

Evaluación del factor de levantamiento de los pozos del campo caño limón y de las variables que afectan su comportamiento.

Juan Manuel Rodríguez Bueno

Trabajo de grado para optar por Magister en Ingeniería de Petróleos y Gas

Director

Edison García Navas

Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Maestría en Ingeniería de Petróleos y Gas

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Ing. Luisa Sánchez - Artificial Lift Coordinator Llanos Norte

Ing. Javier Ruiz - Wells Electrical Supervisor – Caño Limón

Ing. José Saúl Fonseca - Wells and Hiline Senior Supervisor Llanos Norte

Ing. Ricardo Serrato - Asset Integrity Supte Llanos Norte

Occidental de Colombia LLC

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos.	14
2. Justificación.	15
3. Marco de referencia.	15
3.1 Antecedentes investigativos.....	15
3.2 Marco teórico – conceptual.....	20
4. Fases de desarrollo.....	29
4.1 Fase 1. Revisión y análisis del factor de levantamiento (bf/mw) general de todos los pozos en producción del campo caño limón.	29
4.2 Fase 2. Parámetros de selección de pozos más representativos del campo para realizar una evaluación detallada del comportamiento del factor de levantamiento (bf/mw).	34
4.3 Fase 3. Recolección, organización y análisis de la data histórica de las variables de producción de los pozos seleccionados y principales variables operacionales.....	38
4.4. Fase 4. Análisis de las principales variables que afectan el comportamiento del factor de levantamiento (bf/mw) de los pozos seleccionados.....	39
4.4.1. Pozo 406.....	40

4.4.2.	Pozo 229.....	42
4.4.3.	Pozo 587.....	43
4.4.4.	Pozo 613.....	44
4.4.5.	Pozo 160.....	46
4.4.6.	Pozo 455.....	48
4.4.7.	Pozo 344.....	50
4.4.8.	Pozo 525.....	51
4.4.9.	Pozo 183.....	53
4.4.10.	Pozo 521.....	55
4.4.11.	Variables observadas en el comportamiento del factor de levantamiento.....	57
4.5	Fase 5. Plan de optimización.....	59
5.	Conclusiones.....	61
6.	Recomendaciones.	62
	Referencias bibliográficas.....	63

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Descripción detalla de parámetros diseño convencional vs diseño power saving.....	18
Tabla 2. Parámetros operacionales de prueba diseño convencional vs diseño power saving.....	18
Tabla 3. Pozos seleccionados para análisis detallado de factor de levantamiento.....	37
Tabla 4. Características sistema esp retirado pozo 406	41
Tabla 5. Características sistema esp instalado pozo 406	41
Tabla 6. Características sistema esp retirado pozo 525	52
Tabla 7. Características sistema esp instalado pozo 525	52
Tabla 8. Características sistema esp retirado pozo 183	54
Tabla 9. Características sistema esp instalado pozo 183	54
Tabla 10. Características sistema esp retirado pozo 521	56
Tabla 11. Características sistema esp instalado pozo 521	56

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Porcentaje por pérdidas de potencia por componente del sistema esp	17
Figura 2. Comparación sistema convencional esp vs sistema power saving esp.....	17
Figura 3. Tipo de construcción de etapas en una bomba electrosomergible	25
Figura 4. Patrones de flujo en tubería vertical	28
Figura 5. Consolidación de fluido total de levantamiento en campo caño limón.....	31
Figura 6. Consolidación de carga total de levantamiento en campo caño limón.....	32
Figura 7. Comportamiento de carga y factor del levantamiento en campo caño limón	33
Figura 8. Factor de levantamiento en pozos enero – abril	36
Figura 9. Factor de levantamiento pozo 406.....	40
Figura 10. Parámetros operativos pozo 406.....	40
Figura 11. Factor de levantamiento pozo 229.....	42
Figura 12. Parámetros operativos pozo 229.....	42
Figura 13. Factor de levantamiento pozo 587.....	43
Figura 14. Parámetros operativos pozo 587.....	44
Figura 15. Factor de levantamiento pozo 613.....	45
Figura 16. Parámetros operativos pozo 613.....	45
Figura 17. Factor de levantamiento pozo 160.....	46
Figura 18. Parámetros operativos pozo 160.....	47
Figura 19. Factor de levantamiento pozo 455.....	48
Figura 20. Parámetros operativos pozo 455.....	49

Figura 21. Factor de levantamiento pozo 344.....	50
Figura 22. Parámetros operativos pozo 344.....	51
Figura 23. Factor de levantamiento pozo 525.....	51
Figura 24. Parámetros operativos pozo 525.....	52
Figura 25. Factor de levantamiento pozo 183.....	53
Figura 26. Parámetros operativos pozo 183.....	54
Figura 27. Factor de levantamiento pozo 521.....	55
Figura 28. Parámetros operativos pozo 521.....	56
Figura 29. Plan de optimización del factor de levantamiento.....	59

Lista de apéndices

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la
Biblioteca UIS)**

Apéndice A. Datos de fluido total en facilidades de producción y consumo de energía en levantamiento

Apéndice B. Datos recolectados pozo 406.

Apéndice C. Datos recolectados pozo 229.

Apéndice D. Datos recolectados pozo 587.

Apéndice E. Datos recolectados pozo 613.

Apéndice F. Datos recolectados pozo 160.

Apéndice G. Datos recolectados pozo 455.

Apéndice H. Datos recolectados pozo 344.

Apéndice I. Datos recolectados pozo 525.

Apéndice J. Datos recolectados pozo 183.

Apéndice K. Datos recolectados pozo 521

Resumen

Título: Evaluación del factor de levantamiento de los pozos del campo Caño Limón y de las variables que afectan su comportamiento. *

Autor: Juan Manuel Rodríguez Bueno. **

Palabras Claves: Factor de levantamiento, motor de imán permanente, *Spotfire Data Analysis*.

El principio del proceso de producción de hidrocarburos consiste en la migración de fluidos del subsuelo a superficie, ya sea a través del flujo natural de un pozo o por medio de un sistema de levantamiento artificial.

Normalmente en un campo maduro, la presión de yacimiento no es lo suficientemente alta para transportar el fluido desde fondo a superficie, por lo que es necesaria la instalación de un sistema de levantamiento artificial, y que, por condiciones del pozo, fluido y mecánica de la formación, puede ser bombeo mecánico, bombeo electrosumergible, bombeo por cavidades progresivas, entre otros.

Para el campo Caño Limón, se creó un indicador de seguimiento o KPI – *Key Performance Indicator* del levantamiento del fluido por la Compañía, ya sea de un pozo en particular o de la totalidad de fluido levantando en el campo, esto, en comparación con el consumo de energía de los sistemas de levantamiento, denominado Factor de Levantamiento.

El objeto de estudio de este trabajo consiste en realizar la evaluación del factor de levantamiento del campo Caño Limón y así mismo, determinar que variables influyen en su comportamiento, esto con el fin de proponer un plan de acción para optimizar el comportamiento de estas variables si es posible, y lograr una disminución en el consumo de energía en levantamiento.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Msc. Edison García

Abstract

Title: Lifting factor evaluation of Caño Limón wells and variables that affect their behavior. *

Author: Juan Manuel Rodríguez Bueno. **

Keywords: Lifting factor, permanent magnet motor, Spotfire data analysis.

The principle of the hydrocarbon production process consists in the migration of fluids from the bottom to the surface, either through the natural flow of a well or through an artificial lift system.

Normally in a mature field, the reservoir pressure is not high enough to transport the fluid from bottom to surface, so it is necessary to install an artificial lift system, and that by well, fluid and mechanical conditions of the formation, can be mechanical pumping, electric submersible pumping, pumping by progressive cavities etc.

For Caño Limón field, a follow-up indicator or KPI – *Key Performance Indicator* of the fluid lifting was created by Company, either from a particular well or from the total fluid lifted in the field, compared to the energy consumption of the lifting systems, named Lifting Factor.

The object of study of this work is to perform the evaluation of the Caño Limón field lifting factor and, likewise, determine which variables influence its behavior, this with the objective to propose an action plan for optimize those variables behavior if it is possible and achieve a reduce of lifting power consumption.

* Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Msc. Edison García

Introducción

El campo Caño Limón se ha caracterizado por ser un campo con empuje hidráulico y altos cortes de agua en la producción de fluido de la mayoría de sus pozos. Aproximadamente el 85% de los pozos tienen sistema de levantamiento artificial mediante bombas electro-sumergibles controladas por un *variable frequency drive* (en adelante *VFD*) en superficie.

Para seguimiento y evaluación de la eficiencia de los sistemas de levantamiento artificial en la operación Llanos Norte, la compañía operadora (*Occidental de Colombia LLC*), creó un indicador de seguimiento llamado “Factor de Levantamiento”.

Durante paradas prolongadas de producción del campo, generadas por atentados al oleoducto Caño Limón – Coveñas, el factor de levantamiento de los pozos representados por la cantidad de fluido levantando en barriles por megavatio de energía consumida, mejora sustancialmente por presurización del yacimiento, disminuyendo los costos por consumo de energía hasta su estabilización.

El rubro del pago de energía sobre el presupuesto anual de operación de la Compañía es muy alto, ya que el mayor porcentaje de este consumo proviene del levantamiento de fluido (aproximadamente 78%), por lo cual, se requiere explorar planes de acción de eficiencia energética para lograr disminuir este rubro.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General.

Evaluar el factor de levantamiento de los pozos del campo Caño Limón y las variables que afectan su comportamiento, con el fin de diseñar un plan de optimización de las variables deducidas, y de esta manera, reducir los costos de energía en levantamiento de fluido.

1.2 Objetivos Específicos.

- Realizar una revisión y análisis del factor de levantamiento (BF/MW) general de todos los pozos en producción del campo Caño Limón.
- Determinar los parámetros de selección de los pozos más representativos del campo para realizar una evaluación detallada del comportamiento del factor de levantamiento (BF/MW).
- Recolectar, organizar y analizar la data histórica de las variables de producción de los pozos seleccionados y principales variables operacionales.
- Determinar las principales variables que afectan el comportamiento del factor de levantamiento (BF/MW) de los pozos seleccionados.
- Diseñar un plan de acción de optimización de variables influyentes en el factor de levantamiento (BF/MW), que permita disminuir los costos asociados al consumo eléctrico de los pozos del campo.

2. Justificación.

Actualmente, el campo Caño Limón cuenta con pozos productores con sistema de levantamiento *Electric Submersible Pump* (en adelante *ESP*) y *Beam Pump* (en adelante *BP*), los cuales representan el 78% del consumo de energía del campo.

Con ocasión a la búsqueda permanente de planes de acción para optimizar costos y de posibles incrementos en tarifas de energía durante los próximos años, el presente proyecto tiene por objeto realizar una evaluación del factor de levantamiento de los pozos del campo Caño Limón y determinar las variables que afectan su comportamiento, con el fin de ajustar las variables deducidas a punto óptimo de operación.

Teniendo en cuenta lo mencionado, se espera que con el ajuste de las variables que inciden en el factor de levantamiento (BF/MW), se disminuya el costo del levantamiento por barril para la Compañía, en el rubro referente al costo de energía.

3. Marco de Referencia.

3.1 Antecedentes investigativos.

La mayoría de los campos en su etapa de producción madura, buscan realizar procesos de optimización con el fin de disminuir costos de producción por barril producido o intentar mantener los valores actuales de producción a medida que el campo declina.

Bussear y Vachon (2005) exponen la posibilidad de optimizar la producción mediante el monitoreo de parámetros relevantes de la formación y control remoto de elementos finales de control, tales como, las válvulas y los choques; los mecanismos convencionales de monitoreo consisten en un sensor de fondo para presión y temperatura de yacimiento.

Al tener instalado un sistema artificial por *ESP*, se tiene un motor eléctrico cuya velocidad puede ser modificada mediante una frecuencia ajustada, esta frecuencia puede ser ajustada con base a las lecturas de presión de fondo del pozo o las variables relevantes de producción que se estén monitoreando.

Los completamientos inteligentes pueden estar integrados de válvulas de control que cierran cuando la bomba *ESP* se apaga o falla evitando retorno del fluido al yacimiento, también de sistemas *ESP* de múltiples bombas, donde tras el fallo de una de las bombas, entra otra bomba de respaldo en operación, evitando los costos significativos del servicio de pozo.

Posteriormente, Abdou *et al.*, (2013) presentan como opción en optimización de costos en producción, el uso de motores de imán permanente en los sistemas de levantamiento, principalmente *ESP*. Normalmente los motores en estos sistemas de levantamiento son de tipo inducción, cuya eficiencia alcanza hasta un 86%, los motores de imanes permanentes pueden alcanzar eficiencias entre el 94% y 96% debido a que no presentan deslizamiento en su rotación.

Como se puede evidenciar, los autores discriminan las pérdidas de energía por componente del sistema *ESP* como se muestra en la figura 1, y en donde se tiene oportunidad de mejora para realizar optimizaciones y, por ende, mejorar el factor de levantamiento.

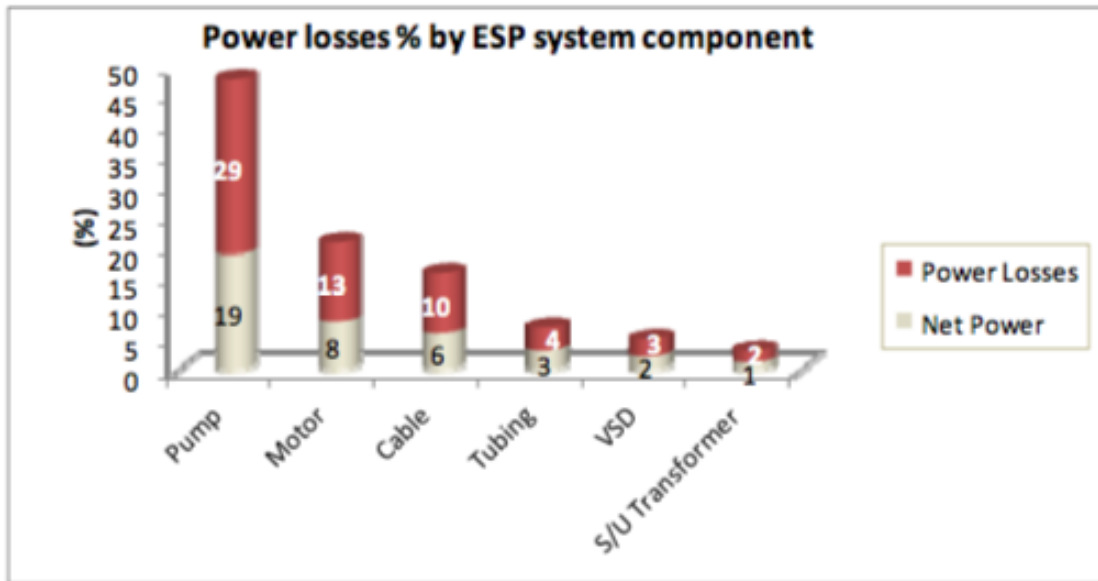


Figura 1. Porcentaje por pérdidas de potencia por componente del sistema ESP. Adaptado de (Abdou *et al.*, 2013)

Las pérdidas más considerables según la gráfica 1 se presentan en la bomba y en el motor *ESP*.

Los autores, realizan una comparación de un sistema *ESP* con motor convencional y un sistema *ESP* con bomba *Power Save* y motor de imán permanente como se observa en la figura 2.

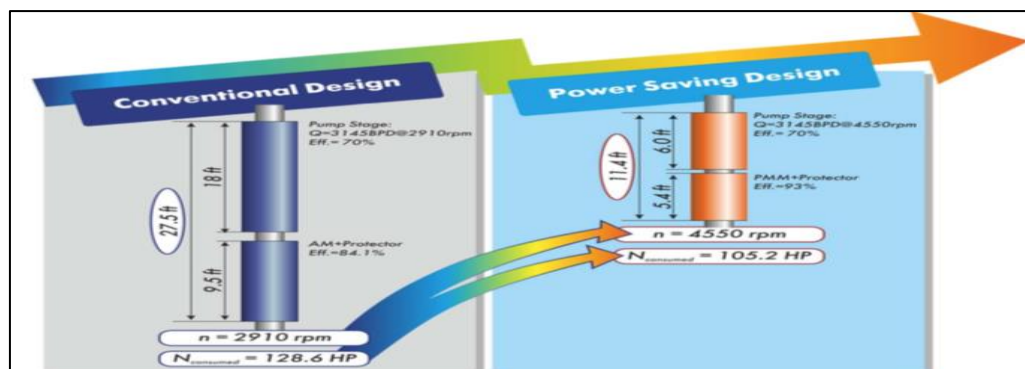


Figura 2. Comparación sistema convencional ESP vs sistema Power Saving ESP. Adaptado de (Abdou *et al.*, 2013).

La descripción detalla de parámetros de la figura 2 se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla 1.

Descripción detalla de parámetros diseño convencional vs diseño Power Saving según (Abdou et al., 2013)

Parámetro	Diseño Convencional	Diseño Power Saving
Tasa de fluido (BFPD)	3,145	3,145
Gravedad especifica promedio (60 F)	0.85	0.85
Potencia Motor – NPHP (HP)	128.6	105.2
Eficiencia de motor + protector (%)	84.1	93
Pérdidas en motor & protector (HP)	20.4	7.4
Potencia en el eje – BHP (HP)	108.2	97.8
Eficiencia total de la bomba (%)	70	70
ESP Potencia Hidráulica -HHP (HP)	75.7	68.5
Pump Total Dynamic Head -TDH (ft)	3,841	3,475
Velocidad rotación (r.p.m.)	2,910	4550

Los autores realizaron la instalación de un sistema *ESP* con diseño *Power Saving* en el campo Meleiha en Egipto, en reemplazo de un sistema *ESP* convencional, obteniendo los datos registrados en la tabla a continuación:

Tabla 2.

Parámetros operacionales de prueba con diseño convencional vs diseño Power Saving según (Abdou et al., 2013)

Parámetro	Con motor Inducción @50Hz	Con motor PMM @54Hz
Tasa de producción (BFPD)	315	315
Presión en Cabeza (psi)	150	170

Cabeza por etapa de la bomba (ft)	20.4	23.88
Potencia requerida por etapa (HP)	0.138	0.12
Eficiencia de la bomba (%)	50	52
Corriente operación (Amp)	19	16
Voltaje (V)	1,730	1870
Potencia aparente (kVA)	56.87	51.76
Motor PF (%)	88	91
Potencia active (kW)	50.04	47.10
Potencia reactiva (kVAR)	27.01	21.46
Eficiencia motor (%)	83	92
Pérdidas en Motor - MPL, kW (HP)	8.5 (11.4)	3.8 (5.1)
Potencia en el eje, kW (HP)	41.5 (55.7)	43.3 (58.1)
ESP Potencia hidráulica – HHP (HP)	27.85	30.21
Longitud del equipo (ft)	54.1	61.9
Motor OD (inch)	5.62	4.6
Velocidad de enfriamiento (ft/s)	0.79 (in 7” shroud)	0.067 (in 9 5/8” casing)
Run life (dias)	180	> 260 (continua en línea)

Como se puede evidenciar, los autores presentan resultados obtenidos con un sistema de levantamiento del proveedor *Novomet*, en donde se alcanzó un ahorro de hasta 10% mediante la combinación con una bomba centrífuga *Power Save* del mismo proveedor. La alternativa del uso de estos motores en los sistemas de levantamiento tipo *ESP*, puede generar un impacto en los costos de producción por barril al obtener ahorros en el consumo de energía.

Adicionalmente, Al Maghlouth, Amer y Al Awajy (2013) exponen la importancia del monitoreo de pozos y la optimización como un aseguramiento de un buen desempeño en los

sistemas de producción. Recientemente los diseños *ESP* están equipados con sistemas de monitoreo de desempeño en tiempo real.

En igual sentido, Al Maghlouth *et al.*, (2013) como parte de la Compañía Saudi Aramco, enumeran las siguientes capas definidas por la compañía para llevar este proceso de optimización:

1. Adquisición de datos y base de datos.
2. Monitoreo y visualización.
3. Alarmas y seguimientos.
4. Recomendaciones y optimización.
5. Sistema experto.

3.2 Marco Teórico – Conceptual.

El factor de levantamiento es un indicador de seguimiento determinado por Occidental de Colombia LLC, operadora del campo Caño Limón, el cual es compuesto de dos variables, barriles de fluido y megavatio de energía. Este indicador muestra cuantos barriles de fluido se pueden levantar de fondo con 1 megavatio de energía. El indicador se puede evaluar de manera general, es decir, para todos los pozos del campo, o de manera específica, para un pozo determinado.

El seguimiento del factor de levantamiento tiene como fin evaluar diferentes parámetros, como aporte del yacimiento, eficiencia de los sistemas de levantamiento artificial, consumo y costo de energía. A finales del año 2017 se inició su seguimiento cuando se organizó una base de datos con valores recolectados a lo largo de un año del fluido total levantando en el campo y el consumo de energía de los sistemas de levantamiento.

La Compañía definió como valor base, un factor de levantamiento general de 22000BF/MW, según la tendencia histórica con los datos recolectados durante los últimos años. Uno de los principales objetivos del seguimiento de este indicador, es el análisis y la creación de estrategias para incrementar este valor base.

Para los motores eléctricos en los sistemas *ESP*, según especificaciones de diferentes fabricantes de motores eléctricos (*General Electric, Weg, Baker Hughes*, etc), están diseñados para trabajar entre un 50% y un 100% de carga, y su máxima eficiencia se encuentra cuando operan ligeramente por debajo de su potencia nominal. Para el caso de los motores eléctricos de los sistemas de levantamiento *ESP*, su eficiencia es del orden del 86%. Las pérdidas del motor son intrínsecas al diseño de este, pero la eficiencia se reduce cuando opera con parámetros por fuera del rango de diseño.

A parte de las características de operación a las condiciones de diseño y temperatura de operación del motor, se debe considerar las condiciones de operación esperadas, corrosión, escala, tratamientos con ácido y de acuerdo a estas definir la metalurgia requerida, revestimiento del motor y materiales de los o-rings.

Al operar el motor con cargas ligeras el calor generado será muy bajo, lo cual al final se refleja en mayor vida útil. La operación con cargas muy altas sacrifica cierta vida útil, pero puede ser más económico para el usuario final dependiendo del objetivo principal de la operación. Al operar el motor con cargas intermedias se tiene un equilibrio.

Por su parte, Chapman (2005) ha señalado que, hasta la llegada de los controladores en estado sólido modernos, los motores de inducción en general no eran las máquinas adecuadas para

aplicaciones que requerían un considerable control de velocidad. El intervalo de operación normal de un motor de inducción regular (clases de diseño A, B y C) está confinado a un deslizamiento de menos de 5% y la variación de velocidad en este intervalo es más o menos directamente proporcional a la carga en el eje del motor. Incluso, si se pudiera aumentar el deslizamiento, la eficiencia del motor se vería afectada, puesto que las pérdidas en el cobre del rotor son directamente proporcionales al deslizamiento del motor.

En realidad, hay sólo dos técnicas posibles para controlar la velocidad de un motor de inducción.

Una consiste en la variación de la velocidad síncrona, que es la velocidad de los campos magnéticos del estator y del rotor, puesto que la velocidad del rotor siempre permanece cerca de la velocidad sincrónica.

La otra técnica consiste en la variación del deslizamiento del rotor para una carga dada.

La velocidad síncrona de un motor de inducción está dada por (Chapman, 2005):

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 f_e}{P}$$

Las únicas maneras en que se puede modificar la velocidad síncrona de una máquina son: 1) cambiando la frecuencia eléctrica y, 2) cambiando el número de polos de la máquina. Se puede lograr el control del deslizamiento si se modifica la resistencia del rotor o el voltaje en los terminales del motor.

El *VFD* de un motor de inducción debidamente diseñado puede ser muy flexible. Puede controlar la velocidad de un motor de inducción dentro de un intervalo que va desde tan poco como 5% de la velocidad base hasta el doble de ella. Sin embargo, es importante mantener ciertos límites

en el voltaje y par del motor conforme se varía la frecuencia para asegurarse de que la operación es segura.

Cuando se opera a velocidades menores a la velocidad base es necesario reducir el voltaje en los terminales aplicado al estator para obtener una operación adecuada. El voltaje en los terminales aplicado al estator debe disminuir linealmente con el decremento de la frecuencia del estator. A este proceso se le llama degradación. Si no se lleva a cabo, se saturará el acero en el núcleo del motor de inducción y fluirán corrientes de magnetización excesivas en la máquina.

El deslizamiento de un motor de inducción es la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor, expresada como un porcentaje (o por unidad) de la velocidad síncrona. El deslizamiento por unidad está dado por la ecuación (Chapman, 2005):

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Donde:

s = deslizamiento

n_s = velocidad síncrona [r/min]

n = velocidad del rotor [r/min]

El deslizamiento es prácticamente cero sin carga y es igual a 1 (o 100%) cuando el rotor está bloqueado.

Pinto (2012), por su parte explica las bombas electrosumergibles como bombas centrífugas de etapas múltiples. El tipo o geometría de la etapa determina el volumen de fluido que maneja la bomba y el número de etapas determina el levantamiento total generado (*TDH*). Las bombas se construyen en un amplio rango de capacidades para aplicaciones en diferentes tamaños de *casings*.

Las etapas se designan de acuerdo con el punto de máxima eficiencia (*BEP*) en barriles por día a 60 Hz.

Con respecto a la forma en que se maneja el empuje generado en la bomba, se tienen tres tipos básicos de construcción de bombas:

1.- Construcción flotante “FL”: Cada impulsor tiene libertad para moverse hacia arriba o abajo en el eje, se puede decir que “flota” en el eje.

2.- Tipo "BFL": Construcción con los impulsores inferiores tipo flotante. Los impulsores superiores son del tipo compresión mientras los inferiores son del tipo flotante. Este es un diseño especial para eliminar todo el empuje descendente transmitido al protector.

3.- Construcción tipo compresión: Cada impulsor está fijo al eje de forma rígida de modo que no puede moverse sin movimiento del eje. Todos los impulsores son comprimidos en conjunto conformando un solo cuerpo rígido, de tal que, si un impulsor trata de moverse hacia arriba o hacia abajo, este tratará de mover también al eje y al conjunto de todos los impulsores con él.

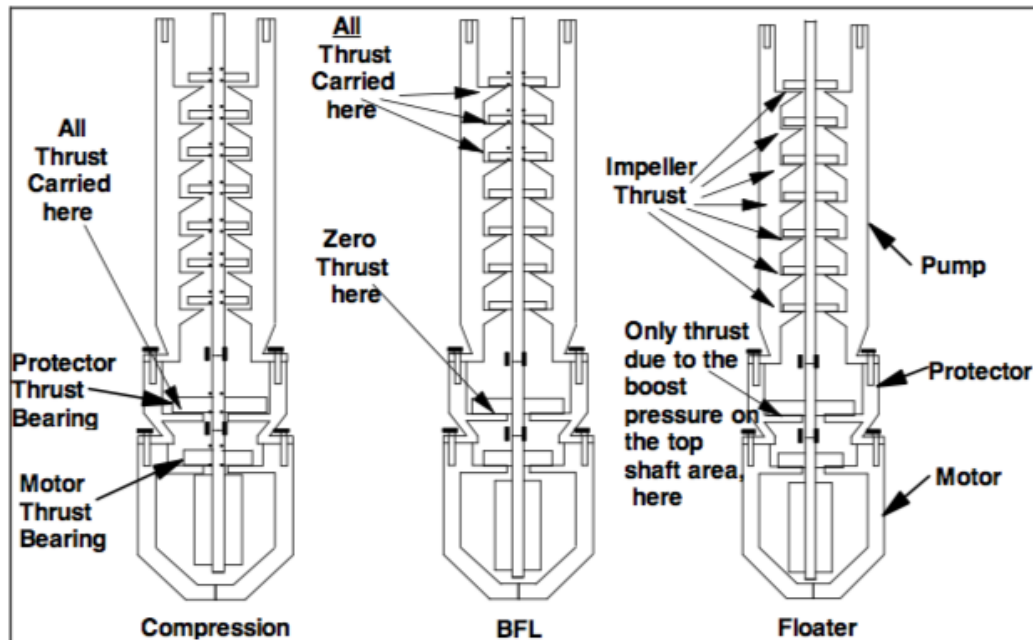


Figura 3. Tipo de construcción de etapas en una bomba electrosumergible. Adaptado de (Pinto ,2012)

A continuación, se dan algunas recomendaciones prácticas para seleccionar la bomba:

- En general, es mejor seleccionar la bomba de mayor diámetro.

Se recomienda escoger la bomba de mayor diámetro que pueda ser instalada libremente en el *casing* para manejar el caudal de diseño previsto. En general las bombas de mayor diámetro serán más eficientes y menos costosas. Adicionalmente las etapas más grandes podrían tener mejor comportamiento con fluidos viscosos o con alto contenido de gas.

- Seleccione la bomba más eficiente al caudal de operación de diseño.

Una vez que ha definido el tamaño o Serie de la bomba se debe considerar la eficiencia de la bomba al caudal de diseño esperado y a las condiciones de operación proyectadas. Se debe evitar en lo posible seleccionar las bombas para operación fuera del rango operativo recomendado.

Cuando la bomba opera en *up-thrust* pierde eficiencia y el fluido recircula por el faldón inferior del impulsor. Si el fluido contiene abrasivos se produce la erosión de las arandelas y eventualmente del mismo material de las etapas.

- Verificar la capacidad de carga del cojinete de empuje del protector.

A parte de las limitaciones físicas de la bomba misma, cuando se seleccionan bombas tipo compresión es necesario verificar que el empuje generado no excede la capacidad de carga del cojinete de empuje del protector, tanto a las condiciones de operación como en el caso de máxima carga.

- Fluidos abrasivos.

Las bombas tipo “FL” son muy efectivas para manejar fluidos moderadamente abrasivos ya que debido al sello que ejercen las *downthrust washer* se evita que el fluido pase a los cojinetes radiales. Una mejor combinación sería el uso de bombas ARZ o con estabilización mejorada “ES”, dependiendo de las condiciones del fluido. Si la aplicación es para bombear fluidos severamente abrasivos, las bombas tipo “*Compression*” ARZ - CR serían una mejor opción ya que el empuje es manejado en el *thrust bearing* del protector, el cual esta lubricado con aceite “limpio”, mientras que en las bombas tipo “FL” las *thrust washer* son lubricadas por el mismo fluido bombeado.

- Productividad del pozo incierta

En aplicaciones donde el Índice de Productividad del pozo es desconocido, es un valor asumido o es un dato “no muy seguro”, la aplicación de la bombas tipo “*Compression*” es muy ventajosa, puesto que en este tipo de bomba el empuje es manejado en el protector, si el *thrust bearing* del protector es seleccionado apropiadamente, el rango de operación de la bomba es mucho más extenso. En las primeras instalaciones de campos en desarrollo donde se prevé la producción de fluidos con cantidades considerables de abrasivos y/o cuando la productividad del pozo no está muy bien determinada, una bomba tipo ARZ - CR tipo compresión sería la mejor opción.

La construcción de las bombas tipo compresión tiene tolerancias más estrechas, y su instalación en el campo requiere procedimientos y técnicas adicionales que deben ser realizadas por personal entrenado.

- Gas libre a la entrada de la bomba.

En aplicaciones en que la bomba debe manejar gas libre se debería usar en lo posible bombas con etapas de flujo mixto, y como el gas libre ocupara un volumen considerable en la etapa, las etapas más grandes son mejores para mantener la eficiencia volumétrica.

- Aplicaciones especiales.

Para aplicaciones especiales relacionadas con condiciones extremas de abrasión, corrosión, fluidos con muy baja lubricidad, etc., se dispone de bombas especiales fabricadas con materiales y/o recubrimientos especiales para incrementar el tiempo de servicio. Se debe consultar con cada fabricante la opción más acertada.

Otro tema que debe ser estudiado son los patrones de flujo en tuberías verticales, Yahaya y Gahtani (2010), mencionan que los principales patrones de flujo en tubería vertical que se consideraron en este estudio son: flujo burbuja, flujo tapón (*slug*), flujo “*churn*” y flujo anular. En la figura 4, se muestran los diferentes patrones de flujo en tubería vertical.

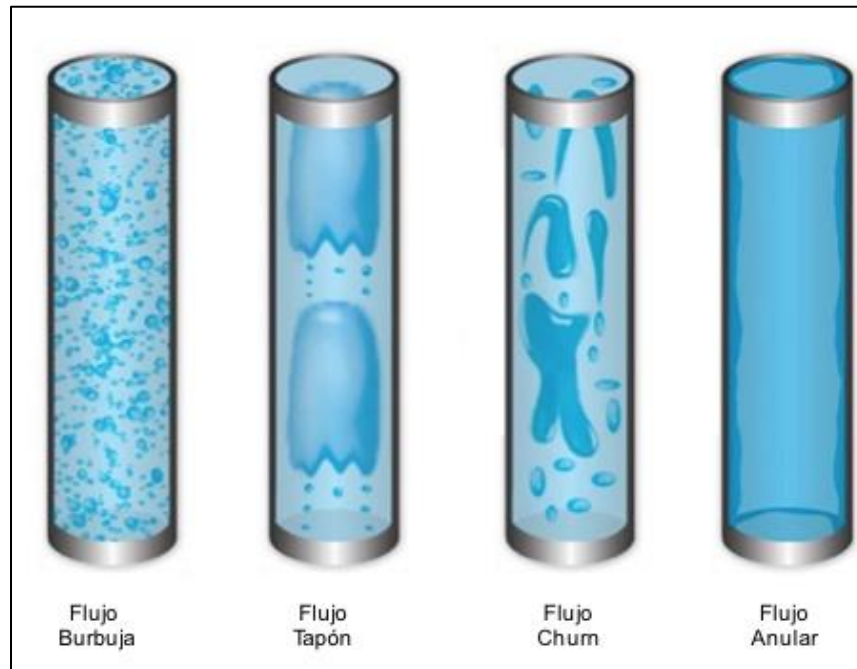


Figura 4. Patrones de flujo en tubería vertical. Adaptado de Yahaya y Gahtani, 2010.

- Flujo burbuja: El líquido llena casi completamente la tubería, y la fase de gas libre está presente en pequeñas burbujas. Las burbujas se mueven a diferentes velocidades y excepto por su densidad, tienen poco efecto sobre el gradiente de presión.
- Flujo tapón: El flujo tapón es un flujo altamente complejo e inestable. La fase gaseosa es más pronunciada. Aunque, la fase líquida es continua, las burbujas de gas coalescen y forman bolsas o tapones que ocupan casi toda la sección transversal de la tubería.

- Flujo anular: El gas fluye por la parte central de la tubería, mientras que el líquido fluye a lo largo de las paredes de la tubería a manera de película.
- Flujo *Churn*: Este patrón de flujo existe solamente en flujo vertical hacia arriba y es muy caótico en naturaleza. Las burbujas de gas se pueden unir y el líquido puede ingresar en las burbujas. Aunque los efectos del líquido son significantes, los efectos de la fase gaseosa son predominantes.

4. Fases de desarrollo.

El desarrollo del proyecto se realizó por medio de la ejecución de fases o etapas, con el fin de mantener un orden en el desarrollo de este, en el manejo y en la presentación de la información. Cada etapa corresponde a un objetivo específico planteado.

4.1 Fase 1. Revisión y análisis del factor de levantamiento (BF/MW) general de todos los pozos en producción del campo Caño Limón.

Inicialmente, durante la primera etapa de desarrollo del proyecto, se realizó un análisis del factor de levantamiento (BF/MW) de forma general para todo el campo, por las siguientes razones:

1. Facilidad de análisis gráfico del comportamiento del factor del levantamiento de forma general y no individual por el gran número de pozos en producción (369 pozos) a través de un periodo de tiempo determinado.

2. El análisis y la evaluación del factor de levantamiento por parte de la Gerencia de Distrito, Staff del campo y Gerencia Funcional, se realiza de forma general; producto de estas revisiones surgió la necesidad de determinar las variables que afectaron el factor de levantamiento en dos periodos de tiempo puntuales. Si se presenta un cambio en la tendencia del comportamiento del factor de levantamiento, se procede a realizar una revisión individual de cada pozo que haya tenido alguna consigna operativa durante el periodo de tiempo donde se presentó ese cambio en la tendencia general.

La revisión y análisis del factor de levantamiento (BF/MW) general de los pozos en producción, se realizó mediante la consolidación del valor medido de tasa de flujo en la entrada de las dos facilidades de producción del campo y el consumo de energía para levantamiento artificial entregado por los relés de medición de energía de las líneas eléctricas que alimentan los pozos.

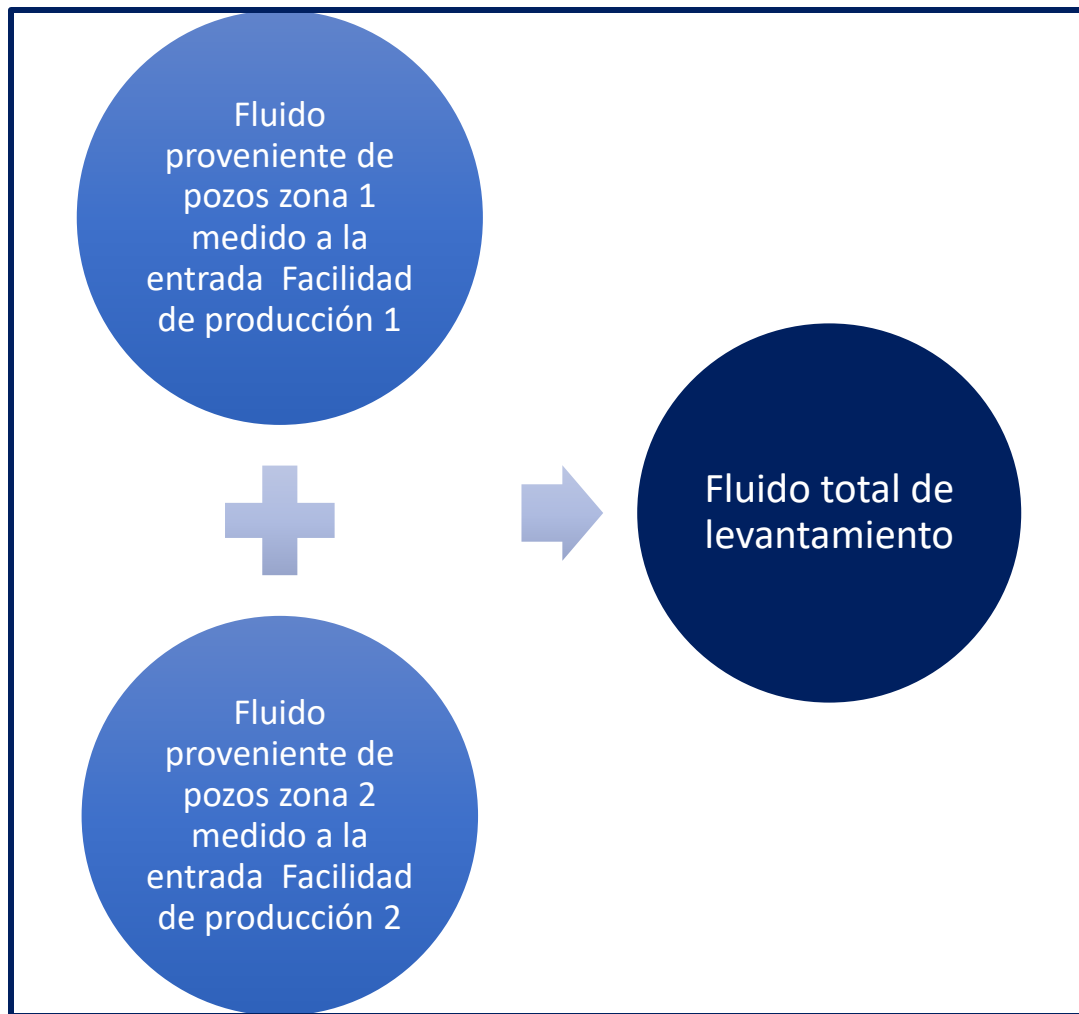


Figura 5. Consolidación de fluido total de levantamiento en Campo Caño Limón

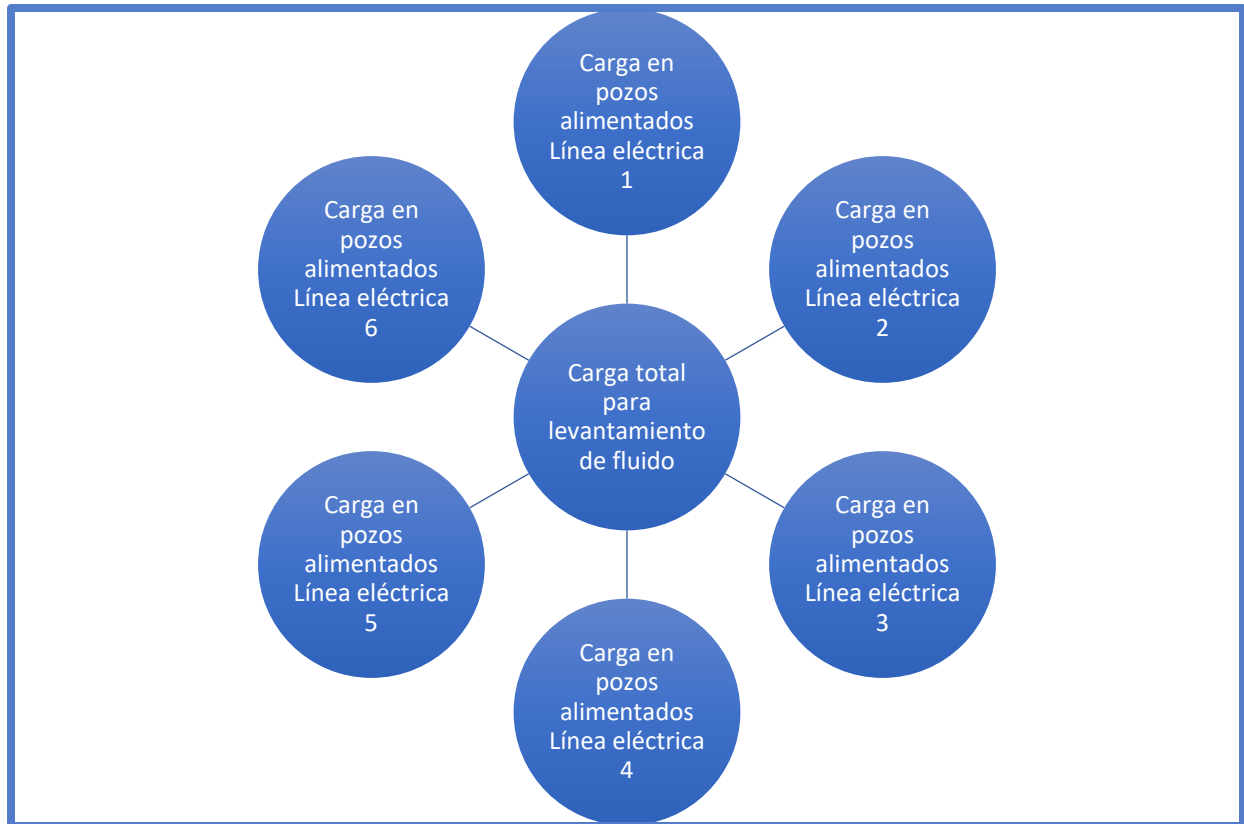


Figura 6. Consolidación de carga total de levantamiento en Campo Caño Limón

La consolidación de los datos se realizó de la siguiente manera:

1. Para la tasa de fluido, se adquirieron los datos reportados por los supervisores de cada facilidad del fluido total tratado en 24 horas, diariamente se obtenía un dato correspondiente a la facilidad 1 y a la facilidad 2, la suma de estos datos arrojaba un dato total correspondiente al fluido levantado en un día por medio de todos los pozos en producción.

2. Para la carga o potencia requerida, se tomaron los datos de los medidores de energía de cada línea eléctrica que alimenta un grupo determinado de pozos, este dato corresponde al promedio diario de la potencia o carga instantánea por hora de cada línea. La suma de estos

promedios diarios corresponde a la potencia o carga instantánea promedio destinado a levantamiento de fluido de los pozos en producción.

A partir de lo descrito anteriormente, se generó una base datos con valores diarios de energía para levantamiento de fluido y fluido levantado (ver apéndice 1), de la cual se deriva la siguiente gráfica para análisis del factor de levantamiento en forma general de todo el campo. La información recolectada corresponde al periodo de tiempo a partir de octubre de 2016 hasta octubre de 2017 (12 meses de muestreo).

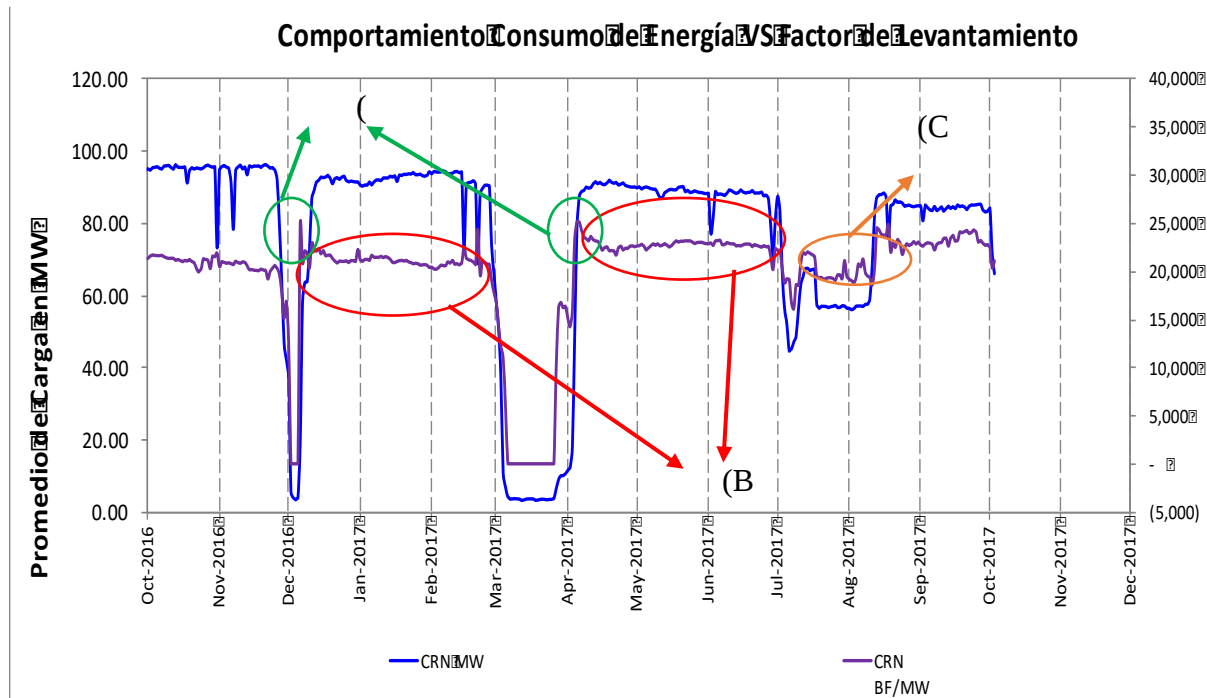


Figura 7. Comportamiento de carga y factor del levantamiento en campo Caño Limón

A partir de la figura anterior se observan distorsiones en el comportamiento promedio del factor de levantamiento descritas a continuación:

(A): Incremento del factor de levantamiento durante un periodo corto de tiempo, inmediatamente después del arranque de pozos por sabotaje al oleoducto Caño Limón – Coveñas. Este incremento del factor de levantamiento se presenta por presurización del yacimiento durante las paradas totales del campo por llenado total de tanques de almacenamiento durante la restricción de bombeo de crudo por el oleoducto.

(B): Mejoramiento del factor de levantamiento en el mes de abril respecto al mes de febrero, después de una parada de campo total en el mes de marzo por sabotaje al oleoducto Caño Limón – Coveñas. Este incremento fue de aproximadamente 2000BPFD bajo las mismas condiciones operativas en los dos periodos de tiempo en comparación. De aquí, surge gran parte de la justificación de este proyecto.

(C): Este periodo corresponde a limitación de bombeo por oleoducto alterno, bajo estas condiciones, fue necesario seleccionar pozos para apagar con el fin de no superar los límites de almacenamiento en tanques.

4.2 Fase 2. Parámetros de selección de los pozos más representativos del campo para realizar una evaluación detallada del comportamiento del factor de levantamiento (BF/MW).

A partir del desarrollo de la fase 1, se desarrolló un archivo para graficación de datos mediante la herramienta “*Spotfire*”, este software se alimenta de 4 bases de datos, estas bases contienen aproximadamente ocho millones de filas de datos, y se clasifican de la siguiente manera:

- Base datos de parámetros eléctricos.
- Base de datos con variables de producción de los pozos (tasa, BSW, aceite neto, presión en cabeza, características mecánicas del pozo).

- Base de datos con comentarios de sala de control y comentarios de intervenciones operaciones y análisis de fluido realizados.

Se realizó un filtro de selección de pozos para analizar más detalladamente el factor de levantamiento, los criterios de selección de pozos para objeto de estudio tendrán como base el periodo de tiempo (B) (ver figura 7), en donde los parámetros operacionales del campo se mantuvieron igual respecto al mes de comparación anterior y hubo un mejoramiento del factor de levantamiento.

Se posee una base datos con los parámetros operacionales de cada pozo que se genera diariamente desde el sistema de supervisión o *Scada* de la compañía. A partir de estos datos automáticamente se obtiene el factor de levantamiento de cada pozo día a día.

Mediante la depuración de datos observada en la figura 8 durante el periodo de tiempo (B) de la figura 7, se obtuvieron cuales pozos, de los 369 que se encuentran en producción, tuvieron una mejora significativa en el factor de levantamiento individual y como consecuencia, el factor de levantamiento general del campo tuvo incremento en los barriles de fluido levantados por megavatio de energía en el periodo de tiempo seleccionado para el análisis y evaluación.

Mediante software de análisis de datos, se realizó una comparación del antes y después de todos los pozos del campo durante el periodo de tiempo (B) de la figura 7.

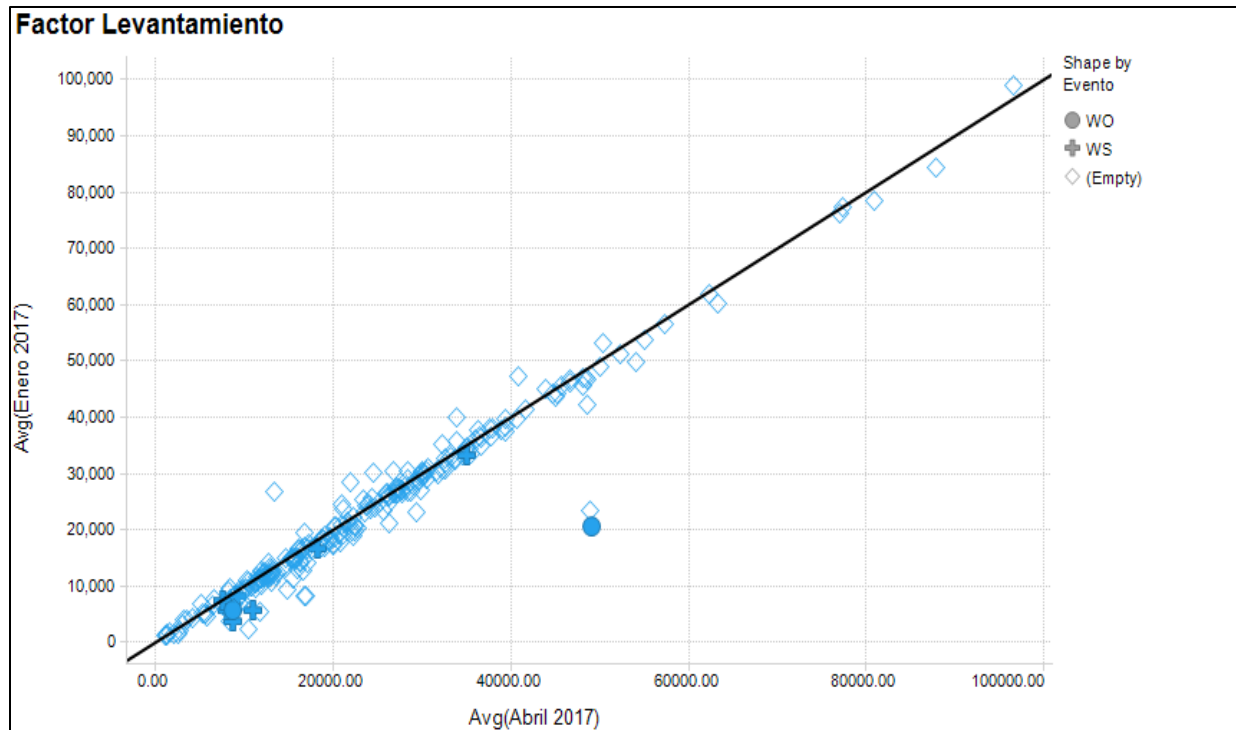


Figura 8. Factor de levantamiento en pozos Enero – Abril

Los pozos bajo la pendiente en la figura 8, tuvieron un mejoramiento del factor de levantamiento.

Para realizar un enfoque más detallado y determinar que variables influyeron en el aumento del factor de levantamiento de estos pozos, se seleccionó una muestra de 10 pozos cuyo comparativo del factor de levantamiento durante el periodo de tiempo seleccionado, tuvieron los mejoramientos más significativos, con un incremento de más de 10% en el factor de levantamiento.

Los criterios de selección de pozos de los 10 pozos objeto de estudio son los siguientes:

1. Pozos con sistema de levantamiento artificial *ESP*.
2. Pozos con piloto de prueba de equipos con nuevas tecnologías para fondo y/o superficie.

3. Pozos intervenidos con trabajos de *Well service* o *Workover* durante el periodo seleccionado para estudio.

4. Incremento de más de 10% en el factor de levantamiento después del arranque de campo en abril

A partir de los criterios de selección expuestos, se obtuvo la siguiente lista de pozos escogidos para llevar a cabo el análisis detallado del factor de levantamiento en forma individual. Por acuerdos de manejo de información y confidencialidad de la compañía, se nombrarán los pozos escogidos en forma numérica en el orden que se reportan diariamente en la base de datos de producción de la compañía.

Tabla 3.

Pozos seleccionados para análisis detallado de factor de levantamiento

Ítem	Pozo	Profundidad intake (ft)	Capacity (BFPD)	Frecuencia operación (Hz)	BSW (%)	Trabajo WS/WO	Mejoramiento FL (%)	Observaciones
1	406	3569	11000	48.3	98.4	WO	159	
2	229	3709	8600	39.5	97	N/A	41	
3	587	6400	3250	66.4	96	N/A	40	
4	613	5503	3000	46	98.3	N/A	38	
5	160	4850	3400	36	93	N/A	12	
6	455	4061	5000	134	97.4	WS	57	Prueba de ESP con motor <i>PMM</i>
7	344	3886	2300	64.7	96.5	WO	35	
8	525	7329	550	48.7	87	WS	39	
9	186	7201	3600	54	93	WS	107	
10	521	7376	500	46	60	WS	38	

4.3 Fase 3. Recolección, organización y análisis de la data histórica de las variables de producción de los pozos seleccionados y principales variables operacionales.

En desarrollo de la fase 3, se recolectó para cada pozo seleccionado según la tabla 1, la siguiente información de variables operacionales durante el periodo de tiempo (B) como se muestra en la figura 7.

1. Tasa
2. *BSW*
3. Presión de *intake* (solo si tiene sensor de fondo)
4. Frecuencia operación
5. Potencia entrada *VFD*
6. Presión en cabeza de pozo
7. Factor de levantamiento.

Estos datos se consiguen por medio del sistema de supervisión (*Scada*), el cuál realiza un corte en la interrogación de controladores de proceso y la exportación de datos cada 3 minutos en promedio, dependiendo la criticidad de la variable monitoreada. Los datos adquiridos se promediaron para sacar un valor único por día de cada variable.

Adicionalmente, se incluye para cada pozo seleccionado, observaciones y comentarios según las bitácoras reportadas por el operador de sala de control para el listado objeto de estudio.

A continuación, se exponen los datos adquiridos de los pozos objeto de estudio entre enero 2017 y mayo 2017.

- Datos recolectados pozo 406 (ver apéndice B)

- Datos recolectados pozo 229 (ver apéndice C)
- Datos recolectados pozo 587 (ver apéndice D)
- Datos recolectados pozo 613 (ver apéndice E)
- Datos recolectados pozo 160 (ver apéndice F)
- Datos recolectados pozo 455 (ver apéndice G)
- Datos recolectados pozo 344 (ver apéndice H)
- Datos recolectados pozo 525 (ver apéndice I)
- Datos recolectados pozo 186 (ver apéndice J)
- Datos recolectados pozo 521 (ver apéndice K)

Los datos recolectados, se exportaron a formato de *excel* como tablas, posteriormente estos datos alimentaron el archivo para generador de gráficas y análisis en el software “*Spotfire*”.

Las figuras generadas a partir de los datos recolectados se muestran en el desarrollo de la fase 4 como base principal para análisis.

4.4 Fase 4. Análisis de las principales variables que afectan el comportamiento del factor de levantamiento (BF/MW) de los pozos seleccionados.

A partir de la data recolectada en la fase 3 con los pozos seleccionados para estudio y evaluación, se realiza el siguiente análisis en cada uno mediante graficación de datos. Por cada pozo objeto del análisis se generaron dos gráficas, una con el comportamiento del factor levantamiento del pozo, y la otra con el comportamiento de sus principales variables operacionales.

4.4.1 Pozo 406.

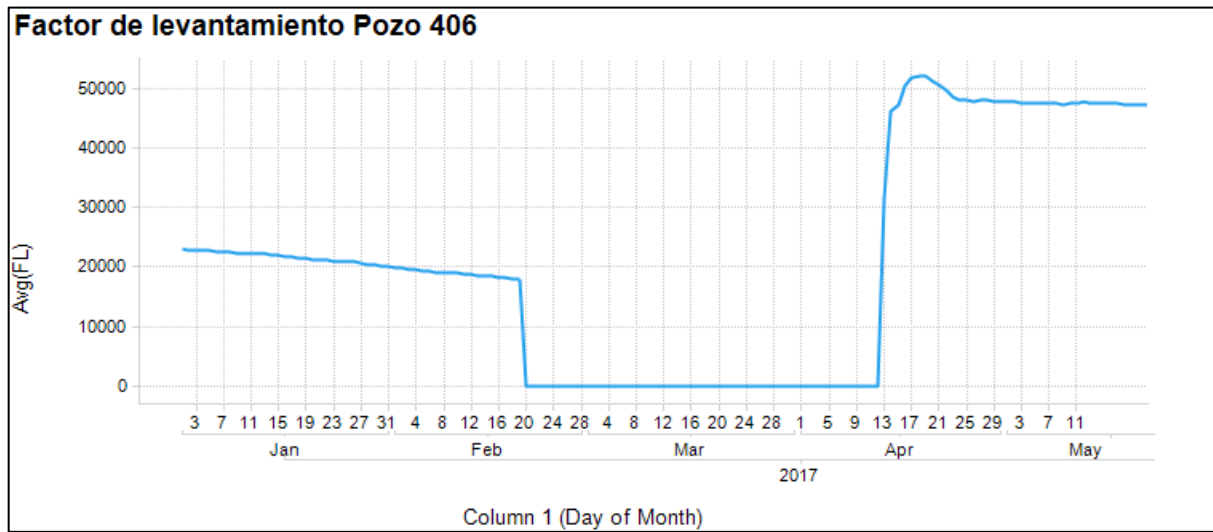


Figura 9. Factor de levantamiento Pozo 406

En el pozo 406 se observa un aumento del factor de levantamiento en 28000 BFPD/MW después de la parada de campo del mes de marzo, en los registros del Ingeniero de Producción se encontró que el pozo se intervino con un trabajo de *workover*, se cambió motor y bomba *ESP*.

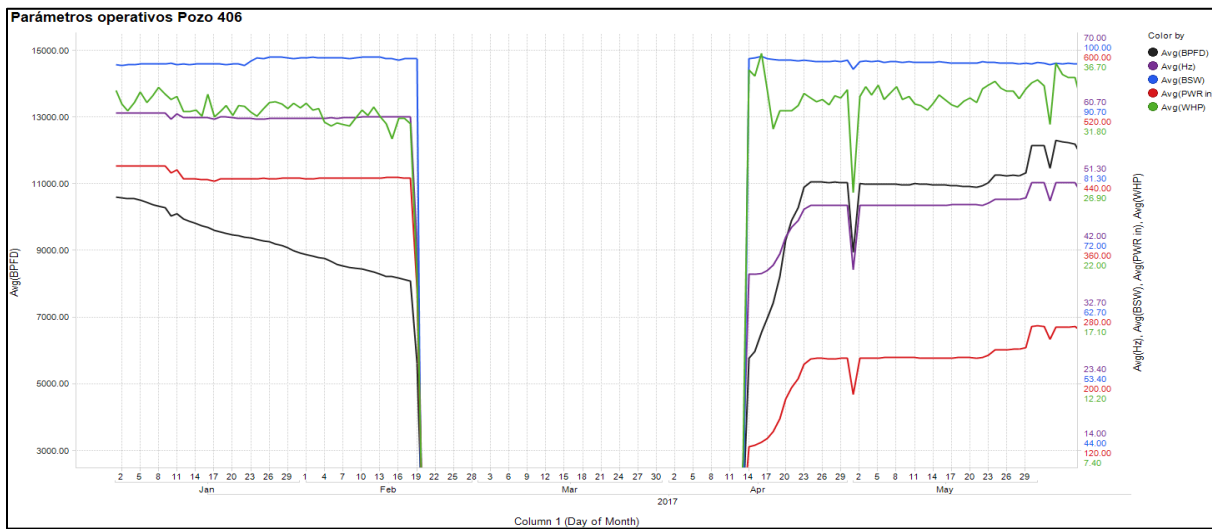


Figura 10. Parámetros operativos Pozo 406

Datos del sistema *ESP* antes y después del trabajo de *workover*.

Tabla 4.

Características sistema ESP retirado pozo 406

ESP Antes				
Motor			Bomba	
Potencia (HP)	Voltage (V)	Corriente (A)	Etapas	Intake (ft)
504	2810	108	105	3685

Tabla 5.

Características sistema ESP instalado pozo 406

ESP Después				
Motor			Bomba	
Potencia (HP)	Voltage (V)	Corriente (A)	Etapas	Intake (ft)
574	3720	92.6	105	3570

Como se observa en las tablas 2 y 3, no hubo una variación significativa en el sistema *ESP* instalado, por esta razón, se puede concluir que el factor del levantamiento del pozo mejoró debido al trabajo de *workover* realizado.

Se obtuvo una reducción de energía de 0.16 MW/hr que anualmente representan un ahorro de US\$117,000.00 en costos de energía para ese pozo.

4.4.2 Pozo 229. El pozo 229 no tuvo intervenciones en trabajos de *workover* y/o *well service* durante la parada de campo del mes de marzo, sin embargo, presentó una mejora en el factor del levantamiento como se muestra en la figura 11.

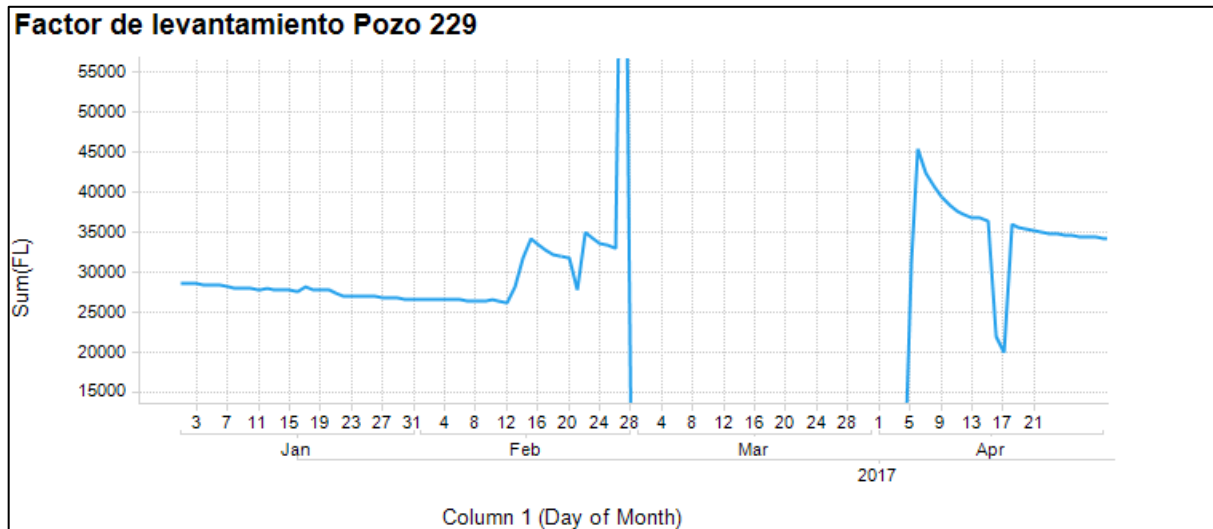


Figura 11. Factor de levantamiento Pozo 229

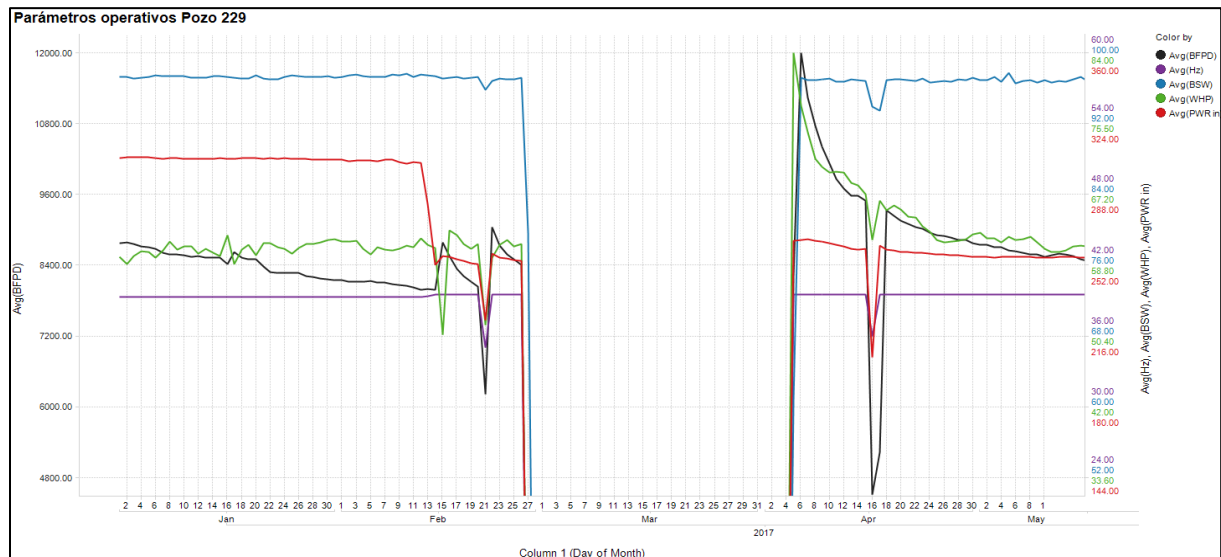


Figura 12. Parámetros operativos Pozo 229

Como se observa en la figura 12, hubo una reducción en el consumo de energía de casi 40 kW, este pozo antes de la parada de campo fue objeto de actividades de optimización de equipos de fondo y de superficie mediante la parametrización del motor a condiciones de operación y del ajuste de la frecuencia máxima de operación del *VFD*, acercando este parámetro, a la frecuencia de operación del pozo.

Esta optimización de energía evidencia mejores resultados con pozos que trabajen con *VFD* en modo de operación V/Hz (voltios por hertz).

La reducción del consumo de energía representa ahorros anuales de US\$29,000.00.

4.4.3 Pozo 587. Al igual que el pozo 229, el pozo 587 tampoco tuvo intervenciones en trabajos de *workover* y/o *well service* durante la parada de campo del mes de marzo, sin embargo, también presentó una mejora en el factor del levantamiento como se muestra en la figura 13.

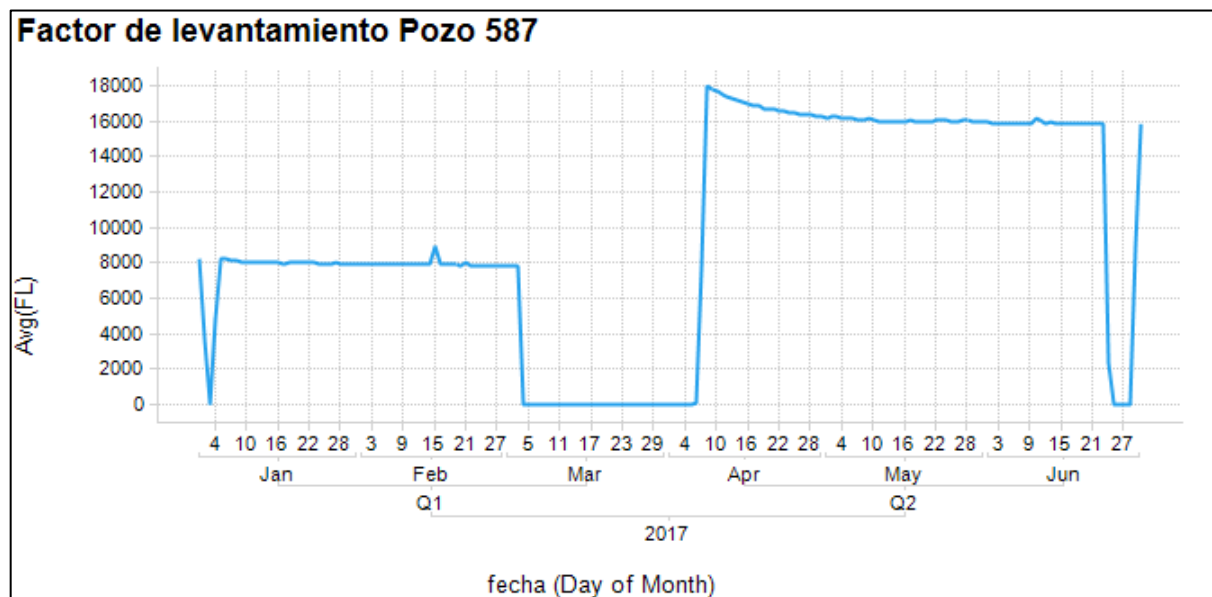


Figura 13. Factor de levantamiento Pozo 587

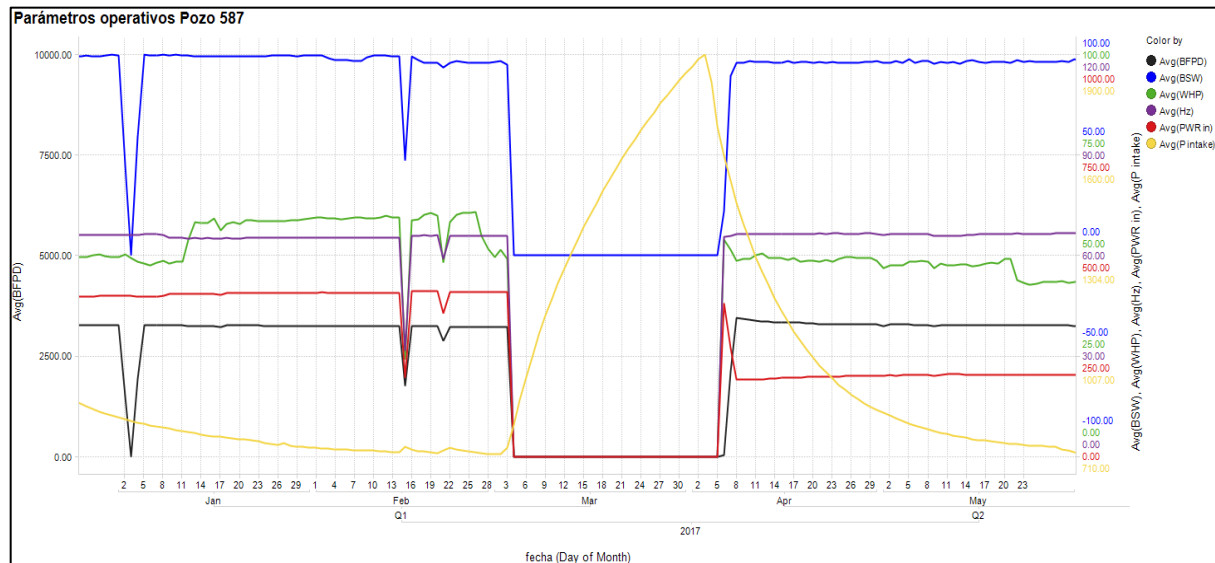


Figura 14. Parámetros operativos Pozo 587

El sistema *ESP* del pozo 587 tiene instalado sensor de fondo, como se observa en la Figura 14, hubo presurización del yacimiento, esto se tradujo en un consumo menor de energía en el levantamiento de fluido, esta presión empezó su declinación hasta su estabilización durante los días posteriores al arranque del campo.

4.4.4 Pozo 613. El pozo 613 no tuvo intervenciones en trabajos de *workover* y/o *well service* durante la parada de campo del mes de marzo, sin embargo, presentó una mejora en el factor del levantamiento como se muestra en la figura 15.

Como se observa en la figura 16, no hubo una reducción en el consumo de energía, pero si un aumento en la tasa de producción del pozo a la misma frecuencia de operación, esto como consecuencia, mejora el factor de levantamiento.

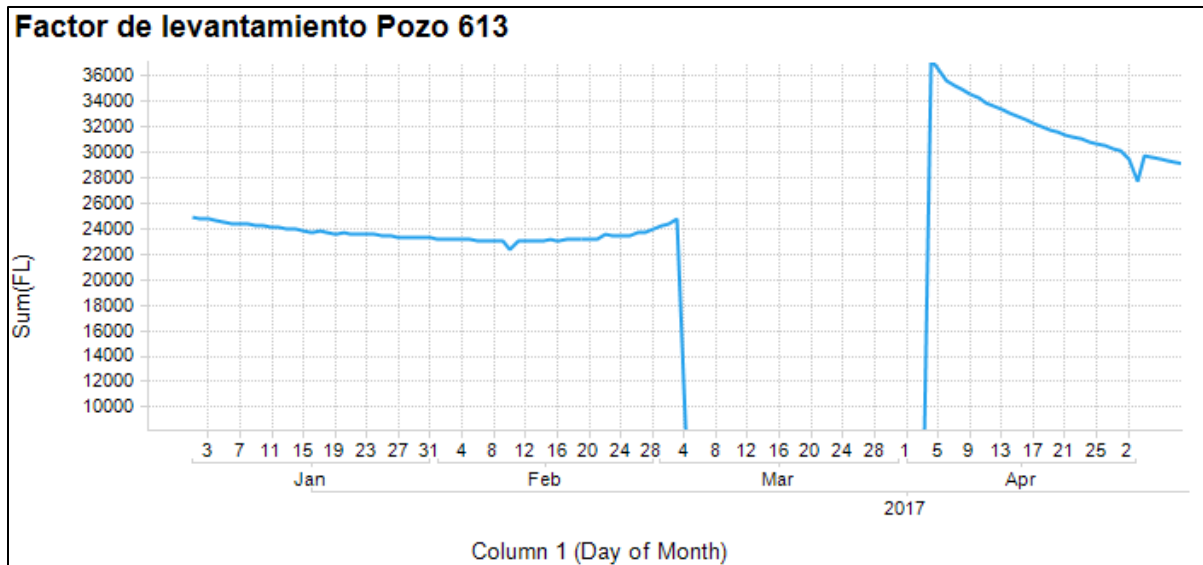


Figura 15. Factor de levantamiento Pozo 613

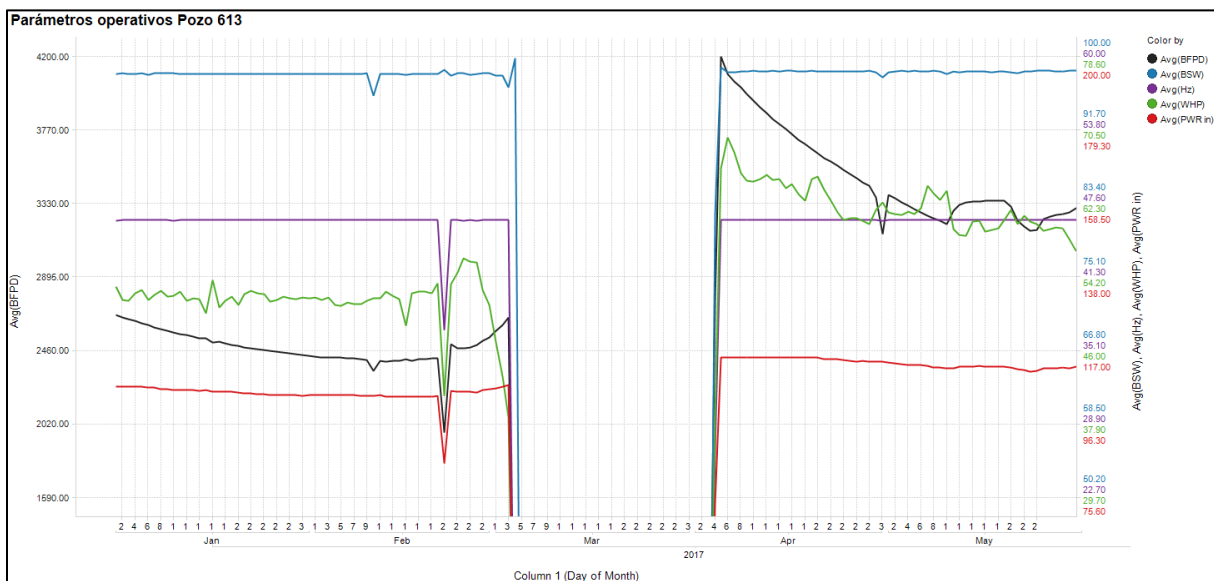


Figura 16. Parámetros operativos Pozo 613

Se hizo una revisión de trabajos realizados durante la parada de campo, y se encontró que, por recomendación del Ingeniero de Integridad Mecánica, se ejecutó el cambio de la línea de flujo del pozo con una variación de +0.5 pulgadas en el diámetro interno, la tubería retirada presentaba

obstrucción por sólidos del 30% del diámetro interno, estas condiciones suprimidas después del cambio de línea permitieron una restricción más leve en el fluido levantado por el sistema *ESP*.

No se realizó ajuste en la frecuencia de operación del *VFD*, ya que el pozo se encontraba operando por debajo de su potencial.

4.4.5 Pozo 160. El pozo 160 no tuvo intervenciones en trabajos de *workover* y/o *well service* durante la parada de campo del mes de marzo, sin embargo, presentó una mejora en el factor del levantamiento como se muestra en la figura 17.

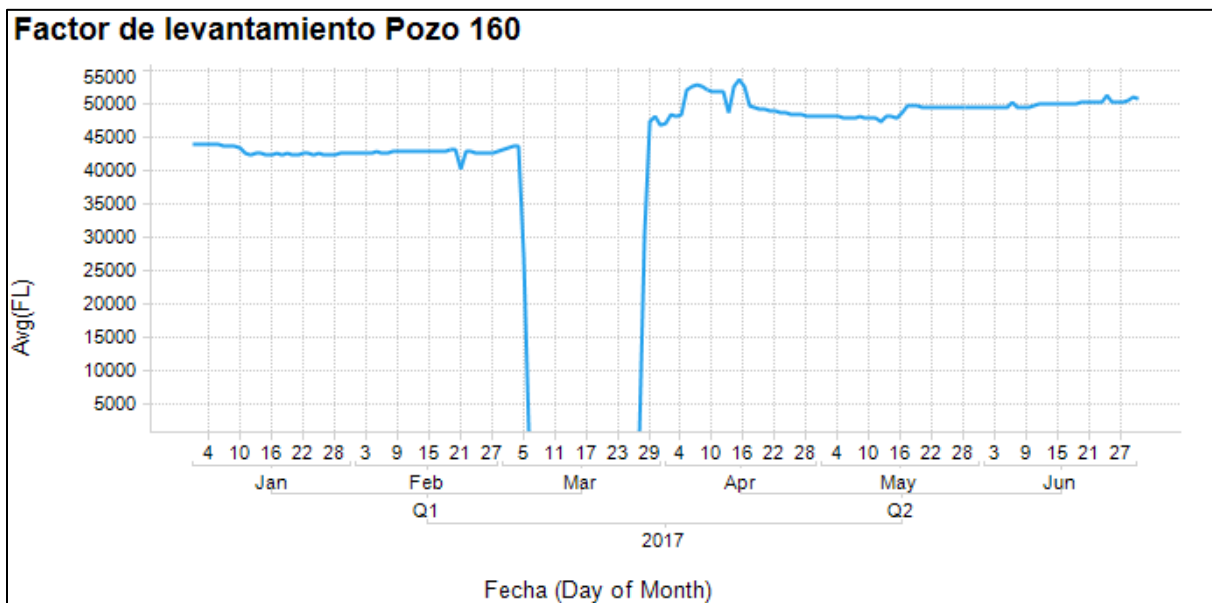


Figura 17. Factor de levantamiento Pozo 160

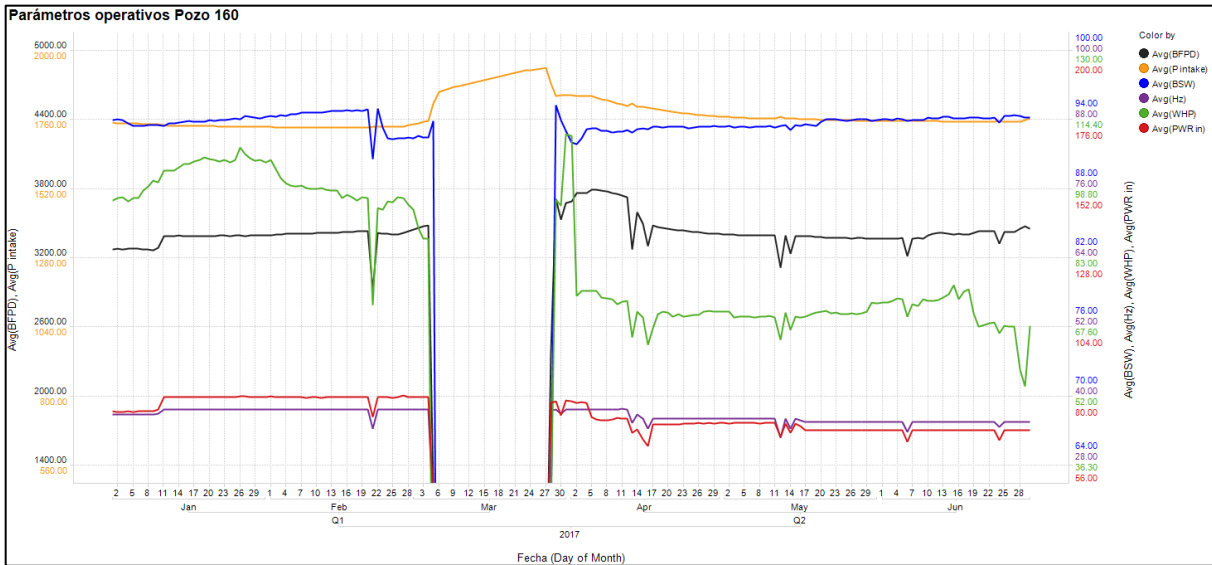


Figura 18. Parámetros operativos Pozo 160

Como se observa en la figura 18, hubo un descenso en la presión de cabeza de pozo después del arranque del pozo en abril. Se revisaron bitácoras de los especialistas de producción de campo y se encontró que el pozo antes de marzo tenía restricción de flujo a través de la válvula wing del cabezal. En abril cuando arrancó el pozo se abrió esta válvula, se bajó frecuencia de operación en el VFD y esto se tradujo en una reducción del consumo de energía mejorando el factor del levantamiento.

La reducción del consumo de energía estuvo por el orden de los 13kW/hr, que anualmente puede representar un ahorro de US\$9,600.00.

4.4.6 Pozo 455. El pozo 455 hace parte de una prueba piloto de motor tipo imanes permanentes en el equipo *ESP*. La característica principal de este tipo de motor es que no tiene deslizamiento ni corriente de magnetización, es decir, toda la corriente aplicada corresponde a trabajo efectivo o torque. Teóricamente un motor de imán permanente puede lograr ahorros del 10% en el consumo de energía.

Se realizó un comparativo con el sistema *ESP* anterior que tenía motor convencional de inducción a la misma tasa de operación.

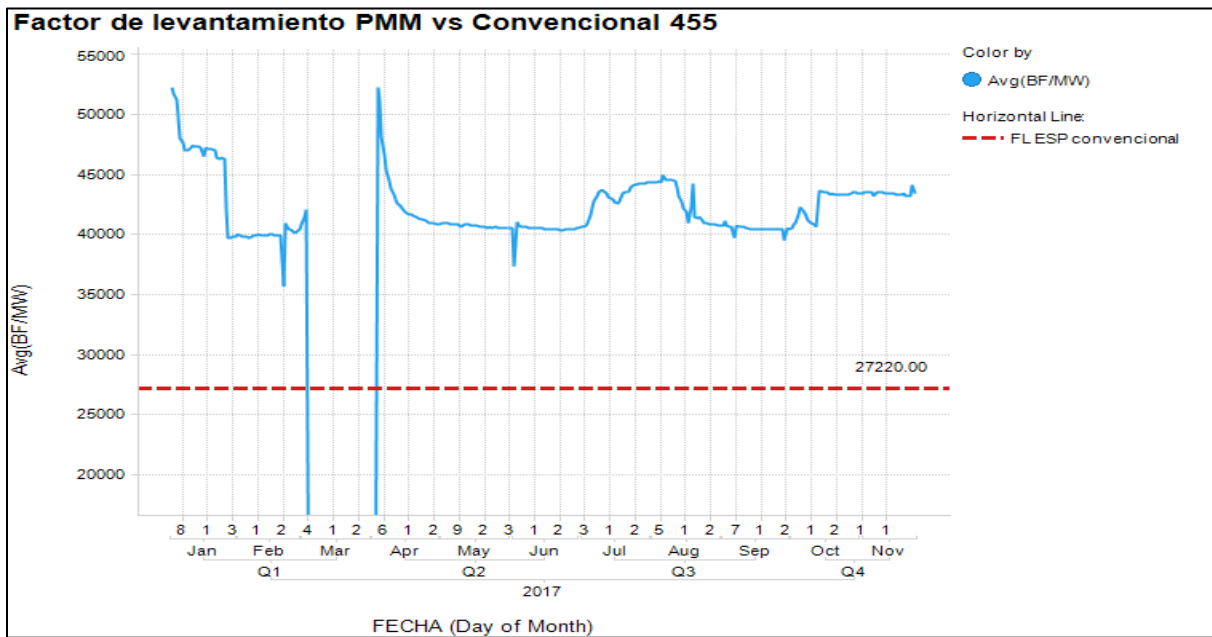


Figura 19. Factor de levantamiento Pozo 455

En la figura 19 se puede observar un incremento del factor de levantamiento considerable, al pasar de 27220 BF/MW a 43000BF/MW aproximadamente.

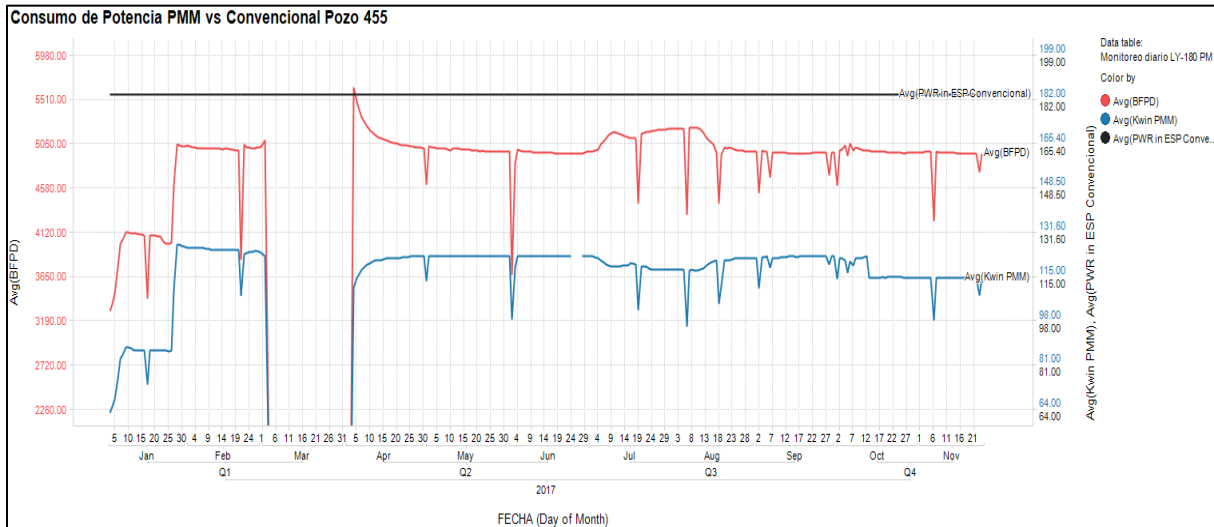


Figura 20. Parámetros operativos Pozo 455

Como se observa en la figura 20, el consumo de energía se redujo considerablemente con el equipo *ESP* con motor de imanes permanentes. Eso a su vez incrementó el factor de levantamiento.

La reducción del consumo de energía para levantar la misma tasa fluido de fluido estuvo alrededor de 30%, esto representa un ahorro anual en energía de US\$32,205.00.

El 20% de ahorro adicional, al 10% teórico que ofrecen los motores de imanes permanentes, se obtuvo por el tipo de bomba instalada (*Power Save*), cuya eficiencia por etapa es mayor a la eficiencia de las bombas convencionales.

Esta prueba tiene un comportamiento adicional observado fuera del tiempo (B) de la figura 7, correspondiente al cambio del equipo de superficie (*VFD*) y su tecnología. Inicialmente el sistema *ESP* trabajó con variador suministrado por el fabricante del motor de imán permanente, cuyo principio de operación es control Voltios por Hertz. El pozo se arrancó en el mes de octubre con un *VFD* Marca *Robicon*, que tiene un modo de operación principal por control vectorial, y que,

para esta prueba, se configuró con modo de operación PMM (*permanent magnet motor*). Como se evidencia en la figura 20, el factor de levantamiento tuvo un mejoramiento adicional al obtenido por la instalación del sistema *ESP* con imanes permanentes. En la figura 20, de igual manera se observa una disminución en el consumo de energía de un 4%, adicional al 30% conseguido inicialmente en la prueba piloto. Esta reducción adicional del 4% en el consumo de energía representa US\$4,294.00 anuales.

4.4.7 Pozo 344. El pozo 344 fue intervenido durante la parada de campo del mes de marzo con un trabajo de *workover*, sin embargo, se bajó el mismo equipo *ESP* con el que venía operando.

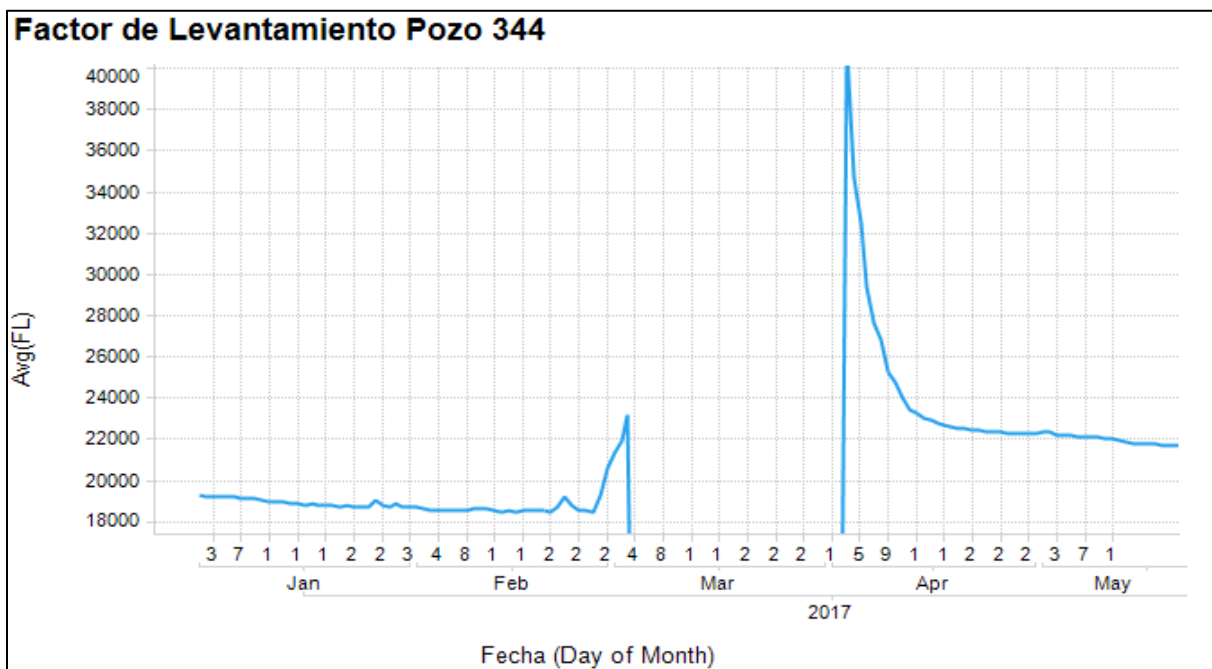


Figura 21. Factor de levantamiento Pozo 344

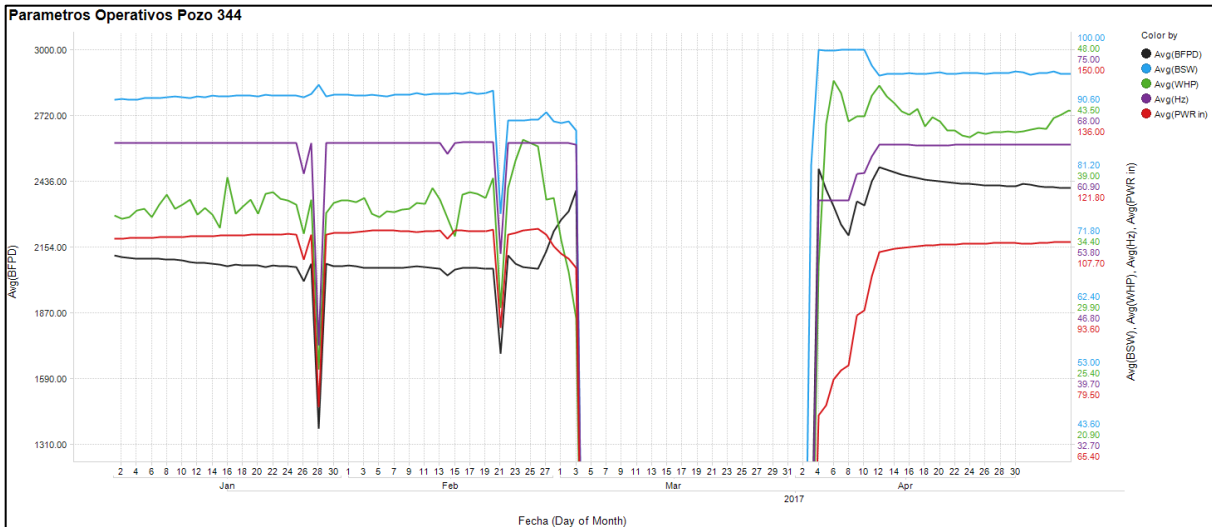


Figura 22. Parámetros operativos Pozo 344

A partir de la gráfica anterior se puede observar que el mejoramiento del factor de levantamiento de la figura 22, corresponde como consecuencia al trabajo de *workover* que permitió un aumento de la tasa de producción con la misma energía utilizada por el sistema de levantamiento artificial.

4.4.8 Pozo 525. Este pozo tuvo trabajos de intervención por *well service*, tras falla eléctrica de equipo de fondo.

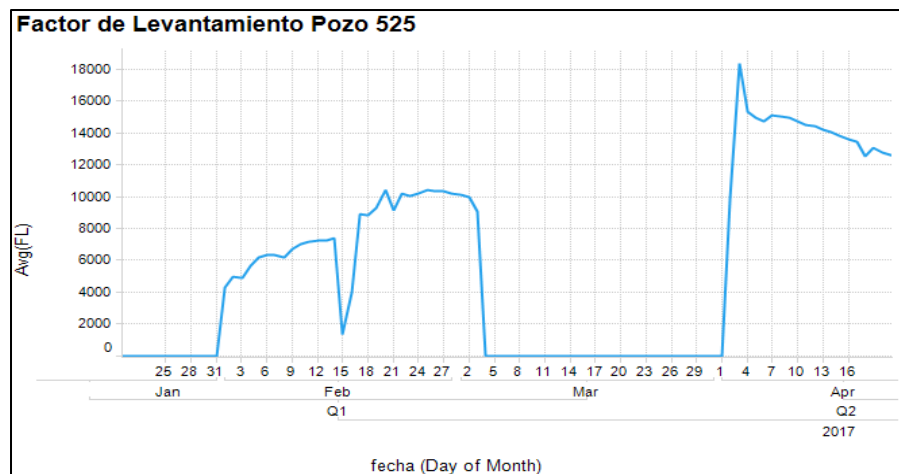


Figura 23. Factor de levantamiento Pozo 525

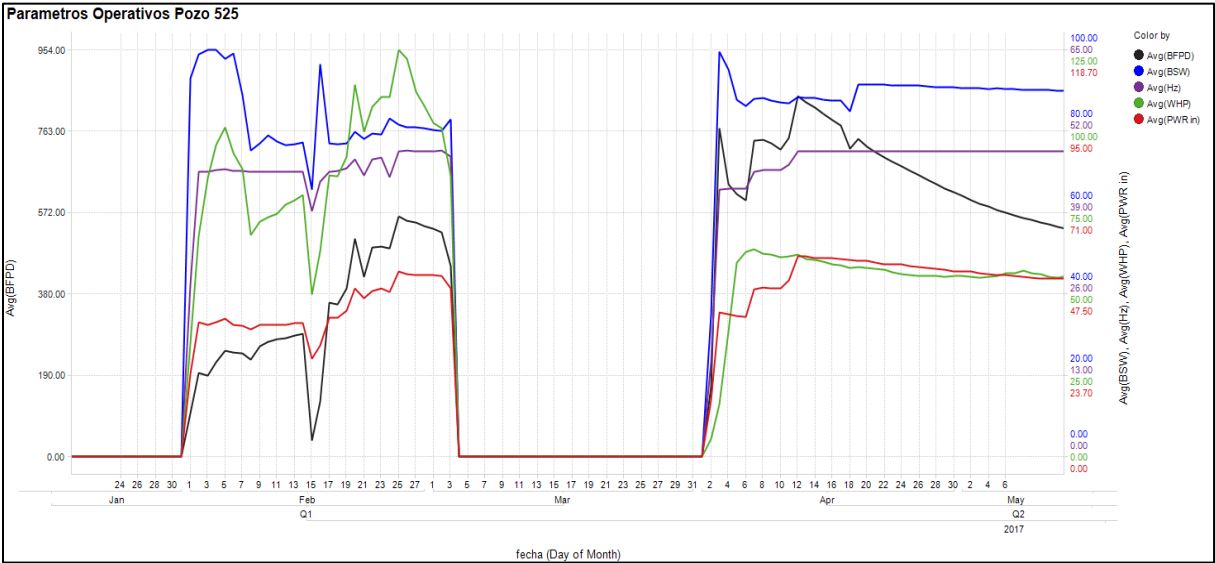


Figura 24. Parámetros operativos Pozo 525

Tabla 6.

Características sistema ESP retirado pozo 525

ESP Antes				
Motor			Bomba	
Potencia (HP)	Voltage (V)	Corriente (A)	Etapas	Intake (ft)
153	1375	71	238	7490

Tabla 7.

Características sistema ESP instalado pozo 525

ESP Después				
Motor			Bomba	
Potencia (HP)	Voltage (V)	Corriente (A)	Etapas	Intake (ft)
120	1295	59	153	7329

Según las tablas 4 y 5 se puede observar una mejora en el diseño del sistema *ESP*, al instalar un equipo de menor potencia que responde a la tasa de producción que maneja el pozo. Este pozo se dejó trabajando con la misma potencia que operaba el equipo retirado, sin embargo, se obtuvo una tasa mayor. La inspección del equipo retirado evidenció desgaste severo de las etapas, por esta razón, a pesar de tener un motor de mayor capacidad, la bomba no levantaba la tasa de fluido a la cual se diseñó.

4.4.9 Pozo 183. Este pozo tuvo trabajos de intervención por *well service*, tras falla eléctrica de equipo de fondo.

El diseño del nuevo equipo instalado tuvo una mejora significativa del factor de levantamiento evidenciada en la figura 25.

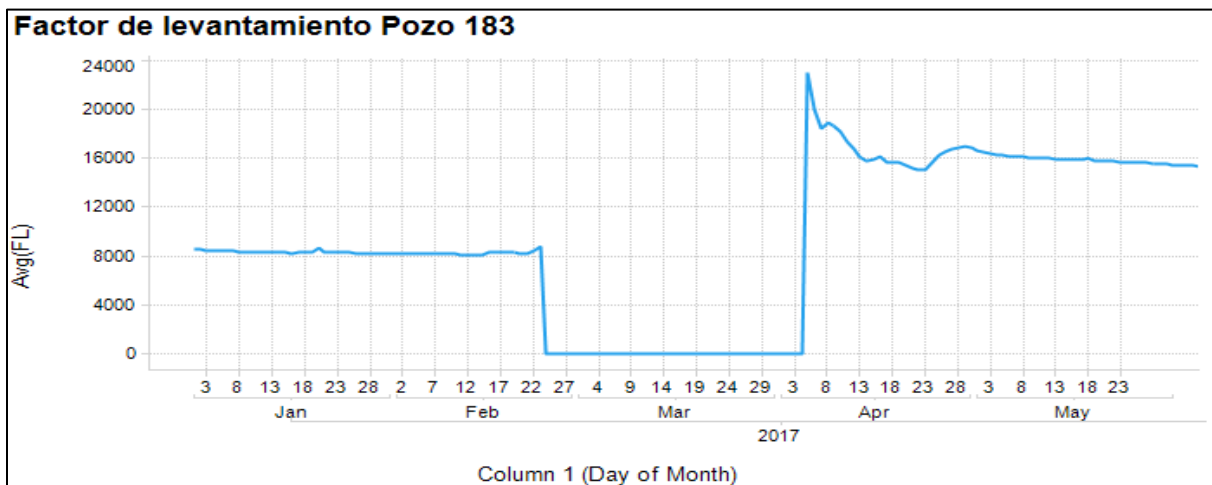


Figura 25. Factor de levantamiento Pozo 183

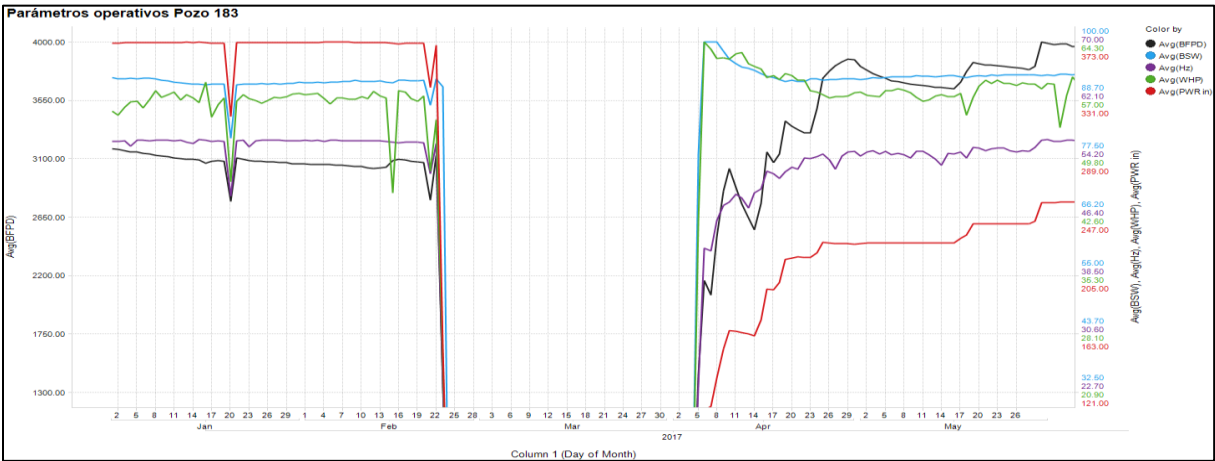


Figura 26. Parámetros operativos Pozo 183

Tabla 8.

Características sistema ESP retirado pozo 183

ESP Antes				
Motor			Bomba	
Potencia (HP)	Voltage (V)	Corriente (A)	Etapas	Intake (ft)
418	2053	130	158	7207

Tabla 9.

Características sistema ESP instalado pozo 183

ESP Después				
Motor			Bomba	
Potencia (HP)	Voltage (V)	Corriente (A)	Etapas	Intake (ft)
391	2533	92	164	7201

Según las tablas 6 y 7 se puede observar una mejora en el diseño del sistema *ESP*, al instalar un equipo de menor potencia que responde a la tasa de producción que maneja el pozo. La reducción de la energía requerida por el equipo aumenta el factor de levantamiento.

La reducción de energía estuvo por el orden de los 115kW/hr, representando un ahorro anual de US\$84,450.00.

4.4.10. Pozo 521

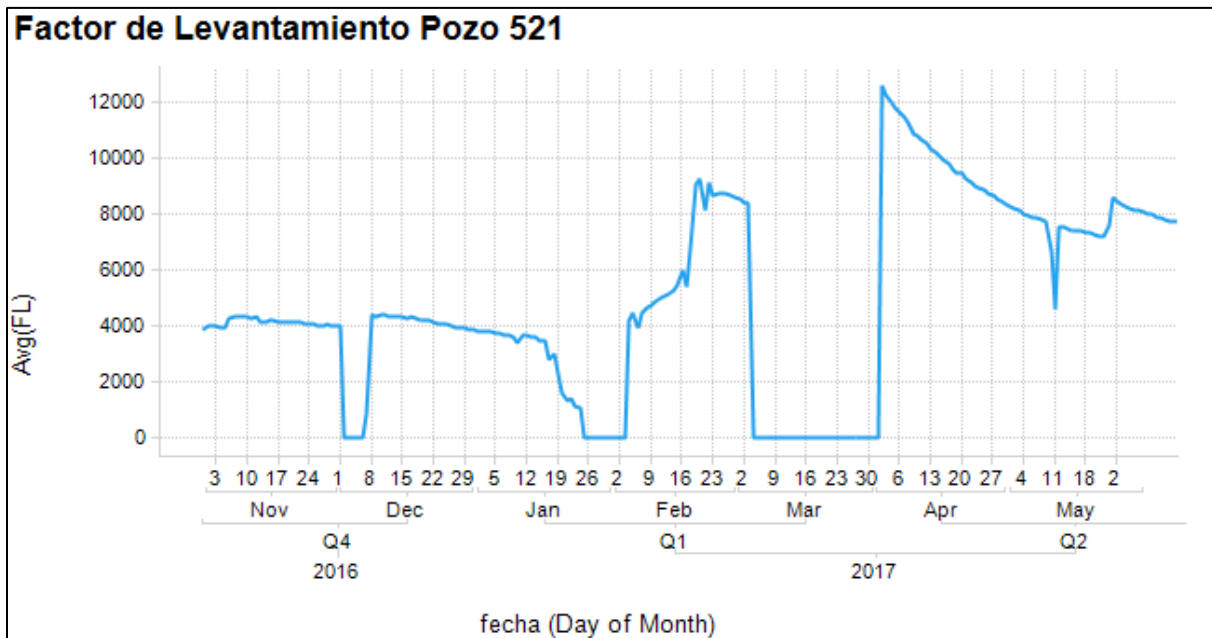


Figura 27. Factor de levantamiento Pozo 521

El pozo 521 tuvo un trabajo de *well service* por falla eléctrica del equipo de fondo en enero. En febrero el pozo entro en operación, sin embargo, como se observa en la figura 27, el pozo solo se puso en condiciones de operación normal casi finalizando el mes de febrero, razón por la no influyó en el factor de levantamiento general del campo en este mes. Esta influencia reflejó en el mes de abril después de arranque del campo.

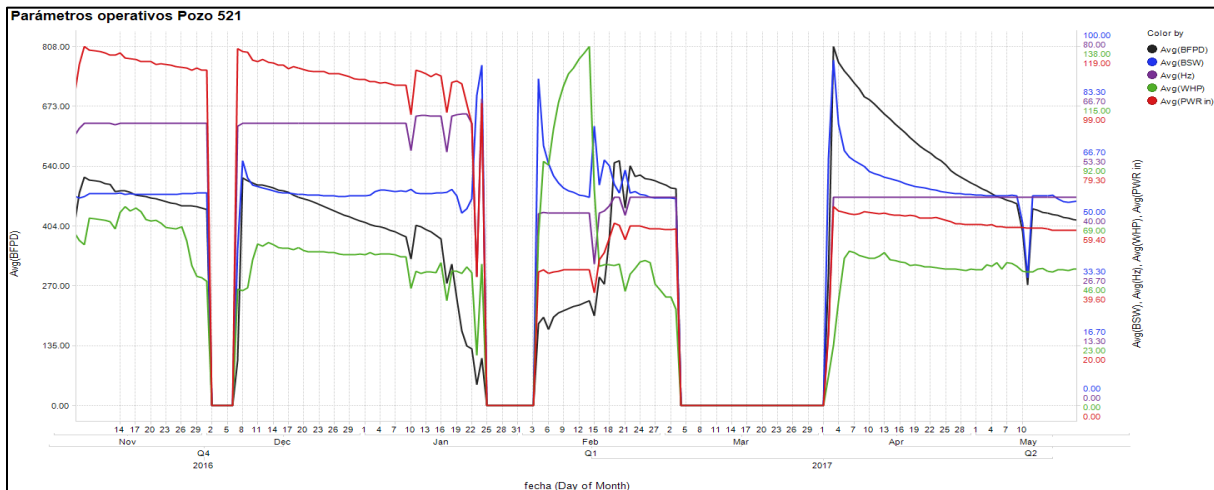


Figura 28. Parámetros operativos Pozo 521

Tabla 10.

Características sistema ESP retirado pozo 521

ESP Antes				
Motor			Bomba	
Potencia (HP)	Voltage (V)	Corriente (A)	Etapas	Intake (ft)
418	2053	130	158	7207

Tabla 11.

Características sistema ESP instalado pozo 521

ESP Después				
Motor			Bomba	
Potencia (HP)	Voltage (V)	Corriente (A)	Etapas	Intake (ft)
391	2533	92	164	7201

Según las tablas 8 y 9 se puede observar un aumento en la potencia del equipo instalado, sin embargo, la eficiencia energética de este último en comparación con el anterior mejoró por:

1. El pozo 521 maneja sólidos, razón por la cual el equipo anteriormente instalado necesitaba más potencia para la tasa de fluido requerida al presentar alto desgaste en las etapas de la bomba ocasionada durante su tiempo de operación.
2. El nuevo diseño contempló una potencia mayor para evitar una operación por encima de 55Hz con el fin de proteger las etapas de la bomba al desgaste ocasionado por estos sólidos.
3. La reducción del consumo de energía estuvo alrededor de 45kW/hr, que representan ahorros anuales de US\$33,000.00

4.4.11 Variables observadas en el comportamiento del factor de levantamiento. A partir del análisis de los 10 pozos seleccionados como objeto de estudio, se observó que las siguientes variables tienen incidencia en el comportamiento del factor de levantamiento, ya se aumentándolo o disminuyéndolo:

- Presión en cabeza de pozo: Se observó que en pozos donde se tenía restricción por medio de válvulas en el cabezal de pozo o *manifolds*, se tenía un consumo de potencia mayor, de igual manera, la presión de cabeza de pozo está asociada a los diámetros de líneas de flujo de los pozos hacia troncales de recibo. Pozos con restricción por finos solidificados en las tuberías, tenían mayor presión en cabeza y, por ende, un consumo de energía adicional al requerido para la tasa de producción deseada.
- Eficiencia del conjunto de etapas la bomba electrosumergible: el pozo con prueba de nuevas tecnologías (motor PMM), se evidenció, una reducción considerable del consumo de energía (20%), asociado a la eficiencia de las etapas de la bomba, para este caso, la bomba de tipo

Power Save, del fabricante *Novomet*, por su diseño patentado, posee etapas con mayor cabeza de fluido a menor potencia comparadas con las bombas convencionales. Sin embargo, el uso de estas bombas no se recomienda para pozos con alta producción de sólidos ya que disminuye el runlife del equipo por pérdida acelerada de eficiencia asociada al desgaste de las etapas.

- Eficiencia del motor eléctrico del sistema *ESP*: como se mencionaba anteriormente, el pozo con piloto de pruebas con nuevas tecnologías tiene un motor eléctrico de tipo imanes permanentes. La reducción del consumo de energía por el uso de este tipo de motores está alrededor de un 10%.
- *VFD*: El tipo de variador de frecuencia, tiene una participación directa y relevante en los consumos de energía de un sistema *ESP*, ya que dependiendo de la tecnología del *VFD*, y del modo de operación (voltios/herz, control vectorial, etc), este podría parametrizar adecuadamente el motor logrando su punto máximo de eficiencia, al igual que el modo de operación del *VFD*, repercute en el consumo del sistema, el modo de operación por control vectorial evidencia mejores resultados en consumo de energía.
- Diseño de sistema *ESP*: Los equipos instalados en pozos con trabajos de *well service*, cuya potencia nominal en comparación con el equipo retirado, era menor, tuvieron una influencia importante en el factor de levantamiento, sin embargo, cabe resaltar, que, para pozos con alta producción de sólidos, es recomendable instalar equipos un 20% más grandes que el requerido en el diseño, esto con el fin, de que la bomba trabaje a bajas frecuencias (menores a 55hz), y evitar el desgaste de las etapas. El desgaste de las etapas, es traducido en pérdida de eficiencia y, por ende, mayor consumo de energía.
- Trabajos de *workover* en el pozo: los trabajos de estimulación, asilamiento y cañoneo de nuevas zonas, etc, evidencian un mejoramiento del factor de levantamiento, inicialmente, al mejoramiento de la presión P_{wf} , y permeabilidades de las arenas de producción, sin embargo, en

los pozos objeto de estudio que fueron intervenidos con estos trabajos, no fue posible graficar estas tendencias por falta de sensores de fondo en los equipos instalados. La compañía se reserva de igual forma, la confidencialidad de los registros eléctricos hechos en estos pozos.

4.5 Fase 5. Plan de optimización

Una vez realizado el análisis del factor de levantamiento de forma general e individual para los pozos objeto de estudio, se definieron los siguientes planes con el fin de optimizar las variables influyentes en su comportamiento que se mencionaron en el numeral 4.4.11.

La compañía cuenta con la licencia del software *Spotfire*, dedicado a análisis de datos, como plan inicial de optimización, se plantea el desarrollo de un archivo en este software para realizar tanto general como individual, el análisis del factor de levantamiento de forma semanal, y así, según la variable que haya incidido en el desempeño de un pozo que evidencie un cambio al ejecutar este archivo, tomar medidas según los siguientes numerales de este capítulo.

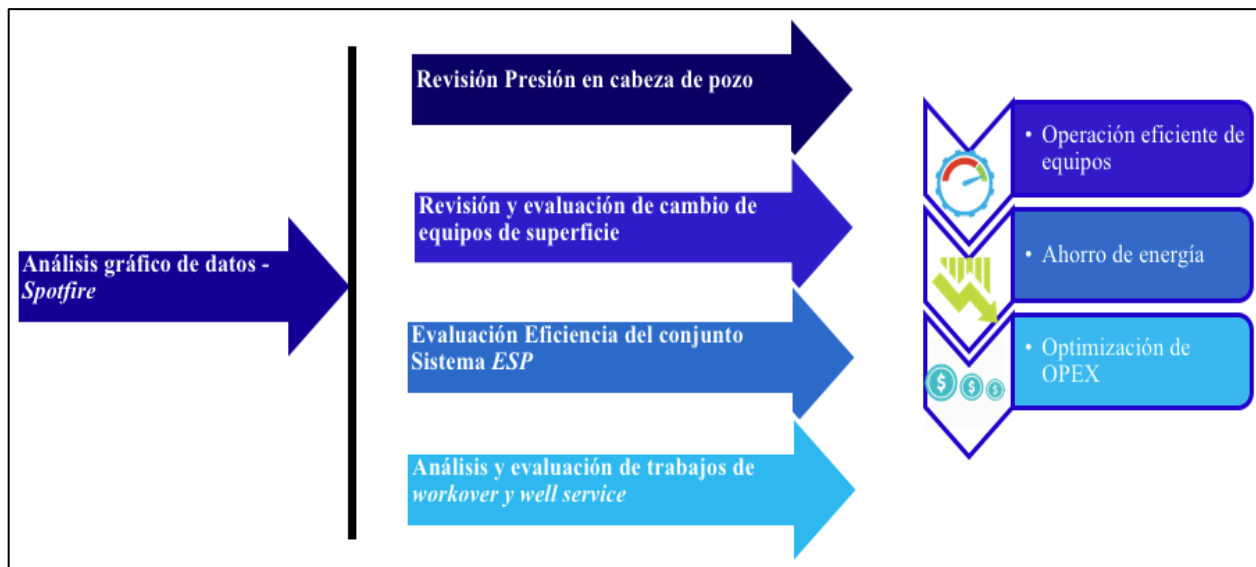


Figura 29. Plan de optimización del factor de levantamiento

1. La presión en cabeza de pozo es una variable que incide en el factor de levantamiento, por ende, mediante el programa de Integridad Mecánica en la Compañía que incluye limpieza de líneas de flujo, una vez se termine la ejecución de estas actividades, se debe realizar la comparación con los ahorros de energía que se consiguieron. Los ahorros están directamente relacionados y dependen de los siguientes factores:

- Reducción en la cabeza dinámica total del sistema *ESP*, esto, por la reducción de la presión en superficie después de los cambios de línea de flujo y/o limpieza de estas líneas.
- A partir de lo anterior, conociendo el número de etapas de la bomba instalada en fondo, y el consumo de energía por etapa, se puede estimar el ahorro final de energía en levantamiento.

Se aclara que la estimación de energía únicamente se puede realizar una vez tenga el listado de pozos a intervenir y se desarrolle un cronograma de ejecución de actividades.

2. La restricción en el cabezal de producción en algunos pozos, se implementa por oscilación en la tasa de producción; ante esta situación, se plantea depurar el listado de todos los pozos que estén operando en estas condiciones, eliminar estas restricciones abriendo válvulas, y posteriormente, implementar el control de tasa por medio de los lazos de control de los *VFDs*, se estima que, por cada 10 pozos intervenidos de esta manera, la reducción de energía oscila alrededor de 115 kW/hr, que se traducen en un ahorro anual de US\$84,000.00. Los valores base para estimar la reducción de energía, se han obtenido por campañas realizadas en otros pozos al detectar esta condición, promedio de ahorro por pozo, 11.5kW/hr.

3. Gestionar la actualización de variadores de frecuencia obsoletos por equipos que puedan trabajar en modo de control vectorial, para lograr un mejor desempeño del equipo de fondo. La Compañía cuenta con *VFDs* marca Robicon, que tienen opción de modo de control vectorial, estos

equipos han sido retirados en campañas de abandono de pozos. Los trabajos de cambio de estos equipos de superficie tienen un costo de US\$7,000.00 / equipo, sin embargo, los ahorros anuales en energía a tarifas actuales con estimación moderada oscilan alrededor de los US\$5,600.00.

4. Implementar la instalación de sistemas *ESP*, con motores de imán permanente y bomba *Power Save*, en pozos que entren a las campañas de trabajos por *well service* y/o *workover*. La instalación de estos sistemas *ESP*, en por lo menos 5 pozos con características similares al pozo analizado en el numeral 4.4.6, estiman un ahorro anual de US\$182,500.00.

5. Continuar la campaña de *workovers* en pozos cuyo aporte de presión o aumento del corte de agua necesiten ser intervenidos, ya que se observó según los datos adquiridos, el mejoramiento del factor de levantamiento por estos trabajos. La estimación del ahorro de energía varía, por la incertidumbre de éxito que se tiene en la realización de estos trabajos.

5. Conclusiones

Se evidenció que los pozos cuya presión en cabeza disminuyó, aumentaron el factor de levantamiento manteniendo la misma tasa de producción o incluso aumentándola. Esta disminución de la presión en cabeza fue consecuencia de cambios de línea de flujo en *manifolds* de recolección de fluido por aumento del diámetro interno de tubería, y/o apertura de válvulas de restricción de flujo en el cabezal de pozo.

La prueba piloto de nuevas tecnologías, donde se instaló un sistema de levantamiento artificial *ESP* con motor tipo *PMM* (*permanent magnet motor*), tuvo una reducción del consumo de energía de 30% en comparación con un motor convencional para el levantamiento de la misma tasa fluido.

Este ahorro se traduce en una reducción anual de US\$32,205.00 en costos de energía de levantamiento en este pozo. Mediante los datos recolectados de parámetros eléctricos de operación, se evidenció que la tecnología utilizada en los equipos de superficie (*VFD*), influye en el consumo de energía para levantamiento. Después del cambio del tipo de variador de frecuencia utilizado en el pozo con el piloto de motor *PMM* (*permanent magnet motor*) en el sistema *ESP*, se evidenció un ahorro de energía anual adicional al conseguido por el motor, de US\$4,294.00

Los datos recolectados evidencian una relación entre el diseño del equipo *ESP* y el factor de levantamiento. Los equipos *ESP* que trabajan dentro de la curva de la bomba, evidencia un mejor desempeño en el consumo de energía, sin embargo, se observó que, en pozos con alta producción de sólidos, un diseño por encima de las capacidades requeridas, a futuro mantiene un mejor factor de levantamiento ya que se retarda el desgaste de las etapas de la bomba y la eficiencia se mantiene.

6. Recomendaciones.

Se recomienda realizar el seguimiento del factor de levantamiento general del campo de forma semanal para evitar colapso de los servidores de datos al realizar una rutina de llamado de datos de un pozo que se quiera analizar y así evitar tiempos de muestreo amplios.

Implementar el plan de acción siguiendo las recomendaciones del numeral 4.2 de este documento. A diciembre 31 de cada año, se debe hacer corte para evaluar actividades ejecutadas del plan acción, inversiones realizadas y ahorros finales obtenidos. Las actividades ejecutadas del plan de acción dependerán del presupuesto aprobado, condiciones operativas, equipos y personal disponible.

Referencias Bibliográficas

- Abdou, H. A. (15 de Abril de 2013). Permanent Magnet Motor application for ESP Artificial Lift. . *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/164666-MS
- Al Awajy, M. A. (10 de Marzo de 2013). ESP Surveillance and Optimization Solutions: Ensuring Best Performance and Optimum Value. . *Society of Petroleum Engineers*. . doi:10.2118/164382-MS
- Al Gahtani, A. &. (1 de Enero de 2010). A Comparative Study Between Empirical Correlations and Mechanistic Models of Vertical Multiphase Flow. . *Society of Petroleum Engineers*. . doi:10.2118/136931-MS
- Bussear, T. R. (2005). Production Optimization in ESP Completions with Intelligent Well Technology. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/93617-MS.
- Chapman, S. J. (2005). *Máquinas eléctricas*. . Mexico D.F.: México: Ediciones McGraw-Hill/Interamericana.
- Pinto, C. A. (2012). *Modulo Bombeo Electrosurgible*. Bogota, Colombia: Publicaciones UIS.