
1,200.0	10.00	202.00	1,192.1	-96.7	-39.1	909,527.34	948,653.23
1,300.0	10.00	202.00	1,290.6	-112.8	-45.6	909,522.44	948,651.24
1,400.0	10.00	202.00	1,389.1	-128.9	-52.1	909,517.53	948,649.26
1,500.0	10.00	202.00	1,487.6	-145.0	-58.6	909,512.62	948,647.28
1,600.0	10.00	202.00	1,586.1	-161.1	-65.1	909,507.72	948,645.30
1,700.0	10.00	202.00	1,684.6	-177.2	-71.6	909,502.81	948,643.31
1,800.0	10.00	202.00	1,783.0	-193.3	-78.1	909,497.90	948,641.33
1,810.0	10.00	202.00	1,792.9	-194.9	-78.8	909,497.41	948,641.13
1,900.0	14.06	202.27	1,880.9	-212.3	-85.8	909,492.11	948,638.98
2,000.0	18.58	202.44	1,976.8	-238.3	-96.5	909,484.20	948,635.72
2,100.0	23.09	202.54	2,070.3	-271.1	-110.1	909,474.18	948,631.57
2,200.0	27.61	202.61	2,160.6	-310.6	-126.6	909,462.14	948,626.56
2,300.0	32.12	202.66	2,247.3	-356.6	-145.7	909,448.13	948,620.72
2,400.0	36.63	202.70	2,329.8	-408.7	-167.5	909,432.26	948,614.09
2,450.8	38.93	202.72	2,370.0	-437.4	-179.5	909,423.50	948,610.42
2,500.0	38.93	202.72	2,408.3	-465.9	-191.4	909,414.82	948,606.79
2,600.0	38.93	202.72	2,486.0	-523.8	-215.7	909,397.15	948,599.39
2,605.1	38.93	202.72	2,490.0	-526.8	-216.9	909,396.25	948,599.01
2,700.0	44.26	200.42	2,561.0	-585.4	-240.0	909,378.40	948,591.97
2,800.0	49.91	198.42	2,629.0	-654.4	-264.3	909,357.35	948,584.57
2,900.0	55.60	196.74	2,689.5	-730.3	-288.3	909,334.22	948,577.26
3,000.0	61.30	195.27	2,741.8	-812.2	-311.7	909,309.27	948,570.12
3,100.0	67.02	193.95	2,785.4	-899.2	-334.4	909,282.73	948,563.21
3,200.0	72.75	192.74	2,819.8	-990.6	-356.1	909,254.89	948,556.61
3,300.0	78.48	191.60	2,844.6	-1,085.2	-376.4	909,226.04	948,550.39
3,400.0	84.22	190.51	2,859.7	-1,182.2	-395.4	909,196.48	948,544.62
3,438.0	86.40	190.10	2,862.8	-1,219.5	-402.2	909,185.13	948,542.55
<b>7"</b>							
3,448.4	87.00	189.99	2,863.4	-1,229.7	-404.0	909,182.00	948,542.00
3,500.0	88.55	189.99	2,865.4	-1,280.5	-412.9	909,166.53	948,539.28
3,560.1	90.35	189.99	2,866.0	-1,339.7	-423.3	909,148.49	948,536.10
3,600.0	90.35	189.99	2,865.7	-1,378.9	-430.3	909,136.52	948,533.99
3,700.0	90.35	189.99	2,865.1	-1,477.4	-447.6	909,106.50	948,528.70
3,800.0	90.35	189.99	2,864.5	-1,575.9	-465.0	909,076.48	948,523.41
3,900.0	90.35	189.99	2,863.9	-1,674.4	-482.3	909,046.47	948,518.12
4,000.0	90.35	189.99	2,863.3	-1,772.9	-499.7	909,016.45	948,512.83
4,100.0	90.35	190.00	2,862.7	-1,871.4	-517.0	908,986.43	948,507.54
4,138.0	90.35	190.00	2,862.4	-1,908.8	-523.6	908,975.03	948,505.53
<b>4 1/2"</b>							
4,148.1	90.35	190.00	2,862.4	-1,918.7	-525.4	908,972.00	948,505.00

## ANEXO B

### FORMATO PARA EVALUAR INVERSIÓN PARA LA CAMPAÑA 2019-2025.

Tarifa RED	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
COP/KWh	\$ 322	\$ 286	\$ 342	\$ 363	\$ 305	\$ 239	\$ 229
TIO ECP ANUAL	10,0%						
TIO EFECTIVA MENSUAL	0,80%						
TRM	3200						
Factor de potencia en VSD	0,96						
Año		2019	2019	2019	2019	2019	2019
Precio COP/KWH		\$ 286	\$ 286	\$ 286	\$ 286	\$ 286	\$ 286
Fecha		ene.-19	feb.-19	mar.-19	abr.-19	may.-19	jun.-19

2025	2026	2027	2028	2029	2030	POTENCIA RED			POTENCIA VSD			POT. XFMR SUT		
\$ 225	\$ 232	\$ 260	\$ 275	\$ 286	\$ 303	KW	CONS	%	KVA	CONS	%	KVA	CONS	%
						350,00	72,25	18,04	260,00	70,59	27,15	460,00	67,57	14,69
						Running	17/01/2015							
						RL dias	1.661							
2019	2019	2019	2019	2019	2019	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
\$ 286	\$ 286	\$ 286	\$ 286	\$ 286	\$ 286	\$ 342	\$ 342	\$ 342	\$ 342	\$ 342	\$ 342	\$ 342	\$ 342	\$ 342
jul.-19	ago.-19	sep.-19	oct.-19	nov.-19	dic.-19	ene.-20	feb.-20	mar.-20	abr.-20	may.-20	jun.-20	jul.-20	ago.-20	sep.-20

Consumo de energía IM KWH	157,50						En el VSD					
Mes	0	1	2	3	4	5						
Pozos de completamiento		9	8	9	8	9						
Mitad de los pozos apagados a los 4 años		9	17	26	34	43						
Mitad de los pozos a los 4 años y apagados al 7		9	17	26	34	43						
total de pozos acumulados		9	17	26	34	43						
Equipo Sup & Fondo incluye instalación inicial (por mes)	\$137.879	\$1.240.911	\$1.103.032	\$1.240.911	\$1.103.032	\$1.240.911						
Consumo energetico mensual	(MW)	1021	1928	2948	3856	4876						
Costo de energía /pozo		\$10.135	\$10.135	\$10.135	\$10.135	\$10.135						
Total Costos Energia		\$114.299.682	\$91.216,13	\$172.297	\$263.513	\$344.594						
VPN costos ESP		\$ 348.853.771										

Consumo de energía PMM KWH 10%	141,8											
Mes	0	1	2	3	4	5	6					
Pozos de completamiento		9	8	9	8	9	8					
Mitad de los pozos apagados a los 4 años		9	17	26	34	43	51					
Mitad de los pozos a los 4 años y apagados al 7		9	17	26	34	43	51					
total de pozos acumulados		9	17	26	34	43	51					
Equipo Sup & Fondo incluye instalación inicial (por mes)	\$152.698	\$1.374.282	\$1.221.584	\$1.374.282	\$1.221.584	\$1.374.282	\$1.221.584					
Consumo energetico mensual	(MW)	919	1735	2654	3470	4389	5205					
Costo de energía mensual		\$9.122	\$9.122	\$9.122	\$9.122	\$9.122	\$9.122					
Total Costos		\$126.584.417	\$82.095	\$155.067	\$237.162	\$310.135	\$392.229					
VPN costos ESP		\$ 337.683.097										

Fuente: elaboración propia.