

**COMPARACIÓN DE EFICIENCIA DE LOS MOTORES ASÍNCRONOS Y
SINCRÓNICOS, DE LAS BOMBAS CONVENCIONALES Y DE ALTA
EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES)**

EDINSON BAUTISTA QUIROGA

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

2020

**COMPARACIÓN DE EFICIENCIA DE LOS MOTORES ASÍNCRONOS Y
SINCRÓNICOS, DE LAS BOMBAS CONVENCIONALES Y DE ALTA
EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES)**

EDINSON BAUTISTA QUIROGA

**Trabajo de grado para optar el título de Especialización en Producción de
Hidrocarburos**

Director:

JOHN ALEXANDER LEÓN PABÓN
Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

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

2020

DEDICATORIA

A la vida por las oportunidades que me ha ofrecido para crecer como persona y profesionalmente.

A mi esposa por su incondicional apoyo, en todas las etapas de mi crecimiento profesional.

A mi hija por ser esa persona tan especial, que hace posible ver más allá de los obstáculos de la vida.

A mis padres porque siempre han estado a mi lado, con los mejores consejos para alcanzar el éxito y salir de los momentos más difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Mis más grandes agradecimientos a Novomet por la oportunidad de aprender, crecer como profesional, adquiriendo conocimiento y experiencia con las bombas electro sumergible.

A mi director John Alexander León Pabón por su conocimiento y aporte durante el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVO	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL ELECTROSUMERGIBLE	18
2.1 SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE (BES).....	19
2.1.1 Componentes de subsuelo o fondo	20
2.1.2 Componentes de Superficie.....	34
3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES AM Y PMM PARA DE UN SISTEMA ELECTRO SUMERGIBLE	37
3.1 MOTORES ASÍNCRONOS O DE INDUCCIÓN (AM)5	37
3.2 MOTORES SINCRÓNICOS O PERMANENT MAGNET MOTOR (PMM)	39
3.2.1 Beneficios del Motor de Magneto Permanente.	40
3.2.2 Ventajas del motor PMM con respecto al motor AM	41
3.2.3 Comparación entre un motor de imanes permanentes y motor asíncrono. ..	42
4. CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS CONVENCIONALES Y DE ALTA EFICIENCIA.....	44
4.1 BOMBAS CONVENCIONAL	45
4.2 BOMBA POWER SAVE O ALTA EFICIENCIA	49
4.2.1 Bombas Power Save disponibles según diámetro y caudal.....	51
5. RETORNO DE INVERSIÓN CON TECNOLOGÍA POWER SAVE (PMM & BOMBAS DE ALTA EFICIENCIA).	53
5.1 DIMENSIONAMIENTO CON EQUIPOS PMM & POWER SAVE (PS)	
ANÁLISIS TÉCNICO.....	55

5.2 ANÁLISIS ECONÓMICO PARA INVERSIÓN DE SISTEMAS PMM & PS64
5.2.1 Costo de equipo PMM & PS64
6. CONCLUSIONES67
BIBLIOGRAFÍA.....69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de Admisión o Intakes	27
Tabla 2. Comparación de un motor AM y PMM	42
Tabla 3. Rangos de operación de bombas convencionales.....	48
Tabla 4. Equipos disponibles Power Save Novomet.....	52
Tabla 5. Parámetros de Dimensionamiento	53
Tabla 6. Equipos Instalados Actualmente, Equipo Convencional.	54
Tabla 7. Datos Actuales de un Sistema Convencional.	54
Tabla 8. Dimensionamiento P-1 PMM & Power Save.....	55
Tabla 9. Dimensionamiento P-1 AM & Power Save.....	56
Tabla 10. Dimensionamiento P-2 PMM & Power Save.....	57
Tabla 11. Dimensionamiento P-2 AM & Power Save.....	58
Tabla 12. Dimensionamiento P-3 PMM & Power Save.....	58
Tabla 13. Dimensionamiento P-3 AM & Power Save.....	59
Tabla 14. Dimensionamiento P-4 PMM & Power Save.....	60
Tabla 15. Dimensionamiento P-4 AM & Power Save.....	61
Tabla 16. Resultados de Propuesta con PMM, AM y PS.....	61
Tabla 17. Comparativo Energético PMM, AM, PS y CONVENCIONAL.....	62
Tabla 18. Comparativo de Eficiencia entre Sistemas.....	63
Tabla 19. Equipo PMM & PS Propuesto	64
Tabla 20. Lista de Precio Equipo Novomet PMM + PS.....	64
Tabla 21. Análisis Económico del Ahorro Energético.	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Rango de aplicación de los sistemas levantamiento artificial más comunes	19
Figura 2. Componentes de un sistema BES.	20
Figura 3. Ilustración de una etapa centrífuga en movimiento.....	22
Figura 4. Etapa de flujo radial.	23
Figura 5. Etapa de flujo Mixto	23
Figura 6. Relación de etapas respecto al flujo, según catálogo de Baker Hughes.	24
Figura 7. Tipos de Etapas Centrífugas.....	25
Figura 8. Clasificación de las bombas según el diseño de ensamblaje.	26
Figura 9. Tipos de Admisión para manejo de Gas.	28
Figura 10. Tipo de Admisión para manejo control de sólidos.	29
Figura 11. Configuraciones Comunes en Protectores Modulares.....	30
Figura 12. Módulo de Sacrificio & Thrust Bearing.....	31
Figura 13. Estructura de funcionamiento de un Sensor de Fondo.....	33
Figura 14. Sistema de Monitoreo de Fondo.....	34
Figura 15. Equipos de Superficie	34
Figura 16. Ilustración de Un Motor de Inducción.....	38
Figura 17. Principio de Operación del PMM	40
Figura 18. Motor PMM vs AM	41
Figura 19. Ventajas PMM vs AM10.....	43
Figura 20. Curva Característica bomba D470N	47
Figura 21. Curva Característica bomba WD-450.	47
Figura 22. Curva Característica bomba NHV450.....	48
Figura 23. Proceso de Fabricación powder metallurgy.....	51

GLOSARIO

BOMBAS ELECTROSUMERGIBLES: método de levantamiento artificial eficiente para la producción de crudos livianos y medianos, con aplicaciones en pozos desviados, alta tasa de producción y pozos profundos.

CONSUMO ENERGÉTICO: se define como la energía empleada para realizar un trabajo, en los sistemas de levantamiento artificial se define como la energía eléctrica requerida para realizar el funcionamiento de los diferentes sistemas.

DIFUSOR: componente estacionario que convierte la energía cinética en energía potencial. Una vez que el impulsor desplaza el fluido de forma perpendicular al eje, el difusor comprime y levanta hacia la siguiente etapa el fluido, este proceso se repite según el número de etapas que esté compuesta la bomba.

ETAPA: componente principal de una bomba centrífuga, conformada por dos elementos principales impulsor y difusor, el cual aumenta la energía del fluido para su desplazamiento a una distancia requerida.

IMPULSOR: disco metálico giratorio, que convierte la energía mecánica en energía cinética. Por medio de la fuerza centrífuga, el impulsor desplaza el fluido guiado por alabes hacia el difusor.

MOTOR ELÉCTRICO: dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Su funcionamiento se basa en un componente fijo estator y un componente móvil rotor.

ABREVIATURAS

BES: Bomba Electro Sumergible.

AM: Motor Asíncrono o Motor de Inducción.

ESP: Electric Submersible Pump. Siglas en ingles de Bomba Electro sumergible.

PMM: Permanent Magnet Motor. Motor de Imán Permanente o Motor Síncrono.

ALS: Artificial Lift System, en español Sistema de Levantamiento Artificial.

PS: Power Save, etapas de alta eficiencia.

RESUMEN

TITULO: COMPARACIÓN DE EFICIENCIA DE LOS MOTORES ASINCRONOS Y SINCRONICOS, DE LAS BOMBAS CONVENCIONALES Y DE ALTA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE (BES)*

AUTOR: EDINSON BAUTISTA QUIROGA**

PALABRAS CLAVES: Electro sumergible, PMM, AM, Consumo Energético, Frecuencia, Imanes Permanentes.

CONTENIDO: Es importante resaltar la eficiencia que se obtiene con los motores sincrónicos comparados con los motores de inducción, logrando reducir el consumo energético hasta un 20%. Este porcentaje de ahorro en potencia eléctrica es significativamente valioso ya que representa menor costo en la operación ampliando el margen de ganancia.

En los últimos años, en medio de la crisis económica de los años 2014-2015 que vivió el planeta con el desplome en los precios del petróleo, las empresas administradoras de campos productores de petróleo, optaron una estrategia de inversión para cumplir con las metas de producción y mantener el margen de ganancia positivo, es en este punto, que, a pesar de obtener mayor eficiencia con los motores sincrónicos, no era suficiente para alcanzar las metas propuestas. La necesidad de superar el 20% de eficiencia que ofrece este tipo de motores, exige a las empresas prestadoras de servicios al desarrollo de una bomba centrífuga multi-etapa de alta eficiencia que ofrece superar este límite alcanzado hasta un 40%-50% de ahorro, combinando la eficiencia del motor sincrónico con el de la bomba centrífuga de alta eficiencia.

Para el desarrollo de la siguiente monografía, se propone un análisis técnico -económico de un campo productor de Colombia, donde se plantea reemplazar las bombas electros sumergibles actuales (convencional) por tecnología PMM con bombas de alta eficiencia optimizando los costos de producción. La combinación de esta revolución tecnológica empleada actualmente en diferentes campos productores de Colombia y en el mundo, ha ofrecido resultados satisfactorios, generando una visión diferente al concepto de este tipo de sistema de levantamiento artificial, tomando mayor ventaja referente en consumo energético.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Especialización en Producción de Hidrocarburos, Director: John Alexander León Pabón, Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

ABSTRACT

TITLE: EFFICIENCY COMPARISON OF ASYNCHRONOUS AND SYNCHRONIC MOTORS, CONVENTIONAL PUMPS AND HIGH EFFICIENCY OF A SUBMERSIBLE ELECTRO PUMP SYSTEM (BES)*

AUTHOR: EDINSON BAUTISTA QUIROGA**

KEYWORDS: Electro submersible, PMM, AM, Energy consumption, Frequency, Permanent Motor.

DESCRIPTION: It is important to highlight the efficiency obtained with synchronous motors compared to induction motors, reducing energy consumption by up to 20% according to some previous studies. This percentage of savings in electric power is significantly valuable as it represents lower cost in the operation by increasing the profit margin.

In recent years, in the middle of the economic crisis of the years 2014-2015 the planet experienced with the collapse in oil prices, oilfield management companies selected a new investment strategy to meet the goals of production and maintain an acceptable profit margin, it is at this point, that despite obtaining greater efficiency with synchronous motors, it was not enough to achieve the proposed goals. The need to overcome the 20% efficiency offered by this type of engine, requires companies providing services to the development of a high efficiency multi-stage centrifugal pump that offers to exceed this limit reached up to 40% -50% savings, combining the efficiency of the synchronous motor with that of the high efficiency centrifugal pump.

For the development of the monograph, a technical-economic analysis of a Colombian producing field is proposed, where it is proposed to replace the current (conventional) submersible electric pumps with PMM technology with high efficiency pumps optimizing production costs. The combination of this technological revolution currently used in different producing fields of Colombia and in the world, has offered satisfactory results, generating a different vision to the concept of this type of artificial lifting system.

* Monograph

** Faculty of Physicochemical Engineering. Specialization in Hydrocarbon Production, Director: John Alexander León Pabón, Master in Hydrocarbon Engineering

INTRODUCCIÓN

En los diferentes campos petrolíferos, las operadoras se han inclinado por instalar sistemas de Bombeo Electro Sumergible como alternativa para la extracción de crudo. A pesar de ser un sistema eficaz, existen variables que ponen en desventaja este método, tales como: el costo de operación puede ser elevado por el alto consumo de energía que demanda la bomba, la inestabilidad de los precios del petróleo y el alto corte de agua en la producción, son algunas de las variables por mencionar.

La ubicación geográfica de estos campos, se encuentra en lugares remotos de difícil acceso a la red eléctrica, elemento primordial para mantener la operación en marcha continua, por esta razón es necesario el uso de plantas generadoras de energía eléctrica que en su mayoría funcionan con combustible Diesel, dicho lo anterior no se observa un panorama alentador, debido que el costo de la energía eléctrica y del combustible tienden al alza de precios a través del tiempo, desfavoreciendo el desarrollo de proyectos de exploración y producción, por los elevados costos de operación y la incertidumbre referente al precio de venta.

La siguiente monografía está orientada en comparar la eficiencia de los motores eléctricos del sistema de Bombeo Electro Sumergible (AM & PMM) y las bombas centrifugas de etapas convencionales vs de alta eficiencia, evidenciando la capacidad de ahorro energético que se obtiene, seleccionando este tipo de tecnología. De esta manera las empresas administradoras de campos productores, tienen el criterio de seleccionar un sistema BES que les permite ampliar el margen de ganancia, ahorrando dinero en sobrecostos de energía eléctrica (red eléctrica o combustible) y así mismo mantener el negocio en marcha.

Con los resultados obtenidos, se compara no solo la eficiencia de los motores PMM sino además se demuestra la importancia del desarrollo tecnológico de etapas de alta eficiencia, para obtener un sistema BES óptimo

1. OBJETIVO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar la eficiencia de los motores asíncronos y síncronos, de las bombas convencionales y de alta eficiencia de un sistema de bombeo electro sumergible.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir los componentes que conforman un sistema de bombeo electro sumergible BES.
2. Detallar las características técnicas de los motores asíncronos y síncronos del sistema de bombeo electro sumergible.
3. Describir las características técnicas de las bombas centrifugas multi-etapas convencionales y de alta eficiencia.
4. Evaluar la tasa de retorno de inversión de la implementación de tecnología de motores PMM y bombas de alta eficiencia aplicado en pozos productores de un campo de los Llanos Orientales.

2. SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL ELECTROSUMERGIBLE

Se define como sistema la unión de elementos que funcionan de forma ordenada. Cuando se refiere a levantamiento artificial, hace referencia al uso de elementos o componentes mecánicos que aumentan la energía de un fluido para ser movido de un punto a otro. En los campos de producción de hidrocarburos, es necesario el uso de un sistema de levantamiento artificial para incrementar la energía de una columna de fluido para que llegue hasta superficie, a una tasa planeada. Esta necesidad aparece debido a la pérdida de energía del reservorio, por lo tanto, el fluido no es capaz de alcanzar la superficie. Al llegar a este punto de producción, según las condiciones del pozo productor, se define que método de levantamiento artificial se instalara para adicionar energía necesaria y lograr las metas de producción. Existen diferentes métodos de levantamiento artificial, según la necesidad y las condiciones mecánicas –físicas- químicas del pozo se seleccionan el sistema a implementar.

La siguiente monografía se enfoca en el Sistema de Bombeo Electro Sumergible, comparando los tipos de motores (AM y PMM) y las bombas centrifugas (Convencionales y de alta eficiencia).

En la siguiente tabla, se caracterizan algunas de las variables de estudio de selección del sistema de levantamiento artificial correcto, de esta manera se puede evaluar de forma rápida los diferentes sistemas y así reducir las opciones a un mínimo que conlleva a una evaluación detallada, considerando aspectos económicos, técnicos, facilidades y disponibilidad.

Figura 1. Rango de aplicación de los sistemas levantamiento artificial más comunes

Parámetro	Bombeo Mecánico	Bombeo Electro Sumergible	Bombeo Hidráulico Tipo Jet	Bombeo Hidráulico Tipo Pistón	Bombeo de Cavidades Progresivas
Tasa de Flujo (STB/d)	5 a 5000	200 a 30000	50 a 4000	300 a 15000	5 a 5000
RGL (Scf/BBL)	Bajo a Moderado	Bajo	Moderado	Moderado	Moderado
Gravedad API °API	≥ 8°	> 10°	≥ 8°	≥ 8°	≤ 35°
Profundidad de Levantamiento (pies)	100 a 15000	1000 a 15000	3900 a 16000	4900 a 15000	2000 a 10000
Migración de Finos	Bajo a Moderado	Bajo	Bajo	Moderado	Alto
Perfil del Pozo	Verticales o con leve desviación	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Verticales o Ligera desviación
Temperatura (°F)	100 a 550	100 a 460	100 a 500	100 a 500	75 a 350

Fuente. Conference Paper Tempate. Selección del Sistema de levantamiento Artificial en el Campo Joma-Distrito Oriente Ecuatoriano

2.1 SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE (BES)

Existen diferentes sistemas de levantamiento artificial, pero no todos cumplen con las necesidades de las empresas. Uno de los sistemas que ha tomado fuerza alrededor del mundo es el bombeo electro sumergible. Su origen se remonta a finales del año 1910 por el Ruso Armais Arutunoff, después de varios avances tecnológicos logra instalar de forma satisfactoria la primer ESP en el año 1926 en el campo Dorando en Kansas.¹

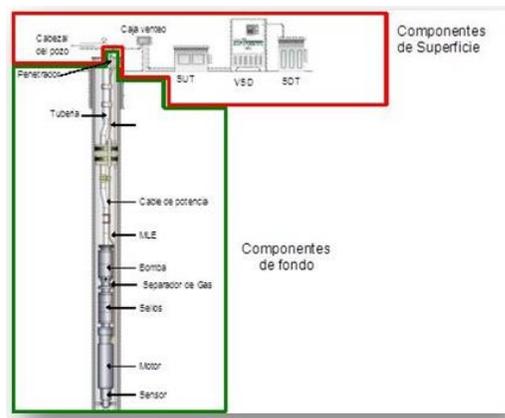
Con las ESP se obtiene múltiples ventajas en comparación con los demás ALS, una de las ventajas destacada son los altos volúmenes de producción que se puede obtener y se considera altamente eficiente para la extracción de crudos livianos y medianos. Se define como sistema, ya que está compuesto por la unión de

¹ OILPRODUCTION OIL & GAS CONSULTING. Análisis y revisión de las mejores prácticas y nuevas tecnologías en ESP, con el fin de optimizar la eficiencia del sistema de producción y los costos asociados. Buenos Aires, Argentina. 23 al 24 de Julio de 2014.

diferentes elementos que operan en función de levantar una columna de fluido hasta superficie, por medio de una tubería de producción. En general un sistema de bombeo electro sumergible, no es más que una forma de extracción de fluido de un pozo, que involucra unos componentes electro-mecánicos, que requiere de energía eléctrica para su funcionamiento, se divide en dos secciones - componentes de subsuelo o fondo y componentes de superficie. A continuación, se mencionan los componentes mínimos que conforman el equipo de subsuelo y el equipo de superficie:

2.1.1 Componentes de subsuelo o fondo. Los componentes de fondo para un BES, son todas las unidades que se encuentran instalados en el fondo del pozo, suspendidos por una tubería de producción que está fijamente sujeta a un colgador por debajo del árbol de válvulas. En caso de falla de alguno de los componentes, se requiere de una unidad de work over para la extracción y corrección de la falla. Los componentes típicos que se instalan en una aplicación simple con una BES son los siguientes:

Figura 2. Componentes de un sistema BES.



Fuente. DEL PINO CASTRILLÓN, Jessica Julieth Estudio Integral De Factibilidad De La Migración De Motores Convencionales A Motores De Imanes Permanentes Para Equipos Electro Sumergibles De Levantamiento Artificial. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Gerencia de Hidrocarburos. Bucaramanga. 2015

2.1.1.1 Colgador: Este dispositivo se coloca en un nido sobre el árbol de válvulas. Su función es sostener la tubería de producción, permitir su paso y el de los tres conductores del cable, proporcionando el sello necesario en el espacio anular entre tubería de producción y de revestimiento para evitar fuga de fluidos a la superficie².

2.1.1.2 Tubería De Producción: Es un tubular de pozo utilizado para conducir los fluidos del yacimiento a superficie. Se acopla de forma continua tubo a tubo enroscados entre si hasta posicionar la bomba a la profundidad requerida, este conjunto de tubos forma lo que se conoce como sarta de producción. La sarta de producción seleccionada debe ser compatible con la geometría del pozo, las características de producción y las propiedades de los fluidos del yacimiento³.

2.1.1.3 Bombas Centrifugas: La bomba es una máquina que transforma la energía mecánica en energía hidráulica y la energía mecánica es transmitida desde un motor eléctrico. Las bombas que se diseñan en los BES, son bombas centrifugas multi-etapas y cada etapa consiste en un impulsor giratorio y un difusor estático. Las bombas centrifugas aplican el concepto de energía cinética y energía potencial. El fluido en su estado natural se encuentra en reposo, en el instante que la bomba se pone en marcha, el fluido cambia de estado estático a dinámico debido al movimiento rotacional del impulsor, este cambio de estado se conoce como energía cinética. Una vez el fluido cambia de estado, el fluido se comprime con el difusor cambiando de posición (altura), esta alteración se conoce como energía potencial.

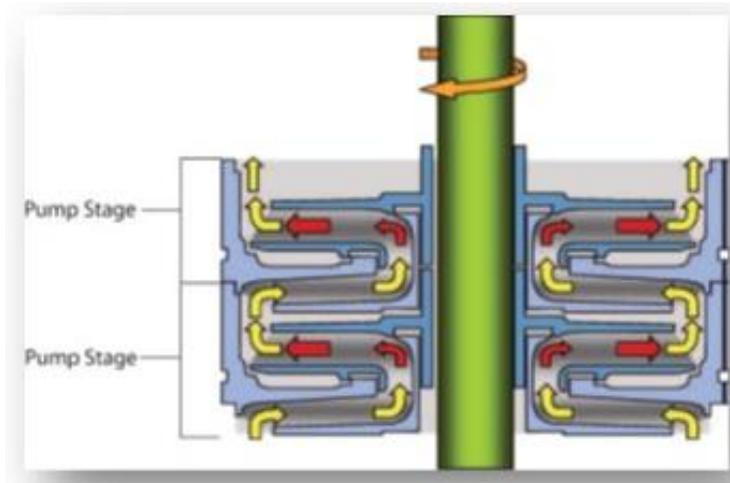
Una etapa proporciona cierta altura dinámica, por lo tanto se requiere de múltiples etapas para alcanzar la altura requerida en cada pozo⁴, ver Figura 3.

² DEL PINO CASTRILLÓN, Jessica Julieth Estudio Integral De Factibilidad De La Migración De Motores Convencionales A Motores De Imanes Permanentes Para Equipos Electro Sumergibles De Levantamiento Artificial. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Gerencia de Hidrocarburos. Bucaramanga. 2015

³ Ibid

⁴ Ibid.

Figura 3. Ilustración de una etapa centrífuga en movimiento



Fuente: BAKER HUGES CENTRILIFT. Submersible Pump Handbook. Baker Hughes Eighth Edition.

Existen diferentes tipos de etapas según su geometría y del pasaje del fluido a través del impulsor, las diferentes compañías dedicadas a la fabricación y comercialización de BES, enfocan sus esfuerzos tecnológicos en los siguientes tipos⁵:

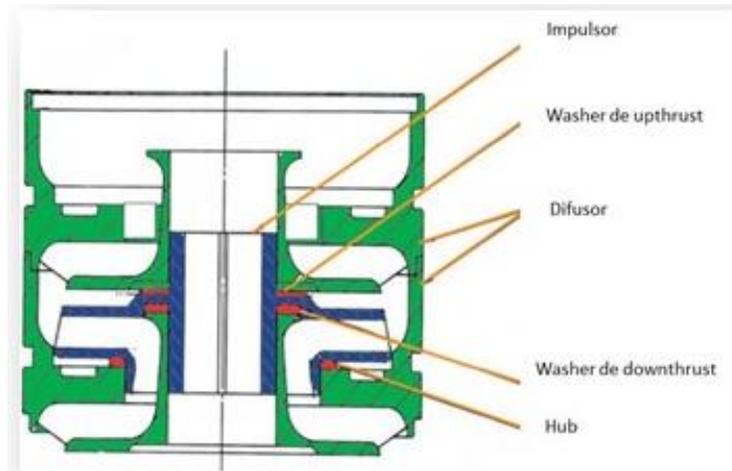
- Etapa Radial: se caracteriza por que el fluido se mueve a través del impulsor de forma radial o perpendicular al eje. Las bombas de bajo caudal usualmente se diseñan con este tipo de etapa⁶, ver figura 4.
- Etapa de Flujo Mixto: a diferencia de las etapas radiales, el fluido se mueve en ambas direcciones (axial y radial), de forma paralela al eje. Este tipo de etapa usualmente se usa para la fabricación de bombas de alto caudal⁷, ver Figura 5.

⁵ *Ibíd.*

⁶ *Ibíd.*

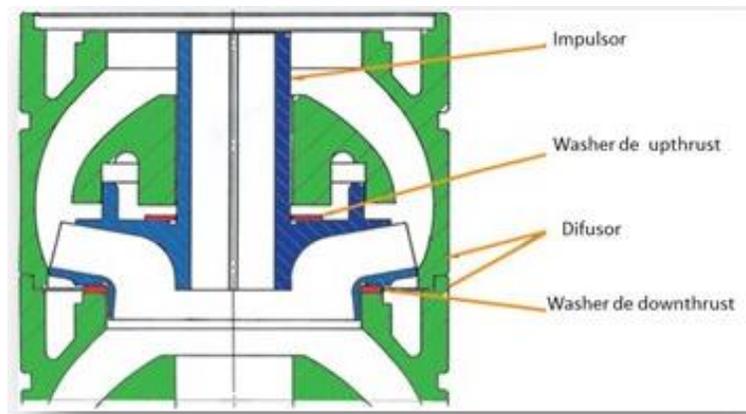
⁷ *Ibid.*

Figura 4. Etapa de flujo radial.



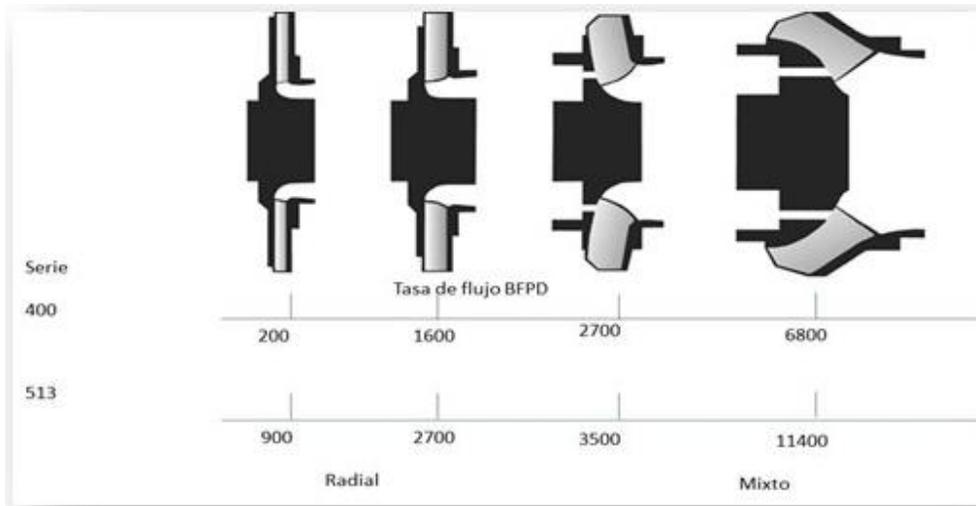
Fuente: BAKER HUGHES CENTRILIFT. Submersible Pump Handbook. Baker Hughes. Ninth Edition. 2009.

Figura 5. Etapa de flujo Mixto



Fuente: BAKER HUGHES CENTRILIFT. Submersible Pump Handbook. Baker Hughes. Ninth Edition. 2009.

Figura 6. Relación de etapas respecto al flujo, según catálogo de Baker Hughes.



Fuente: BAKER HUGHES CENTRILIFT. Submersible Pump Handbook. Baker Hughes. Ninth Edition. 2009

Las etapas pueden ser de fabricación sencilla **centrifuga** o **centrifuga vortex**. Este segundo tipo de etapa vortex ofrece mayor manejo de gas libre en la bomba, por su geometría permite mejorar el rendimiento de la bomba por bloqueos de gas⁸, ver Figura 7

⁸ NOVOMET. Power Saving in ESP Production. Evgen Poshvin. Documentos en línea. Disponible en <http://www.novomet.ru/eng/products/smart-solutions/powersave-esp-systems>

Figura 7. Tipos de Etapas Centrifugas.



Fuente: Novomet Group.

Clasificación de las bombas según el diseño de ensamblaje: bomba flotante, bomba compresora y bombas semi-compresora.

5. Bomba Flotante o Flotadora: este diseño de bomba, se caracteriza por que los impulsores se mueven axialmente libres en el eje entre los difusores. Se estabilizan radialmente y no genera carga axial sobre el protector⁹.

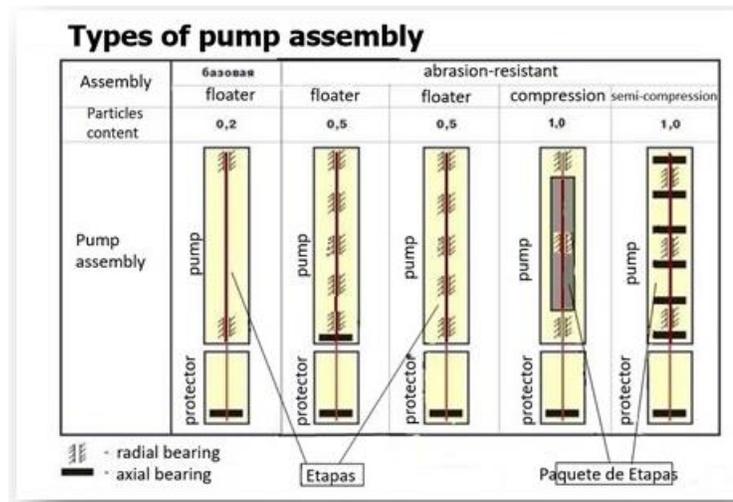
6. Bomba Compresora: a diferencia de la bomba flotadora, el impulsor esta fijamente sujeto al eje, por lo tanto, al desplazar una etapa se mueve todo el conjunto al mismo tiempo. Este diseño de bomba genera carga axial sobre el protector, por lo tanto es necesario realizar un procedimiento de *Shimming* para asegurar que la bomba opere en el punto óptimo y mitigar el desgaste prematuro de los impulsores¹⁰.

⁹ *Ibíd.*

¹⁰ *Ibíd.*

7. Bomba Semi-Compresora: consiste en un conjunto de etapas flotantes que se agrupan por paquetes y de esta manera se estabilizan axial y radialmente. De esta manera se obtiene un mayor manejo de solidos durante la operación. La fuerza axial generada no es transferida al protector¹¹.

Figura 8. Clasificación de las bombas según el diseño de ensamblaje.



Fuente: Novomet Group. 2018

2.1.1.4 Admisión o Intake. Este componente se define como el único punto de entrada de los fluidos del pozo a la bomba para que lleguen a superficie. Existen diferentes tipos de intakes según la aplicación condicionada a las propiedades del pozo referente a la cantidad de gas libre que se produce o de solidos suspendidos¹².

Estos son los diferentes tipos de intakes en función según la aplicación:

¹¹ Ibid.

¹² Ibid.

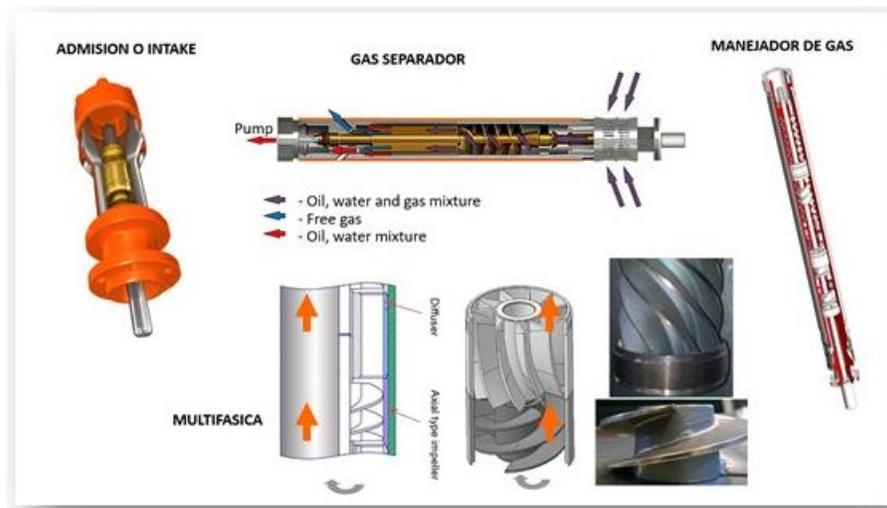
Tabla 1. Tipos de Admisión o Intakes

TIPOS INTAKES	CARACTERÍSTICAS Y CAMPO DE APLICACIÓN
ESTÁNDAR	<p>Permite el ingreso de fluido del pozo a la bomba.</p> <p>No presenta mayor complejidad en el diseño.</p> <p>Se usa en pozos con baja GLR.</p> <p>Se recomienda para pozos que no presentan gas libre, con presión de burbuja menor a la presión de pozo fluyente.</p> <p>A pozos con alto corte de agua y bajo en aceite</p> <p>Según fabricante se recomienda usar cuando se tiene hasta 25% libre de gas con etapas centrifugas y 35% con etapas vortex.</p>
GAS SEPARADOR	<p>Además de permitir el ingreso de fluido del pozo, de manera dinámica separa el fluido del gas a través de la geometría del diseño.</p> <p>El diseño presenta mayor complejidad comparado con el estándar, ya que separa el fluido del gas y mejorar el rendimiento de la bomba con menor cantidad de gas libre que ingresa.</p> <p>El gas que se separa del fluido, se libera al anular del casing.</p> <p>Según el fabricante, ofrece hasta un máximo de gas libre contenido en el intake de la bomba de 80%.</p>
MULTIFASICA	<p>A demás de ser intake se conoce como bomba multifasica, ya que tiene la función de comprimir el gas libre que ingresa en burbujas de menor tamaño y generar una mezcla homogénea con el fluido.</p> <p>A diferencia del gas separador, la multifasica convierte en una mezcla homogénea el fluido con el gas, mitigando el bloqueo de la bomba en vacío.</p> <p>Al obtener una mezcla homogénea, el gas viaja comprimido con el fluido a través de la tubería de producción y se le libera en superficie.</p>

TIPOS INTAKES	CARACTERÍSTICAS Y CAMPO DE APLICACIÓN
	Según el fabricante ofrece hasta un máximo de gas libre contenido en el intake de la bomba de 65%.
FILTRO RANURADO	<p>Las bombas centrífugas no están diseñadas para el manejo de sólidos, según su metalúrgica se obtiene cierta tolerancia a la abrasión aumentado la vida útil del componente.</p> <p>El intake de filtro ranurado, es un componente que se utiliza para proteger la bomba de sólidos. Funciona como un colador, es un tubo cubierto por una malla de poros finos que permiten filtrar sólidos e impedir el paso a la bomba.</p>

Fuente. Catálogo de Novomet Group.

Figura 9. Tipos de Admisión para manejo de Gas.



Fuente. Catalogo Novomet Group.

Figura 10. Tipo de Admisión para manejo control de sólidos.



Fuente. Catalogo Novomet Group.

2.1.1.5 Protector o Sello. Este componente es de gran importancia, ya que la vida útil del motor eléctrico depende de él. En esencia, como su nombre lo dice es un protector del motor que su funcionalidad se define en lo siguiente¹³.

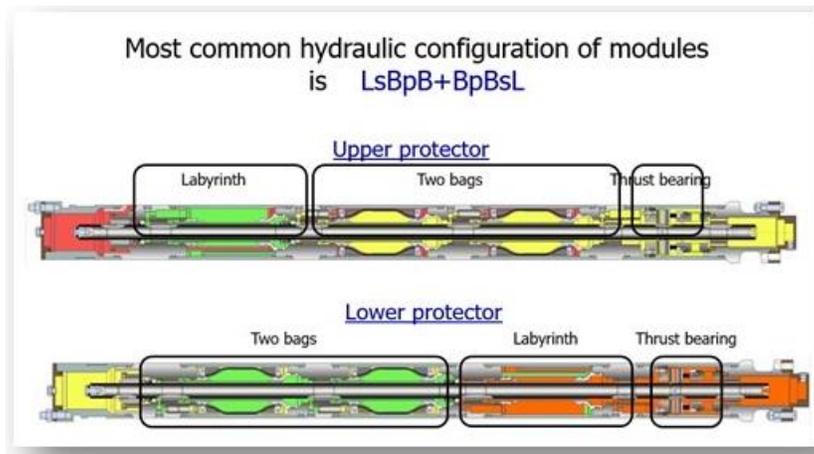
- Transferir el torque del motor a la bomba.
- Prevenir el ingreso del fluido del pozo al motor.
- Ecuilizar presiones entre el pozo y el motor mediante la expansión de aceite por cambios térmicos.
- Ayuda con la refrigeración del motor.

Los protectores en las ESP, normalmente son modulares el cual significa que se componen de módulos independiente que pueden ser laberintos o bolsas. Estos módulos contienen un volumen de aceite dieléctrico con las mismas

¹³ DÍAZ CÉSPEDES, Leonardo Alberto. Análisis Comparativo Del Consumo Energético Y Económico Con La Implementación De Motores De Inducción Vs Motores PMM en los sistemas BES. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Producción de Hidrocarburos. Bucaramanga. 2016.

especificaciones técnicas del aceite del motor, los módulos se encuentran separados por sellos mecánicos entre sí, de esta manera se retarda la entrada de fluido del pozo al motor mitigando danos eléctricos. Los protectores según el fabricante, comúnmente se encuentran en cuerpos sencillos de tres módulos que según las condiciones de operación se exige acoplar dos cuerpos con un resultado de 6 módulos. Este tipo de uniones se conoce como protectores en tándem¹⁴, ver figura 8.

Figura 11. Configuraciones Comunes en Protectores Modulares



Fuente. Catalogo Novomet Group. 2018

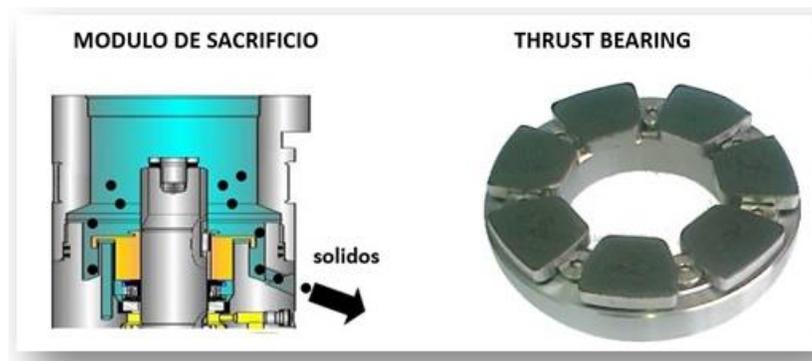
La cámara o modulo superior, justo el que se acopla con el intake, se conoce como **cámara de sacrificio**, ya que es el primer módulo que se contamina con fluido de formación en el mismo instante que se baja el equipo a fondo. La función de este módulo es recibir los sólidos y fluido de formación que se filtran desde el intake, una vez se pone la bomba en marcha, el aceite aumenta de temperatura expandiendo su volumen y equaliza presión liberando exceso de aceite por medio de este módulo.¹⁵

¹⁴ DEL PINO CASTRILLÓN, Óp. Cit.

¹⁵ NOVOMET. Catalogue Product. ESP Fundamentals. 2018

Otro de los componentes de importancia en los protectores son las **Thrust Bearing**, este elemento soporta la carga axial que se genera en todo el sistema y evita que se transfiera al motor evitando daños mecánicos. Está ubicado en la parte inferior del protector, fabricado de un material especial para soportar carga axial pero no tolera fricción de ningún tipo⁶.

Figura 12. Módulo de Sacrificio & Thrust Bearing



Fuente. Catalogo Novomet Group. 2018

2.1.1.6 Motor Electro sumergible. Se conoce como motor eléctrico una maquina capaz de transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Llevando este concepto al bombeo electro sumergible, se refiere a un motor eléctrico con la capacidad de operar sumergido en el fluido del pozo, a condiciones físico-química adversas (altas presiones, alta temperatura, fluido corrosivo y gran profundidad). La energía mecánica generada por el motor se transfiere a las bombas para mover el fluido hasta superficie.

Otra de las ventajas que ofrece estos motores electro sumergibles, es la capacidad de operar a múltiples frecuencias en función de obtener el caudal propuesto por el operador.

En los inicios de este sistema de levantamiento, era posible operar con un solo tipo de motor, basados en el principio de funcionamiento de motores trifásicos asíncronos o de inducción. Este tipo de motor, a pesar de funcionar correctamente, se evidencia un consumo energético excesivo que desfavorece este sistema de levantamiento, sobrecalentamiento del motor eléctrico que se traduce en menos vida útil. Se han desarrollado soluciones técnicas que pueden aumentar la eficiencia de los motores de inducción hasta en un 95%. Sin embargo, estas soluciones técnicas no pueden implementarse en motores asíncronos sumergibles debido a la relación no estándar de sus diámetros y longitudes. Se hizo evidente que las posibilidades de aumentar aún más la eficiencia de los motores eléctricos asíncronos sumergibles están prácticamente agotadas¹⁶.

Para los accionamientos de las instalaciones sumergibles centrífugas, se necesitaba un motor nuevo y más eficiente energéticamente, que tuviera una combinación de características que permitiera la implementación de un régimen tecnológico óptimo para seleccionar productos de pozos con un consumo mínimo de energía y un recurso máximo¹⁷.

El desarrollo de convertidores de energía electromecánicos inteligentes, que simultáneamente llevan a cabo la conversión de energía y el control del accionamiento, indican un salto cualitativo en la dirección de la creación de accionamientos altamente eficientes para diversas máquinas y equipos. Estos dispositivos son, por un lado, una máquina eléctrica y, por otro, un sistema integrado de accionamiento eléctrico controlado. La creación e introducción generalizada de tales motores se hizo posible con el advenimiento de imanes permanentes altamente coercitivos a partir de aleaciones de metales de tierras raras con energías específicas relativamente altas en el mercado. Sobre la base de tales imanes, la

¹⁶ LUKEOIL EPU, Historia De La Creación De Un Accionamiento De Válvula Para La Producción De Petróleo. Disponible en <http://lukoil-epu.ru/BLDC/history>

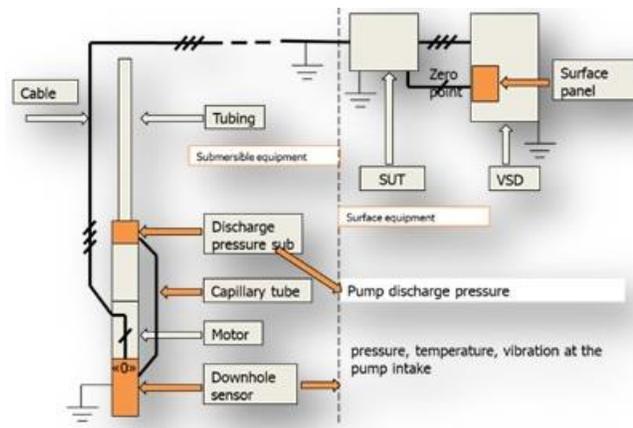
¹⁷ *Ibíd.*

producción de motores eléctricos comenzó a desarrollarse intensamente en la década de 1970, que se denominan motores sincrónicos de imanes permanentes¹⁸.

Hoy día en el mercado, es posible encontrar 2 tipos de motores electros sumergibles, motores Asincrónicos o inducción (AM) y motores Sincrónicos o de imán permanente (PMM). Estos tipos de motores presentan una arquitectura diferente que ofrece ventajas tecnológicas.

2.1.1.7 Sensores. Permite obtener un mejor control y análisis del rendimiento absoluto del pozo, del reservorio y del equipo de fondo ya que se puede obtener datos precisos del mismo a través de la transmisión de datos en tiempo real, mediante una señal eléctrica que es enviada por el cable del motor a superficie, donde se visualizan datos de fondo como: presión de entrada a la bomba, presión de descarga, temperatura de fondo, temperatura de motor y vibración axial & radial del equipo. Estas son algunas variables de monitoreo y control que se obtiene por medio del sensor de fondo. ¹⁹

Figura 13. Estructura de funcionamiento de un Sensor de Fondo



Fuente. Catalogo Novomet Group. 2018

¹⁸ Ibíd.

¹⁹ NOVOMET. Catalogue Product. ESP Fundamentals. 2018

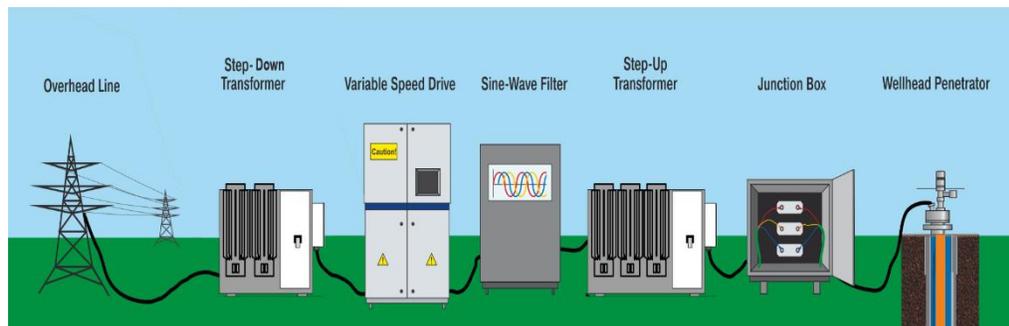
Figura 14. Sistema de Monitoreo de Fondo.



Fuente. Catalogo Novomet Group. 2018

2.1.2 Componentes de Superficie. Los componentes de superficie para una BES, son todas las unidades que se encuentran instalados en el suelo. Son elementos normalmente eléctricos, operan en función de mantener el control del motor y proporcionar la energía eléctrica demandada por la bomba. Se caracteriza por ser de fácil acceso, fácil mantenimiento, en caso de falla es posible reemplazar o reparar. A continuación, se mencionan los equipos mínimos de superficie utilizados para una aplicación con una BES simple:

Figura 12. Equipos de Superficie



Fuente. Catalogo Novomet Group.

2.1.2.1 Fuente Eléctrica. Para el funcionamiento de una BES es de vital importancia mantener una fuente eléctrica estable. Según la ubicación geográfica del campo productor, es posible obtener esta fuente de alimentación por medio de la red eléctrica nacional, el cual se realizan adecuaciones de facilidades para trabajar con los niveles eléctricos requeridos. El costo eléctrico varía dependiendo de la modalidad de compra que se acuerde entre la operadora y la empresa que suministra la electricidad ya sea por KVA consumido o por mensualidad fija pactada.

La mayoría de campos productores de crudo, se encuentran ubicados geográficamente en sitios remotos donde no es posible obtener red eléctrica por falta de infraestructura, por lo tanto, para mantener la operación en marcha, requiere de una fuente alterna que se remonta al uso de generadores eléctricos. Los generadores eléctricos, son motores mecánicos que operan con combustible (diésel, gas, petróleo), que convierten la energía mecánica en energía eléctrica. Por requerir combustible para su funcionamiento, el costo de la operación puede llegar a ser poco rentable si la demanda de combustible es elevada. En los casos donde el campo productor proporciona suficiente gas, este recurso natural es dispensable, ya que es usado como combustible para el funcionamiento de los generadores, de esta manera las empresas administradoras de campos productores, aumentan los márgenes de ganancia reutilizando los recursos suministrados por el mismo campo. Para el caso que se requiera comprar el combustible, que son la mayoría de los campos, es de gran importancia mantener una operación económicamente rentable, por lo tanto, el consumo energético de la bomba electro sumergible, suma un papel importante en el momento de su selección, como sistema de levantamiento para un campo o pozo en particular.

2.1.2.2 Variador de Velocidad: Es un dispositivo compuesto por elementos eléctricos y electrónicos, que permite controlar la velocidad giratoria principalmente de un motor. El cambio de velocidad (RPM) de un motor es posible, sencillamente con un cambio de frecuencia que se ajusta desde el VSD, estos cambios de

velocidad, permiten modificar la tasa de producción en superficie obteniendo el volumen de fluido esperado.

Los VSD cumplen una función importante, ya que el funcionamiento y la vida útil del motor dependen en gran parte de este componente. Los motores tipo AM, no requieren de gran complejidad para su funcionamiento y control comparado con los PMM, por lo tanto, los VSD que se aprovisionan para estas aplicaciones, son comunes y de fácil selección. En el caso del PMM, son de mayor complejidad, por lo tanto en el momento de seleccionar un VSD para esta aplicación, es necesario contar con la aceptación del proveedor del motor si el VSD cuenta con la aprobación para realizar el control adecuado al motor²⁰.

2.1.2.3 Transformador Elevador (SUT)²¹. Los transformadores elevadores, son componentes eléctricos que permiten elevar la tensión de un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia requerida.

2.1.2.4 Caja De Venteo²². La caja de venteo, es un mecanismo que une los componentes de subsuelo y los componentes de superficie. Es una caja metálica con conectores eléctricos que tiene como fin liberar el gas que se filtre entre el cable de fondo y no llegue hasta el transformador SUT evitando accidentes.

2.1.2.4 Conector de Superficie²³. El conector de superficie o penetrador se ubica en la base del árbol de válvulas, se utiliza para conectar el cable de fondo con superficie, tiene una conexión especial que permite soportar altas presiones y evitar el paso de fluido del pozo a superficie.

²⁰ BAKER HUGHES. Guía Bombeo Electro Sumergible

²¹ TAKACS G. Electrical Submersible Pumps Manual Desing. Operations, and Maintenance, USA: 2009. Motor asíncrono trifásico

²² Ibid.

²³ NOVOMET. Catalogue Product. ESP Fundamentals

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES AM Y PMM PARA DE UN SISTEMA ELECTRO SUMERGIBLE

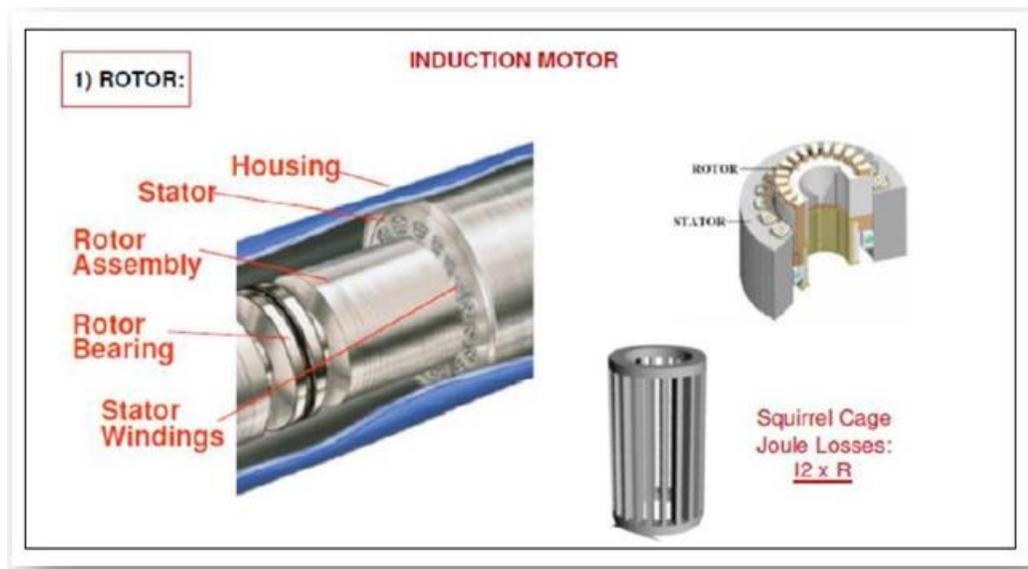
Como se ha mencionado con anterioridad, un sistema electro sumergible requiere de un motor eléctrico para su funcionamiento. En la actualidad se conocen dos tipos de motores **Asíncronos (AM)** y **Síncronos (PMM)** con características propias que se definen por su arquitectura, control, ventajas y desventajas. Al inicio de la implementación de este sistema de levantamiento artificial, se conocía los motores asíncronos, siendo este tipo el único motor conocido para el uso de esta aplicación. A pesar de ser un elemento robusto, fácil de operar, una arquitectura básica y de bajo costo, genera inconformismo debido al alto consumo energético y baja eficiencia que representa este tipo de tecnología. Se han desarrollado soluciones técnicas que pueden aumentar la eficiencia de los motores de inducción hasta en un 95%. Sin embargo, estas soluciones técnicas no pueden implementarse en motores asíncronos sumergibles debido a la relación no estándar de sus diámetros y longitudes. Se hizo evidente que las posibilidades de aumentar aún más la eficiencia de los motores eléctricos asíncronos sumergibles están prácticamente agotadas. Con el desarrolló del motor sincrónico, que posee una arquitectura propia ofrece disminuir el consumo energético, aumentar la eficiencia, ampliar la vida útil del equipo de esta manera logra optimizar las deficiencias que el motor AM representa.

3.1 MOTORES ASÍNCRONOS O DE INDUCCIÓN (AM)⁵

Los motores de inducción están formados por un estator y un rotor, el estator está construido por un núcleo en cuyo interior existen 3 pares de arrollamientos o devandos colocados simétricamente en un ángulo de 120° . El campo inductor está

generado por corriente eléctrica alterna. Generalmente, el inductor está en el estator y el inducido en el rotor. La interacción entre el campo magnético del estator y la corriente del inducido en el rotor produce la fuerza que hace mover el rotor. Los motores de inducción o jaula de ardilla en los sistemas electro sumergible, presentan una configuración en la que al momento de alimentarse con corriente alterna generan un campo magnético en el estator que actúa sobre el rotor creando una corriente secundaria que causa un segundo campo magnético que interactúa con el primario, dando lugar al torque y giro del eje del motor. Esta corriente del rotor, genera calor (perdidas de Joule $I^2 \times R$) y es causa de pérdida de eficiencia.

Figura 16. Ilustración de Un Motor de Inducción



Fuente: Borets International. Experiencia de aplicaciones y operaciones de motores de magneto permanente en sistemas electro sumergible.

Por lo general los motores de inducciones en aplicaciones para ESP, son de gran diámetro externo y longitud, por lo tanto, exige el completamiento de pozos con revestimientos de gran tamaño y así garantizar la corrida del equipo. De igual

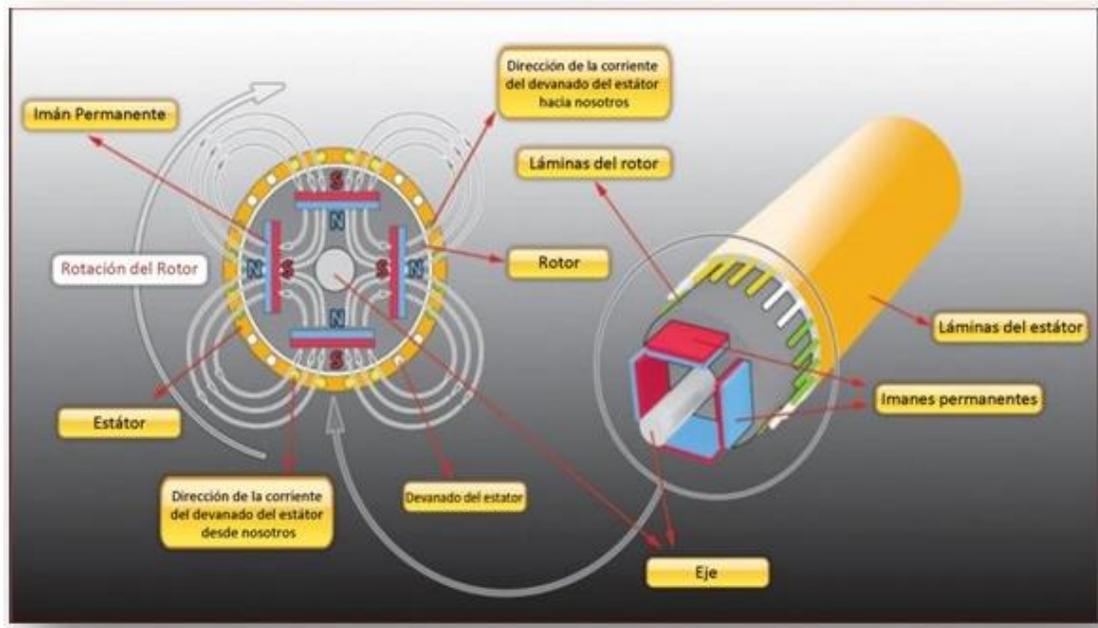
manera esto genera una limitante para los pozos que ya han sido completados con sistema de levantamiento mecánico que requieren de menor diámetro.

3.2 MOTORES SINCRÓNICOS O PERMANENT MAGNET MOTOR (PMM)

Los motores de imanes permanentes (PMM) se emplean en las instalaciones de bombas electro sumergible de la misma manera que son utilizados los motores asíncronos. Estos motores se fabrican a base de paquetes del rotor con imanes permanentes de material aglomerado magnéticos duros. Los imanes generan el campo magnético en el rotor del motor de imanes permanentes, lo cual lo diferencia del funcionamiento de los motores a inducción, tipo jaula de ardilla. Para el funcionamiento de bombas electros centrífugas, el motor de imanes permanentes se equipa con los paquetes del rotor de alta velocidad, y según su configuración, es posible lograr rangos de velocidad entre 500 - 6000 rpm²⁴.

²⁴ BORETS INTERNATIONAL. Submersible Pump Units Utilizing Permanent Magnet Motors. 2014

Figura 17. Principio de Operación del PMM



Fuente: Experiencia de Campo con la Aplicación y Operación de los Motores de Imanes Permanentes (PMM) en la Industria de las Bombas Eléctricas Sumergibles (ESP)

En los PMM, los rotores se fabrican con imanes en lugar de laminaciones con barras del rotor como en los motores de inducción convencionales, lo cual hace que no tengamos que inducir el campo al rotor, ya que por ser un imán el campo magnético lo posee, lo cual disminuye la energía requerida para su funcionamiento, también los motores permiten que las corrientes consumidas en el arranque sean menores logrando arranques suaves (sin picos de corriente).

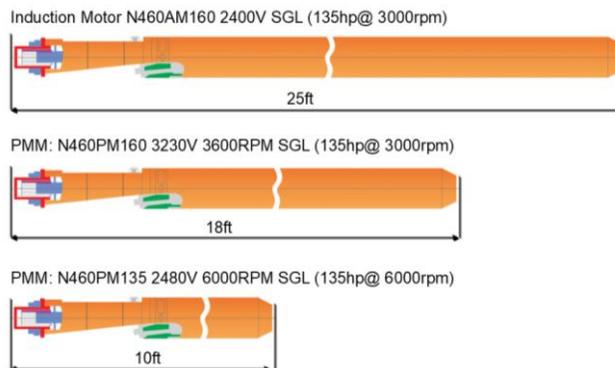
3.2.1 Beneficios del Motor de Magneto Permanente²⁵.

1. Los imanes suministran el flujo magnético a los rotores, lo cual se traduce en reducción en el suministro de potencia requerida.

²⁵ NOVOMET. Op. Cit.

2. Funcionamiento síncrono (es decir su velocidad de rotación depende exclusivamente de la frecuencia de la corriente que recibe).
3. El deslizamiento en el flujo entre rotor y estator es cercano a cero. El flujo del rotor y el estator se mantiene en un ángulo de 90°.
4. Aumento de la potencia específica debido a mayores HP para las mismas dimensiones, ver figura 15.
5. Amplio rango de operación, alta eficiencia, habilidad para arranque suave, fácil control de las características de operación y menor calentamiento del motor.
6. Novomet produce motores de imán permanente en rango muy amplio, 2,72 a 7,44 pulgadas: Series 319, 406, 460, 512, 744. Con potencias desde 10 a 1290 HP.

Figura 18. Motor PMM vs AM



Fuente. Catalogo Novomet Group.

3.2.2 Ventajas del motor PMM con respecto al motor AM²⁶

1. Reducción de la corriente de operación hasta en un 15%.
2. De 10% a 20% de incremento de eficiencia a potencia nominal.

²⁶ BORETS INTERNATIONAL. Op. Cit.

3. Factor de potencia más alto en 14%.
4. De 10% a 20% menos en el consumo de potencia.
5. Reducción en las pérdidas eléctricas.
6. Reducción en el calentamiento del motor.
7. Reducción en las longitudes de los motores hasta un 40% y menos peso.

3.2.3 Comparación entre un motor de imanes permanentes y motor asíncrono²⁷.

Existen múltiples diferencias entre estos motores, en la siguiente tabla se compara un motor AM y PMM:

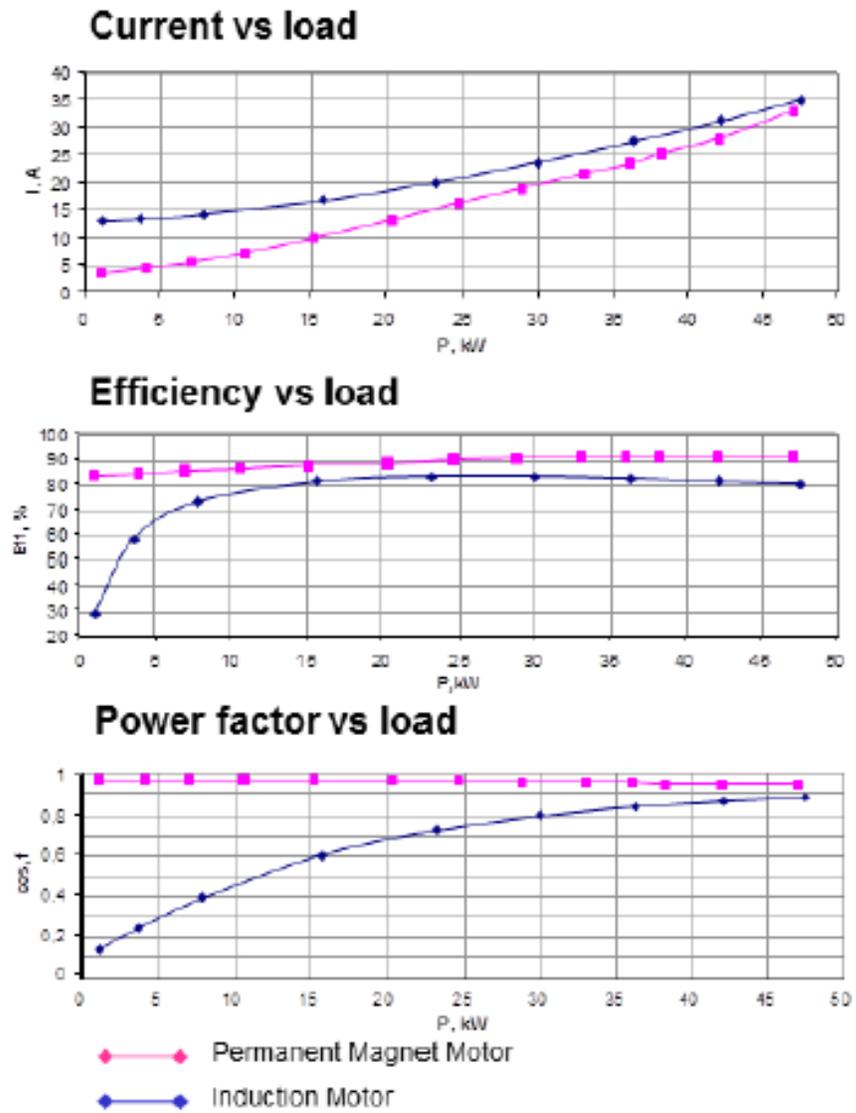
Tabla 2. Comparación de un motor AM y PMM

MOTOR	POWER HP	VOLT V	CURRENT A	RPM	EFF %	PF	LONG ft	PESO, Kg
N117AM180	180	2000	40	2910	84	0,859	24,9	545
N117PM180 -3 (PMM)	180	220	36	3000	90,8	0,95	18	429
N117PM180 -6 (PMM)	180	2400	37	6000	91,7	0,95	9,9	221

Fuente: BORETS INTERNATIONAL. Oil Production Using the Cyclic Well Operation Technology

²⁷ BORETS INTERNATIONAL. Oil Production Using the Cyclic Well Operation Technology

Figura 19. Ventajas PMM vs AM¹⁰



Fuente. Catálogo Novomet Group. BORETS INTERNATIONAL. Oil Production Using the Cyclic Well Operation Technology

4. CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS CONVENCIONALES Y DE ALTA EFICIENCIA.

Como se ha mencionado con anterioridad durante el desarrollo de esta monografía, el sistema de levantamiento artificial con bomba electro sumergible, presenta grandes ventajas, pero así mismo la eficiencia del sistema es cuestionable. La implementación de PMM ha optimizado la eficiencia del sistema, con resultados favorables para la operación, pero además es necesario mencionar que la inversión inicial es mayor comparado con los AM, de esta manera si se proyecta en el tiempo es posible que algunas operadoras no vean reflejado un diferenciador económico que incline para uso de esta nueva tecnología PMM. El foco en aumentar la eficiencia del sistema, se centró en las bombas centrifugas. Desde el inicio de la implementación de los BES, la eficiencia que ofrece en promedio los diferentes diseñadores y fabricantes de estos componentes es del 55% en el mejor escenario según catálogo, cada compañía fabrica las etapas con diferentes metales y bajo la técnica de fundición. Este método de fabricación (fundición) es de los más antiguos empleados para dar forma a un metal. Las etapas por fundición no se recomiendan para usar a alta velocidad y ofrece baja eficiencia, dentro de esta perspectiva y en busca de optimizar el sistema, las investigaciones apuntaron al desarrollo de una bomba centrifuga que se conoce como Power Save.

Esta etapa emplea un método diferente de fabricación con metales únicos que ofrecen mayor eficiencia. Como resultado se tiene disponible en el mercado dos tipos de bombas centrifugas una bomba convencional y otra bomba Power Save o alta eficiencia.²⁸

²⁸ NOVOMET. Power Saving in ESP Production. Evgen Poshvin. Documentos en línea. Disponible en <http://www.novomet.ru/eng/products/smart-solutions/powersave-esp-systems>

4.1 BOMBAS CONVENCIONAL

Las bombas convencionales son de las más comunes y de las más usadas por todas las compañías. Se construye a partir de la unión de un conjunto de etapas centrífugas (impulsor y difusor) que son moldeadas bajo el método de fundición y así obtener la etapa al diámetro requerido.

Las bombas centrífugas han existido desde mucho antes que su aparición como sistema de levantamiento artificial. Las bombas ESP originales, al igual que las actuales, consta de varias etapas con difusores estacionarios e impulsores rotativos fijados al eje de la bomba. El diseño geométrico de la etapa suele ser más una obra de arte que una ciencia, que involucra múltiples iteraciones hasta obtener la forma con la máxima eficiencia energética. Esta situación ha cambiado completamente desde la introducción de CFD (Computational Fluid Dynamics) permitiendo el diseño y análisis de comportamiento de la etapa con diferente geometría a partir de simulaciones en computador. Este novedoso método de diseño permite un completo control sobre los procesos hidráulicos que ocurren dentro de las etapas de bombeo y ayuda a los diseñadores a construir etapas para diferentes requisitos: mejor punto de eficiencia, máximo desarrollo de levante, etc. El proceso de manufactura convencional asociado con los materiales tradicionales que se acaba de mencionar es la fundición moldeada en arena donde se funde el metal y se moldea en moldes de arena. Los moldes de arena son baratos y resistentes al calor, pueden proporcionar suavidad superficial necesaria pero la complejidad de la geometría es limitada. Otra desventaja es que no todos los metales se prestan a este proceso; de todos modos, la mayoría de las etapas de bombeo todavía se fabrican mediante fundición en arena hoy en día.

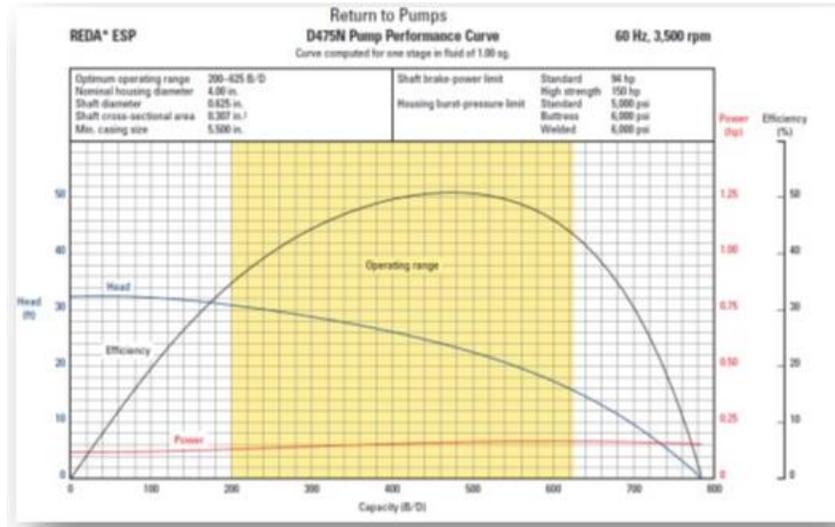
La producción de arena u otros materiales sólidos abrasivos acompañado con el fluido de pozo, acorta severamente la vida útil del equipo ESP normal, el componente más afectado es la bomba centrífuga. Una forma de mejorar la vida útil de la bomba, es el uso de materiales con mayor resistencia que la arena. El uso de carburo de tungsteno o cerámica (Zirconia) en rodamientos radiales y axiales, así como arandelas de empuje aumenta severamente la vida útil de las bombas ESP en pozos que producen grandes cantidades de abrasivos²⁹.

Dentro de este orden de ideas, se conoce que la bomba convencional no emplea un método diferente al de fundición de metales, en otras palabras, se puede afirmar que el resultado no tiene cambios significativos que impacten severamente el resultado final de esta técnica en general. Debe señalarse, la importancia que ocupa la geometría de cada etapa, para así entender cómo obtener mejor eficiencia en el sistema. Si bien es cierto, que es de las más utilizadas por todas las compañías, existen limitantes para el desarrollo de etapas de diámetros ligeramente pequeños, impidiendo el desarrollo de equipos Slim para aplicaciones de pozos con revestimientos de menor diámetro.

A continuación, se muestra la curva característica de una bomba convencional para cierto caudal de diferentes proveedores:

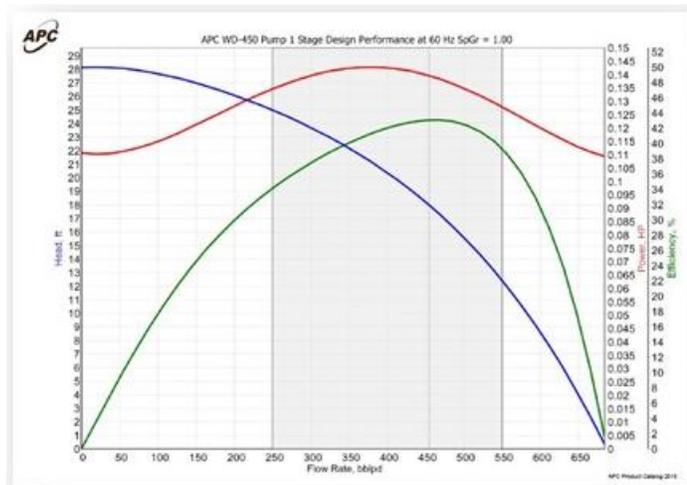
²⁹ TAKACS G. Three inventions shaping the future of ESP technology. University of Miskolc, Hungary. 2019

Figura 20. Curva Característica bomba D470N



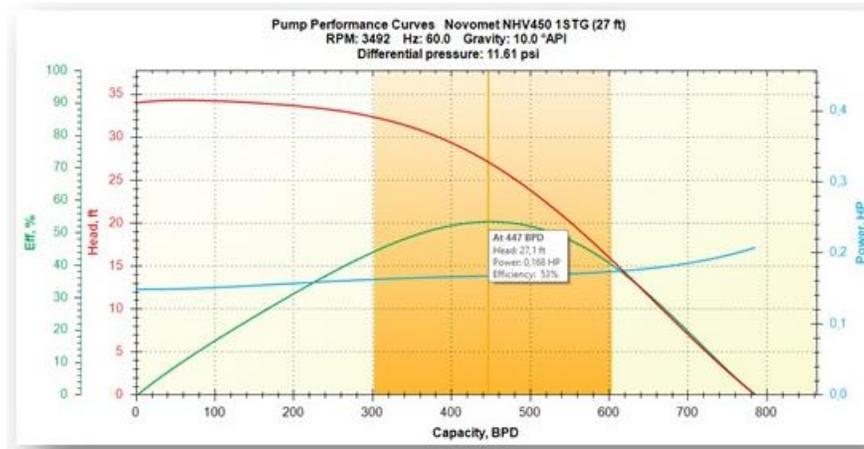
Fuente. REDA Electric Submersible Pump Technology ESP Catalog.

Figura 21. Curva Característica bomba WD-450.



Fuente. Alkhorayef Petroleum Artificial-Lift Products & Components 2015

Figura 12. Curva Característica bomba NHV450.



Fuente. Novomet Product Catalog.

Las anteriores evidencias, describen la curva característica de una bomba convencional serie 400, para un caudal entre el rango de 200 y 600 BPD de tres reconocidas compañías. De este modo se obtiene los siguientes parámetros técnicos de las bombas mencionadas:

Tabla 3. Rangos de operación de bombas convencionales

REFERENCIA	RANGO DE OPERACIÓN RECOMENDADO BPD	BEP BPD	POTENCIA POR ETAPA HP	LEVANTAMIENTO POR ETAPA FT	EFF. %
D475N	200-625	475	0.17	24	52
WD-450	250-550	455	0.14	18	43
NHV450	264-528	377	0.16	29.5	53

4.2 BOMBA POWER SAVE O ALTA EFICIENCIA³⁰

La tecnología ESP, ha sido empleada por décadas desde su invención. Cada día se ha desarrollado ideas nuevas que han evolucionado el sistema obteniendo mayor eficiencia y superando los retos que a diario se presenta en cada pozo, uno de los más revolucionarios proyectos ha sido la implementación de motores PMM con el objeto de mejorar la eficiencia energética. Sin duda se obtiene resultados satisfactorios, por otro lado, cabe destacar la importancia de mejorar la eficiencia volumétrica del ESP, para lograr esta finalidad se desarrolló las bombas Power Save que en vez de fundición se introduce la **polvo metalurgia** como método de fabricación de etapas centrifugas.

La innovación que revolucionó la fabricación de la etapa de bombeo es la introducción de la tecnología de polvo metalurgia, un procedimiento bien conocido en otras industrias. Las primeras etapas de la bomba ESP con esta tecnología fueron fabricadas por la empresa Rusa Novomet en 1991. La tecnología de polvo convencional implica mezclar, moldear y sinterizar polvos metálicos en la forma final requerida. Para fabricar formas complejas de impulsores y difusores, el proceso se divide en varios pasos³¹:

1. Materias primas en polvo finamente molidas (hierro, grafito, cobre, etc.) se mezclan utilizando recetas precisas.
2. Partes cuidadosamente seleccionadas de impulsores y difusores son fabricadas por inyección el polvo en moldes y luego con la ayuda de prensas de alta presión, las piezas se forman en frío en los espacios en vacíos deseados.
3. Los espacios vacíos se ensamblan para formar impulsores y difusores usando un pegamento especial.

³⁰ NOVOMET. Op. Cit.

³¹ TAKACS, Op. Cit.

4. Los espacios en blanco se sinterizan a alta temperatura durante períodos prolongados, mientras que las partículas metálicas se unen para formar el material final objetos sólidos.
5. El mecanizado final termina la fabricación de impulsores y difusores.³²

Figura 23. Proceso de Fabricación Powder Metallurgy.



Fuente. Powder Metallurgy Stages Manufacturing Technology Novomet.

Este proceso de fabricación produce etapas de bombeo con las siguientes mejoras muy importantes en comparación con las etapas realizadas con el método convencional de fundición en arena:

1. Se pueden fabricar etapas con geometría más compleja, que no es posible por medio del método de fundición, en conjunto con herramientas de diseño y simulaciones.³³
2. Se pueden fabricar etapas de bombeo más eficientes debido a la geometría de diseño óptimo y la superficie final presenta mayor suavidad generando menor fricción al paso del fluido.³⁴

³² Ibid.

³³ POWDER METALLURGY AT NOVOMET, Arsenal Novomet Solutions. May 2009. pp. 7–9 Issue 2

³⁴ Ibid.

3. La selección óptima de combinaciones de metal para piezas específicas de la bomba es posible; Se pueden construir etapas de bombeo para fines específicos (corrosión, resistencia a la erosión, etc.)³⁵.
4. Las etapas de la bomba son más balanceadas y producen menor vibración, lo que aumenta la fiabilidad de la bomba. Debido a esta característica, las bombas pueden funcionar a velocidades mucho más altas (hasta 6,000 RPM) a diferencia de las bombas convencionales.³⁶
5. Es posible la fabricación de etapas de diámetros pequeños, para aplicación de pozo de bajo caudal, con trayectorias internas menores de 3mm².
6. La combinación de metales, permite elaborar mezclas de metales que hacen posible aumentar la tolerancia a la abrasión de sólidos en virtud de mejorar la vida útil de la bomba³⁷.

El aumento de la eficiencia de la bomba, reduce las pérdidas hidráulicas, sin duda resulta en reducir la pérdida de potencia y mejorar la producción en términos económicos. La búsqueda interminable de mejorar la rentabilidad de Las operaciones ESP, por lo tanto, las operaciones se hacen más rentable si se emplea etapas de bombeo por la tecnología de polvo metalurgia³⁸.

4.2.1 Bombas Power Save disponibles según diámetro y caudal. Otra ventaja tecnológica que ofrece la técnica de polvo metalurgia, es el desarrollo de bombas de diámetro pequeño, que por fundición no es posible de obtener. A continuación, se mencionan las bombas Power Save disponible por la compañía Novomet:

³⁵ Ibid.

³⁶ TAKACS, Op. Cit.

³⁷ POWDER METALLURGY AT NOVOMET, Op. Cit.

³⁸ TAKACS, Op. Cit.

Tabla 4. Equipos disponibles Power Save Novomet.

OD inch	FLOW RATE BPD	MAX FREQ RPM	EFF. %
2,72	125-1250	5820	44-57
3,19	157-3145	5820	40-70
3,62	63-3773	5820	43-67
4,06	630-5030	5820	69-73
5,35	1890-15100	4660	67-79
6,77	10060-18900	3500	74-76

Fuente. Powder Metallurgy Stages Manufacturing Technology Novomet.

5. RETORNO DE INVERSIÓN CON TECNOLOGÍA POWER SAVE (PMM & BOMBAS DE ALTA EFICIENCIA).

En el siguiente capítulo se evalúa un caso de un campo productor maduro, ubicado en los llanos orientales de Colombia, actualmente se tiene instalado cuatro equipos de bombeo electro sumergible de diferentes compañías reconocidas en el sector de hidrocarburos. La producción de agua es considerablemente alta, por lo tanto, requiere de un sistema de bombeo electro sumergible que alcance la misma tasa de producción ofreciendo menor consumo energético. Para el análisis técnico-económico se solicita a la operadora datos de parámetros de diseño característicos de los pozos y datos eléctricos actuales de consumo:

Las propiedades de fluido y características de los pozos son las siguientes:

Tabla 5. Parámetros de Dimensionamiento

Pozo	Formaciones	Datum ft	Presión @ Datum, psia	Pwf, psi	Q, bfpd	IP bbls/d/psi	Rangos de producción, bfpd	
							Mínimo	Máximo
P-1	Mirador + Ubaque	8764	3894	3136	10334	13,6	4700	10500
P-2	Ubaque + Gacheta	9089	3847	3074	5867	7,6	2200	6500
P-3	Mirador	8406	3732	2975	3417	4,5	1700	5200
P-4	Mirador	8406	3732	3387	9558	27,7	6000	11000

Formación	Presión Py	Tyac, °F	Api	Pb, Psia	Bs&W %
MIRADOR	3711	212	16	420	97
UBAQUE	4092	223	15.7	658	98

Fuente: Datos suministrados por la operadora.

Actualmente se tiene instalados los siguientes equipos de reconocidas compañías:

Tabla 6. Equipos Instalados Actualmente, Equipo Convencional.

Pozo	Motor Power HP - Amperios	Leng FT	Bomba Etapas #	OD (inch)	Leng FT	Profundidad Admisión FT
P-1	413 - 124	26,14	52	5.38	21.75	3208
P-2	450-73.5	33,96	88	5.38	23.51	4313
P-3	336-77	25,27	58	5.38	19.88	5278
P-4	336-77	25,28	105	5.38	37.89	6074

Fuente: Datos suministrados por la operadora.

Resumen de interés tomado en campo, con equipos de medición eléctrica certificados, los datos de producción suministrados por el cliente:

Tabla 7. Datos Actuales de un Sistema Convencional.

	P-1	P-2	P-3	P-4
CRUDO, [BOPD]	191	89	118	78
AGUA, [BWPD]	10269	6012	3687	6865
FLUIDO, [BFPD]	10460	6102	3805	6944
FLUIDO, [BFPH]	435	254	158	289
BS&W, [%]	98%	99%	97%	99%
API, °	14,7	14,8	15	15
THP, [Psi]	80	72	63	83
THT, [°F]	227	217	207	204
FRECUENCIA, [Hz]	63	56	49	35
AMPERAJE, [Amp]	540	367	172	219
VOLTAJE, [Volt]	473	448	458	352
TEMP. MOTOR, [°F]	285	240	260	237
KW / H	335	244	114	101

	P-1	P-2	P-3	P-4
KWH / BFPH	0,77	0,96	0,72	0,34
KWH TOTAL				794

Fuente: Predictivo Realizado para Análisis Técnico – Económico.

5.1 DIMENSIONAMIENTO CON EQUIPOS PMM & POWER SAVE (PS) ANÁLISIS TÉCNICO

Bajo los parámetros suministrados por la operadora y con el objetivo de optimizar el consumo energético, se propone instalar equipos PMM y bombas Power Save, como solución para alcanzar este objetivo, a continuación, se presenta la propuesta técnico-económica con equipo Novomet que ofrece esta tecnología.

A continuación, se mencionan los equipos propuestos por Novomet, implementando tecnología PMM-PS y AM-PS:

Tabla 8. Dimensionamiento P-1 PMM & Power Save

POZO P-1			
DISEÑO PMM & POWER SAVE			
MOTOR:N512PM370HP BOMBA: NP(11300-15100)H 64 ETAPAS			
PARÁMETRO	Caso1	Caso 2	UNIDADES
Presión de Burbuja	658	658	PSI
API	15	16	°API
Índice de Productividad	13,6	13,6	BFPD/PSI
Corte de Agua	98	98	%
Presión estática a nivel de perforados	3894	3894	PSI
Frecuencia de Operación	105,6	116,8	HZ
Producción Estimada Fluido (agua + aceite)	10461	12000	BFPD

POZO P-1			
DISEÑO PMM & POWER SAVE			
Producción Estimada de Aceite Neto	209,22	240,00	BOPD
PIP	702	585	PSI
TDH	2248	2706	FT
Eficiencia volumétrica de la Bomba en punto de operación	77,9	78	%
Carga del Amperaje del Motor	71	89	%
Temperatura de embobinado del motor	271	272	F
Voltaje en las terminales del motor	3462	3915	V
Consumo energético a la salida del SUT	194,1	263	KW/H
Corriente de motor	31	38,8	A

Fuente: Resultados de Simulación Software SubPump.

Tabla 9. Dimensionamiento P-1 AM & Power Save

POZO P-1			
DISEÑO AM & POWER SAVE			
MOTOR: N562AM350HP			
BOMBA: NP(11300-15100)H 64 ETAPAS			
PARÁMETRO	Caso1	Caso 2	UNIDADES
Presión de Burbuja	658	658	PSI
API	15	16	°API
Índice de Productividad	13,6	13,6	BFPD/PSI
Corte de Agua	98	98	%
Presión estática a nivel de perforados	3894	3894	PSI
Frecuencia de Operación	53,4	59,1	HZ
Producción Estimada Fluido (agua + aceite)	10461	12000	BFPD
Producción Estimada de Aceite Neto	209	240	BOPD
PIP	702	585	PSI
TDH	2248	2706	FT
Eficiencia volumétrica de la Bomba en punto de operación	77,7	75	%
Carga del Amperaje del Motor	73	90	%
Temperatura de embobinado del motor	281	283	F
Voltaje en las terminales del motor	2776	3073	V

POZO P-1			
DISEÑO AM & POWER SAVE			
Consumo energético a la salida del SUT	203	277	KW/H
Corriente de motor	49	59	A

Fuente: Resultados de Simulación Software SubPump.

Tabla 10. Dimensionamiento P-2 PMM & Power Save

POZO P-2			
COMENTARIOS DEL DISEÑO PMM & POWER SAVE			
MOTOR: N512PM355HP BOMBA: NP(7900-10100)H 56 ETAPAS			
PARÁMETRO	Caso1	Caso 2	UNIDADES
Presión de Burbuja	658	658	PSI
API	15	16	°API
Índice de Productividad	7,6	7,6	BFPD/PSI
Corte de Agua	99	99	%
Presión estática a nivel de perforados	3847	3847	PSI
Frecuencia de Operación	112,8	119,6	HZ
Producción Estimada Fluido (agua + aceite)	6102	6700	BFPD
Producción Estimada de Aceite Neto	61,02	67,00	BOPD
PIP	1041	963	PSI
TDH	2205	2438	FT
Eficiencia volumétrica de la Bomba en punto de operación	72	70	%
Temperatura de embobinado del motor	279	278	F
Carga del Amperaje del Motor	72	80	%
Voltaje en las terminales del motor	2125	2271	V
Consumo energético a la salida del SUT	124	144	KW/H
Corriente de motor	32,6	36	A

Fuente: Resultados de Simulación Software SubPump.

Tabla 11. Dimensionamiento P-2 AM & Power Save

POZO P-2			
COMENTARIOS DEL DISEÑO AM & POWER SAVE			
MOTOR: N562AM245HP BOMBA: NP(7900-10100)H 56 ETAPAS			
PARÁMETRO	Caso1	Caso 2	UNIDADES
Presión de Burbuja	658	658	PSI
API	15	16	°API
Índice de Productividad	7,6	7,6	BFPD/PSI
Corte de Agua	99	99	%
Presión estática a nivel de perforados	3847	3847	PSI
Frecuencia de Operación	56,6	60	HZ
Producción Estimada Fluido (agua + aceite)	6102	6700	BFPD
Producción Estimada de Aceite Neto	61	67	BOPD
PIP	1041	963	PSI
TDH	2205	2438	FT
Eficiencia volumétrica de la Bomba en punto de operación	72	70	%
Temperatura de embobinado del motor	280	279	F
Carga del Amperaje del Motor	64	71	%
Voltaje en las terminales del motor	2940	3120	V
Consumo energético a la salida del SUT	129	152	KW/H
Corriente de motor	31	33	A

Fuente: Resultados de Simulación Software SubPump.

Tabla 12. Dimensionamiento P-3 PMM & Power Save

POZO P-3			
DISEÑO PMM & POWER SAVE			
MOTOR: N512PM220HP BOMBA: NP(4700-6300)H 46 ETAPAS			
PARÁMETRO	Caso1	Caso 2	UNIDADES
Presión de Burbuja	428	428	PSI
API	15	15	°API
Índice de Productividad	4,5	4,5	BFPD/PSI

POZO P-3			
DISEÑO PMM & POWER SAVE			
Corte de Agua	97	97	%
Presión estática a nivel de perforados	3732	3732	PSI
Frecuencia de Operación	112	139,2	HZ
Producción Estimada Fluido (agua + aceite)	3806	5300	BFPD
Producción Estimada de Aceite Neto	114	159	BOPD
PIP	1573	1242	PSI
TDH	1768	2627	FT
Eficiencia volumétrica de la Bomba en punto de operación	71	65	%
Temperatura de embobinado del motor	263	262	F
Carga del Amperaje del Motor	58	84,00	%
Voltaje en las terminales del motor	2038	2594	V
Consumo energético a la salida del SUT	63	109	KW/H
Corriente de motor	17	24	A

Fuente: Resultados de Simulación Software SubPump.

Tabla 13. Dimensionamiento P-3 AM & Power Save

POZO P-3			
DISEÑO AM & POWER SAVE			
MOTOR: N562AM200HP BOMBA: NP(4700-6300)H 68 ETAPAS			
PARÁMETRO	Caso1	Caso 2	UNIDADES
Presión de Burbuja	428	428	PSI
API	15	15	°API
Índice de Productividad	4,5	4,5	BFPD/PSI
Corte de Agua	97	97	%
Presión estática a nivel de perforados	3732	3732	PSI
Frecuencia de Operación	47,5	59,5	HZ
Producción Estimada Fluido (agua + aceite)	3806	5300	BFPD
Producción Estimada de Aceite Neto	114	159	BOPD
PIP	1573	1242	PSI
TDH	1768	2627	FT

POZO P-3			
DISEÑO AM & POWER SAVE			
Eficiencia volumétrica de la Bomba en punto de operación	77	78	%
Temperatura de embobinado del motor	267	264	F
Carga del Amperaje del Motor	44	69,00	%
Voltaje en las terminales del motor	1016	1273	V
Consumo energético a la salida del SUT	67	127	KW/H
Corriente de motor	49	64,6	A

Fuente: Resultados de Simulación Software SubPump.

Tabla 14. Dimensionamiento P-4 PMM & Power Save

POZO P-4			
COMENTARIOS DEL DISEÑO PMM & POWER SAVE			
MOTOR: N512PM220HP BOMBA: NP(11300-15100)H 19 ETAPAS			
PARÁMETRO	Caso1	Caso 2	UNIDADES
Presión de Burbuja	428	428	PSI
API	15	15	°API
Índice de Productividad	27,7	27,7	BFPD/PSI
Corte de Agua	99	99	%
Presión estática a nivel de perforados	3732	3732	PSI
Frecuencia de Operación	93,4	148,6	HZ
Producción Estimada Fluido (agua + aceite)	6945	12900	BFPD
Producción Estimada de Aceite Neto	69,45	129,00	BOPD
PIP	2505,2	2322	PSI
TDH	559	1227	FT
Eficiencia volumétrica de la Bomba en punto de operación	72	56	%
Temperatura de embobinado del motor	271	266	F
Carga del Amperaje del Motor	38,00	75,00	%
Voltaje en las terminales del motor	1687,00	3000	V
Consumo energético a la salida del SUT	35	110	KW/H
Corriente de motor	11,5	22,7	A

Fuente: Resultados de Simulación Software SubPump.

Tabla 15. Dimensionamiento P-4 AM & Power Save

POZO P-4			
COMENTARIOS DEL DISEÑO AM & POWER SAVE			
MOTOR: N562AM200HP			
BOMBA: NP(11300-15100)H 32 ETAPAS			
PARÁMETRO	Caso1	Caso 2	UNIDADES
Presión de Burbuja	428	428	PSI
API	15	15	°API
Índice de Productividad	27,7	27,7	BFPD/PSI
Corte de Agua	99	99	%
Presión estática a nivel de perforados	3732	3732	PSI
Frecuencia de Operación	36,3	59,9	HZ
Producción Estimada Fluido (agua + aceite)	6945	12900	BFPD
Producción Estimada de Aceite Neto	69,45	129	BOPD
PIP	2505,2	2322	PSI
TDH	559,17	1227	FT
Eficiencia volumétrica de la Bomba en punto de operación	78	64	%
Temperatura de embobinado del motor	283	269	F
Carga del Amperaje del Motor	31,00	63,00	%
Voltaje en las terminales del motor	776,00	1281	V
Consumo energético a la salida del SUT	39,5	118	KW/h
Corriente de motor	42	60,3	A

Fuente: Resultados de Simulación Software SubPump.

Resumen comparativo de equipos PMM-PS y AM-PS:

Tabla 16. Resultados de Propuesta con PMM, AM y PS

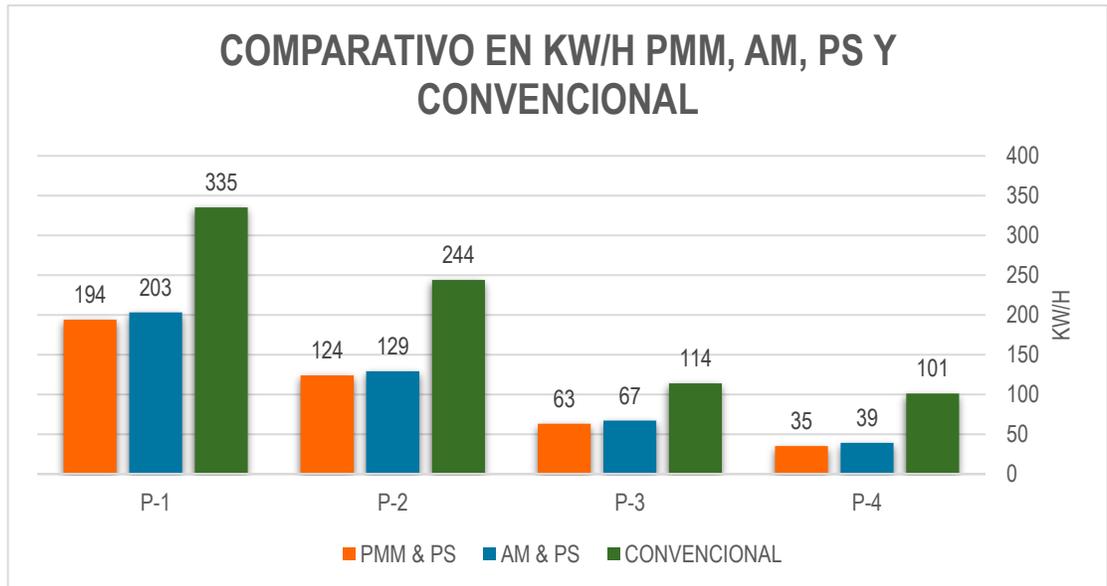
RESUMEN PMM & PS					RESUMEN AM & PS			
PARÁMETROS	P-1	P-2	P-3	P-4	P-1	P-2	P-3	P-4
FLUIDO, [BFPD]	10460	6102	3806	6945	10460	6102	3806	6945
FLUIDO, [BFPH]	436	254	159	289	436	254	159	289

RESUMEN PMM & PS					RESUMEN AM & PS			
PARÁMETROS	P-1	P-2	P-3	P-4	P-1	P-2	P-3	P-4
FRECUENCIA, [Hz]	105,6	112,8	112	93,4	53,4	56,6	47,5	36,3
AMP MOTOR, [Amp]	31	32,6	17	11,5	49	31	49	42
VOLTAJE, [Volt]	3462	2125	2038	1687	2776	2940	1016	776
TEMP. MOTOR, [°F]	271	279	263	271	281	280	267	283
KW / H	194	124	63	35	203	129	67	39
KWH / BFPH	0,45	0,49	0,40	0,12	0,47	0,51	0,42	0,13
KWH TOTAL	416				438			

Fuente: Resultados de Simulación Software SubPump.

Análisis comparativo en consumo KW/H usando tecnología PMM-PS, AM-PS y Convencional (actual), es evidente una gran diferencia en consumo entre los equipos de alta eficiencia comparado con el convencional.

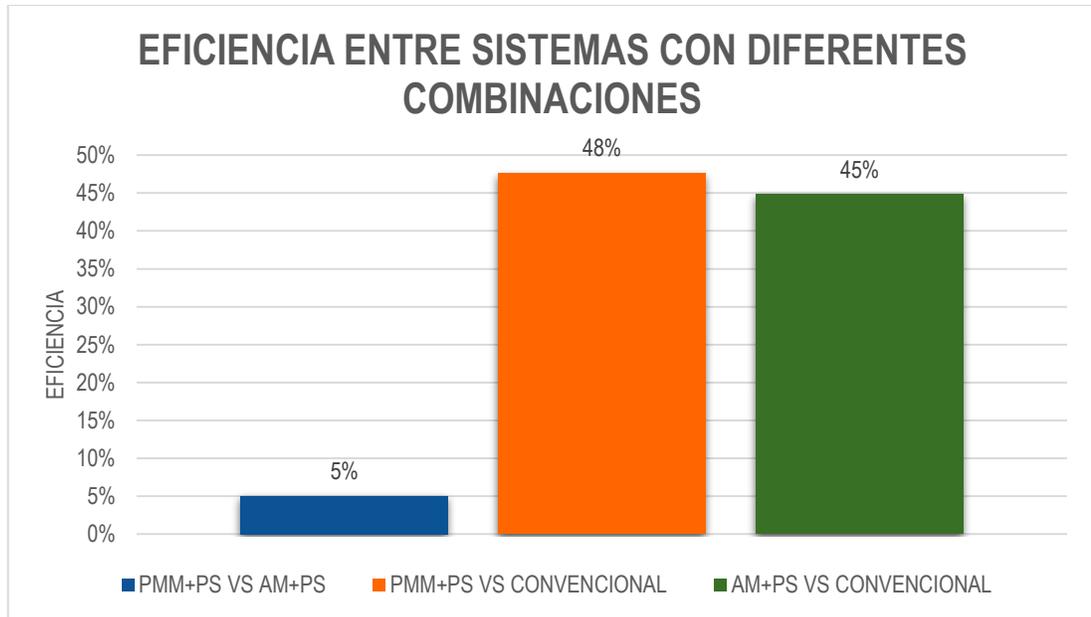
Tabla 17. Comparativo Energético PMM, AM, PS y CONVENCIONAL



Fuente: Resultados de Simulación Software SubPump.

Continuando con el análisis comparativo entre las diferentes tecnologías, se evidencia una diferencia mínima entre los equipos PMM-AM-PS de Novomet y una gran diferencia con respecto a los equipos convencionales.

Tabla 18. Comparativo de Eficiencia entre Sistemas



Fuente. Resultados de Simulación Software SubPump.

Equipos de fondo Novomet, propuestos para la intervención de los pozos en evaluación, son de menor longitud y OD comparado con los equipos actuales, las bombas son de menos etapas, por lo tanto, requiere menor número de cuerpos de bombas, menor potencia el motor, menor peso en el BHA.

Tabla 19. Equipo PMM & PS Propuesto

Pozo	Motor	OD (inch)	Leng FT	Bomba Etapas #	OD (inch)	Leng FT	Profundidad Admisión FT
P-1	N512PM370HP	5,12	22	NP(11300-15100)H 64 STG	5,35	26,2	3208
P-2	N512PM355HP	5,12	14,6	NP(7900-10100)H 56 STG	5,35	19,6	4313
P-3	N512PM220HP	5,12	10,4	NP(4700-6300)H 46 STG	5,35	16,4	5278
P-4	N512PM220HP	5,12	10,4	NP(11300-15100)H 19 STG	5,35	8,2	6074

Fuente. Resultados de Simulación Software SubPump y Catalogo Novomet

5.2 ANÁLISIS ECONÓMICO PARA INVERSIÓN DE SISTEMAS PMM & PS

5.2.1 Costo de equipo PMM & PS. Los costos de los equipos hacen referencia al equipo ESP, sin contemplar costos de equipos de WO, WS, Cable de potencia, ya que estos costos son asumidos por la empresa operadora y hacen parte del presupuesto anual de la compañía independiente de la tecnología que decida instalar.

Tabla 20. Lista de Precio Equipo Novomet PMM + PS

EQUIPO P-1	# Etapas Bombas	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT USD\$
BOMBA	64	NP(11300-15100)H CMP AR2 CR1 S13 64STG	\$29.230,00
OTROS		SELLO, INTAKE, MANEJADOR DE GAS, SENSOR	\$50.000,00
MOTOR		N562AM350 3120V SGL CR0 HT	\$37.450,00

EQUIPO P-1	# Etapas Bombas	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT USD\$
Total Etapas	64		\$116.680,00
EQUIPO P-2	# Etapas Bombas	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT USD\$
PUMP UT	56	NP(7900-10100)H CMP AR2 CR1 S13 56STG	\$23.000,00
OTROS		SELLO, INTAKE, MANEJADOR DE GAS, SENSOR	\$50.000,00
MOTOR		N562AM245 3120V SGL CR0 HT	\$30.410,00
Total Etapas	56		\$103.410,00
EQUIPO P-3	# Etapas Bombas	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT USD\$
PUMP UT	46	NP(4700-6300)H CMP AR2 CR1 S13 46STG	\$25.000,00
OTROS		SELLO, INTAKE, MANEJADOR DE GAS, SENSOR	\$50.000,00
MOTOR		N562AM200 2916V SGL CR0 HT	\$35.100,00
Total Etapas	46		\$110.100,00
EQUIPO P-4	# Etapas Bombas	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT USD\$
PUMP UT	19	NP(11300-15100)H CMP AR2 CR1 S13 19STG	\$12.200,00
OTROS		SELLO, INTAKE, MANEJADOR DE GAS, SENSOR	\$50.000,00
MOTOR		N562AM200 2916V SGL CR0 HT	\$35.100,00
Total Etapas	19		\$97.300,00
TOTAL USD\$			\$ 427.490,00

Se realiza proyección durante dos años que hace parte de la duración del contrato. La variable de interés para el siguiente análisis se enfoca en el ahorro económico alcanzado solo con ahorro energético.

Tabla 21. Análisis Económico del Ahorro Energético.

ANÁLISIS DE AHORRO DE ENERGÍA (4 POZOS)		
	EQUIPO CONVENCIONAL	NOVOMET (PMM + PS PUMP)
FLUIDO TOTAL POR DIA (BPD)	27313	27313
FLUIDO TOTAL POR HORA (BPH)	1138	1138
CONSUMO ENERGÉTICO KW/H	794	416
KW POR BARRIL INDEX (KW/BARREL)	0,70	0,37
COSTO PROMEDIO POR KW/H (USD)	\$ 0,24	\$ 0,24
COSTO POR BARRIL (USD)	\$ 0,17	\$ 0,09
AHORRO CON EQUIPOS NOVOMET PMM + PS		48%
COSTO DIARIO DE PRODUCCIÓN (USD)	\$ 4.573,44	\$ 2.396,16
COSTO MENSUAL DE PRODUCCIÓN (USD)	\$ 137.203,20	\$ 71.884,80
AHORRO MENSUAL USANDO NOVOMET PMM + PS		\$ 65.318,40
COSTO DE PRODUCCIÓN POR AÑO	\$ 1.646.438,40	\$ 862.617,60
AHORRO ANUAL USANDO NOVOMET PMM + PS		\$ 783.820,80
COSTO DE PRODUCCIÓN POR 2 AÑOS (DURACIÓN CONTRATO)	\$ 3.292.876,80	\$ 1.725.235,20
AHORRO ECONÓMICO USANDO NOVOMET PMM+PS		\$ 1.567.641,60

6. CONCLUSIONES

Como resultado, se evidencio mayor eficiencia energética, con la implementación de un sistema de tecnología PMM y bombas de alta eficiencia, para el caso en estudio se obtiene hasta un 48% de eficiencia comparado con un sistema ESP convencional.

Por consiguiente, la utilización de motores AM combinados con las bombas de alta eficiencia, se obtiene un ahorro significativo del 45% comparado con el equipo convencional actualmente instalado.

Se observa una eficiencia energética del 5%, entre un sistema PMM combinado con bombas de alta eficiencia, en comparación de un sistema con motor AM y bombas de alta eficiencia, el cual indica que el motor PMM debido a sus características electro mecánicas ofrece una eficiencia mejorada comparado con el motor AM oscilando entre 5-12% como lo aseguran los fabricantes, ahora bien, con la combinación de bombas PS es posible obtener mayor eficiencia del 48%.

La fabricación de bombas de alta eficiencia, con el método de polvo metalurgia, ha revolucionado la industria en cuanto al desarrollo y caracterización de los sistemas electro sumergible, la reducción de consumo energético ha posicionado este

sistema de levantamiento como uno de los más usados en el mundo debido a la optimización reduciendo los costos de producción.

El desarrollo tecnológico de motores de PMM y bombas PS, ha permitido la fabricación de equipos ESP de menor diámetro y longitud en comparación de los equipos convencionales, ofreciendo la facilidad de completamientos de pozos con revestimientos de menor diámetro reduciendo el CAPEX y aumentando la manejabilidad económica de los proyectos.

En conclusión, es conveniente valorar proyectos en campos productores que requieran de sistemas de bombeo electro sumergible como método de levantamiento, el consumo energético (KW/H) y así evaluar el retorno de inversión con el ahorro de energía obtenido.

BIBLIOGRAFÍA

AZANOV, I, (TNK-Nizhnevartovsk, TNK-BP), SHAMIGULOV A, (SNGDU-2, Samotlorneftegaz, TNK-BP). Application of Permanente Motors in Oil Production. SPE-117386-RU. SPE Russian Oil and Gas Technical Conference an Exhibition, Moscow, Russia. 2008

BAKER LIFT SYSTEMS. Design, Specification & Application of Baker Lift Systems Electric Submersible Pumping Systems

BORETS INTERNATIONAL. Documentos en línea. <http://la.borets.com/productos/motores/im/>. Citado en Junio 19 de 2014

_____. Submersible Pump Units Utilizing Permanent Magnet Motors

DEL PINO CASTRILLÓN, Jessica Julieth. Estudio integral de factibilidad de la migración de motores convencionales a motores de imanes permanentes para equipos electro sumergibles de levantamiento artificial. Tesis de Especialista En Gerencia De Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander – UIS. Facultad de Petróleos, 2015, 67p.

CANDELO VIAFARA, Juan Manuel. (2018). Impactos indirectos de la tasa de cambio y los precios del petróleo en una economía no petrolera: aproximaciones VECM y VAR para el Valle del Cauca, Colombia. Revista Finanzas y Política Económica, Vol 10, Iss 2, Pp 403-436 (2018), (2), 403. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2236/10.14718/revfinanzpolitecon.2018.10.2.9>

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Documentos en línea. Disponible en <https://www.minenergia.gov.co/historico-de-precios>

NOVOMET. Power Saving in ESP Production. Evgen Poshvin. Documentos en línea. Disponible en <http://www.novomet.ru/eng/products/smart-solutions/powersave-esp-systems>

_____. Technological comparison test results developed in Rubiales field during first half of 2013 between conventional ESP systems and Novomet power save technology.

REFAI, A (Agiba Petroleum Company), ABDOU, H (Agiba Petroleum Company), SELEIM, A (Agiba Petroleum Company), BIASIN, G (Agiba Petroleum Company), REDA, W (Novomet Egypt), LETUNOV, D (Novomet Egypt). Permanent Magnet motor application for ESP Artificial Lift, 2013 SPE 164666. North Africa Technical Conference and Exhibition, 15-17 April, Cairo, Egypt.

TACKS, G. Electrical Submergible Pumps Manuel Desings, Operation, and Maintenance, USA 2009.

TAKACS G. Three inventions shaping the future of ESP technology. University of Miskolc, Hungary. 2019.