

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO CON LA
IMPLEMENTACIÓN DE MOTORES DE INDUCCIÓN vs MOTORES PMM EN LOS
SISTEMAS BES**

**Presentado por:
LEONARDO ALBERTO DIAZ CESPEDES
Ingeniero de Sistemas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
ESPECIALIZACION EN PRODUCCION DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2016**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO CON LA
IMPLEMENTACIÓN DE MOTORES DE INDUCCIÓN vs MOTORES PMM EN LOS
SISTEMAS BES**

LEONARDO ALBERTO DIAZ CESPEDES

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

**Director
CIRO ABRAHAM PINTO RIZZO
Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
ESPECIALIZACION EN PRODUCCION DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2016**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por cada momento vivido y permitir culminar una nueva etapa académica satisfactoriamente.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos UIS por crear este espacio y darnos la oportunidad de seguir creciendo como personas y profesionales.

A Borets International, por haber permitido el desarrollo de este proyecto con la información y avances tecnológicos de su compañía.

Al grupo de estudiantes y docentes de la V promoción de la Especialización en Producción de Hidrocarburos, en especial a mi compañero y amigo Angel Polania por su apoyo incondicional para poder realizar esta especialización.

DEDICATORIA

A toda mi familia, en especial a mis padres y hermano, quienes son motivo de orgullo y mi ejemplo a seguir en la vida, por enseñarme que con esfuerzo y determinación se pueden alcanzar todas las metas.

A Daniela por su motivación, comprensión y apoyo incondicional a lo largo de nuestras vidas.

A mi Hija Isabel, por ser ese motor e impulso de levantarme cada día con el objetivo de superarme profesional y personalmente para darle un mejor futuro.

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	13
1. SISTEMAS BES.....	14
1.1 Sistema de bombeo electro sumergible	14
1.1.2 Ventajas y Beneficios	15
1.1.3 Limitaciones	15
1.2 Equipo de fondo	16
1.2.1 Motor de inducción.....	16
1.2.2 Bomba Centrifuga	16
1.2.3 Sello	17
1.2.4 Intake / Separador de gas.....	17
1.2.5 Cable de potencia	18
1.2.6 Motor Lead Extensión.....	19
1.3Equipo de superficie.....	19
1.3.1 Variador	19
1.3.2 Transformadores.....	20
1.4 Funcionamiento del motor de inducción vs motor de imán permanente.....	20
1.5 Ventajas del Motor PMM vs Motor de Inducción.....	22
2. SELECCIÓN Y DESCRIPCION DE LOS POZOS SELECCIONADOS.....	25
POZO A.....	25
POZO B.....	29
POZO C.....	32
Los parámetros de operación para los 3 pozos se encuentran resumidos a continuación:	35
3. DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA LOS POZOS SELECCIONADOS.....	36

POZO A.....	36
POZO B.....	40
POZO C.....	43
4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENCONTRADOS EN LOS POZOS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE MOTORES PMM VS MOTORES DE INDUCCIÓN	47
POZO A.....	47
POZO B.....	52
POZO C.....	56
5. CONCLUSIONES	61
6. RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFIA.....	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de operación Pozo A:.....	25
Tabla 2. Parámetros de operación Pozo B:.....	29
Tabla 3. Parámetros de operación Pozo C:	32
Tabla 4. Comparación de parámetros actuales en los pozos A, B y C:	35
Tabla 5. Comparación de parámetros con motores de inducción vs PMM en los pozos A, B y C:.....	46
Tabla 6. Comparación de parámetros de operación en el pozo A:	50
Tabla 7. Comparación económica de los consumos en el pozo A:	51
Tabla 8. Comparación de parámetros de operación en el pozo B:	55
Tabla 9. Comparación económica de los consumos en el pozo B:	55
Tabla 10. Comparación económica de los consumos en el pozo C:	59
Tabla 11. Porcentajes de ahorro:.....	60
Tabla 12. Ahorro económico:	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bombeo Electro Sumergible	14
Figura 2. Motor	16
Figura 3. Bomba Centrifuga	16
Figura 4. Etapa	16
Figura 5. Sello	17
Figura 6. Intake / Separador de Gas	18
Figura 7. Cable de Potencia	18
Figura 8. MLE	19
Figura 9. Variador	19
Figura 10. Transformador	20
Figura 11. Bobinas Inductoras	21
Figura 12. Bobinas y Rotores Inductores	21
Figura 13. Rotor PMM	22
Figura 14. Ventajas PMM vs Inducción	22
Figura 15. Comparativo de motores instalados (inducción vs pmm) mercado ruso	23
Figura 16. Motores PMM en operación	24
Figura 17. Estado Actual del pozo A	26
Figura 18. Curva estándar de la bomba en el pozo A	28
Figura 19. Curva factor de potencia en el pozo A	28
Figura 20. Estado Actual del pozo B	30
Figura 21. Curva estándar de la bomba en el pozo B	31
Figura 22. Factor de potencia del motor en el pozo B	31
Figura 23. Estado Actual del pozo B	33
Figura 24. Curva estándar de la bomba en el pozo C	34
Figura 25. Factor de potencia del motor en el pozo C	34
Figura 26. Estado Nuevo del pozo A	36
Figura 27. Curva estándar de la bomba Borets en el pozo A	39
Figura 28. Factor de potencia del motor PMM en el pozo A	39
Figura 29. Estado Nuevo del pozo B	40
Figura 30. Curva estándar de la bomba Borets en el pozo B	42
Figura 31. Factor de potencia del motor PMM en el pozo B	42
Figura 32. Estado Nuevo del pozo C	43
Figura 33. Curva estándar de la bomba Borets en el pozo C	45
Figura 34. Factor de potencia del motor PMM en el pozo C	45
Figura 35. Comparación de bomba, motor y profundidad POZO A	47
Figura 36. Comparación de variables de operación del POZO A	48
Figura 37. Comparación de bomba, motor y profundidad POZO B	52
Figura 38. Comparación de variables de operación del POZO B	52
Figura 39. Comparación de bomba, motor y profundidad POZO C	56
Figura 40. Comparación de variables de operación del POZO C	57

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE MOTORES DE INDUCCIÓN vs MOTORES PMM EN LOS SISTEMAS BES*

AUTOR: LEONARDO ALBERTO DIAZ CESPEDES**

PALABRAS CLAVES: Motores Imanes Permanentes, Motores de Inducción, Equipos de Bombeo Electrosumergible, Análisis económico.

DESCRIPCIÓN:

La actualidad de la industria petrolera se encuentra pasando por una etapa de crisis a nivel mundial donde todas las compañías concentran sus esfuerzos en tratar de disminuir los costos de sus operaciones a los niveles más bajos posibles, en nuestro país el sistema de levantamiento artificial que más se encuentra utilizado en estos momentos es el bombeo de electro sumergible por lo cual será el sistema objetivo de este trabajo.

Uno de los mayores costos asociados a la instalación de bombeo electrosumergible es su costo de operación el cual está asociado al consumo energético necesario para operar el equipo, haciendo de este un punto de optimización para cualquier campo de operación.

En el presente trabajo de monografía se realizará un análisis técnico - económico donde se compare la nueva tecnología de motores de imanes permanentes comparada con la tecnología de motores de inducción que se han venido utilizando durante todo el tiempo en el país, se compara lo largo de un periodo de tiempo el consumo y ahorros logrados en tres pozos donde se instaló esta tecnología y se analizara los resultados obtenidos.

Una vez terminada la monografía se pretende que a lo largo de todo el país se masifique la implementación de motores de imanes permanentes por sus beneficios económicos y ecológicos a los cuales pueda estar asociado el menor consumo de energía manteniendo las mismas producciones en los campos de producción.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería de Petróleos. Director: Ciro Pinto, Ingeniero de Petróleos

ABSTRACT

TITULO: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE MOTORES DE INDUCCIÓN vs MOTORES PMM EN LOS SISTEMAS BES.*

AUTHOR: LEONARDO ALBERTO DIAZ CESPEDES**

KEY WORDS: PMM Motor's, Induction Motor's, Electric Submersible Pump Systems, Economic Analysis.

DESCRIPTION:

Today the oil industry is going through a period of global crisis where all companies are concentrating their efforts on trying to reduce the costs of their operations to the lowest possible levels, in our country the artificial lift system more is used at present is the electro submersible pump so it will be the aim of this work system.

One of the biggest costs associated with the installation of electric submersible pump is operating cost which is associated with the energy consumption required to operate the equipment, making this a point of optimization for any field of operation.

In this paper work will be performed technical - economic analysis where the new technology of permanent magnet motor technology compared to induction motors have been used all the time in the country compare, along compares a period of time and consumption savings achieved in three wells where this technology was installed and the results obtained were analyzed.

Once the paper is intended that throughout the country the implementation of permanent magnet motors for its economic and ecological benefits adoption increases to which can be associated the lower power consumption while maintaining the same production in the fields of production.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería de Petróleos. Director: Ciro Pinto, Ingeniero de Petróleos

INTRODUCCION

En la industria de los hidrocarburos, uno de los sistemas de levantamiento artificial de más acogida es el sistema de bombeo electro-sumergible, todos estos equipos que funcionan actualmente en el país utilizan motores de inducción los cuales presentan altos niveles de consumo de energía, ya que por su diseño los motores de inducción para obtener un punto alto de eficiencia se requiere que el motor tenga una mayor carga, trayendo como consecuencia un mayor consumo de energía.

La tecnología PMM (Motores de imanes permanentes) es desconocida en el país, pero se ha evidenciado casos de éxito en otros países que con la implementación de motores PMM se puede obtener una disminución en el consumo energético respecto a los motores convencionales, lo cual permite un ahorro económico en la operación del pozo.

En la actualidad donde afrontamos una crisis debido a los precios del barril de crudo las empresas implementan dentro de sus objetivos estratégicos la reducción de costos y así mismo la reducción en el consumo de energía en sus sistemas de levantamiento artificial, que para este caso en particular en su gran mayoría está conformado por sistemas electro sumergible

En Colombia todos los sistemas de bombeo electro sumergible están instalados con motores de inducción, debido a su masificación y desconocimiento de nuevas tecnologías hace que las operadoras en el país no vean en el motor BES una fuente importante para la optimización en los costos de producción de un pozo.

En diferentes partes del mundo se ha implementado el uso de motores de imanes permanente PMM obteniendo buenos resultados en los pozos donde se han utilizado, ya que esta tecnología tiene una mayor eficiencia de operación lo cual permite una reducción en el consumo energético del pozo que a su vez conlleva a un ahorro económico para las compañías.

El presente trabajo de monografía caracterizara los motores de inducción y PMM identificando las ventajas y desventajas de cada una de las dos tecnologías, realizara simulaciones con software especializado para el diseño de sistemas BES, se tomaran como muestra algunos pozos que tienen instalados estos sistemas con el objetivo de evaluar las condiciones de operación de las dos tecnologías con las mismas variables de operación en cada uno de los pozos.

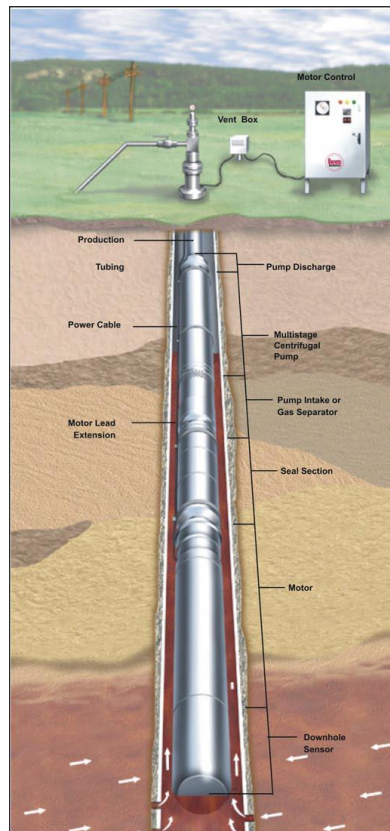
Finalmente identificara los ahorros de consumo energético obtenidos por los motores PMM y de igual manera analizara el ahorro económico en la operación en cada uno de los pozos.

1. SISTEMAS BES

1.1 Sistema de bombeo electro sumergible ³

La figura 1 muestra una instalación típica del sistema ESP, que incorpora un motor eléctrico y unidad de bomba centrífuga conectada en una cadena de producción hasta superficie, el motor es conectado a la superficie hasta un transformador a través de un cable de alimentación eléctrico.

Figura 1. Bombeo Electro Sumergible



Los componentes de fondo de pozo están suspendidos de la tubería de producción por encima de las perforaciones de los pozos. En la mayoría de los casos el motor se encuentra en la parte inferior de la sarta. Por encima de la del motor se encuentra la sección de sello, el separador de gas o admisión, y la bomba. El cable de alimentación sujetado a la tubería y se conecta a la parte superior del motor.

La bomba sumergible consta de múltiples etapas, cada una compuesta de dos componentes clave: un impulsor, que impulsa el fluido, y un difusor, que dirige el fluido a la siguiente etapa. La altura total disponible en la descarga de la bomba está diseñada

³ BORETS INTERNATIONAL. Esp. Application Guide Version 1.5a , 2008

para igualar o superar la cabeza dinámica total (TDH) requerida para elevar la tasa de flujo diseñado a la superficie y moverlo hasta la planta de producción en superficie.

1.1.2 Ventajas y Beneficios

- Mayor vida útil en los pozos profundos, pozos desviados y pozos verticales con dog leg.
- Alta eficiencia operativa y reducción de costos operativos en pozos con los volúmenes de producción de más de 500 BFPD.
- Requisitos de mantenimiento mínimo como resultado una mayor producción con menos tiempo de inactividad.
- Los requisitos de superficie mínima permiten menores costos de instalación.
- Los pozos con casing de tamaños 4-1 / 2 pulgadas de puede usar más fácilmente con un sistema ESP.
- Alta resistencia a los ambientes de fondo de pozo corrosivos.
- Opcionalmente se puede instalar con el sistema en tiempo real de instrumentación que informan la presión de admisión, la presión de descarga, la temperatura del motor, la temperatura del fluido, la vibración del sistema y la pérdida de corriente a la superficie.
- Aplicaciones cuando se desconoce la presión de intake.

1.1.3 Limitaciones

- El sistema se limita a las zonas donde la energía eléctrica o generadores están disponibles.
- Capacidad de adaptación limitada a cambios importantes en depósito debido a bombear rango de operación; puede ser mejorado cuando se utiliza un controlador de frecuencia variable (VFD).
- Mayor necesidad de energía cuando se bombean fluidos de alta viscosidad.
- Los altos costos de la intervención.

1.2 Equipo de fondo

1.2.1 Motor de inducción

El primer componente ESP es el motor sumergible (ver Figura 2). Es un equipo bipolar, trifásico, de tipo inducción de jaula de ardilla. Los motores funcionan a una velocidad nominal de 3.500 rpm en operación de 60 Hz (2917 RPM en marcha de 50 Hz). Los motores están llenos de aceite dieléctrico que proporciona lubricación a los rodamientos internos, y la conductividad térmica

El calor generado por el funcionamiento del motor se transfiere al fluido que viaja alrededor del motor. La velocidad del fluido mínimo debe ser de 1 ft / s para proporcionar una refrigeración adecuada. Un ESP estándar nunca debe asentarse por debajo de las perforaciones o la zona productora.

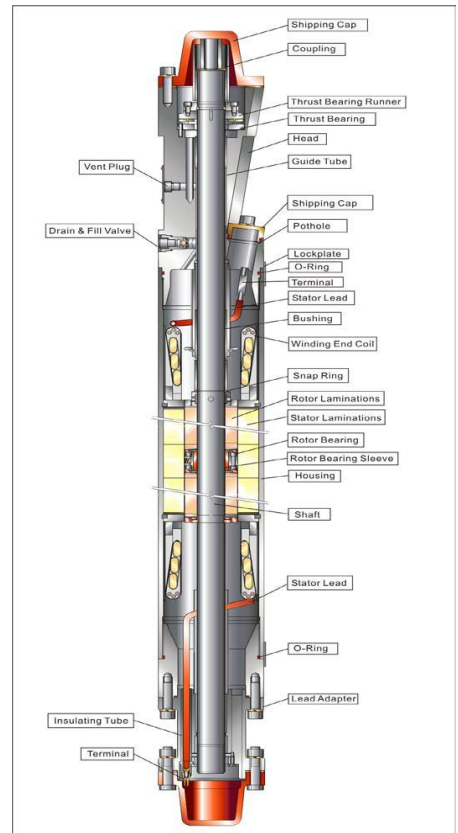


Figura 2. Motor

1.2.2 Bomba Centrífuga

Una bomba centrífuga imprime energía al fluido mediante la rotación de un impulsor dentro de un difusor.

La rotación de los componentes convierte la velocidad (movimiento) en presión (cabeza).

Cada conjunto de impulsor y difusor conforman una etapa.

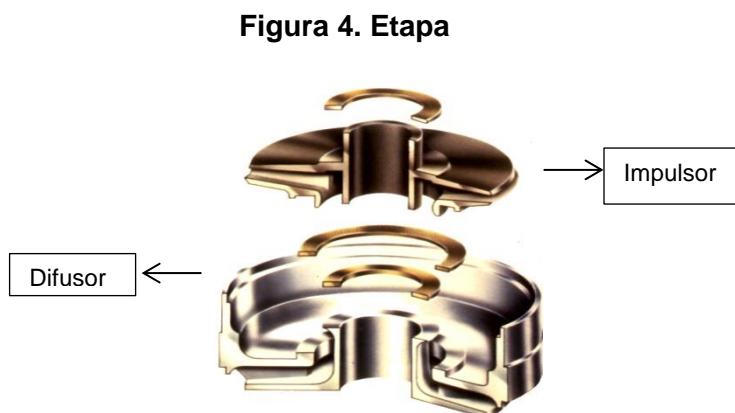


Figura 4. Etapa

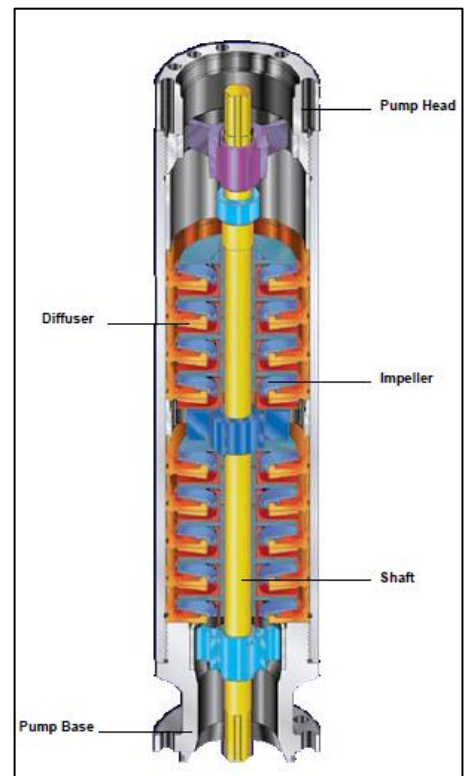


Figura 3. Bomba Centrífuga

El impulsor toma el fluido y le imprime energía cinética. El difusor convierte esta energía cinética en energía potencial (Cabeza). La función de cada etapa es llevar el fluido de un nivel a otro, incrementando su energía, hasta alcanzar una presión de descarga que permita que el fluido llegue a superficie.

1.2.3 Sello

El propósito principal de la sección de sello es aislar el aceite de motor del fluido de pozo, igualar la presión interna del motor con la presión del anular y para alojar el cojinete de empuje que soporta el empuje de la bomba. Hay dos tipos de diseño de la sección de sello, la bolsa y la cámara de laberinto. El diseño del sello tipo de bolsa se basa en una bolsa de fluido de barrera elástica para permitir la expansión térmica del fluido motor en funcionamiento, mientras que aísla el fluido del pozo del aceite del motor. El diseño laberinto utiliza la gravedad específica del fluido del pozo y del aceite del motor para evitar que el fluido del pozo entre en el motor. Esto se consigue permitiendo que el aceite y fluido del pozo se comuniquen a través de caminos (tubo de conexión) y cámaras segregadas. Varias combinaciones de elastómeros, materiales de construcción, elementos de fijación, materiales de ejes y cojinetes de empuje están disponibles en el mercado, lo que permite adecuar el sello para las condiciones de cada pozo.

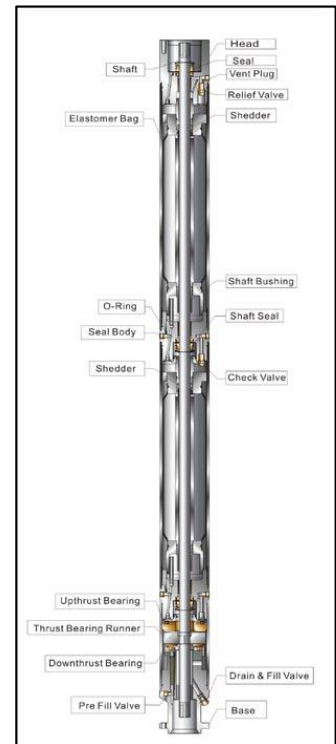
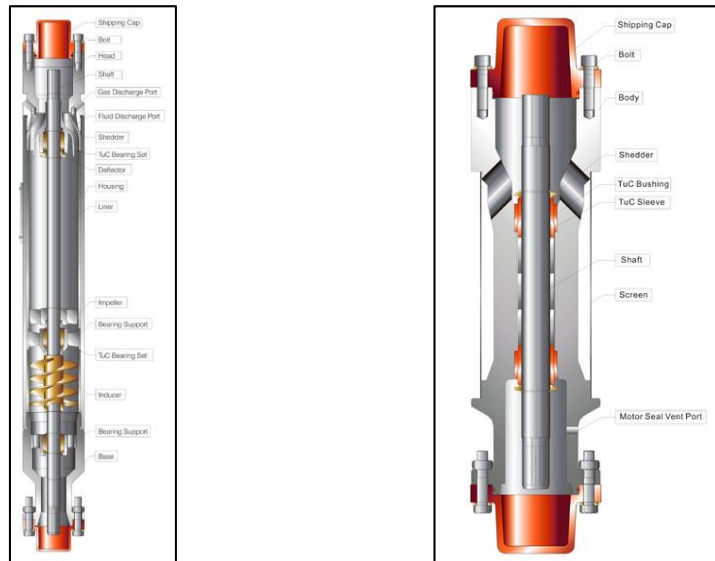


Figura 5. Sello

1.2.4 Intake / Separador de gas

Los intakes estándar se utilizan en pozos que producen con una relación de gas libre de muy baja. En general, la cantidad de gas libre por volumen que puede entrar a la bomba debe ser no más de 10% para una etapa de flujo radial y el 20% para una etapa de flujo mixto. El intake estándar tiene varios agujeros bastante grandes, permitiendo que los fluidos fluyan dentro de la sección inferior de la bomba y entrar en la etapa inferior en la bomba. La mayoría de los modelos están equipados con una malla para mantener los desechos grandes fuera de la bomba. El intake está atornillado a la parte inferior de la bomba.

Figura 6. Intake / Separador de Gas



El separador de gas Vortex, separará el gas libre con una eficiencia de hasta el 90% bajo algunas condiciones. El separador de gas debe utilizarse donde el gas libre disponible en la entrada de la bomba supera el 10% con una etapa de flujo radial y el 20% con una etapa de flujo mixto. El uso de un separador de vórtice debe ser considerado cuidadosamente. A pesar de que el separador de gas vórtice es muy eficiente, todavía puede haber casos en los que la bomba sufra bloqueo por gas. Se pueden instalar separadores en tándem para aplicaciones que lo requieran.

1.2.5 Cable de potencia

La energía eléctrica se suministra al motor de fondo de pozo por un cable trifásico sumergible especial (Figura 6). Hay dos configuraciones de cable, planas y redondos. La gama estándar de tamaños de conductores es 1/0 a 6 AWG (American Wire Gauge). El conductor es trenzado o de cobre sólido con un revestimiento de estaño que reduce el los daños por corrosión. Un número de tipos de aislamiento y diseños están disponibles y la selección se basa en el entorno operativo pozo. La protección mecánica es proporcionada por una armadura de acero galvanizado. El Acero inoxidable y el Monel son utilizados para ambientes corrosivos.



Figura 7. Cable de Potencia

Cable se construye con tres conductores individuales, uno para cada fase de potencia. Cada conductor está rodeado por el aislamiento y el material de revestimiento. El espesor

y la composición del aislamiento y revestimiento determinan la resistencia del conductor a la fuga de corriente, su capacidad de temperatura máxima, y su resistencia a la permeabilidad por fluido del pozo y gas. El Cable de alimentación eléctrica está diseñado para operar a temperaturas de hasta 450 ° F (232 ° F) a 5.000 psi y 5 kV.

1.2.6 Motor Lead Extensión

La extensión de cable del motor (MLE) es la sección más baja de la cadena del cable de alimentación. El MLE tiene un perfil más bajo que el cable de alimentación plano estándar para que se pueda adaptar a la longitud de las secciones de la bomba, sello y de admisión. La longitud del MLE está determinada por la longitud del sistema (cabezal de descarga + bombas + admisión + sello + 2 pies). Se requiere un mínimo de 7 pies adicionales para permitir el empalme del MLE al cable de alimentación.

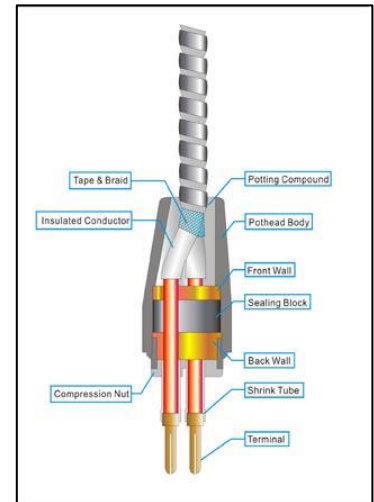


Figura 8. MLE

1.3 Equipo de superficie

1.3.1 Variador ⁴

El variador de frecuencia (VDF) es un controlador de motor que permite operar el sistema BES en un rango

Amplio de frecuencia en vez de estar limitado a la frecuencia de línea. Así el gasto de producción, la carga o ambos se pueden ajustar, dependiendo de la aplicación, al variar la velocidad de la bomba, sin modificaciones en el equipo de fondo. La operación básica del VDF es convertir la entrada trifásica de corriente alterna a corriente directa DC.

Luego, usando semiconductores de potencia como interruptores de estado sólido, invierte la corriente directa a una salida alterna trifásica de voltaje y frecuencia variable.



Figura 9. Variador

El propósito principal para usar el VDF en el sistema BEC es la flexibilidad en el bombeo, pero también se obtienen otros beneficios tales como la extensión de la vida útil del

⁴ BAKER HUGHES. Guía Bombeo Electro sumergible

equipo de fondo, arranque suave, velocidad controlada automáticamente, supresión de transitorios de línea y eliminación de estrangulamientos superficiales.

1.3.2 Transformadores⁵

En la mayoría de los casos, la tensión de superficie disponible no es compatible con el voltaje necesario para el funcionamiento del motor, la distribución de energía en un campo petrolero es de tensiones de 6000 voltios o más, mientras que el equipo ESP trabaja con tensiones entre alrededor de 250 y 4000 voltios. Los transformadores para las instalaciones ESP permiten bajar o elevar la tensión a los niveles deseados.



Figura 10. Transformador

Los transformadores se seleccionan en base a los niveles de tensión y de potencia. La tensión superficial requerida depende en gran medida de la profundidad de colocación de los equipos ESP dado que la caída de tensión en los cables de potencia aumenta con la longitud del cable. Esta caída de tensión más la tensión del motor seleccionado da la tensión superficial necesaria.

1.4 Funcionamiento del motor de inducción vs motor de imán permanente

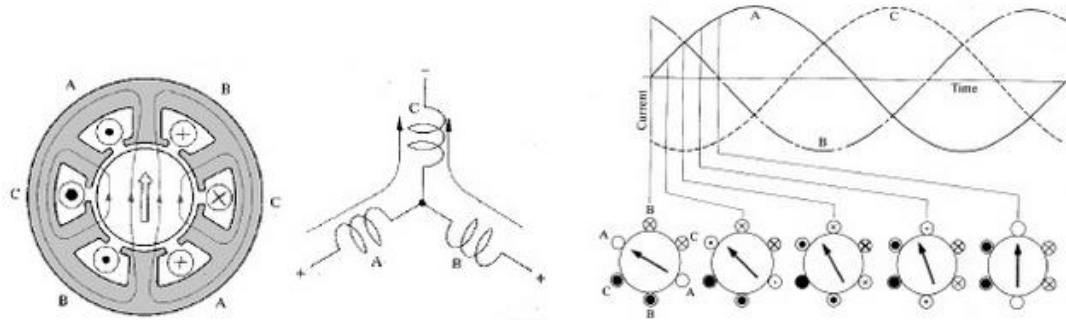
Los motores de inducción están formados por un estator y un rotor, el estator está constituido por un núcleo en cuyo interior existen 3 pares de arrollamientos o devanados colocados simétricamente en un ángulo de 120°. El campo inductor está generado por corriente alterna. Generalmente, el inductor está en el estator y el inducido en el rotor.⁶

La interacción entre el campo magnético del estator y la corriente del inducido en el rotor produce la fuerza que hace mover el rotor

⁵ TAKACS G. Electrical Submersible Pumps Manual Design, Operations, And Maintenance, USA: 2009

⁶ Motor asíncrono trifásico, En línea <<http://es.scribd.com/doc/93504625/Motor-asincrono-trifasico#scribd>> Citado 07 de febrero 2015

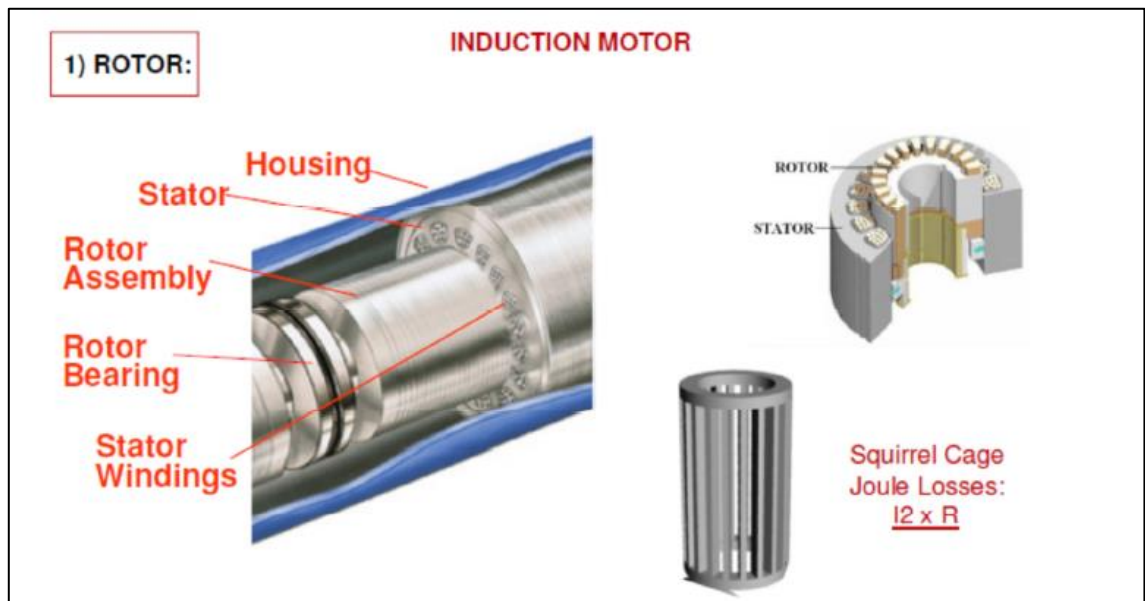
Figura 11. Bobinas Inductoras



A,B,C representan las tres bobinas inductoras, la circulación del sistema trifásico de corriente produce un campo magnético giratorio, este sistema de tres bobinas produce un par de polos (norte y sur).

Los motores de inducción o de 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 actúan sobre el rotor (jaula de ardilla) 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.⁷

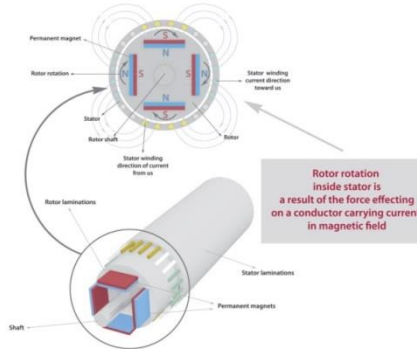
Figura 12. Bobinas y Rotores Inductores



⁷ SECZON L, SHAPOSHNIK D, AYALA C. Borets International. Experiencia de aplicación y operación de motores de magneto permanente en sistemas electro sumergibles: Historias de éxito y lecciones aprendidas, 2014

La aplicación del Motor de Imanes permanentes en sistemas electro sumergible utiliza imanes en el rotor del motor, eliminando las pérdidas de Joule, incrementando la eficiencia del mismo.

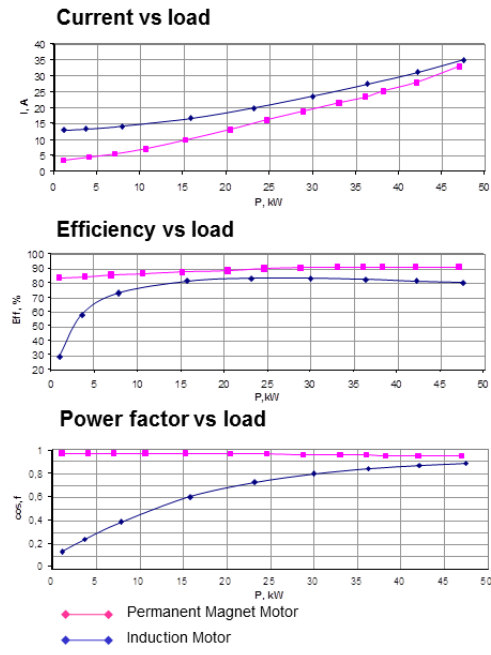
Figura 13. Rotor PMM



En los motores 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 la corriente consumida en lo arranques sea menor logrando arranques suaves (sin picos de corriente).

1.5 Ventajas del Motor PMM vs Motor de Inducción

Figura 14. Ventajas PMM vs Inducción

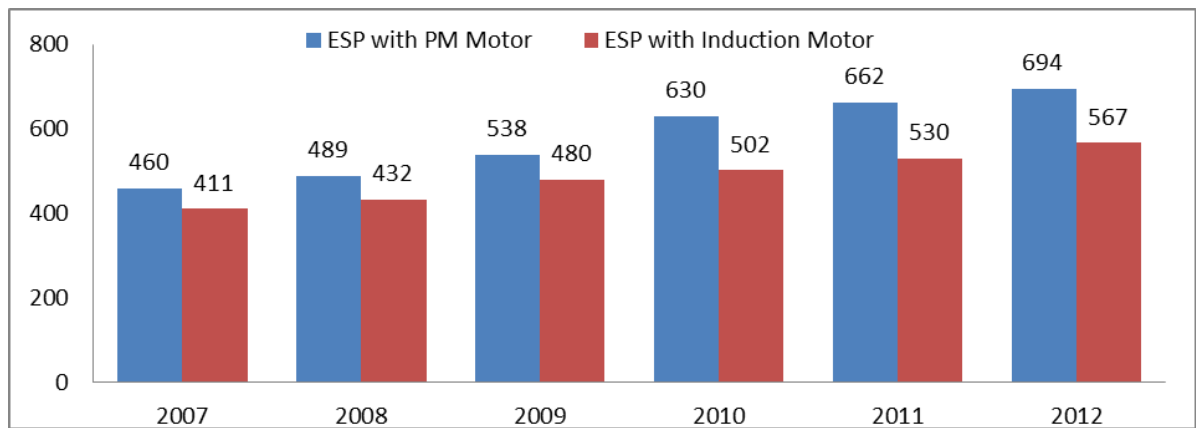


- Mejora de la eficiencia: 14%
- Mejor Factor de potencia: 15%.
- 40%. Menor peso y tamaño por efectos de mayor densidad de potencia generada por los imanes en el rotor.
- 15% promedio menos de corriente de operación.
- Corriente de vacío menor en un 85%.
- Menor temperatura de operación.
- No se tiene deslizamiento, es decir la rotación es sincrónica.

⁸Ventajas del tiempo de vida: Inducción vs. PM Motors.

El análisis estadístico se muestra que la vida (RUNLIFE) de sistemas BES con PMM está excediendo el runlife de equipos BES con motor de inducción. Es resultado de la alta calidad y fiabilidad de los motores. Los resultados de la comparación se enumeran en la tabla siguiente.

Figura 15. Comparativo de motores instalados (inducción vs pmm) mercado ruso

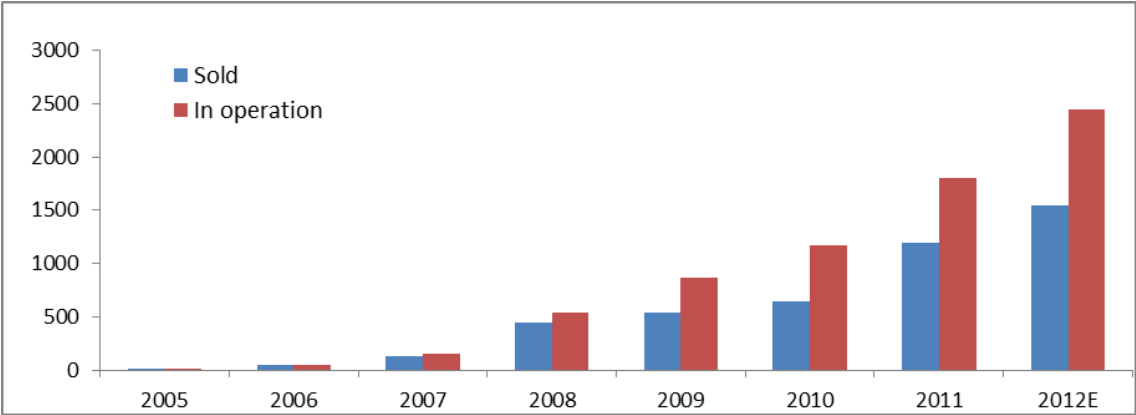


La experiencia de la aplicación de PMM en el mercado Ruso.

El motor de imán permanente se ha introducido en Rusia desde el año 2005. A partir de ese momento en el volumen de entrega PMM aumentado de 10 a 1.400 unidades por año. En este momento hay alrededor de 2.400 PMMS en funcionamiento en toda Rusia.

⁸ BORETS INTERNATIONAL. ESP

Figura 16. Motores PMM en operación



2. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS POZOS SELECCIONADOS

Para el presente el presente trabajo fueron seleccionados 3 pozos de los llanos orientales. Las características con las que debían cumplir los pozos eran las siguientes:

- Contar con levantamiento artificial de bombeo electro sumergible
- Pruebas de producción
- Análisis de calidad de energía

Lo anterior es necesario para poder realizar un buen análisis del consumo de energía necesaria para producir los mismos barriles con dos equipos de características similares pero que uno de ellos cuente con la tecnología de motores PMM.

A continuación se describen cada uno de los pozos seleccionados para el estudio.

POZO A

Caudal de Comparación: 4000 Bfpd - 60 Hz

Equipo Anterior

Bomba: SN3600 – 52 etapas

Motor: 263 HP, 61 Amp

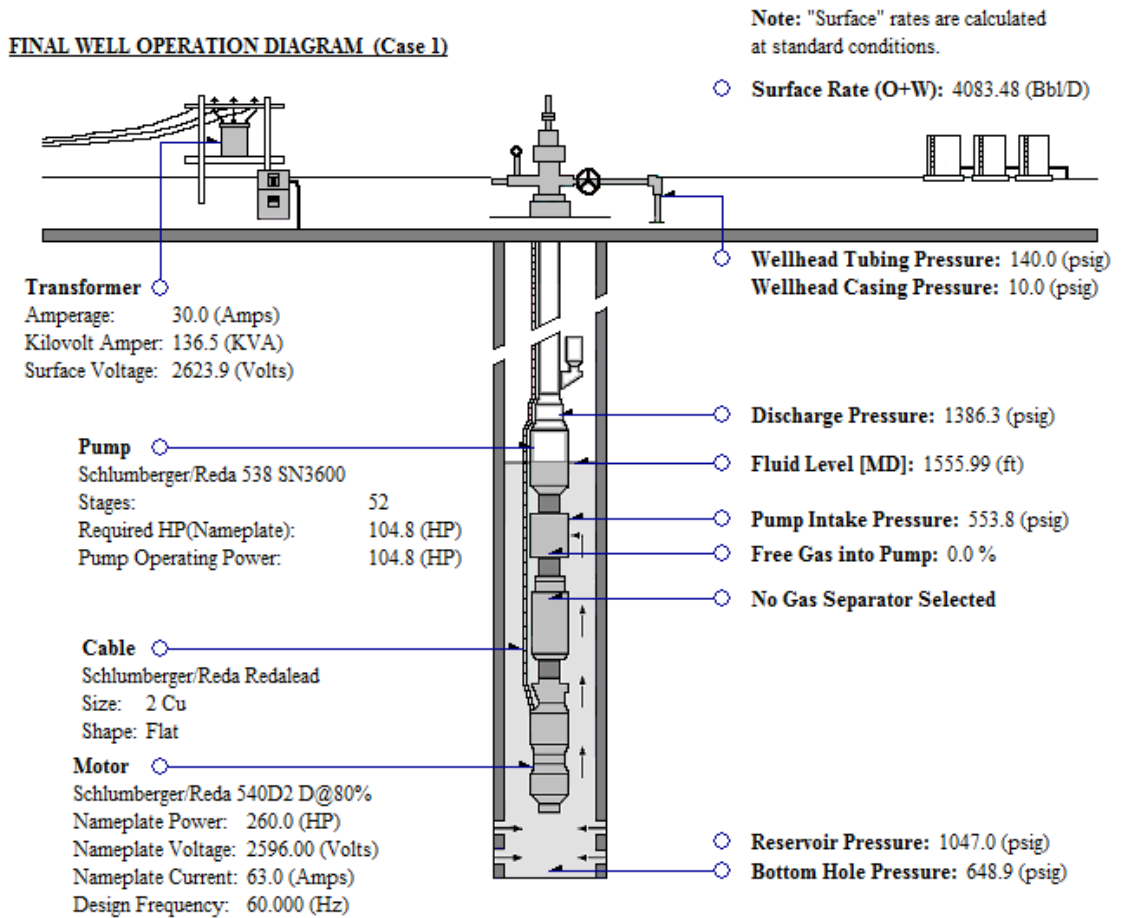
Tabla 1. Parámetros de operación Pozo A:

	IN VSD			OUT VSD			XFMR		
	A-B	A-C	B-C	A-B	A-C	B-C	A-B	A-C	B-C
V F-F	473	473	473	453	452	452	2570	2560	2571
V F-T	273	273	273	287	284	280	1493	1530	1428
AMP	140	137	139	183	183	184	32	32	31

PRESSION INTAKE	563.7	PSI	VIBR. X	0.1	g
PRESSION DESCARGA		PSI	VIBR. Y		g
TEMP. INTAKE	146.7	°F	L.V		V
TEMP. MOTOR	163.4	°F	C.L	0.04	mA
THP	180	PSI	BFPD	3998	
CHP	-	PSI			
THT	150	°F			
CHT	-	°F			

THD VOLT %	THD CORRIENTE %	POTENCIA		POTENCIA TOTAL	POTENCIA	FACTOR DE
		TOTAL	KW	KVA	TOTAL	POTENCIA
6.0	44.5	102.7		103.4	20	0.89
					KVAR	"FP"

Figura 17. Estado Actual del pozo A



DATOS DEL MOTOR

Fabricantes:	Schlumberger / Reda		
Serie:	540D2		
Tipo:	D@80% - Double		
Potencia en la Placa de Identificación, HP:	260.0	Frecuencia de la Placa de Identificación, Hz:	
Voltaje de la Placa de Identificación, Volts:	2596.00		
Corriente de la Placa de Identificación, Amp:	63.0		
Ajustar por Deslizamiento del Motor:	Si	Corriente de Operación, Amps:	
Frecuencia de Diseño, Hz:	60.0	Voltaje de Operación, Volts:	
Carga de operación del Motor, HP:	104.8	Factor de Potencia de Operación, frac:	
(@ Frecuencia de Diseño)			
Carga Operativa del Motor, %:	40.31	Eficiencia de Operación, %:	
Velocidad de Operación, RPM:	3548	Velocidad del Fluido, ft/sec:	
Temperatura del Fluido del Pozo, °F:	144.3	Velocidad del aumento del calor, °F:	
Aumento de Temperatura en la Cubierta, °F:	4.5	Calentamiento Armónico debido a la VSD, °F:	
Aumento de Temp. de Bobina sobre cubierta, °F:	40.0	Temp. Total de la Bobina, °F:	

	<u>Catálogo</u>	<u>Actual</u>
Total de Etapas	52	52
Deslizamiento en las Etapas	0	0
Cabeza Dinámica Total (TDH), ft	1896.38	1920.89
Caudal en Superficie (P+A), Bbl/D	4000.33	4083.48
Promedio de Caudal por Etapas (P+G+A), Bbl/D	4064.81	4149.31
Presión de Entrada a la Bomba, psig	562.0	553.8
Potencia de Operación, HP	104.8	109.0
Eficiencia de la Bomba, %	53.3	55.5
Velocidad de Operación, RPM	3500	3548

	<u>Diseño</u>
	<u>Frec.</u>
Frecuencia, Hz	60
Temp.del Conductor, °F	152.1
Máx. Amp Permisible, Amps	188.5
Amperaje, Amps	30.0
Kilovoltio Amperio, KVA	136.5
Kilovatios, kW	102.7
Kilovatios, \$/mes	17246
Voltaje de Superficie, Volts	2623.9
Caída de Voltaje @ 68.0 °F, Volts	23.9
Caída de Voltaje @ 147.0 °F BHT, Volts	27.9
Pérdida de Kilovatios, kW	1.1
Costo de la Pérdida de Voltaje, \$/mes	183
Voltaje Requerido por el Motor, Volts	2596.0
Voltaje de Fondo del Motor, Volts	2596.0
Caída de Voltaje In-rush del Motor, Volts	111.6
Mínimo Voltaje de Arranque del Motor , Volts	2512.3
Relación Arranque/Operación, Relación	1.0

Nota: Los caudales en "superficie" son calculados a condiciones estándar

Figura 18. Curva estándar de la bomba en el pozo A

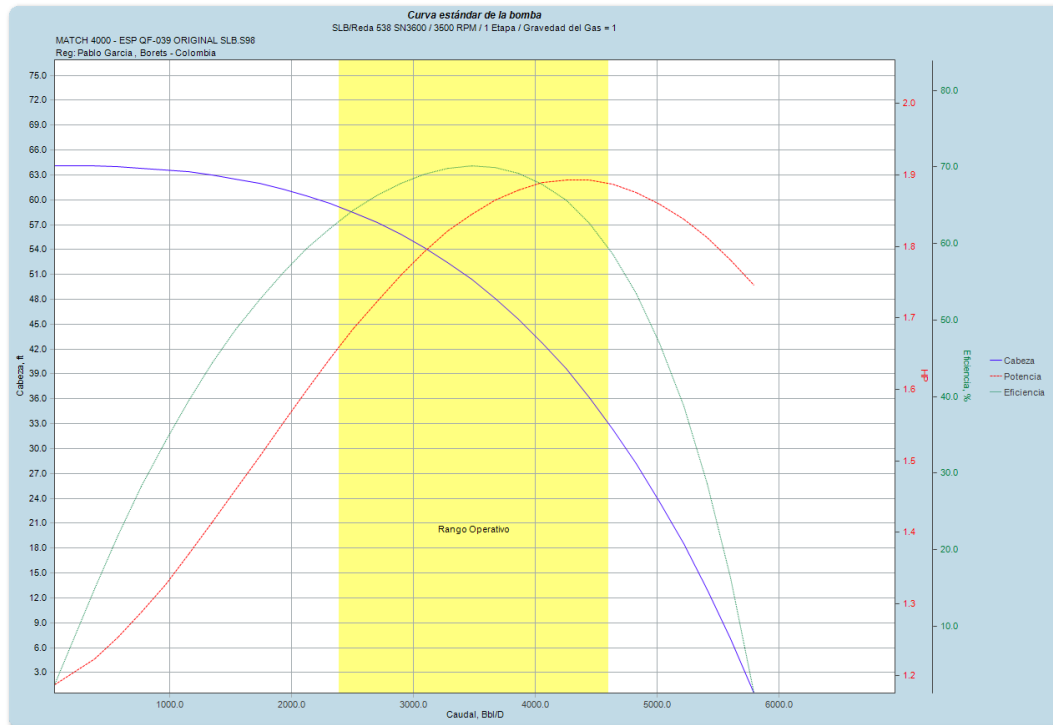
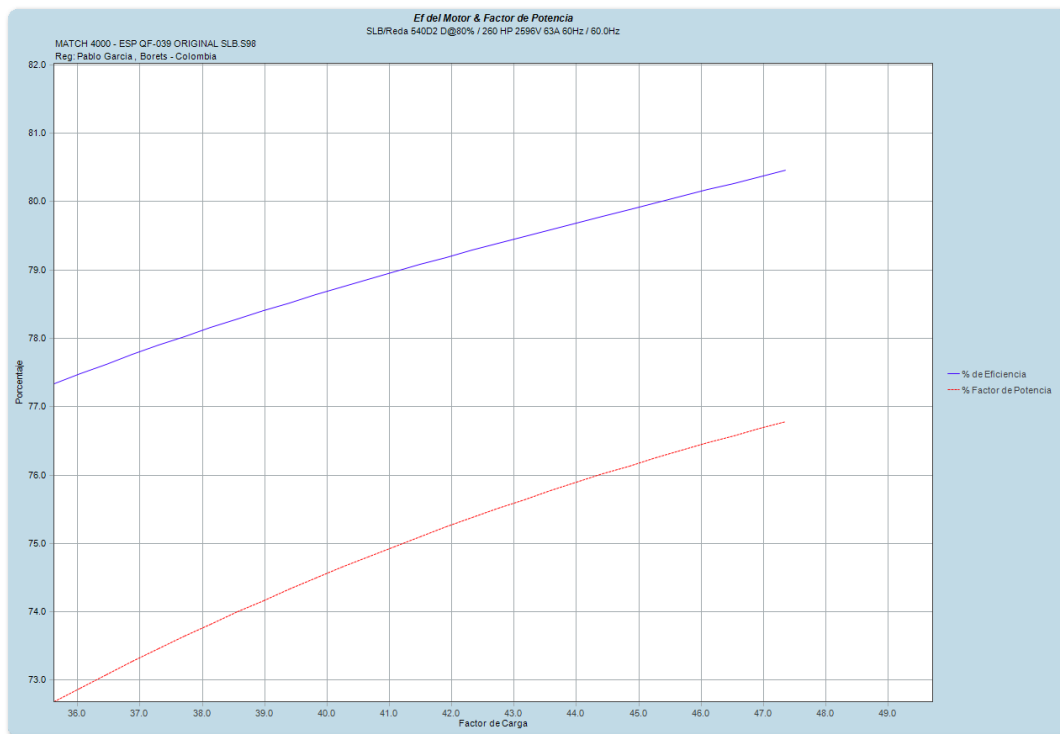


Figura 19. Curva factor de potencia en el pozo A



POZO B

Caudal de comparación: 8250 BFPD - 63 Hz

Equipo Anterior

Bomba: SN-8000 – 52 etapas

Motor: 240 HP, 2434 V, 57 Amp

Tabla 2. Parámetros de operación Pozo B:

	IN VSD			OUT VSD			XFMR		
	A-B	A-C	B-C	A-B	A-C	B-C	A-B	A-C	B-C
V F-F	481	482	481	354	355	355	1935	1929	1935
V F-T	277	278	279	242	240	240	1150	1101	1105
AMP	135	138	135	211	210	204	32	39	36

PRESION INTAKE	721.6	PSI	VIBR. X	1.042	g
PRESION DESCARGA	-	PSI	VIBR. Y		g
TEMP. INTAKE	149.3	°F	L.V		V
TEMP. MOTOR	187	°F	C.L	0.204	mA

THP	132	PSI	BFPD	8066	
CHP	0	PSI			
THT	144	°F			
CHT	-	°F			

THD VOLT %	THD CORRIENTE %	POTENCIA TOTAL KW	POTENCIA TOTAL KVA	POTENCIA TOTAL KVAR	FACTOR DE POTENCIA "FP"
9.5	29.2	107.2	108.5	13.6	0.93

Figura 20. Estado Actual del pozo B

DATOS DEL MOTOR

Fabricantes:	Schlumberger / Reda		
Serie:	540-I		
Tipo:	M - Double		
Potencia en la Placa de Identificación, HP:	240.0	Frecuencia de la Placa de Identificación, Hz:	60
Voltaje de la Placa de Identificación, Volts:	2700.00		
Corriente de la Placa de Identificación, Amp:	58.5		
Ajustar por Deslizamiento del Motor:	Si	Corriente de Operación, Amps:	47.0
Frecuencia de Diseño, Hz:	63.0	Voltaje de Operación, Volts:	2835.00
Carga de operación del Motor, HP:	213.4	Factor de Potencia de Operación, frac:	0.855
(@ Frecuencia de Diseño)			
Carga Operativa del Motor, %:	84.69	Eficiencia de Operación, %:	85.40
Velocidad de Operación, RPM:	3645	Velocidad del Fluido, ft/sec:	8.559
Temperatura del Fluido del Pozo, °F:	137.9	Velocidad del aumento del calor, °F:	3.0
Aumento de Temperatura en la Cubierta, °F:	3.5	Calentamiento Armónico debido a la VSD, °F:	8.1
Aumento de Temp. de Bobina sobre cubierta, °F:	47.6	Temp. Total de la Bobina, °F:	189.1

Si el Filtro de la Onda Seno se usa en la Operación del VSD, el calentamiento Armónico es cero.

	Diseño
	<u>Frec.</u>
Frecuencia, Hz	63
Temp.del Conductor, °F	157.0
Máx. Amp Permissible, Amps	190.5
Amperaje, Amps	47.0
Kilovoltio Amperio, KVA	234.7
Kilovatios, kW	200.7
Kilovatios, \$/mes	0
Voltaje de Superficie, Volts	2881.8
Caída de Voltaje @ 68.0 °F, Volts	40.6
Caída de Voltaje @ 140.0 °F BHT, Volts	46.8
Pérdida de Kilovatios, kW	3.3
Costo de la Pérdida de Voltaje, \$/mes	0
Voltaje Requerido por el Motor, Volts	2835.0
Voltaje de Fondo del Motor, Volts	2835.0
Caída de Voltaje In-rush del Motor, Volts	187.3
Mínimo Voltaje de Arranque del Motor , Volts	2694.5
Relación Arranque/Operación, Relación	1.0

Figura 21. Curva estándar de la bomba en el pozo B

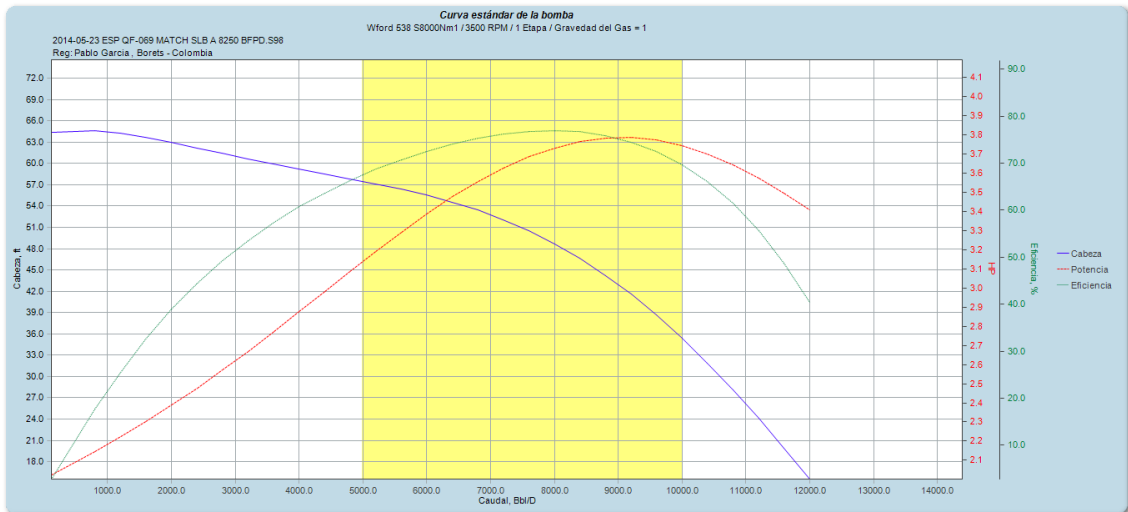
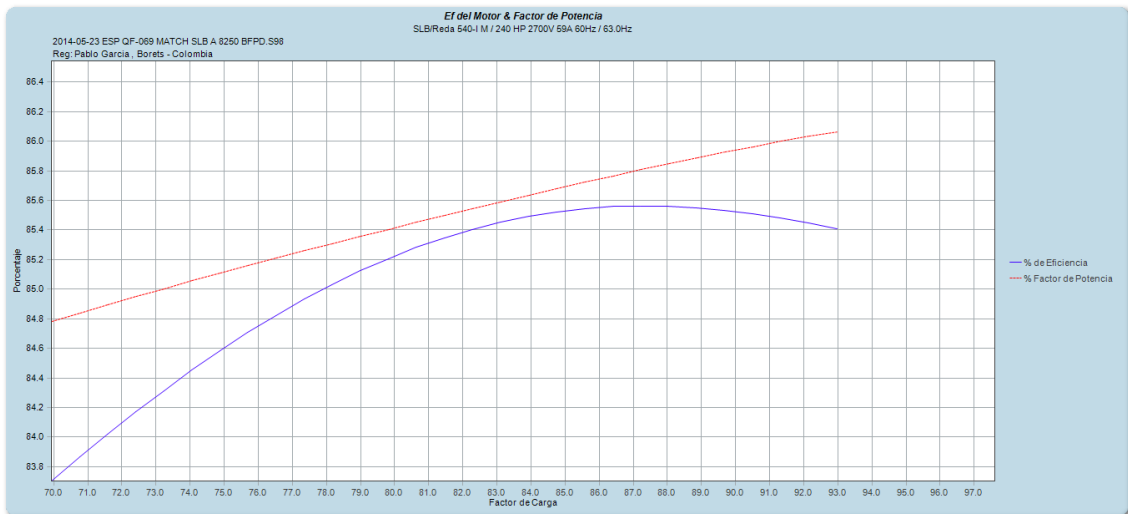


Figura 22. Factor de potencia del motor en el pozo B



POZO C

Caudal de comparación: 7900 BFPD - 64 HZ

Equipo Anterior

Bomba: TE-7000 – 53 etapas

Motor: 225 HP, 2455 V, 57 Amp

Tabla 3. Parámetros de operación Pozo C:

	IN VSD			OUT VSD			XFMR		
	A-B	A-C	B-C	A-B	A-C	B-C	A-B	A-C	B-C
V F-F	472	473	472	413	415	413	2424	2433	2417
V F-T	272	274	274	262	264	265	1398	1401	1400
AMP	253	246	248	326	329	329	53	55	51

PRESION INTAKE	660.1	PSI	VIBR. X	2.91	g
PRESION DESCARGA	-	PSI	VIBR. Y	2.86	g
TEMP. INTAKE	182.8	°F	L.V	39.7	V
TEMP. MOTOR	182.8	°F	C.L	9.640	mA

THP	260	PSI	BFPD	7429
CHP	-	PSI		
THT	136	°F		
CHT	-	°F		

IN VSD					
THD VOLT %	THD CORRIENTE %	POTENCIA TOTAL KW	POTENCIA TOTAL KVA	POTENCIA TOTAL KVAR	FACTOR DE POTENCIA "FP"
6.6	6.0	202.6	203.6	33.2	0.99

Figura 23. Estado Actual del pozo B

<u>DATOS DEL MOTOR</u>			
Fabricantes:	GE ESP		
Serie:	540		
Tipo:	TR5 - Single		
Potencia en la Placa de Identificación, HP:	225.0	Frecuencia de la Placa de Identificación, Hz:	60
Voltaje de la Placa de Identificación, Volts:	2235.00		
Corriente de la Placa de Identificación, Amp:	64.0		
Ajustar por Deslizamiento del Motor:	Si	Corriente de Operación, Amps:	55.3
Frecuencia de Diseño, Hz:	64.0	Voltaje de Operación, Volts:	2384.00
Carga de operación del Motor, HP:	217.3	Factor de Potencia de Operación, frac:	0.858
(@ Frecuencia de Diseño)			
Carga Operativa del Motor, %:	90.55	Eficiencia de Operación, %:	82.94
Velocidad de Operación, RPM:	3695	Velocidad del Fluido, ft/sec:	8.152
	<u>Catálogo</u>	<u>Actual</u>	
Total de Etapas	53	53	
Deslizamiento en las Etapas	0	0	
Cabeza Dinámica Total (TDH), ft	2438.03	2405.47	
Caudal en Superficie (P+A), Bbl/D	7910.87	7776.20	
Promedio de Caudal por Etapas (P+G+A), Bbl/D	8118.72	7980.50	
Presión de Entrada a la Bomba, psig	491.8	497.0	
Potencia de Operación, HP	217.3	211.3	
Eficiencia de la Bomba, %	65.0	65.0	
Velocidad de Operación, RPM	3733	3695	

	<u>Diseño</u>
	<u>Frec.</u>
Frecuencia, Hz	64
Máx. Amp Permissible, Amps	162.7
Amperaje, Amps	55.3
Kilovoltio Amperio, KVA	236.5
Kilovatios, kW	202.9
Kilovatios, \$/mes	35099
Voltaje de Superficie, Volts	2470.8
Caída de Voltaje @ 68.0 °F, Volts	75.8
Caída de Voltaje @ 136.0 °F BHT, Volts	86.8
Pérdida de Kilovatios, kW	7.1
Costo de la Pérdida de Voltaje, \$/mes	1232
Voltaje Requerido por el Motor, Volts	2384.0
Voltaje de Fondo del Motor, Volts	2384.0
Caída de Voltaje In-rush del Motor, Volts	347.2
Mínimo Voltaje de Arranque del Motor, Volts	2123.6
Relación Arranque/Operación, Relación	0.9

Nota: Los caudales en "superficie" son calculados a condiciones estándar

Figura 24. Curva estándar de la bomba en el pozo C

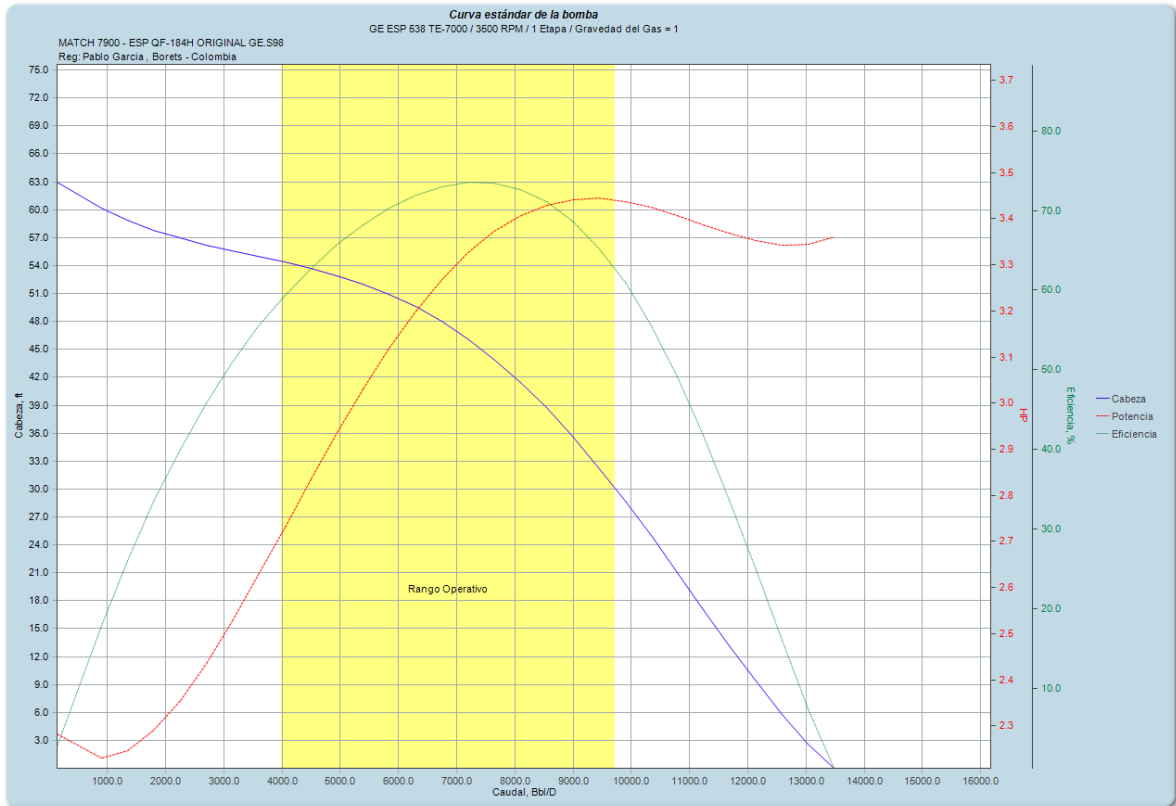
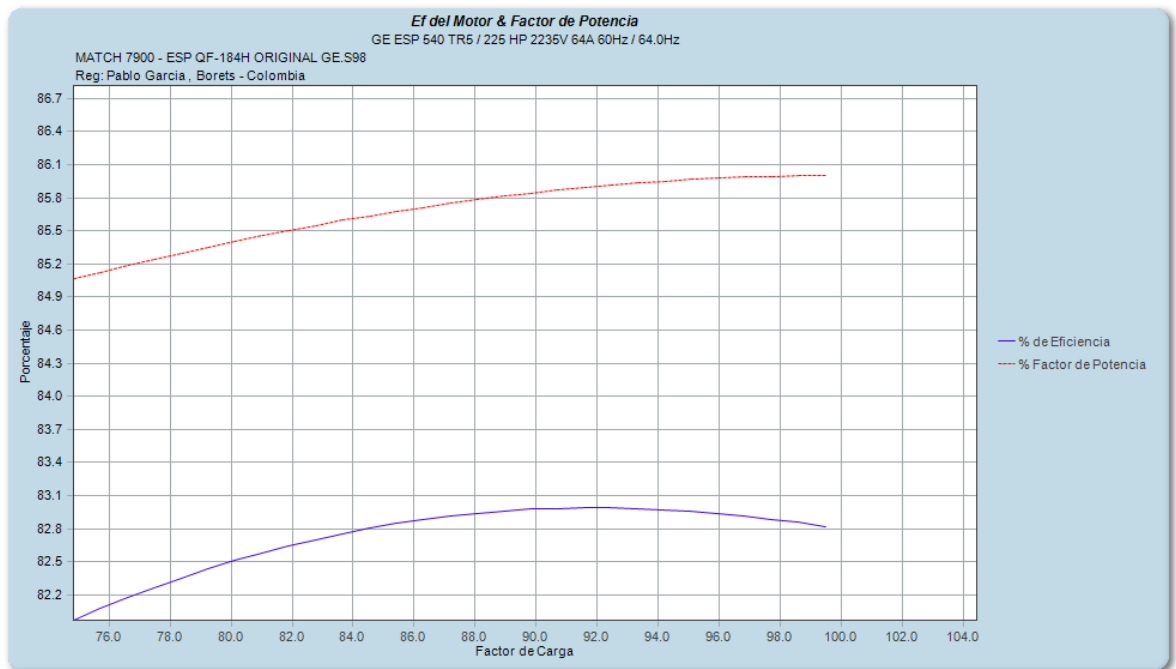


Figura 25. Factor de potencia del motor en el pozo C



Los parámetros de operación para los 3 pozos se encuentran resumidos a continuación:

Tabla 4. Comparación de parámetros actuales en los pozos A, B y C:

	POZO A	POZO B	POZO C
Profundidad	2795.0	3037.0	2838.0
BFPD	4000.0	8249.0	7429.0
BSW	95.5%	95.3%	88.8%
API	13.8	13.9	13.8
IP	10.3	69.1	26.9
KW	102.7	207.7	202.6
FP	0.89	0.93	0.99

Los pozos son apagados de manera manual, y con los datos suministrados se procede a realizar los nuevos diseños con la implementación del motor PMM

3. DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA LOS POZOS SELECCIONADOS

Con el objetivo de obtener una prueba confiable, se diseñan equipos para cada uno de los pozos mencionados anteriormente con equipos de características similares, tratando de garantizar que las condiciones de operación sean lo más parecidos a las corridas anteriores y así poder obtener un resultado comparable.

POZO A

CAUDAL DE COMPARACION: 4000 BFPD - 56 Hz

Equipo - Marca BORETS

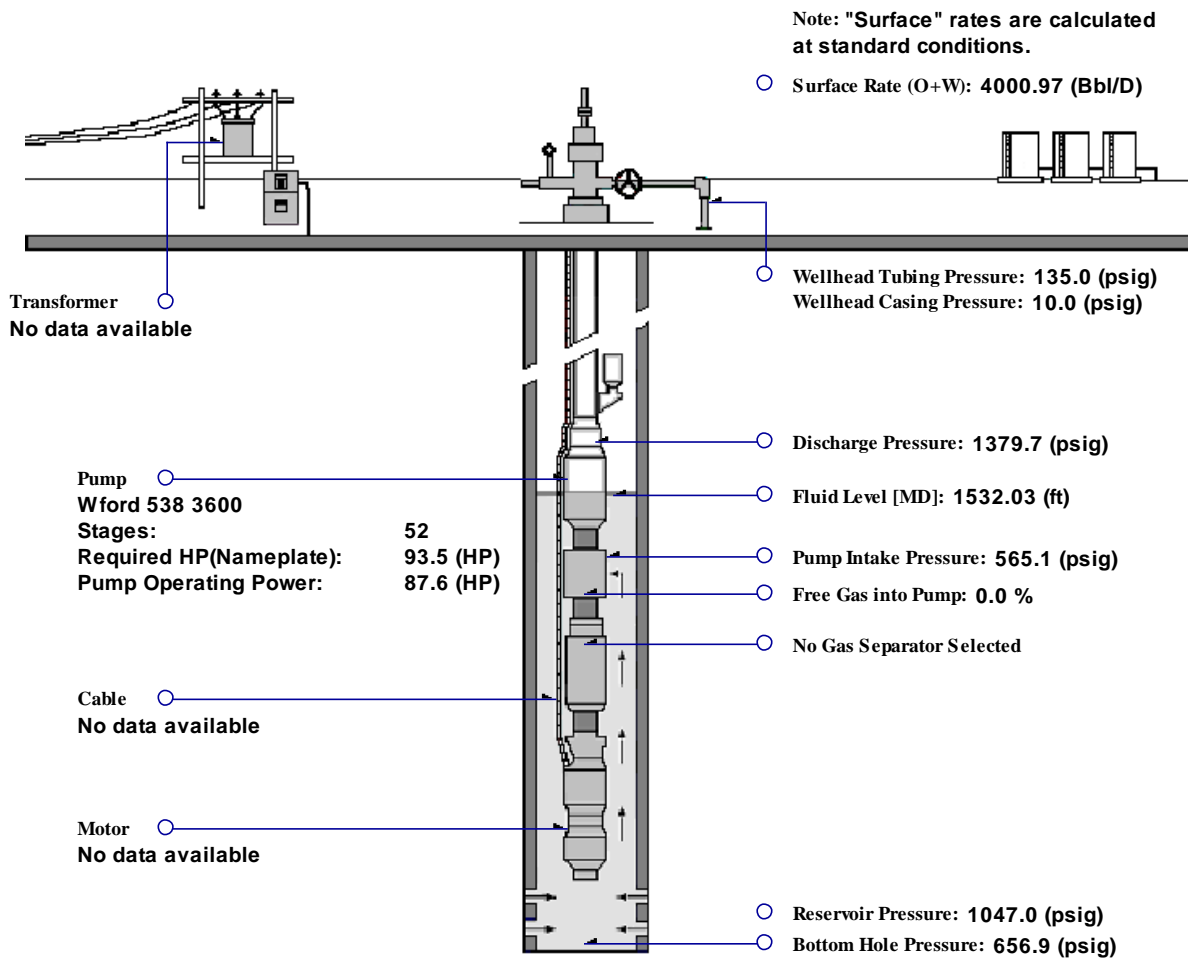
Bomba: 538-3600 – 52 etapas

Motor: PMM 177 HP, 3216 V, 32.5 Amp

Figura 26. Estado Nuevo del pozo A

<u>DATOS DEL MOTOR</u>			
Fabricantes:	Borets_DC		
Serie:	117		
Tipo:	5VEDBT110 - Single		
Potencia en la Placa de Identificación, HP:	177.0	Frecuencia de la Placa de Identificación, Hz:	60
Voltaje de la Placa de Identificación, Volts:	3216.00		
Corriente de la Placa de Identificación, Amp:	32.5		
Ajustar por Deslizamiento del Motor:	Si	Corriente de Operación, Amps:	16.6
Frecuencia de Diseño, Hz:	56.2	Voltaje de Operación, Volts:	3012.32
Carga de operación del Motor, HP: (@ Frecuencia de Diseño)	87.5	Factor de Potencia de Operación, frac:	0.960
Carga Operativa del Motor, %:	52.80	Eficiencia de Operación, %:	91.80
Velocidad de Operación, RPM:	3372	Velocidad del Fluido, ft/sec:	2.580

** Los cálculos del motor de CC se basan en las recomendaciones de Borets. Póngase en contacto con Borets para obtener más información.



DATOS DE LA BOMBA 1

Fabricantes: Wford
Serie: 538
Modelo: 3600
& Fuente de Datos del Equipo:

Mínimo Caudal Recomendado, Bbl/D: 2358.47**
Máximo Caudal Recomendado, Bbl/D: 4520.41**
Caudal a la Máxima Eficiencia, Bbl/D: 3439.44**
Potencia a la Máxima Eficiencia, HP: 85.0**
Frecuencia, Hz: 56.2

** = Corregida para la Frecuencia & Viscosidad

Número de Etapas: 52
Etapas con Gas Libre: 0

Factores de corrección por Viscosidad

Introducidas por el Usuario

Caudal: 1.020
Cabeza: 1.020
Potencia: 1.068
Eficiencia: 0.974
Viscosidad: Fluido

Si
Si
Si

DATOS DEL CABLE

Fabricantes: Schlumberger / Reda
Tipo: Redalead
Tamaño: 2 Cu
Forma: Flat
Tipo de Conductor: Solid
Máx.Temp., °F: 450.0
Longitud del Cable, ft: 2897.00

Calcular: Voltaje de Superficie
Costo de la Electricidad, \$/kWH: 0.23

Nota: *Indica que el cable está fuera de rango!

Diseño
Frec.

Frecuencia, Hz	56
Temp.del Conductor, °F	146.7
Máx. Amp Permissible, Amps	188.5
Amperaje, Amps	16.6
Kilovoltio Amperio, KVA	87.0
Kilovatios, kW	83.6
Kilovatios, \$/mes	14029
Voltaje de Superficie, Volts	3027.7
Caída de Voltaje @ 68.0 °F, Volts	13.2
Caída de Voltaje @ 147.0 °F BHT, Volts	15.4
Pérdida de Kilovatios, kW	0.4
Costo de la Pérdida de Voltaje, \$/mes	71
Voltaje Requerido por el Motor, Volts	3012.3
Voltaje de Fondo del Motor, Volts	3012.3
Caída de Voltaje In-rush del Motor, Volts	61.7
Mínimo Voltaje de Arranque del Motor, Volts	2966.1
Relación Arranque/Operación, Relación	1.0

Nota: Los caudales en "superficie" son calculados a condiciones estándar

Figura 27. Curva estándar de la bomba Borets en el pozo A

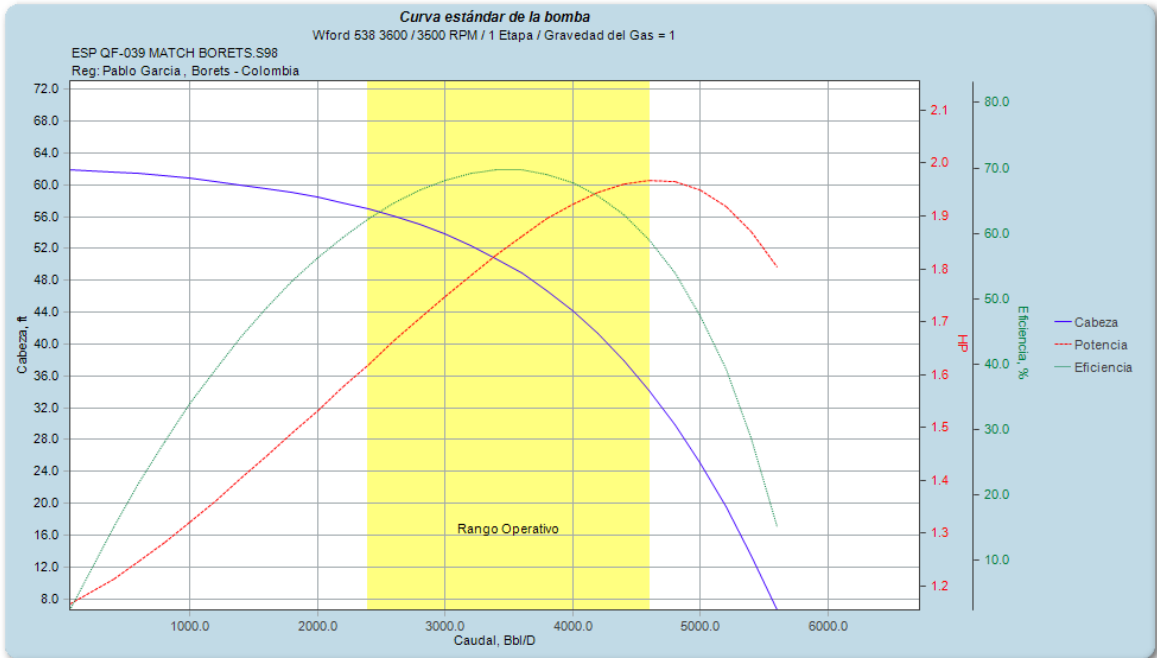
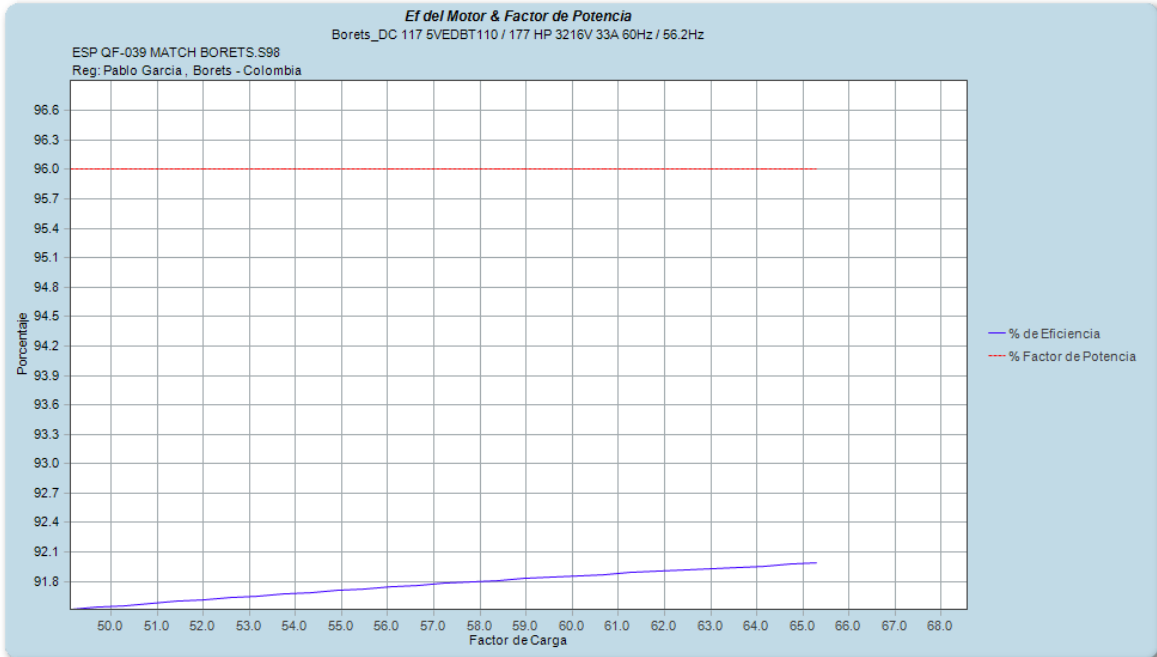


Figura 28. Factor de potencia del motor PMM en el pozo A



POZO B

CAUDAL DE COMPARACION: 8250 BFPD - 55 Hz

Equipo - Marca BORETS

Bomba: 538-9000 – 61 etapas

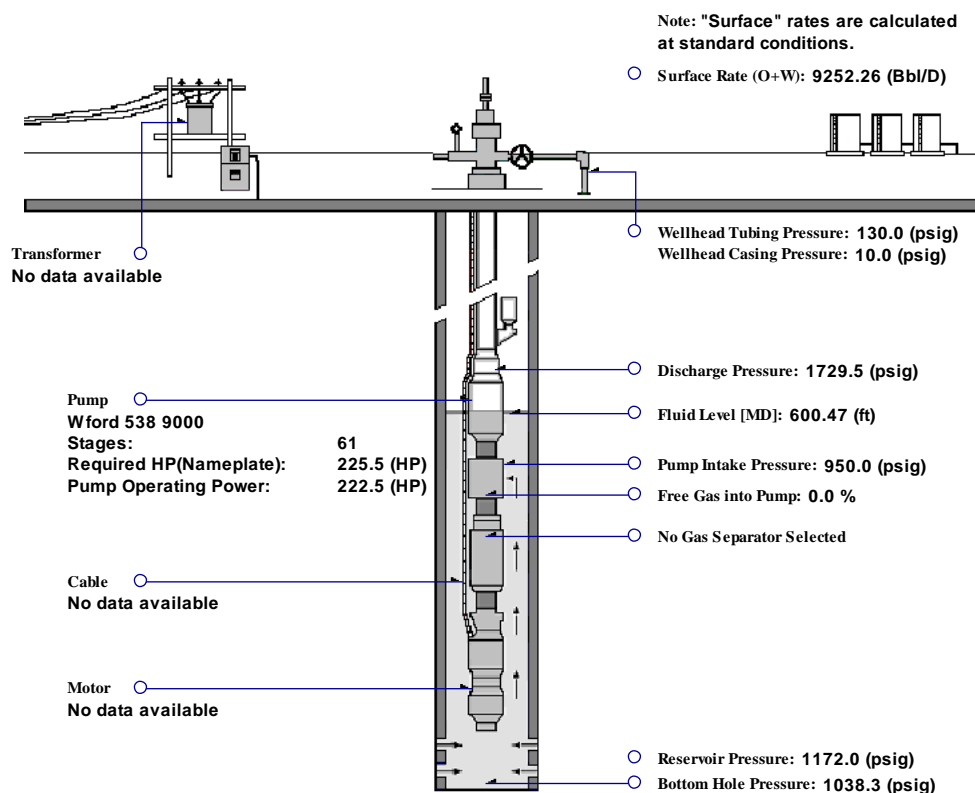
Motor: PMM 321.9 HP, 2556 V, 71 Amp

Figura 29. Estado Nuevo del pozo B

DATOS DEL MOTOR

Fabricantes:	Borets_DC		
Serie:	117		
Tipo:	1VEDBT200 - Single		
Potencia en la Placa de Identificación, HP:	321.9	Frecuencia de la Placa de Identificación, Hz:	60
Voltaje de la Placa de Identificación, Volts:	2556.00		
Corriente de la Placa de Identificación, Amp:	71.0		
Ajustar por Deslizamiento del Motor:	Si	Corriente de Operación, Amps:	45.0
Frecuencia de Diseño, Hz:	55.0	Voltaje de Operación, Volts:	2343.00
Carga de operación del Motor, HP:	181.4	Factor de Potencia de Operación, frac:	0.960
(@ Frecuencia de Diseño)			
Carga Operativa del Motor, %:	61.48	Eficiencia de Operación, %:	90.47
Velocidad de Operación, RPM:	5300	Velocidad del Fluido, ft/sec:	5.411

** Los cálculos del motor de CC se basan en las recomendaciones de Borets. Póngase en contacto con Borets para obtener más información.



DATOS DE LA BOMBA 1

Fabricantes: Wford
 Serie: 538
 Modelo: 9000
 & Fuente de Datos del Equipo:

Mínimo Caudal Recomendado, Bbl/D: 4445.57**
 Máximo Caudal Recomendado, Bbl/D: 9780.26**
 Caudal a la Máxima Eficiencia, Bbl/D: 7779.75**
 Potencia a la Máxima Eficiencia, HP: 179.4**
 Frecuencia, Hz: 55.0

** = Corregida para la Frecuencia & Viscosidad

Número de Etapas: 61
 Etapas con Gas Libre: 0

Factores de corrección por Viscosidad

Introducidas por el Usuario

Caudal:	0.943	Si
Cabeza:	0.943	Si
Potencia:	1.096	Si
Eficiencia:	0.812	
Viscosidad: Fluido		

Diseño

Catálogo

Cabeza Dinámica Total (TDH), ft:	1627.23	1626.75
Caudal en Superficie (P+A), Bbl/D:	8445.00	8443.89
Promedio de Caudal por Etapas (P+G+A), Bbl/D:	N/A	8554.01
Presión de Entrada a la Bomba, psig:	960.5	960.5
Potencia de Operación, HP:	N/A	181.4
Eficiencia de la Bomba, %:	N/A	55.8

**Diseño
Frec.**

Frecuencia, Hz	55
Temp.del Conductor, °F	155.4
Máx. Amp Permisible, Amps	190.5
Amperaje, Amps	45.0
Kilovoltio Amperio, KVA	186.3
Kilovatios, kW	178.8
Kilovatios, S/mes	0
Voltaje de Superficie, Volts	2387.9
Caída de Voltaje @ 68.0 °F, Volts	38.9
Caída de Voltaje @ 140.0 °F BHT, Volts	44.9
Pérdida de Kilovatios, kW	3.4
Costo de la Pérdida de Voltaje, S/mes	0
Voltaje Requerido por el Motor, Volts	2343.0
Voltaje de Fondo del Motor, Volts	2343.0
Caída de Voltaje In-rush del Motor, Volts	179.4
Mínimo Voltaje de Arranque del Motor, Volts	2208.4
Relación Arranque/Operación, Relación	0.9

Nota: Los caudales en "superficie" son calculados a condiciones estándar

Figura 30. Curva estándar de la bomba Borets en el pozo B

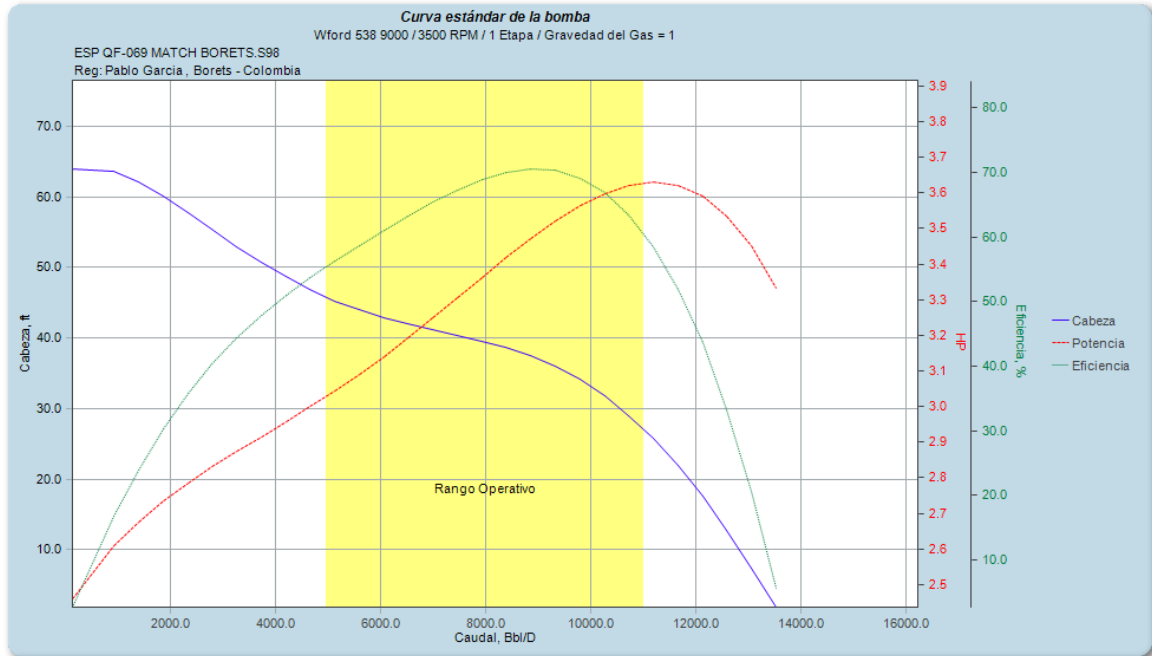
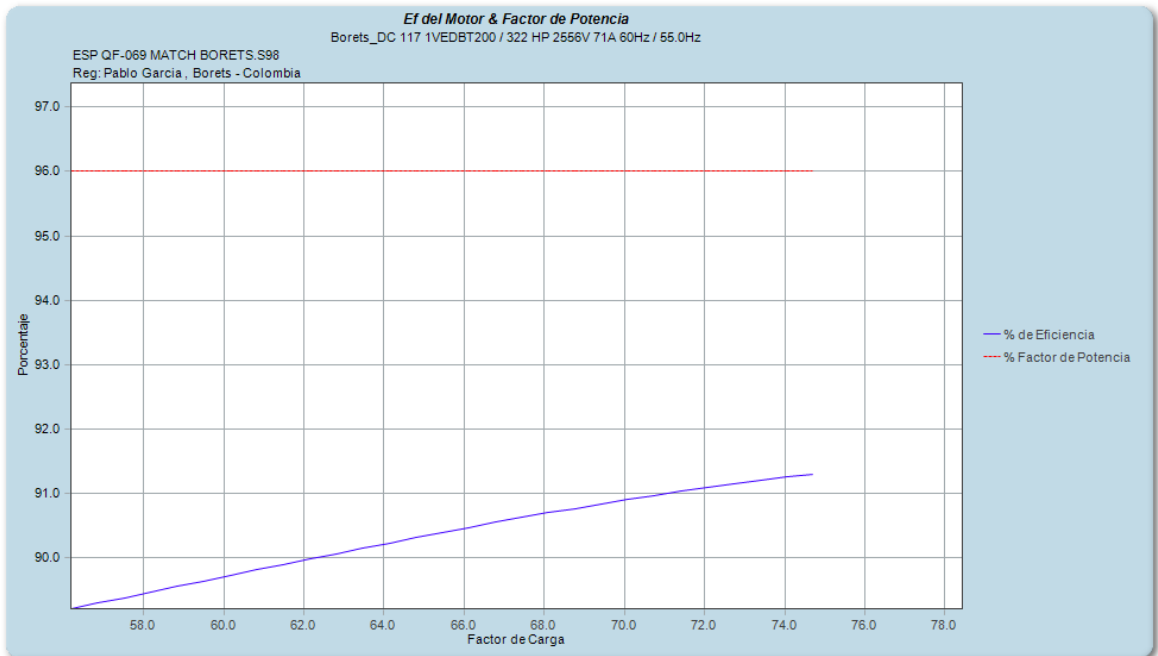


Figura 31. Factor de potencia del motor PMM en el pozo B



POZO C

CAUDAL DE COMPARACION: 7840 BFPD - 57.1 Hz

Equipo - Marca BORETS

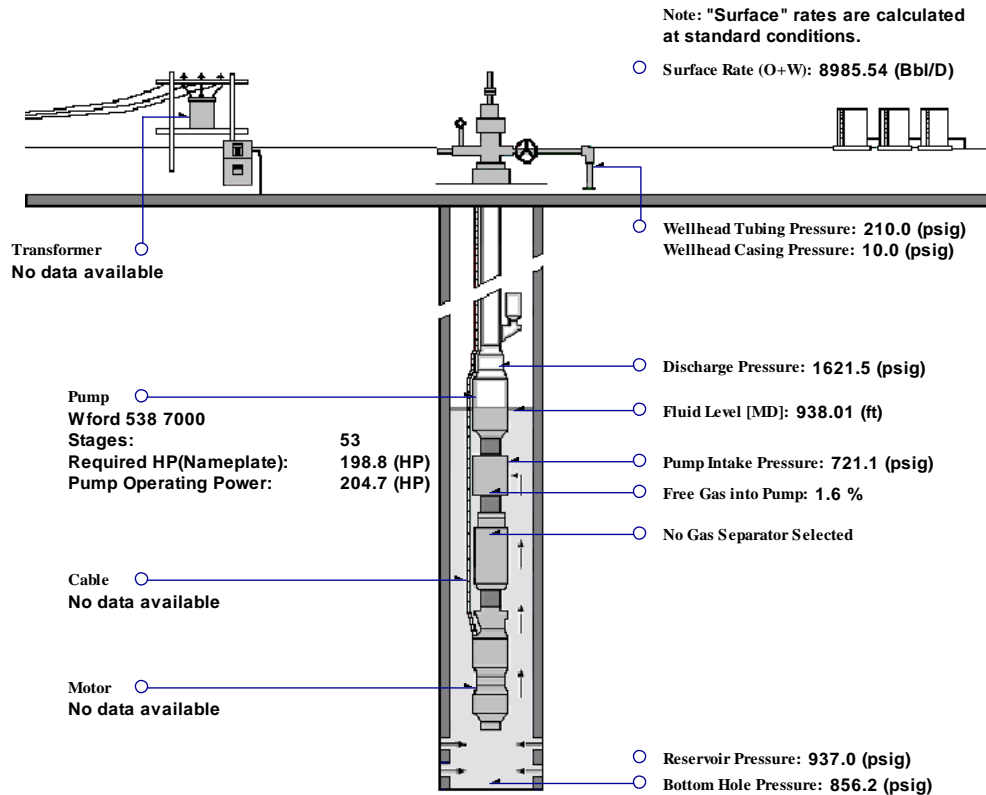
Bomba: 538-7000 – 57.1 etapas

Motor: PMM 321.9 HP, 2556 V, 71 Amp

Figura 32. Estado Nuevo del pozo C

DATOS DEL MOTOR			
Fabricantes:	Borets_DC		
Serie:	117		
Tipo:	1VEDBT200 - Single		
Potencia en la Placa de Identificación, HP:	321.9	Frecuencia de la Placa de Identificación, Hz:	60
Voltaje de la Placa de Identificación, Volts:	2556.00		
Corriente de la Placa de Identificación, Amp:	71.0		
Ajustar por Deslizamiento del Motor:	Si	Corriente de Operación, Amps:	38.0
Frecuencia de Diseño, Hz:	57.1	Voltaje de Operación, Volts:	2432.46
Carga de operación del Motor, HP:	160.4	Factor de Potencia de Operación, frac:	0.960
(@ Frecuencia de Diseño)			
Carga Operativa del Motor, %:	52.36	Eficiencia de Operación, %:	89.33
Velocidad de Operación, RPM:	3426	Velocidad del Fluido, ft/sec:	5.057

** Los cálculos del motor de CC se basan en las recomendaciones de Borets. Póngase en contacto con Borets para obtener más información.



DATOS DE LA BOMBA 1

Fabricantes: Wford
Serie: 538
Modelo: 7000
& Fuente de Datos del Equipo:

Mínimo Caudal Recomendado, Bbl/D: 5139.00**
Máximo Caudal Recomendado, Bbl/D: 10278.00**
Caudal a la Máxima Eficiencia, Bbl/D: 6994.75**
Potencia a la Máxima Eficiencia, HP: 162.1**
Frecuencia, Hz: 57.1

** = Corregida para la Frecuencia & Viscosidad

Número de Etapas: 53
Etapas con Gas Libre: 53

Factores de corrección por Viscosidad

Introducidas por el Usuario

Caudal: 1.050 Si
Cabeza: 1.050 Si
Potencia: 1.127 Si
Eficiencia: 0.978
Viscosidad: Fluido

Diseño

Catálogo

Cabeza Dinámica Total (TDH), ft:	2019.08	1902.65
Caudal en Superficie (P+A), Bbl/D:	8619.89	7824.22
Promedio de Caudal por Etapas (P+G+A), Bbl/D:	N/A	8019.56
Presión de Entrada a la Bomba, psig:	723.0	730.6
Potencia de Operación, HP:	N/A	160.4
Eficiencia de la Bomba, %:	N/A	62.4

DATOS DEL CABLE

Fabricantes: Wford
Tipo: E-Lead-Compacted-5KV
Tamaño: 2 Cu
Forma: Flat
Tipo de Conductor: Stranded
Máx.Temp., °F: 450.0
Longitud del Cable, ft: 2938.00

Calcular: Voltaje de Superficie
Costo de la Electricidad, \$/kWh: 0.24

Nota: *Indica que el cable está fuera de rango!

Diseño

Frec.

Frecuencia, Hz	57
Máx. Amp Permissible, Amps	162.7
Amperaje, Amps	38.0
Kilovoltio Amperio, KVA	164.0
Kilovatios, kW	157.5
Kilovatios, \$/mes	27242
Voltaje de Superficie, Volts	2492.1
Caída de Voltaje @ 68.0 °F, Volts	52.1
Caída de Voltaje @ 136.0 °F BHT, Volts	59.7
Pérdida de Kilovatios, kW	3.8
Costo de la Pérdida de Voltaje, \$/mes	652
Voltaje Requerido por el Motor, Volts	2432.5
Voltaje de Fondo del Motor, Volts	2432.5
Caída de Voltaje In-rush del Motor, Volts	238.7
Mínimo Voltaje de Arranque del Motor, Volts	2253.4
Relación Arranque/Operación, Relación	0.9

Nota: Los caudales en "superficie" son calculados a condiciones estándar

Figura 33. Curva estándar de la bomba Borets en el pozo C

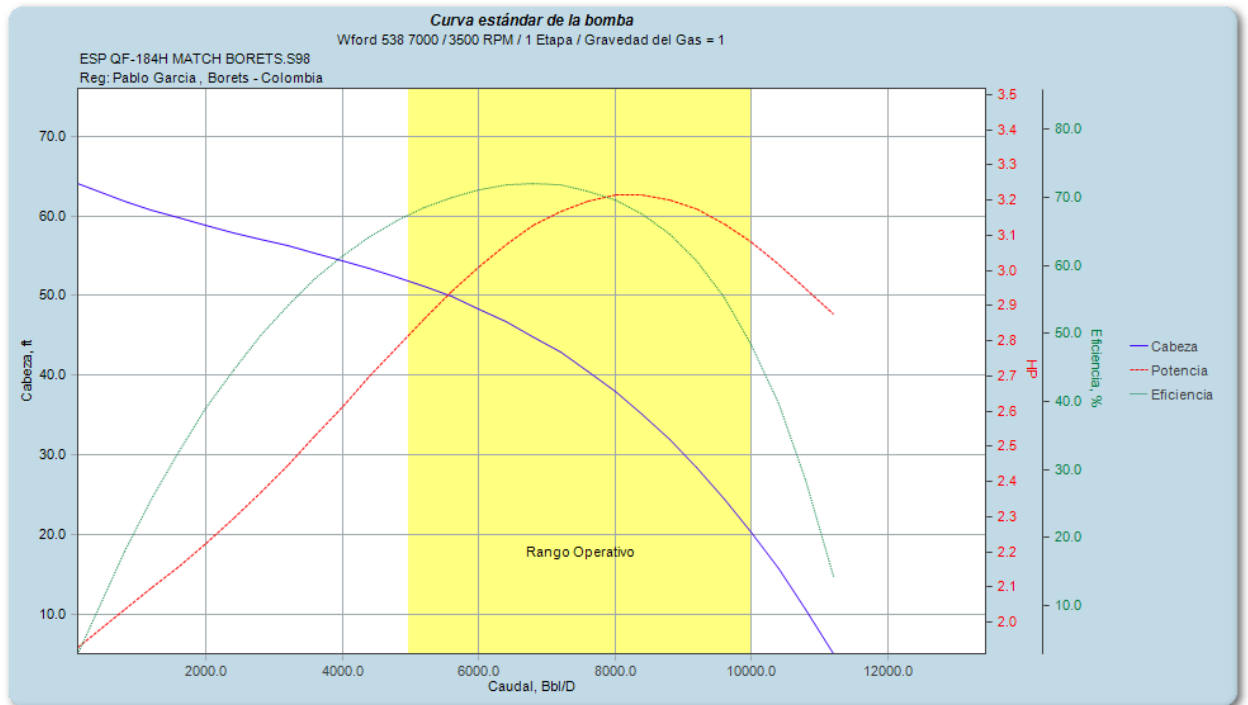
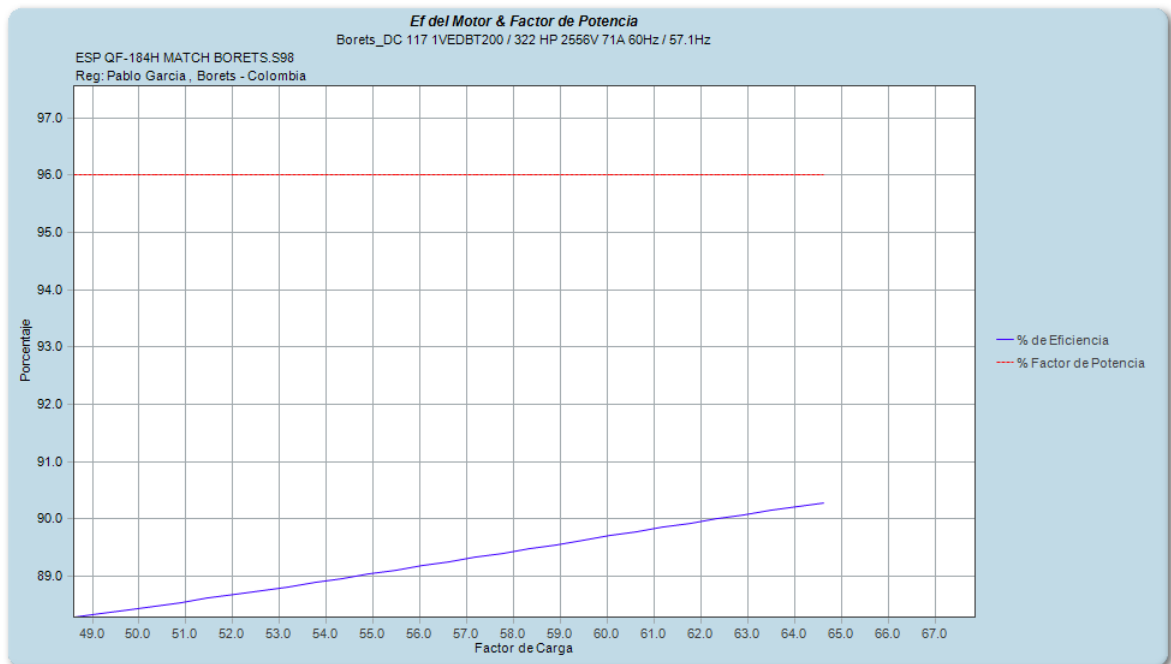


Figura 34. Factor de potencia del motor PMM en el pozo C



Los siguientes resultados se obtienen de realizar una comparación con los datos de las corridas anteriores en cada uno de los pozos, hasta este momento los datos con la implementación de motores PMM son teóricos.

Tabla 5. Comparación de parámetros con motores de inducción vs PMM en los pozos A, B y C:

	POZO A	POZO A PMM	POZO B	POZO B PMM	POZO C	POZO C PMM
Profundidad	2795.0	2795.0	3037.0	3037.0	2838.0	2838.0
BFPD	4000.0	4000.0	8249.0	8249.0	7429.0	7429.0
BSW	95.5%	95.5%	95.3%	95.3%	88.8%	88.8%
API	13.8	13.8	13.9	13.9	13.8	13.8
IP	10.3	10.3	69.1	69.1	26.9	26.9
KW	102.7	83.6	207.7	178.8	202.6	157.5
% Carga Mtr	40.3%	52.8%	84.7%	61.5%	90.6%	52.4%
FP	0.89	0.96	0.93	0.96	0.99	0.96
Ahorro		18.6%		13.9%		22.3%

En la anterior tabla podemos evidenciar una de las mayores ventajas de la implementación de los motores de imanes permanentes, y es la de su factor de potencia constante y cercano a 1. Sin importar la carga con la que el motor esté operando su factor de potencia es elevado a diferencia de los motores de inducción que para que su factor de potencia sea mayor el motor debe estar más cargado

4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENCONTRADOS EN LOS POZOS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE MOTORES PMM VS MOTORES DE INDUCCIÓN

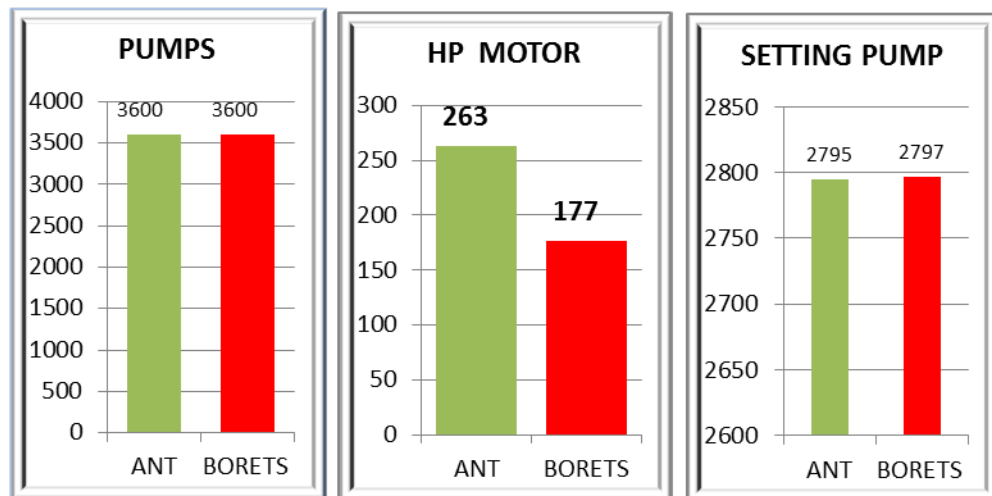
Luego de 3 meses de operación de los EBES con tecnología PMM se llevaron a cabo las pruebas finales para la comparación de resultados de las dos tecnologías.

POZO A

Se realizó la comparación de la configuración de los equipos BES analizados a continuación:

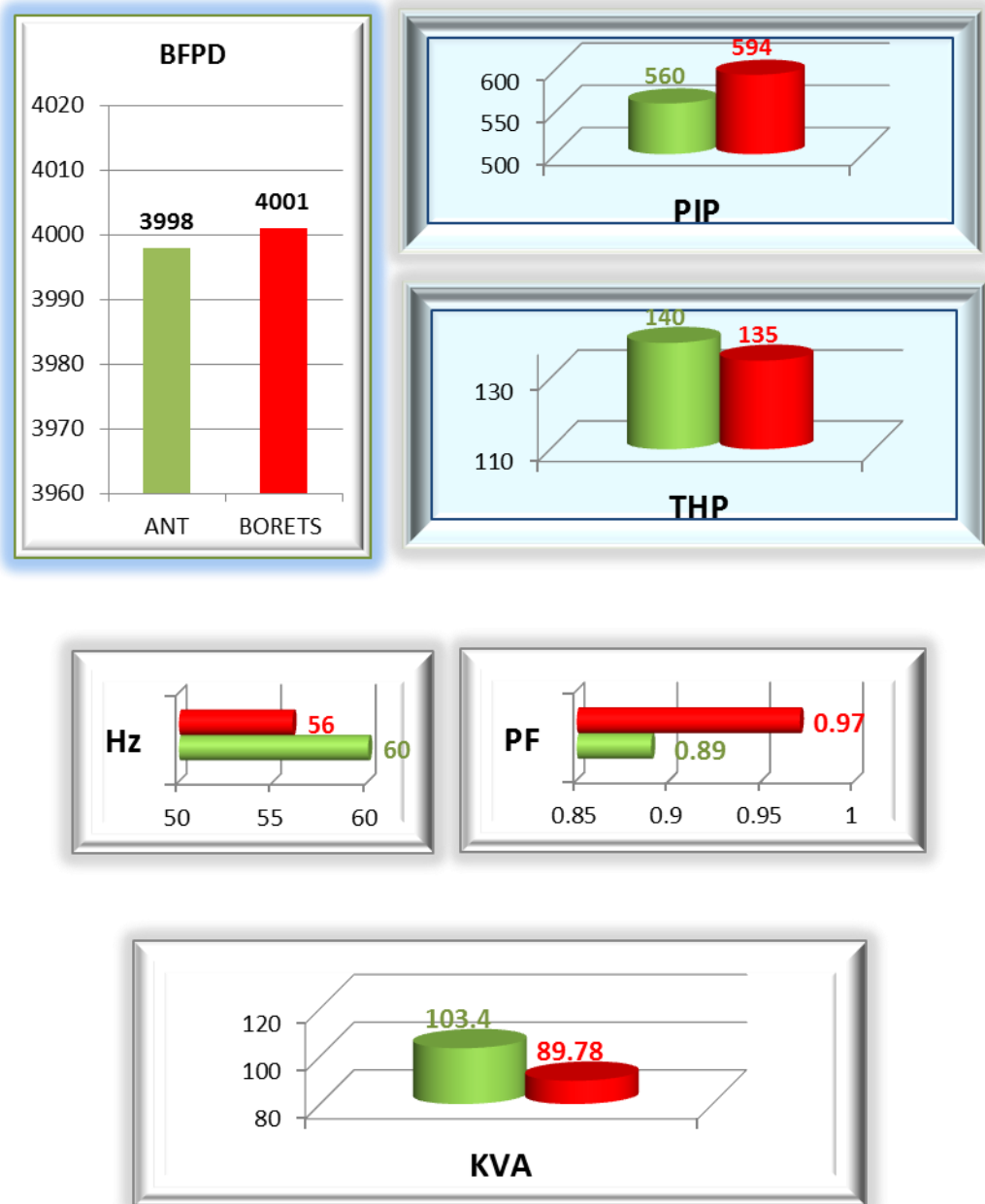
Los valores nominales de las dos bombas tanto de la corrida anterior como la corrida con el motor PMM era de 3600 BFPD, y se instalaron a las mismas profundidades para que existiera igualdad de condiciones al momento de realizar la comparación.

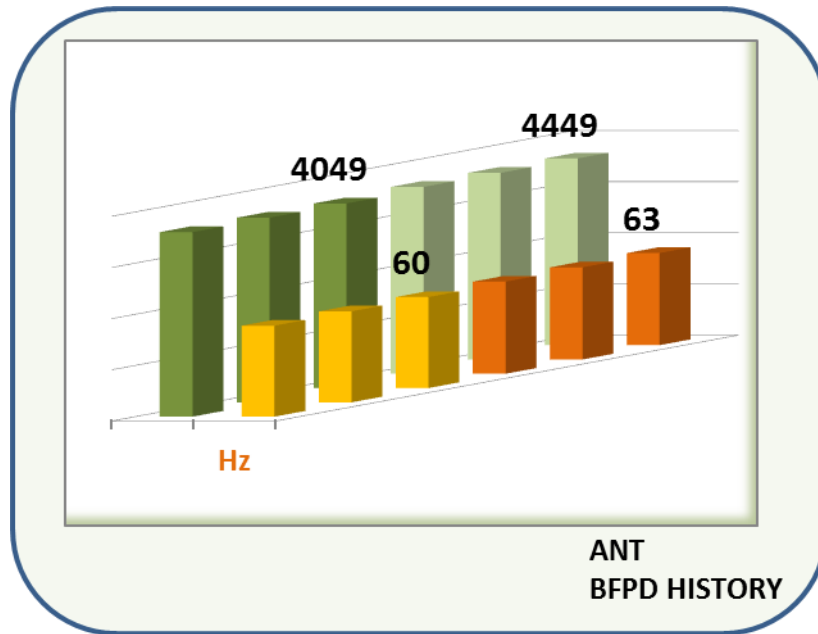
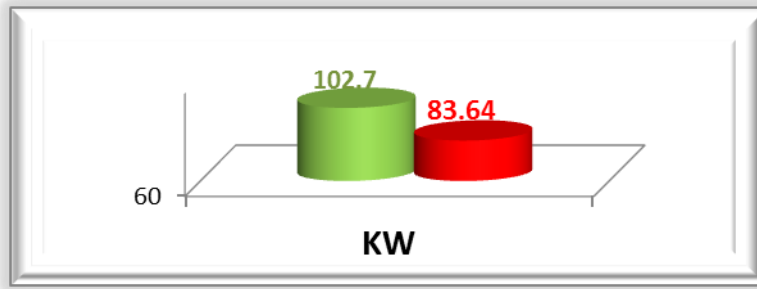
Figura 35. Comparación de bomba, motor y profundidad POZO A



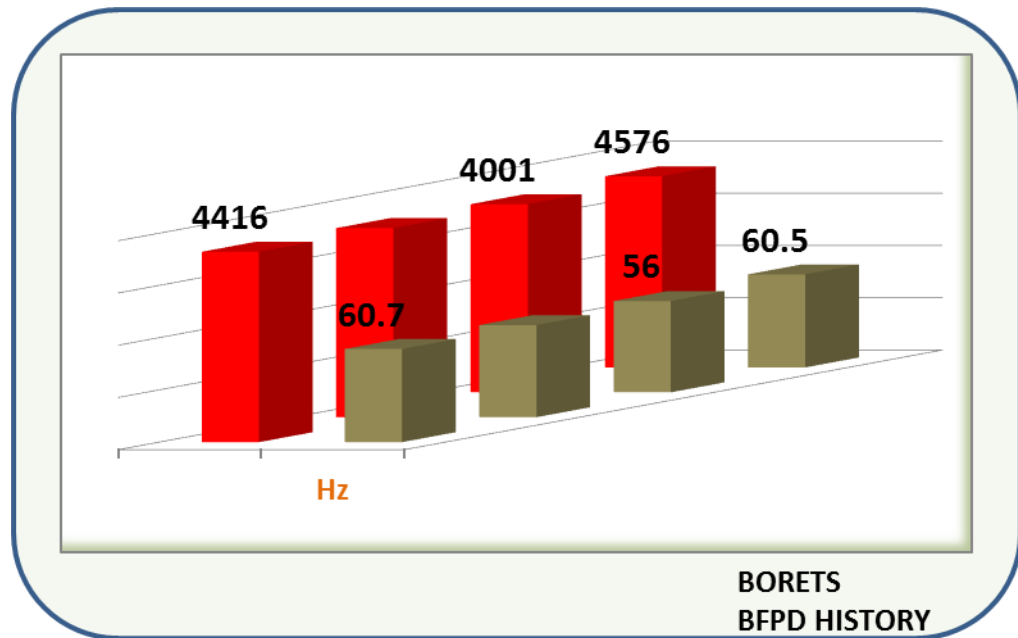
Los siguientes son los parámetros de operación del pozo a, en esta sección es importante resaltar el aumento considerable del factor de potencia del equipo con la implementación del motor PMM lo cual permite un mejor aprovechamiento de la energía.

Figura 36. Comparación de variables de operación del POZO A





BFPD/Kw	38.93
---------	-------



BFPD/Kw	47.83
----------------	--------------

A continuación se relacionan las variables a tener en cuenta para realizar el análisis comparativo de consumo energético del motor de inducción vs el motor PMM

Tabla 6. Comparación de parámetros de operación en el pozo A:

Item	Characteristics	ANT	PMM	
1	IP	8.063	8	
2	Potencia en la salida (Hp)	263	177	
3	Tensión (V)	2601	2304	
4	Corriente (A)	61.1	42	
5	Hz	60	56.2	
6	Bfpd	3998	4000.8	
7	PF	0.89	0.97	
8	THP (PSIG)	140	135	
9	KVA	103.4	89.78	
10	KW	102.7	83.64	Diff 18.6%

Para el pozo A teniendo unas características de operación similares:

- Producción
- Profundidad de asentamiento
- IP
- THP

El motor PMM logró obtener una disminución del 18.6% diario en el consumo de energía para obtener la misma producción respecto al motor de inducción de la corrida anterior, realizando la comparación económica el beneficio que trae dicho ahorro de energía es el siguiente:

Tabla 7. Comparación económica de los consumos en el pozo A:

Power Cost		\$0.237
	ANT	PMM
Hz	60	56.2
BFPD	3998	4001
Op. Motor PF	0.89	0.97
Total kW	102.7	83.64
Op. Cost Per Month	\$ 17,524.73	\$ 14,272.33
Load Cost Per 12 M	\$ 210,296.74	\$ 171,267.96
Cost Dif. per Month		\$ (3,252.40)
Cost Dif. per 12 Months		\$ (39,028.78)
Percent Difference		18.6%

Saving	\$ 39,028.78
---------------	---------------------

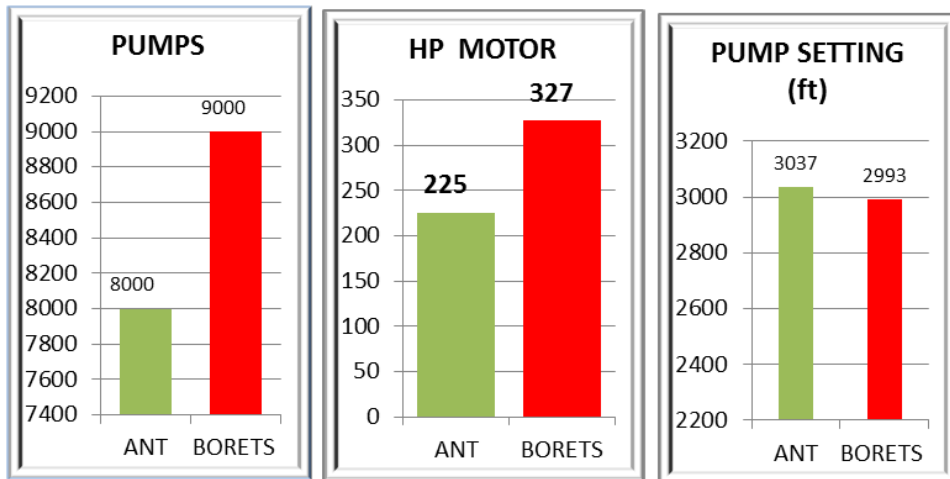
Si asumimos un valor de USD \$0.237 el costo del KW, el cual puede ser variable dependiendo el campo de producción donde nos encontremos ubicados, la implementación del motor de imanes permanentes está disminuyendo el costo de operación del equipo en USD \$39,028.78.

POZO B

Se realizó la comparación de la configuración de los equipos BES analizados a continuación:

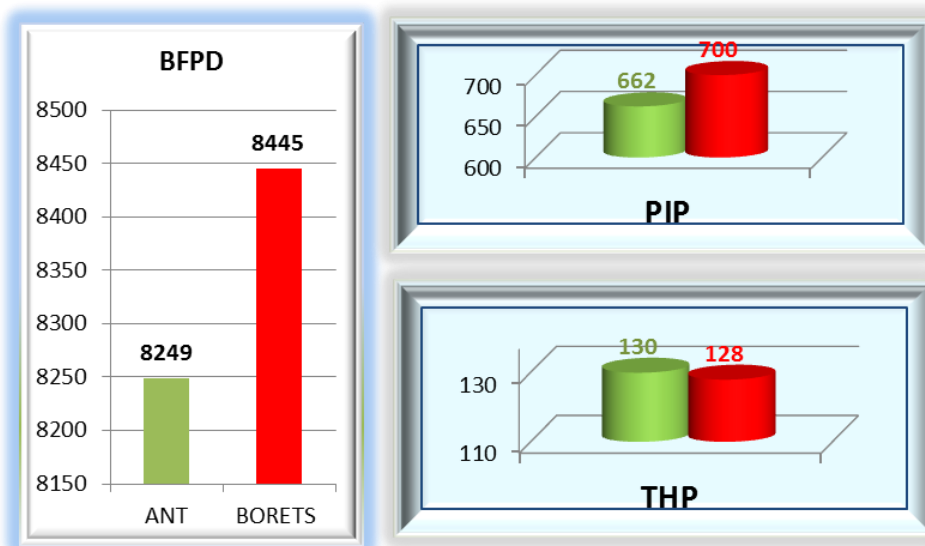
Los valores nominales de la bomba de la corrida anterior es de 8000BFPD y para la nueva corrida de instaló una bomba de 9000BFPD, se instalaron profundidades similares para que existiera igualdad de condiciones al momento de realizar la comparación.

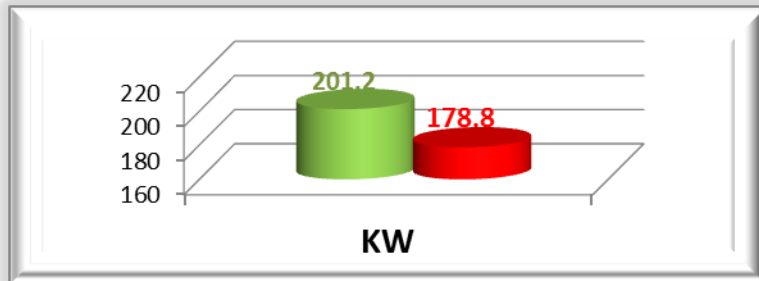
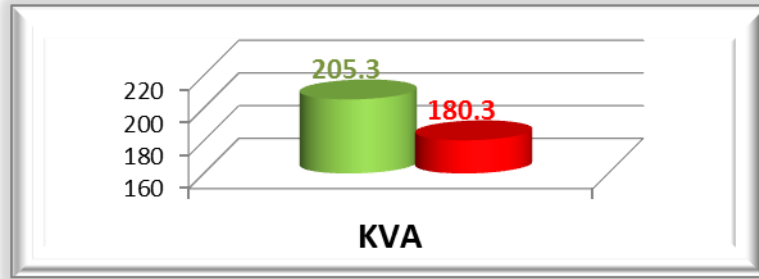
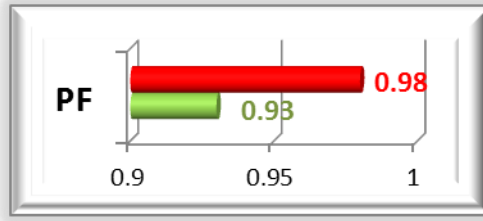
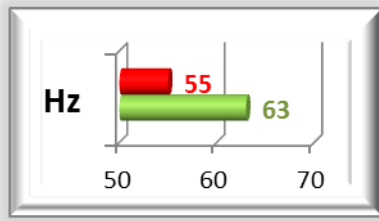
Figura 37. Comparación de bomba, motor y profundidad POZO B

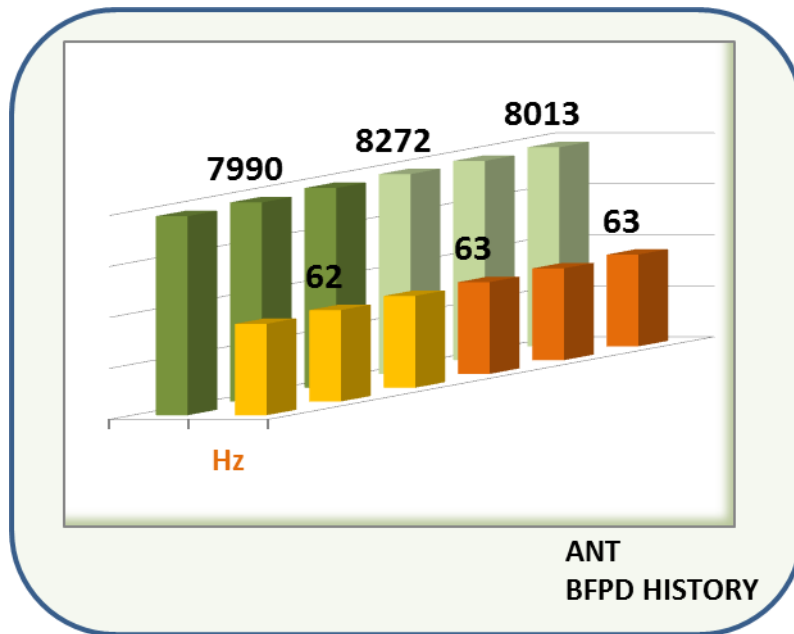


Los siguientes son los parámetros de operación del pozo a, en esta sección es importante resaltar el aumento del factor de potencia del equipo con la implementación del motor PMM lo cual permite un mejor aprovechamiento de la energía.

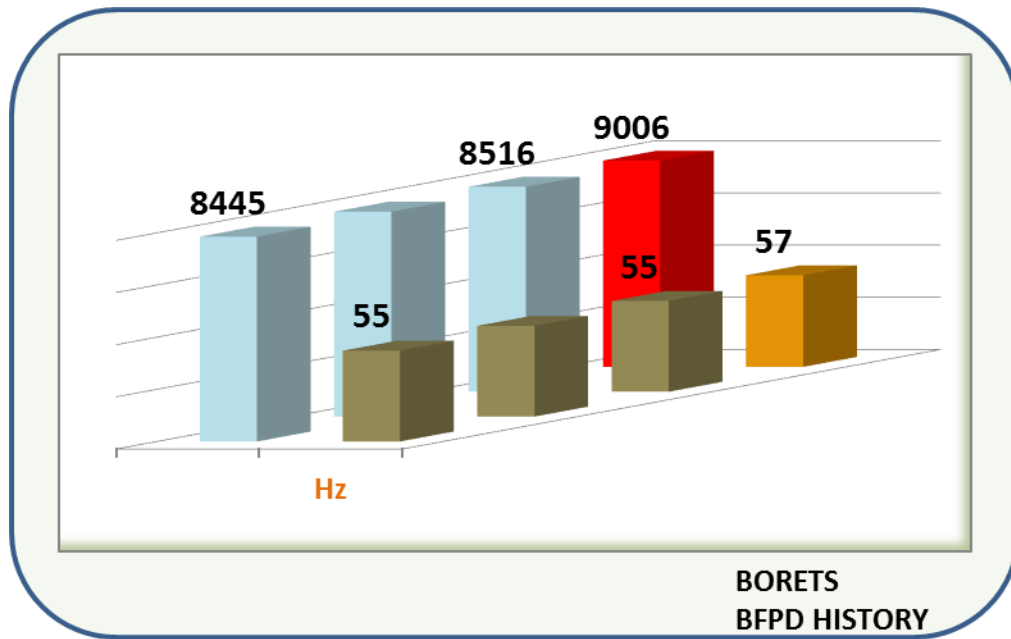
Figura 38. Comparación de variables de operación del POZO B







BFPD/Kw 41.00



BFPD/Kw 47.23

A continuación se relacionan las variables a tener en cuenta para realizar el análisis comparativo de consumo energético del motor de inducción vs el motor PMM

Tabla 8. Comparación de parámetros de operación en el pozo B:

Item	Characteristics	ANT	PMM	
1	IP			
2	Potencia en la salida (Hp)	225	327	
3	Tensión (V)	2455	2560	
4	Corriente (A)	57	71	
5	Hz	63	55	
6	Bfpd	8249	8445	
7	PF	0.93	0.98	
8	THP (PSIG)	130	128	
9	KVA	205.3	180.3	
10	KW	201.2	178.8	Diff 11.1%

Para el pozo A teniendo unas características de operación similares:

- Producción
- Profundidad de asentamiento
- IP
- THP

El motor PMM logró obtener una disminución del 11.1% diario en el consumo de energía para obtener la misma producción respecto al motor de inducción de la corrida anterior, realizando la comparación económica el beneficio que trae dicho ahorro de energía es el siguiente:

Tabla 9. Comparación económica de los consumos en el pozo B:

Power Cost		\$0.237
	ANT	PMM
Hz	63	55
BFPD	8249	8445
Op. Motor PF	0.93	0.98
Total kW	201.2	178.8
Op. Cost Per Month	\$ 34,332.77	\$ 30,510.43
Load Cost Per 12 M	\$ 411,993.22	\$ 366,125.18

Cost Dif.per Month		\$ (3,822.34)
Cost Dif. per 12 Months		\$ (45,868.03)
Percent Difference		11.1%

Saving	\$	45,868.03
---------------	-----------	------------------

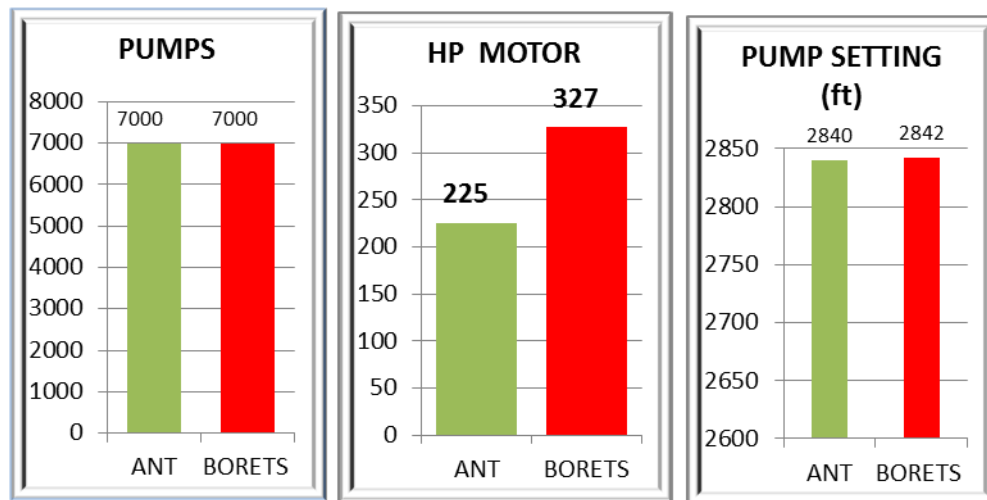
Si asumimos un valor de USD \$0.237 el costo del KW, el cual puede ser variable dependiendo el campo de producción donde nos encontremos ubicados, la implementación del motor de imanes permanentes está disminuyendo el costo de operación del equipo en USD \$45,868.03

POZO C

Se realizó la comparación de la configuración de los equipos BES analizados a continuación:

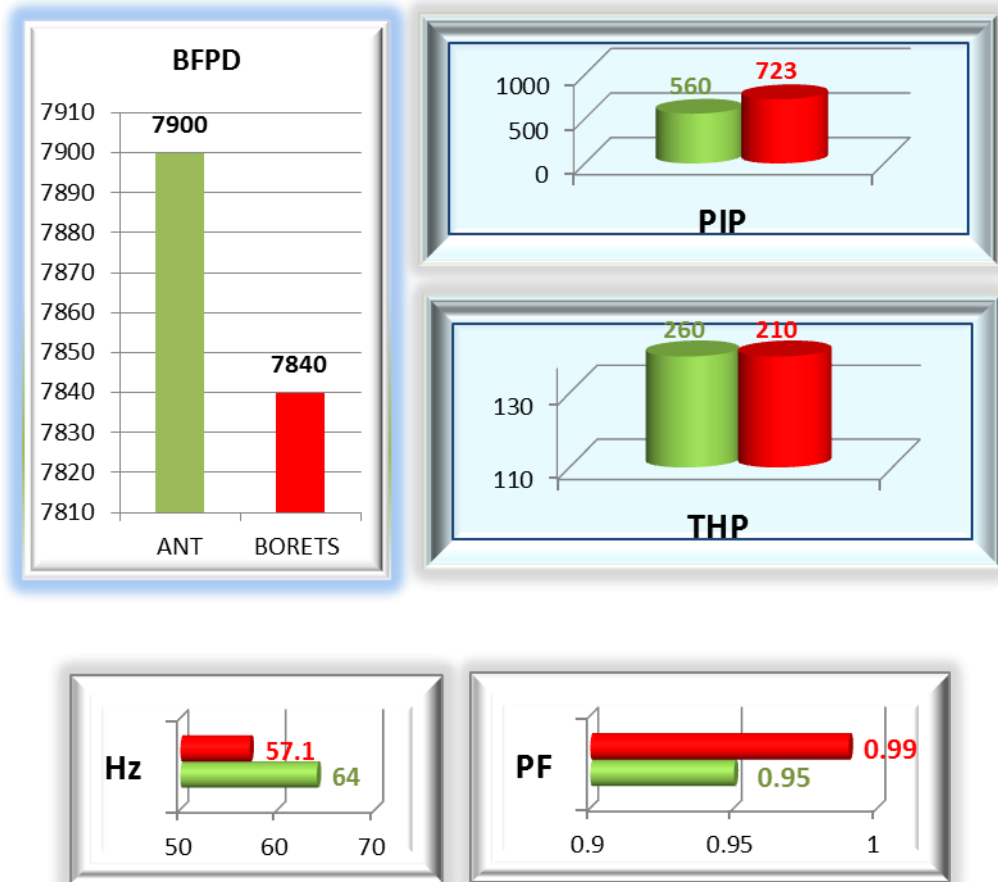
Los valores nominales de las dos bombas tanto de la corrida anterior como la corrida con el motor PMM era de 7000 BFPD, y se instalaron a las mismas profundidades para que existiera igualdad de condiciones al momento de realizar la comparación.

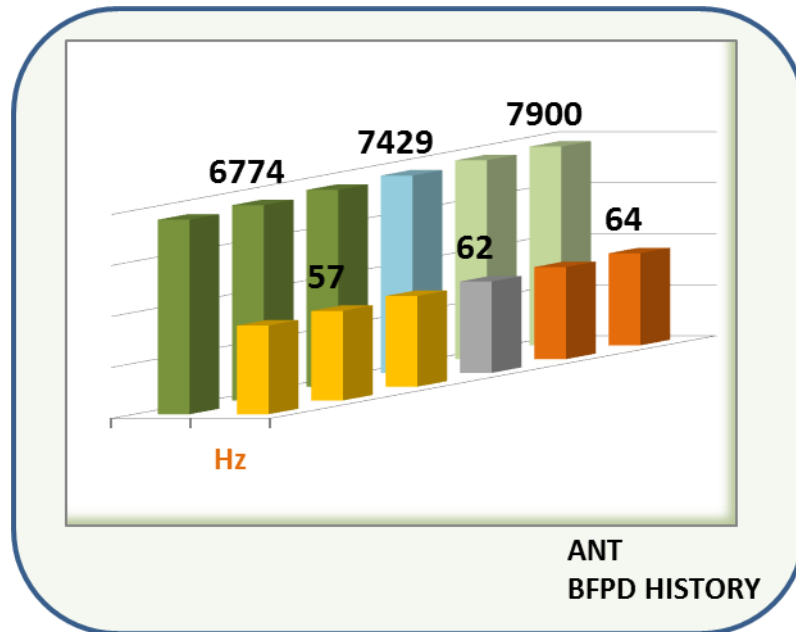
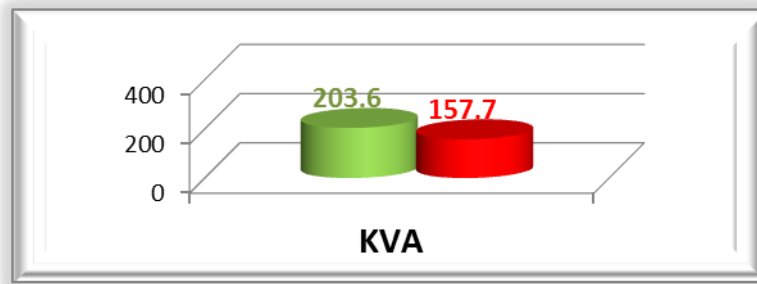
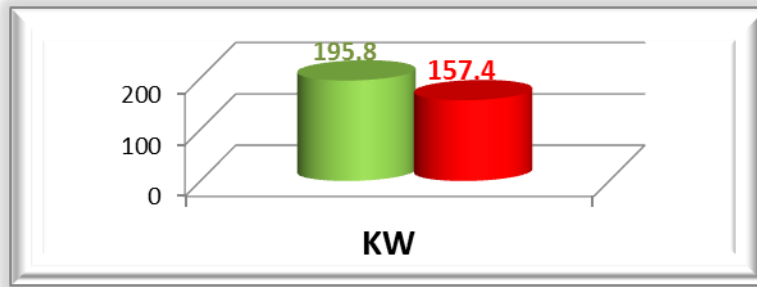
Figura 39. Comparación de bomba, motor y profundidad POZO C



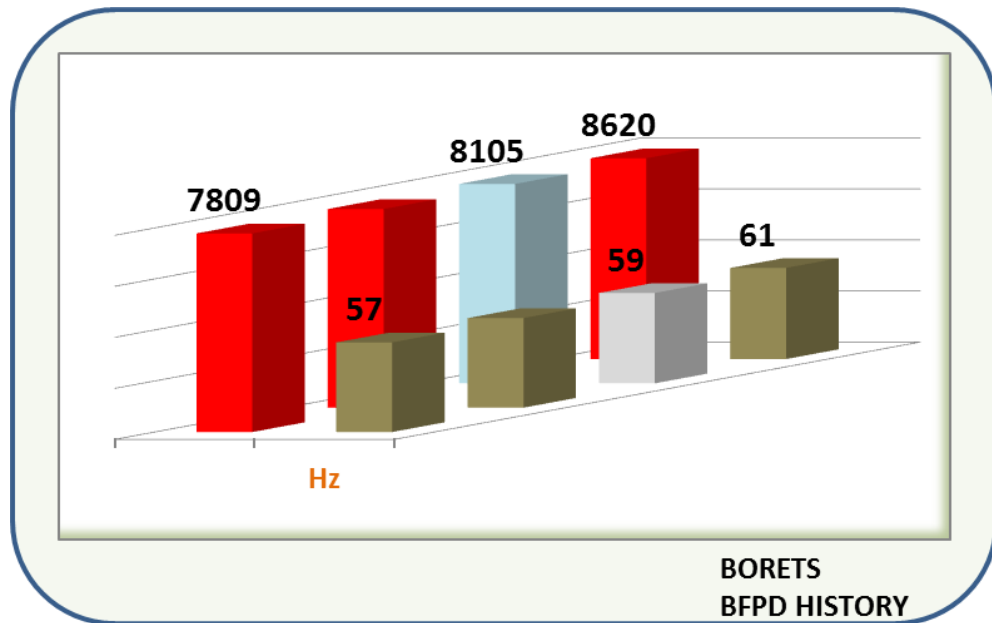
Los siguientes son los parámetros de operación del pozo a, en esta sección es importante resaltar el aumento del factor de potencia del equipo con la implementación del motor PMM lo cual permite un mejor aprovechamiento de la energía.

Figura 40. Comparación de variables de operación del POZO C





BFPD/Kw	40.35
---------	-------



BFPD/Kw	49.81
----------------	--------------

A continuación se relacionan las variables a tener en cuenta para realizar el análisis comparativo de consumo energético del motor de inducción vs el motor PMM

Tabla 10. Comparación económica de los consumos en el pozo C:

Power Cost		\$0.237
	ANT	PMM
Hz	64	57.1
BFPD	7900	7840
Op. Motor PF	0.95	0.99
Total kW	195.8	157.4
Op. Cost Per Month	\$ 33,411.31	\$ 26,858.74
Load Cost Per 12 M	\$ 400,935.74	\$ 322,304.83
Cost Dif. per Month		\$ (6,552.58)
Cost Dif. per 12 Months		\$ (78,630.91)
Percent Difference		19.6%

Saving	\$	78,630.91
---------------	-----------	------------------

Si asumimos un valor de USD \$0.237 el costo del KW, el cual puede ser variable dependiendo el campo de producción donde nos encontremos ubicados, la implementación del motor de imanes permanentes está disminuyendo el costo de operación del equipo en USD \$78,630.91

Con estos resultados obtenidos con la implementación de los motores se ha obtenido un ahorro promedio de 16.4% en los costos de energía para la operación de los pozos.

Tabla 11. Porcentajes de ahorro:

Pozo A	18.6%
Pozo B	11.1%
Pozo C	19.6%
Prom Pozo	16.4%

Si llevamos este ejercicio a un campo petrolero que tenga en producción alrededor de 100 pozos, obtendríamos los siguientes datos

Tabla 12. Ahorro económico:

Pozo A	\$ 39,028.78
Pozo B	\$ 45,868.03
Pozo C	\$ 78,630.91
Prom Pozo	\$ 54,509.24
Campo 100 pozos	\$ 5,450,924.00

Una disminución de USD \$ **5,450,924** en costos operacionales del campo con la implementación de motores de imanes permanentes, una cifra bastante significativa en tiempos de crisis como los que vive el sector petrolero hoy en día.

5. CONCLUSIONES

- Al obtener los resultados del análisis técnico-económico se pudo evidenciar un ahorro considerable en el consumo de energía con la implementación de los motores PMM que permitirá una reducción en los costos de operación de un campo petrolero.
- Los motores de imán permanente pueden ser implementados en cualquier tipo de aplicación en la que un sistema BES convencional pueda operar, lo cual permite desde baja a altas tasas de caudal inclusive con bombas de cavidades progresivas PCP.
- La empresa en la cual se realizó la prueba tecnológica ha disminuido sus gastos de operación anuales en \$ 163,527.72 con solo la implementación de 3 sistemas PMM.
- Por todo lo anterior puede concluirse que la implementación de sistemas PMM representa beneficios significativos en optimización de recursos económicos y de generación eléctrica, que a su vez es un beneficio para el medio ambiente.

6. RECOMENDACIONES

- Reproducir el mismo proyecto en campos con altas tasas de producción y consumo de energía, ya que se espera que el beneficio económico aumente al tener mayor porcentaje de ahorro en KW.
- Masificar la tecnología de imanes permanentes a los largo de todo el país donde se tengan corriendo equipos de bombeo electro sumergible, lo cual beneficiaría a todas las operadoras en sus costos de producción algo que ayudaría mucho en tiempos de crisis como los que está viviendo la industria petrolera actualmente.

BIBLIOGRAFIA

BORETS INTERNATIONAL. Esp. Application Guide Version 1.5a, 2008

CORDOBA B, ERAZO P, HERRERA C - SCHLUMBERGER. Bombeo Electro Sumergible Curso Básico. [En línea] <http://es.scribd.com/doc/130098988/Bombeo-Electro-Sumergible-Partes#scribd> Citado 07 de febrero 2015

BAKER HUGHES. Guía Bombeo Electro sumergible. 2010.

SECZON L, SHAPOSHNIK D, AYALA C. Borets International. Experiencia de aplicación y operación de motores de magneto permanente en sistemas electro sumergibles: Historias de éxito y lecciones aprendidas, 2014.

TAKACS G. Electrical Submersible Pumps Manual Desing, Operations, And Maintenance, USA: 2009.

Motor asíncrono trifásico, [En línea] <<http://es.scribd.com/doc/93504625/Motor-asincrono-trifasico#scribd>> Citado 07 de febrero 2015.