

Disminución del deslizamiento en la ESP de los pozos del campo caño limón que operan con VFD Robicon, mediante la modificación de las variables eléctricas, para facilitar el incremento de la producción de barriles de fluido por día.

Javier Andrés Ruiz Castiblanco

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

Director

Fernando Enrique Calvete González M.Sc.

Ingeniero de Petróleos – Magister en Informática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Maestría en Petróleo y Gas

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

*Quiero agradecer al que hizo posible este sueño, al que me dio la vida y todo lo que poseo, a mí
Señor Jesucristo.*

*A mí amada esposa e hijas por su apoyo incondicional; quienes pese a las adversidades siempre
me dieron las fuerzas y me alentaron a seguir, no era fácil después de un turno viajar a recibir
mis clases, al dejarlas sentía un vacío, pero su amor era un aliciente.*

*A mí madre, mujer valiente y luchadora quien extiende su mano para impulsarme y me motiva a
perseguir mis sueños.*

*Hoy cada uno de ellos son un motivo para celebrar, para agradecer por lo que llega y por lo que
llegaré.*

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo general.....	16
1.2 Objetivos específicos.	16
2. Justificación.	17
3. Marco de referencia.	18
3.1 Antecedentes investigativos.....	18
3.2 Marco teórico – conceptual.....	20
3.2.1 Sistemas de bombeo electrosumergible (ESP).	20
3.2.2 Motor de inducción	22
3.2.3 Variador.	26
3.3 Marco práctico.	28
4. Fases de desarrollo.....	30

4.1 Fase 1. Identificar los motores de los equipos de fondo que se encuentran operando al 100% de la corriente nominal. mediante la toma de parámetros eléctricos de todos los pozos del campo que operan con VFD robicon.....	30
4.2 Fase 2. Determinación del voltaje máximo de operación de los motores seleccionados y compararlos con el voltaje de operación actual.	33
4.3 Fase 3. Realizar la modificación del voltaje aplicado al motor de la ESP a través, del ajuste de parámetros del VFD robicon.....	35
4.4 Fase 4. Evaluar el incremento de BFPD mediante el medidor másico después de la modificación de parámetros.....	37
4.4.1 Pozo CH-07.....	43
4.4.2 Pozo CY-17.....	44
4.4.3 Pozo LY-104.....	45
4.4.4 Pozo CL-07.	46
4.4.5 Pozo LY-247.....	47
4.4.6 Pozo LY-143.....	48
4.4.7 Pozo LY-068.....	49
4.4.8 Pozo LY-186.....	50

4.4.9 Pozo LY-162.....	51
4.4.10 Pozo LY-260.....	52
4.4.11 Pozo CL-29.....	53
4.4.12 Pozo LY-175.....	54
4.5 Fase 5. Análisis de resultados.....	55
5. Conclusiones.....	58
6. Recomendaciones.....	59
Referencias bibliográficas.....	61

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Pozos operativos con VFD en el campo Caño Limón.	30
Tabla 2. Pozos seleccionados para el estudio con parámetros eléctricos adecuados en el campo Caño Limón.	32
Tabla 3. Pozos seleccionados para el estudio en el campo Caño Limón, se muestra su voltaje de operación y su diferencia con el voltaje nominal.....	33
Tabla 4. Efectos de no trabajar con el voltaje nominal las ESP.	34
Tabla 5. Variables de producción en los pozos objeto del estudio antes y después del mismo.	55
Tabla 6. Resultados del incremento de producción en los pozos objeto del estudio.	56
Tabla 7. BS&W en los pozos objeto del estudio.	57

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Perdidas en el sistema de conducción de los motores de inducción. Adaptado de (Chelliah et al., 2009).....	19
Figura 2. Característica de carga bomba, carga del sistema, potencia útil, potencia en el eje y eficiencia de la bomba a velocidad variable, comparativa con velocidad constante. Adaptado de (Abril et al., 2013).....	20
Figura 3. Curva mecánica característica de un motor asíncrono. Adaptado de (Aller, 2008).....	26
Figura 4. Aplicación típica de un VFD. Adaptado de (Bose, 2006).....	27
Figura 5. Diagrama de torta con los porcentajes de los distintos modelos de VFD en el campo Caño Limón.	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
Figura 6. Panel de control de la herramienta Tools Suite.	31
Figura 7. Curva característica del motor de inducción. Adaptado de (Pinto, 2012).....	35
Figura 8. Curva característica del motor de inducción variando voltaje. Adaptado de (Pinto, 2012)	36
Figura 9. Incremento de voltaje en el pozo CH-07 el día 6 de agosto de 2017.	ERROR!
	BOOKMARK NOT DEFINED.
Figura 10. Propiedades del fluido de los pozos objetivo del estudio.....	38
Figura 11. Especificaciones del conjunto motor-sello sello-bomba.	39
Figura 12. Esquema grafico del sistema de levantamiento artificial en el pozo CH-07	40
Figura 13. Esquema del estado mecánico de un pozo en el área de estudio.....	41

Figura 14. Valores medidos de los pozos objetivo del estudio de incremento de voltaje.	42
Figura 15. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo CH-07 el día 6 de agosto de 2017.....	43
Figura 16. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo CH-07.....	43
Figura 17. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo CY-07 el día 6 de agosto de 2017.....	44
Figura 13. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo CY-17.....	44
Figura 19. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-104 el día 6 de agosto de 2017.....	45
Figura 20. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo LY-104.....	45
Figura 21. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo CL-07 el día 5 de agosto de 2017.	46
Figura 22. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo CL-27.....	46
Figura 23. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-247 el día 6 de agosto de 2017.....	47
Figura 24. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo LY-247.....	47
Figura 25. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-143 el día 6 de agosto de 2017.....	48

Figura 26. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo LY-143.....	48
Figura 27. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-068 el día 6 de agosto de 2017.....	49
Figura 28. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo LY-068.....	49
Figura 29. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-186 el día 06 de agosto de 2017.....	50
Figura 30. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo LY-186.....	50
Figura 31. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-162 el día 6 de agosto de 2017.....	51
Figura 32. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo LY-162.....	51
Figura 33. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-260 el día 06 de agosto de 2017.....	52
Figura 34. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo LY-260.....	52
Figura 35. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo CL-29 el día 06 de agosto de 2017.....	53
Figura 36. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo CL-29.....	53

Figura 37. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-175 el día 06 de agosto de 2017.....	54
Figura 38. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del pozo LY-175.....	54

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 informe de producción del día agosto 03 del 2017

Apéndice B. Datos de fluido total en informe de producción del día agosto 15 del 2017

Resumen

Título: Disminución del deslizamiento en la ESP de los pozos del campo caño limón que operan con VFD Robicon, mediante la modificación de las variables eléctricas, para facilitar el incremento de la producción de barriles de fluido por día. *

Autor: Javier Andrés Ruiz Castiblanco. **

Palabras Claves: Deslizamiento, levantamiento Artificial, bomba electrosumergible, variador de frecuencia, voltaje.

Descripción: La producción de hidrocarburos se basa en la migración de fluidos (aceite y agua) hasta la superficie mediante un diferencial de presión entre la formación almacenadora y la superficie o por medio de un sistema de levantamiento artificial.

Caño Limón es un campo maduro, donde normalmente no hay suficiente presión en el yacimiento para transportar los fluidos desde el intervalo productor del pozo hasta la superficie, por lo que se utiliza un sistema de levantamiento artificial, este depende de las condiciones del pozo, la mecánica de la formación, la densidad del fluido y la litología, entre los más usados mundialmente se encuentran el bombeo electrosumergible, bombeo mecánico, bombeo por cavidades progresivas, entre otros.

Para el campo Caño Limón se utiliza en el 90% de los casos el levantamiento artificial a través de bombas electrosumergibles, el gasto de energía eléctrica debido a este tipo de levantamiento es alto, a la vez que algunos pozos del campo llegan al punto máximo de operación en poco tiempo, lo que genera disminución de la producción de barriles por día, por lo tanto, generar un ahorro de energía eléctrica en las bombas electrosumergibles generara un ahorro monetario y una disminución sobre el impacto ambiental en todo el campo.

El objetivo de estudio de este trabajo consiste en realizar una disminución del deslizamiento en los motores de las bombas electrosumergibles mediante la modificación de variables eléctricas, utilizando el variador de frecuencia Robicon, ya que al disminuir el deslizamiento se prevé un aumento en la producción de barriles de fluido por día.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Maestría en Ingeniería de Petróleos y Gas. Director: Fernando Enrique Calvete González. Ingeniero de Petróleos - Magister en Informática.

Abstract

Title: Decreased slippage in the ESP of wells in Caño Limon fields which operate with VFD Robicon by modifying the electrical variables in order to facilitate the increase in the production of barrels of fluid per day. *

Author: Javier Andrés Ruiz Castiblanco. **

Key Words: Slippage, Artificial lift, Electrosubmersible pump, Variable frequency drive, voltage.

Description. Hydrocarbon production is based on the migration of fluids (oil and water) to the surface through a differential pressure between the storage formation and the surface or via an artificial lifting system.

Caño Limon is a mature field with insufficient pressure in the reservoir to transport fluids from the producing interval of the well to the surface. For this reason, an artificial lifting system is used which relies on the conditions of the well, the mechanics of the formation, the density of the fluid and the lithology, among the most used worldwide is electro-submersible pumping, mechanical pumping, pumping by progressive cavities, among others.

In 90% of the cases in this area, artificial lifting is implemented through electro-submersible pumps. These pumps generate a high expense of electrical energy while some wells reach the maximum point of operation in a short time, generating a decrease in the production of barrels per day. Therefore, saving electrical energy in electro-submersible pumps will generate monetary savings and a decrease in the environmental impact throughout the field.

The purpose of this thesis is to reduce the slippage of electro-submersible pump motors by modifying electrical variables using the Robicon variable frequency drive since, by decreasing slippage an increase in barrels of fluid is expected per day.

* Thesis.

** Faculty of Physicochemical Engineering. Petroleum Engineering School. Master in Oil and Gas Engineering. Director: Fernando Enrique Calvete González. Petroleum Engineer - Master in Informatics.

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 en la mayoría de sus pozos. Aproximadamente el 90% de los pozos tienen sistema de levantamiento artificial (en adelante ESP) mediante bombas electrosumergibles controladas por un *variable frequency drive* (en adelante VFD) en superficie, el gasto de energía debido a este tipo de levantamiento es alto. Los diseños de ESP en los trabajos de workover (en adelante W.O) y Initial Completion (en adelante I.C) tienen alta incertidumbre, los costos por rediseño del pozo son altos. Lo que limita el tiempo de producción y a su vez aumenta los costos de esta.

Algunos motores de los pozos del campo Caño Limón por lo descrito anteriormente, llegan al punto máximo de operación en poco tiempo, lo que genera disminución de la producción de barriles por día. Al disminuir el deslizamiento de los motores de ESP a través de la modificación de variables en el variador Robicon (Voltaje), se prevé un aumento de los barriles de fluido por día (en adelante BFPD) llevando el pozo a su potencial.

El desarrollo de esta investigación dio inicio recopilando información sobre el alto consumo de energía debido a los motores de las ESP, lo que permitió enfocar distintas maneras para mitigar dicho gasto, la compañía cuenta con VFD Robicon que permiten las modificaciones de parámetros eléctricos en dichos motores, facilitando se use este medio para disminuir las pérdidas energéticas en los motores de las ESP que se generan debido al deslizamiento de estos.

Para lograr esto se realizaron incrementos de voltaje en los motores de las ESP que se encontraban trabajando con corriente nominal, para evitar daños en la integridad física de los mismo y no sobrepasar las indicaciones de trabajo que estos traen de fábrica, al realizar estos incrementos en el voltaje se monitoreo constantemente con un sensor de volumen el incremento de BFPD y BOPD, generando incrementos de producción en algunos pozos objeto de esta investigación.

Logrando dicho incremento en el Campo Caño Limón sin recurrir a rediseños del pozo y al aumento del consumo de energía. Se mitiga el impacto ambiental de la producción sobre el ecosistema y a su vez baja el costo de barril producido aumentando el factor de levantamiento (BFPD\ kW).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General.

Disminuir el deslizamiento en la ESP, de los pozos del Campo Caño Limón que operan con variable frequency drive Robicon, mediante la modificación de las variables eléctricas, para facilitar el incremento de la producción de BFPD.

1.2 Objetivos Específicos.

- Identificar que motores de los equipos de fondo operan al 100% de la corriente nominal, mediante toma de parámetros eléctricos de todos los pozos del campo que operan con VFD Robicon.
- Determinar el voltaje máximo de operación de los motores seleccionados y compararlos con el voltaje de operación actual.
- Realizar la modificación del voltaje aplicado al motor de la ESP a través, del ajuste de parámetros del VFD Robicon.
- Evaluar el incremento de BFPD mediante el medidor másico después de la modificación de parámetros.

2. Justificación.

El campo Caño Limón cuenta con 350 pozos productores, los cuales tienen un aproximado en producción de 52000 BOPD (Occidental de Colombia LLC, 2018). Operando con sistema de levantamiento artificial ESP, el uso de este tipo de levantamiento genera un alto costo de energía y los problemas respecto a los diseños de ESP en los trabajos de WO e IC, ocasiona que la producción de los pozos esté limitada por la corriente del motor y no por su yacimiento, los pozos tienen mayor potencial y se pueden incrementar para obtener mayor producción.

El problema es que los pozos están limitados por el motor de la ESP por mal diseño, lo que imposibilita el incremento de la producción. Usualmente se afronta esta situación con un rediseño de la ESP, pero esto ocasiona sobre costos en el servicio del pozo.

Por ello plantear la idea de disminuir el deslizamiento en la ESP de los pozos del Campo Caño Limón que operan con VFD Robicon, mediante la modificación de las variables eléctricas, para facilitar el incremento de la producción de barriles de fluido por día; abre la posibilidad a un incremento en la producción y por ende un aumento de ganancias con la reducción de pérdidas de producción y ahorro de energía. Un cambio o una mejora se reflejan en el aumento de la productividad del campo y una mejora al proceso de producción.

3. Marco de Referencia.

3.1 Antecedentes investigativos.

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 nuestra operación utilizan motores de inducción los cuales presentan altos niveles de consumo de energía, ya que por su diseño el motor de inducción para obtener un punto alto de eficiencia se requiere que este opere a una mayor carga, trayendo como consecuencia un alto consumo de energía.

Bussear y Vachon (2005) muestran 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.

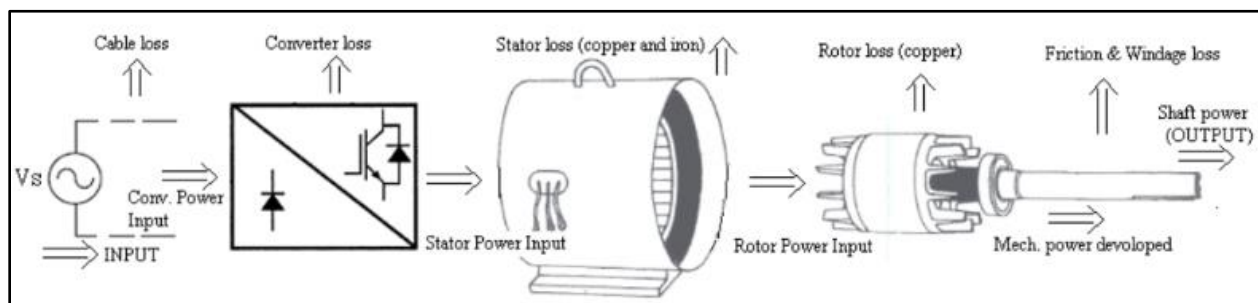
A continuación, se describen algunos de los aportes más representativos reportados en la literatura, relacionados con la optimización de los motores de inducción.

Chelliah, Srivastava y Agarwal (2009) Afirmó que al hacer optimización o hacer eficiente un sistema eléctrico existen beneficios en términos de dinero y ambientales. En este documento se presentó una revisión de la evolución en la optimización de la eficiencia del motor de inducción trifásico a través de técnicas óptimas de control y diseño. El control óptimo abarcó tanto los enfoques amplios, es decir, el control del modelo de pérdidas. El diseño óptimo cubre las

modificaciones de diseño de los materiales y la construcción con el fin de optimizar la eficiencia del motor. Se ilustran ejemplos experimentales y de simulación sobre la optimización de la eficiencia.

Figura 1.

Perdidas en el sistema de conducción de los motores de inducción. Adaptado de (Chelliah et al., 2009).



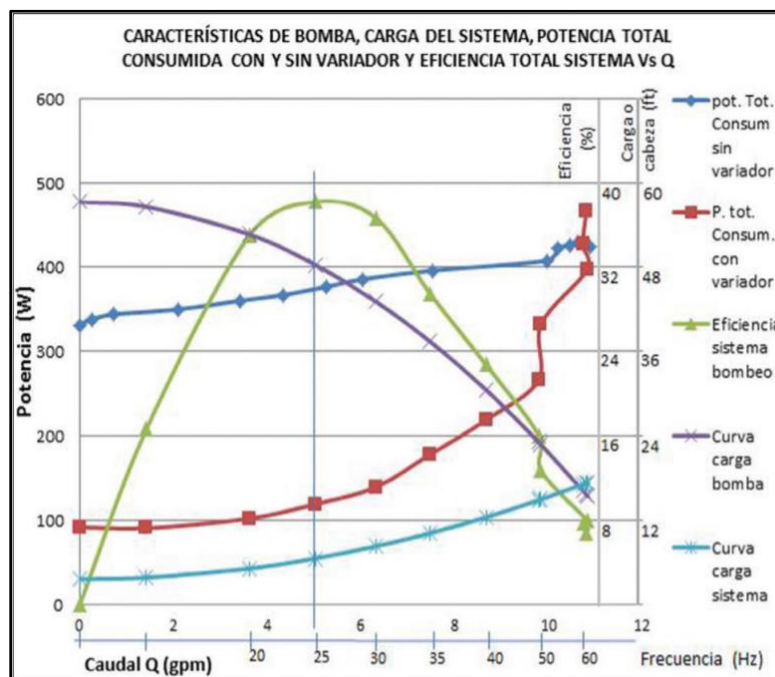
Khakimyanov, Shafikov y Khusainov (2016) Confirma que el levantamiento artificial a través del ESP usando motores de inducción es el más usado en la industria petrolera, concluyendo que es donde hay mayor potencial para la introducción del ahorro energético. Se calcula que las pérdidas en los motores eléctricos del sistema electros sumergibles es del 12% debido a efectos de carga del motor o condiciones inadecuadas de uso.

Abril, Peñaranda y Tovar (2013) exponen dentro de su investigación “efectos de carga del motor o condiciones inadecuadas de uso” un estudio sobre la optimización energética en sistemas de bombeo, destacando el impacto de los variadores de frecuencia variable (VFD). Su trabajo pretende proponer un modelo para el diagnóstico de sistemas de bombeo, que contribuya a reducir el consumo de energía. Se realizó una búsqueda y compilación de teoría de sistemas de bombeo,

motores de CA, VFD, y aplicaciones industriales. Los autores proponen un modelo para el diagnóstico y datos experimentales se obtuvieron de un banco de pruebas.

Figura 2.

Característica de carga bomba, carga del sistema, potencia útil, potencia en el eje y eficiencia de la bomba a velocidad variable, comparativa con velocidad constante. Adaptado de (Abril et al., 2013)



3.2 Marco Teórico – Conceptual.

3.2.1 Sistemas de bombeo electrosumergible (ESP).

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 o a través de un cable de alimentación eléctrico.

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 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 que se conecta a la parte superior del motor. (Cordoba, Erazo y Herrera, 2006)

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 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. (Cordoba et al., 2006)

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 área superficial menores permiten optimizar costos de instalación.
- 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.

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 bombea fluidos de alta viscosidad.
- Altos costos de intervención.

3.2.2 Motor de inducción

El primer componente ESP es el motor sumergible. 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. (Villegas, Aracena, Moncada y Muñoz, 2006)

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.

Para los motores eléctricos de inducción tipo jaula de Ardilla usado en los sistemas ESP, según especificaciones de diferentes fabricantes de estos (General Electric, Weg, Baker Huges, 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. (Villegas et al., 2006)

Aparte 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 con estas definir la metalurgia requerida, revestimiento del motor y materiales de los O-rings. (Bussear, 2005)

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 modernos en estado sólido, 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. El deslizamiento en un motor es la diferencia entre la velocidad nominal del motor y la velocidad efectiva de el mismo.

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. (Chapman, 2005)

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):

$$n_{sinc} = \frac{120 f_e}{P} \quad (1)$$

Donde: n_{sinc} = Velocidad sincrónica, f_e = Frecuencia del sistema, P = Numero de polos

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. (Chapman, 2005)

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):

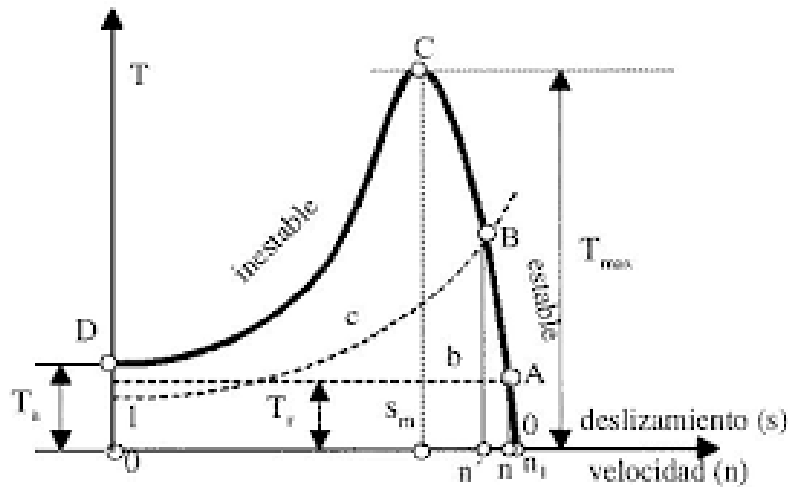
$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Donde: S = Deslizamiento, n_s = Velocidad Síncrona, n = Velocidad del Rotor

El deslizamiento es prácticamente cero sin carga y es igual a 1 (o 100%) cuando el rotor está bloqueado. Las etapas se designan de acuerdo con el punto de máxima eficiencia (BEP) en barriles por día a 60 Hz.

Figura 3.

Curva mecánica característica de un motor asíncrono. Adaptado de (Aller, 2008)



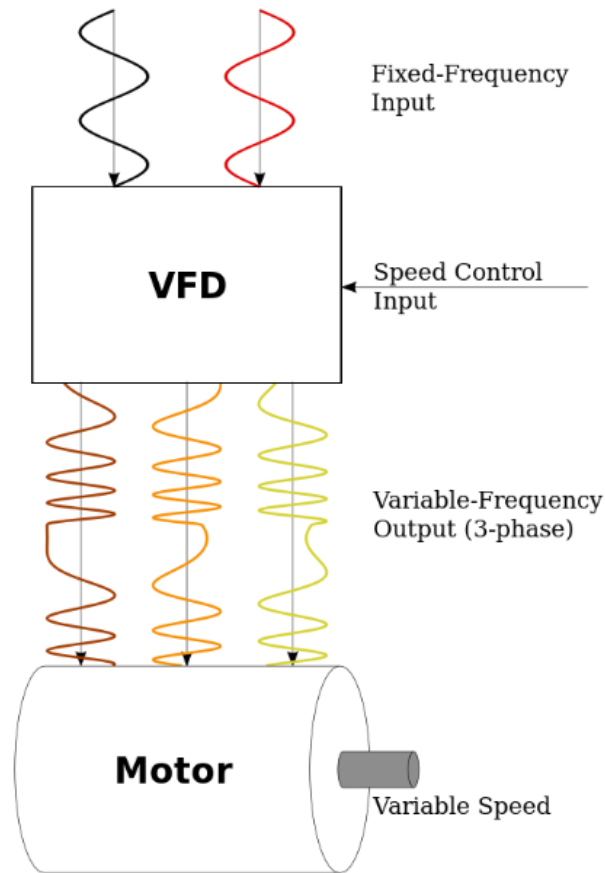
3.2.3 Variador.

El VFD es un controlador de motor que permite operar el sistema ESP en un rango amplio de frecuencia en vez de estar limitado a la frecuencia de la red eléctrica. 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 4.

Aplicación típica de un VFD. Adaptado de (Bose, 2006).



El propósito principal para usar el VFD en el sistema ESP es la flexibilidad en el bombeo, pero también se obtienen otros beneficios tales como la extensión de la vida útil del equipo de fondo, arranque suave, velocidad controlada automáticamente, supresión de transitorios de línea y eliminación de estrangulamientos superficiales. (Bose, 2006)

3.3 Marco practico.

El 11 de Junio de 1980 Ecopetrol y Occidental de Colombia, firmaron el contrato de Asociación Cravo Norte, para la explotación de petróleo sobre los bloques Cravo Norte, Cinaruco, Rondón, Orocué y Guarrojo de un millón de hectáreas, ubicados en el departamento de Arauca, en el cual se descubrieron 11 campos con reservas originales superiores a los 1500 millones de barriles de petróleo, iniciando de esta forma uno de los proyectos más importantes en la industria petrolera del país, de los cuales se han producido a la fecha más de 1300 millones de barriles de petróleo. (Occidental de colombia llc, 2018).

El campo petrolero Gigante de Caño Limón, fue descubierto el 13 de julio de 1983, por el pozo direccional Caño Limón 1, que producía de la formación Mirador inferior, con una producción inicial de 3,425 BOPD.

La comercialización se dio en abril de 1986 con terminación 22 años después (abril de 2008, la cual fue acordada para diciembre del mismo año, para compensar las pérdidas de producción por los atentados al oleoducto Caño Limón - Coveñas). Sin embargo, en abril de 2007, el gobierno del Presidente Álvaro Uribe V. lo extendió hasta el límite económico, o sea a perpetuidad, con el objetivo de incrementar las reservas recuperables en 50 millones de barriles de petróleo, desacelerando de esta forma la caída de producción de crudo; amparado en la recomendación del documento COMPES 3245 de 2003 que busca garantizar el abastecimiento de hidrocarburos al país, y en el concepto 1149 del Consejo de Estado, donde se sugiere la extensión siempre y cuando sea lo más conveniente económicamente para el país.

En la actualidad, Caño Limón es considerado un campo maduro, donde gran parte de los pozos han disminuido significativamente su tasa de producción de petróleo e incrementado la producción de agua. El 30% de los pozos se encuentra produciendo con cortes de agua por encima del 99% y cerca de su límite económico. En este punto de la vida productiva del campo, es importante explorar nuevas tecnologías que permitan recuperar, de manera rentable, las reservas remanentes asociadas a estos pozos, reducir los costos del consumo de energía y los costos de tratamiento químico.

En desarrollo del contrato se han descubierto los campos Caño Limón, La Yuca, Caño Yarumal, Matanegra, Redondo, Caño Verde, Redondo Este, La Yuca Este, Tonina, Remana, Jibá y Chipirón, en la cuenca de los Llanos orientales.

El campo de Caño Limón ha sido modelo de explotación eficiente y su factor de recobro es uno de los más altos de Colombia y el mundo (superior al 55 por ciento). En la actualidad se afronta 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 disminución 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. (Occidental de colombia llc, 2018).

En nuestra operación todos los sistemas de bombeo electro sumergible están instalados con motores de inducción, debido a su masificación y desconocimiento de nuevas tecnologías hace que la empresa no vea en el motor ESP una fuente importante para la optimización en los costos de producción de un pozo.

4. Fases de desarrollo.

Este proyecto se desarrolló en 5 fases, las cuales permitieron dar resolución a todos los objetivos específicos y a su vez llevar acabo el objetivo general del trabajo. Las fases de desarrollo permiten optimizar el tiempo de trabajo y el manejo de presentación de la información, estas fueron ejecutadas en el siguiente orden:

4.1 Fase 1. Identificar los motores de los equipos de fondo que se encuentran operando al 100% de la corriente nominal. Mediante la toma de parámetros eléctricos de todos los pozos del campo que operan con VFD Robicon.

Lo primero que se realizó fue un análisis de los pozos operativos en Caño Limón, para eso se utilizó la herramienta Wells Status provista por la compañía y que nos muestra que modelo de VFD utiliza cada equipo de fondo en cada pozo correspondiente ya que existen 3 modelos diferentes, Robicon, ICS-GCS y Yaskawa.

Tabla 1.

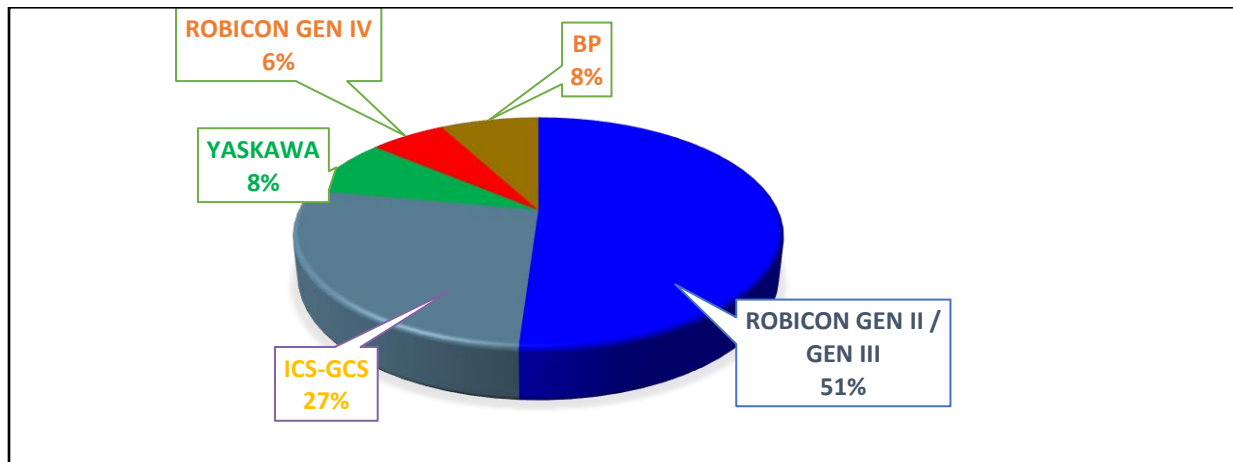
Pozos operativos con VFD en el campo Caño Limón.

VFD	Robicon	ICS-GCS	Yaskawa	Total
Pozos Operativos	169	89	27	285

Wells Status contabilizo un total de 285 con VFD en el campo Caño Limón distribuido de la siguiente manera en %, Robicon, 57%, BP 8%, Yaskawa 8%, ICS-GCS 27%.

Figura 5.

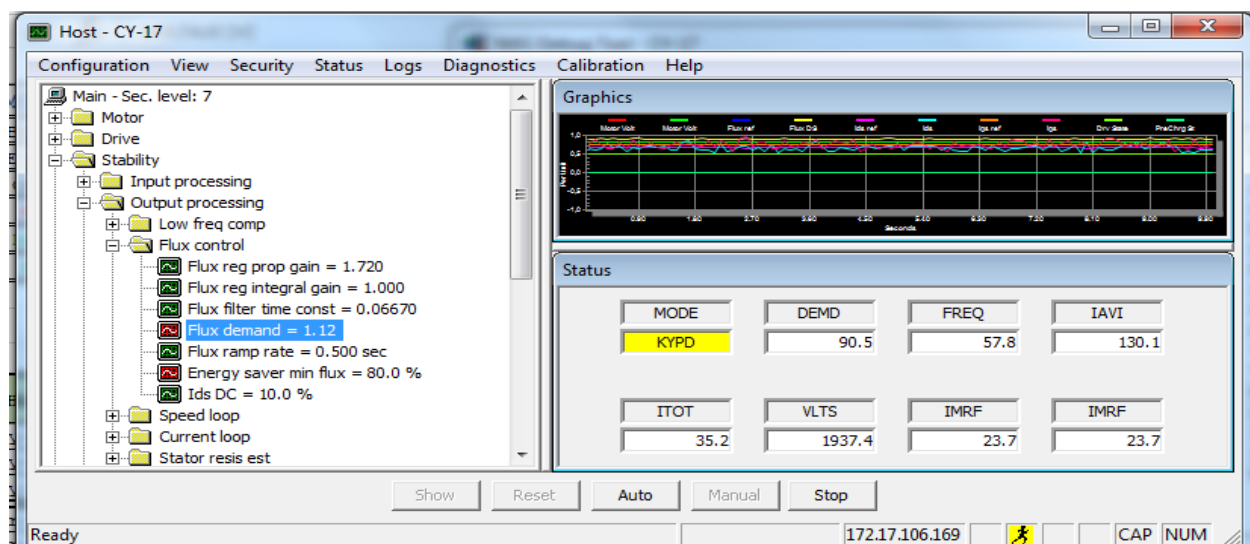
Diagrama de torta con los porcentajes de los distintos modelos de VFD en el campo Caño Limón.



De los 285 pozos en el campo que tienen VFD, 169 operan con el modelo Robicon y a los cuales se los hizo la toma de parámetros eléctricos mediante el Software Tools Suite. Usado por la compañía y de código libre, este se puede descargar en la siguiente dirección electrónica <https://spring.io/tools>.

Figura 6.

Panel de control de la herramienta Tools Suite.



Al realizar la selección de los pozos objetivo de este trabajo, el parámetro eléctrico más importante fue la corriente nominal, esta tenía que ser 100% o cercana a 100%, para analizar la corriente es ideal mirar el voltaje nominal de cada motor. Gracias a Tools Swite se encontraron 12 pozos con VFD Robicon que poseían esta característica.

Los pozos seleccionados para el estudio fueron:

Tabla 2.

Pozos seleccionados para el estudio con parámetros eléctricos adecuados en el campo Caño Limón.

Pozos	Voltaje De Operación (V)	Voltaje Nominal (V)	% Voltaje	% Carga	BOPD
CH-07	1604	1935	0.83	98.692	1720
CY-17	1723	1795	0.96	100	297
LY-104	2704	2810	0.96	98.148	163
CL-07	2511	2393	1.05	100	126
LY-247	2601	2860	0.91	96.552	122
LY-143	2509	2646	0.95	96.154	112
LY-068	2123	2053	1.03	97.692	89
LY-186	1985	2053	0.97	100.769	78
LY-162	2447	2229	1.10	103.279	70
LY-260	2321	2533	0.92	103.261	64
CL-29	2617	2900	0.90	100.826	54
LY-175	1269	1425	0.89	97.959	50

De estos pozos podemos resaltar, que los pozos que se encuentran operando con un % de voltaje menor con CH-07 y LY-175, a su vez que los pozos con un % de voltaje mayor son LY-162 y CL-07. A la vez el pozo con mayor BOPD es CH-07.

4.2 Fase 2. Determinación del voltaje máximo de operación de los motores seleccionados y compararlos con el voltaje de operación actual.

A partir del desarrollo de la fase 1, se determinó el voltaje máximo de operación o voltaje nominal que es el voltaje que no debe superar el motor en funcionamiento normal. Otra definición de voltaje nominal es la diferencia de potencial específica para la que se diseña un equipo o una instalación.

Se presenta el voltaje de operación actual de los pozos seleccionados para el estudio, también se determina el faltante o el sobrante de voltaje entre el voltaje de operación y el voltaje nominal para analizar el incremento adecuado de voltaje para disminuir las pérdidas en los motores de fondo por deslizamiento.

Tabla 3.

Pozos seleccionados para el estudio en el campo Caño Limón, se muestra su voltaje de operación y su diferencia con el voltaje nominal.

Wells	Volt De Operación (V)	Voltaje Nominal (V)	Diferencia de Voltaje (%)
CH-07	1604	1935	-17%
CY-17	1723	1795	-4%
LY-104	2704	2810	-4%
CL-07	2511	2393	+5%
LY-247	2601	2860	-7%
LY-143	2509	2646	-5%
LY-068	2123	2053	+3%
LY-186	1985	2053	-3%
LY-162	2447	2229	+10%
LY-260	2321	2533	-8%
CL-29	2617	2900	-10%
LY-175	1269	1425	-11%

Se tienen pozos con un voltaje bajo en el motor, lo que lleva consigo un aumento de la intensidad necesaria para conseguir la potencia nominal y un aumento del deslizamiento. Aumentando las pérdidas de energía en el equipo de fondo y calentamiento también será mayor.

Tabla 4.

Efectos de no trabajar con el voltaje nominal las ESP.

Parámetros eléctricos afectados	Corriente a carga nominal				
	1.1	1.04	1.0	0.956	0.935
% de Voltaje Nominal	90	95	100	105	110
Eficiencia carga nominal	0.905	0.915	0.92	0.925	0.92
Factor de potencia a carga nominal	0.9	0.89	0.88	0.87	0.86
Deslizamiento a carga nominal	1.23	1.11	1.0	0.91	0.83
Carga para eficiencia Máxima	0.73	0.81	0.9	1.0	1.1
Elevación de temperatura a carga nominal	1.11	1.05	1.0	0.925	1.01

Nota: Adaptado de (Abril et al., 2013)

Cuando el motor opera a potencia nominal es recomendable que el voltaje del motor sea muy cercano al valor del voltaje nominal. Los motores con Normas NEMA están diseñados para operar con una desviación máxima de 10% del voltaje nominal, las variaciones de voltaje afectan significativamente la eficiencia, el factor de potencia y el tiempo de vida

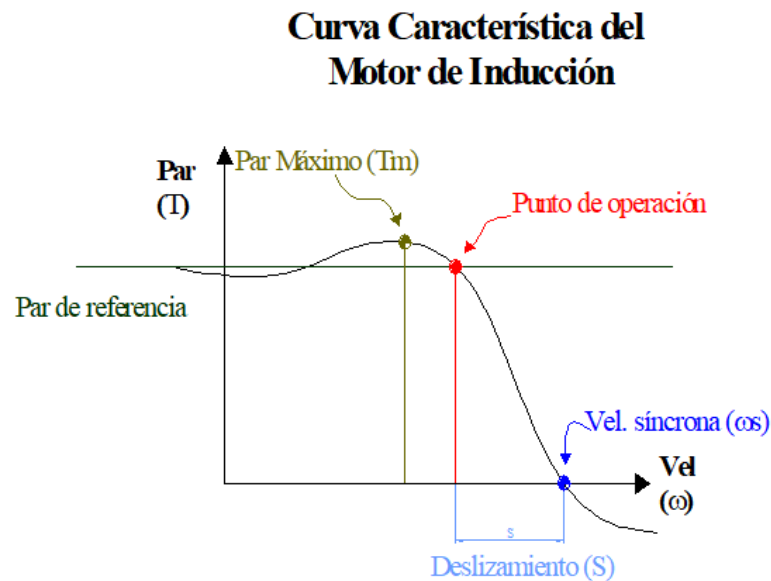
4.3 Fase 3. Realizar la modificación del voltaje aplicado al motor de la ESP a través, del ajuste de parámetros del VFD Robicon.

En desarrollo de la fase 3, se realizó para cada pozo seleccionado según la tabla 2, la modificación en su voltaje aplicado mediante el software Tools Swite que sirve como controlador en las VFD Robicon.

Al tener un voltaje estático se tiene un punto de operación con un deslizamiento fijo (Figura 7), si se logra disminuir la diferencia entre el punto de operación y la velocidad sincrónica se disminuirán las pérdidas de energía por deslizamiento.

Figura 7.

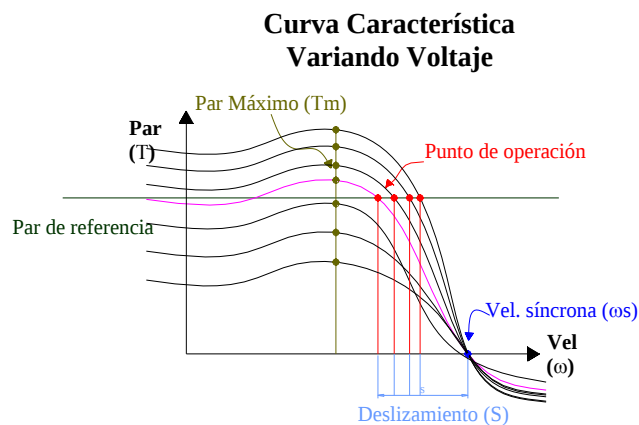
Curva característica del motor de Inducción. Adaptado de (Pinto, 2012)



Con el fin de lograr esto, se procede a realizar un ajuste en los equipos de fondo de los pozos del campo Caño Limón aumentando el voltaje, esperando a que la corriente de operación disminuyera desapareciendo así la restricción de corriente máxima (Figura 8) y haciendo posible realizar nuevos incrementos de frecuencia para disminuir el deslizamiento, mejorar la eficiencia energética y aumentar la producción del pozo. Adicionalmente la eficiencia aumenta y la temperatura tiende a disminuir.

Figura 8.

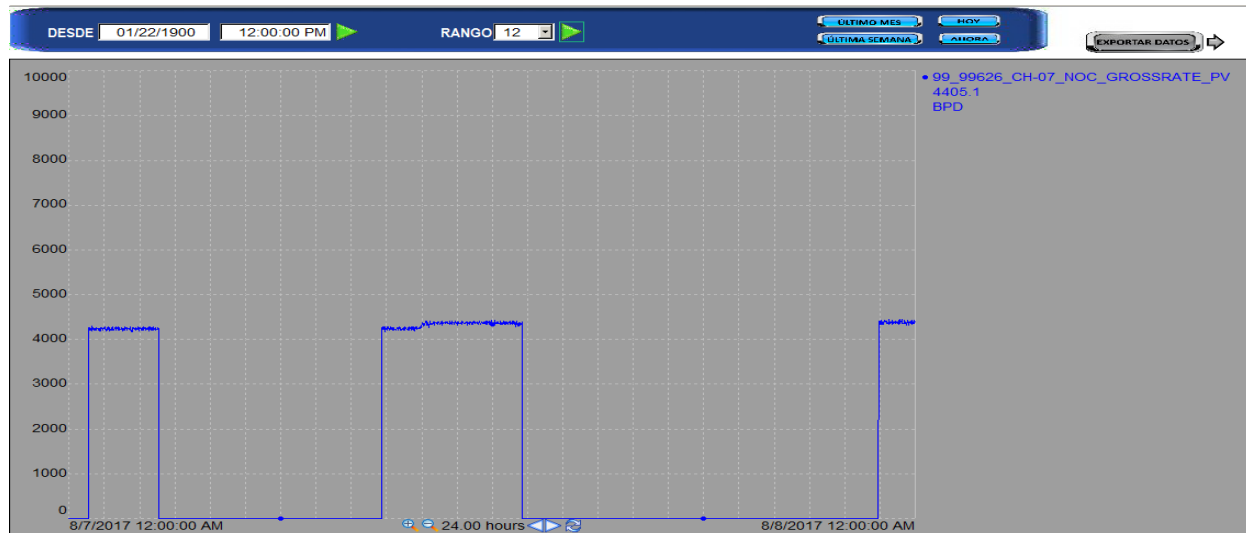
Curva característica del motor de Inducción variando voltaje. Adaptado de (Pinto, 2012)



Se procedió a aumentar el voltaje mediante la herramienta Tools Suite (Figura 9), Se aumentó el voltaje de los pozos objetivo del estudio hasta su valor nominal mostrando un incremento en la producción de barriles de fluido por día, a su vez se logró disminuir la corriente de operación en algunos pozos, donde fue posible realizar nuevos incrementos de frecuencia y variaciones en el voltaje para aumentar la producción de barriles de fluido por día.

Figura 9.

Incremento de voltaje en el pozo CH-07 el día 6 de agosto de 2017.



A continuación, se exponen los datos adquiridos de los pozos objeto de estudio entre 3 de agosto 2017 y agosto 15 de 2017.

- Informe de producción agosto 03 de 2017 (ver apéndice A)
- Informe de producción agosto 15 de 2017 (ver apéndice B)

4.4 Fase 4. Evaluar el incremento de BFPD mediante el medidor másico después de la modificación de parámetros.

Antes de evaluar el incremento en la producción de BFPD es importante mencionar las condiciones a la cuales se realizó las variaciones del voltaje con respecto a:

- Propiedades del fluido.
- Especificaciones del conjunto motor-sello, sello- bomba.

- Estado Mecánico generalizado de los pozos evaluados.
- Índice de productividad medido por registros, índice de productividad calculado, Presión de fondo fluyendo calculada.

Propiedades del fluido.

Todos los pozos objetivos de este estudio se encuentran ubicados en el campo Caño Limón, Se realizo una recopilación de las propiedades promedio del fluido para dicho campo.

Figura 10.

Propiedades del fluido de los pozos objetivo del estudio.

Propiedades del fluido	
Gravedad API del petróleo	28°API - 30°API
Factor volumétrico @ 207°F y 3200 psi	1,04 - 1,06 BI/STB
Viscosidad del petróleo @ 207°F y 3200 psi	3.9 - 4.1 cp
Presión de burbuja	49 - 51 psi
Relación Gas-Aceite (GOR)	7,9 - 8,2 SCF / STB
Densidad del petróleo	0.85- 0.91 gr/cc

Especificaciones del conjunto motor-sello, sello- bomba.

En este ítem trataremos las opciones para el pozo CH-07. Ya que las otras opciones tienen un ajuste motor sello y sello bomba muy similar.

Figura 11.

Especificaciones del conjunto motor-sello sello-bomba.

Design Point:

Desired flow (total) 2300 BPD
 % water 85.4 %
 % Gas into pump 12.8 %GIP /19.7 %GIPbs

Frequency 50.0 Hz
 GOR into pump 853.0 scf/STB
 TDH 5288 ft
 Friction Losses 76.11 psi

Pump Selection:

	<u>Intake</u>	<u>Discharge</u>
Pressure	647.0 psi	2727 psi
Flowrate	2874 BPD	2522 BPD
Specific Gravity	0.804 rel-H2O	0.92 rel-H2O
Viscosity	0.286Cp	0.302Cp

Pump Selected:

CENTURION 120-538FLEX47SXD
 Pshaft RPM = 2945
 Shft HP @ 50.0 Hz = 155.6
 Shaft load =(Std 51%) / (HS 34%)
 Required Motor HP at 60.0 Hz = 188.9

Seal Selection:

Well angle (set depth) = 26.49Deg fm vert.
 Sand present
 Pump uses floater-type stages
 Motor/Seal Oil type = CL6
 Seal Selected : SP1T 4B [538 Series]
 Options : H6 HL

Oil temperature at thrust chamber = 267°F
 Chamber Cap Used (Top to Bot)=
 23% 21% 24% 15% 13% 13%
 Thrust bearing load =21 %
 Shaft load = 16 %

Motor Selection:

Terminal Voltage =1417.5 V
 Motor Current =69.1 A
 Load acc to N.P. =57.2 %
 Shaft Load =15.6 %

Fluid Speed =0.958ft/s
 Eff/PF =86.7% / 80.55%
 Internal Temp =252.5°F
 Motor Selected: KM-V/C
 330HP 1935V 107A [562Series]

A la vez se adjunta un esquema grafico presentado por la compañía Baker Hughes del conjunto motor-sello, sello-bomba.

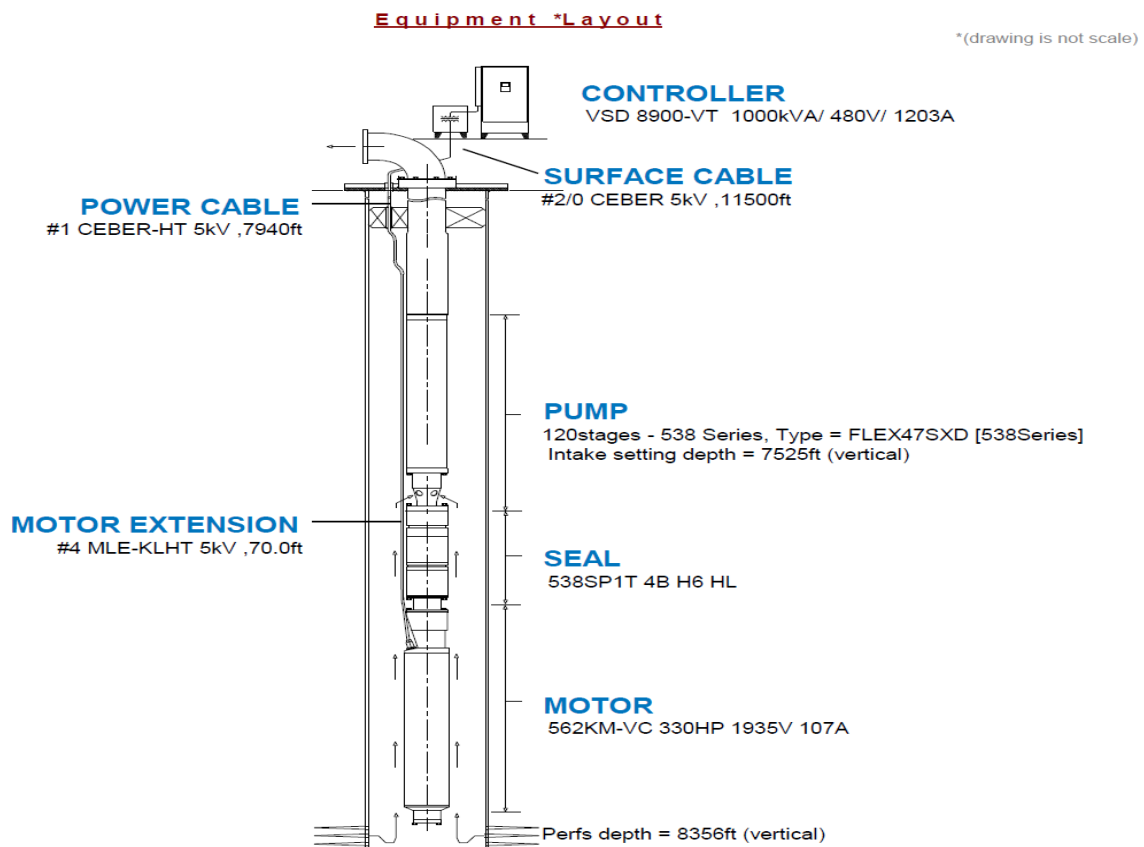
En él se evidencian los elementos clave en el ensamblaje del sistema de levantamiento artificial por medio de motores electrosumergible, como lo son:

- Cable de potencia
- Controlador VSD
- Cable de superficie
- Bomba

- Extensión del motor
- Sello
- Motor
- Profundidad perforada.

Figura 12.

Esquema grafico del sistema de levantamiento artificial en el pozo CH-07

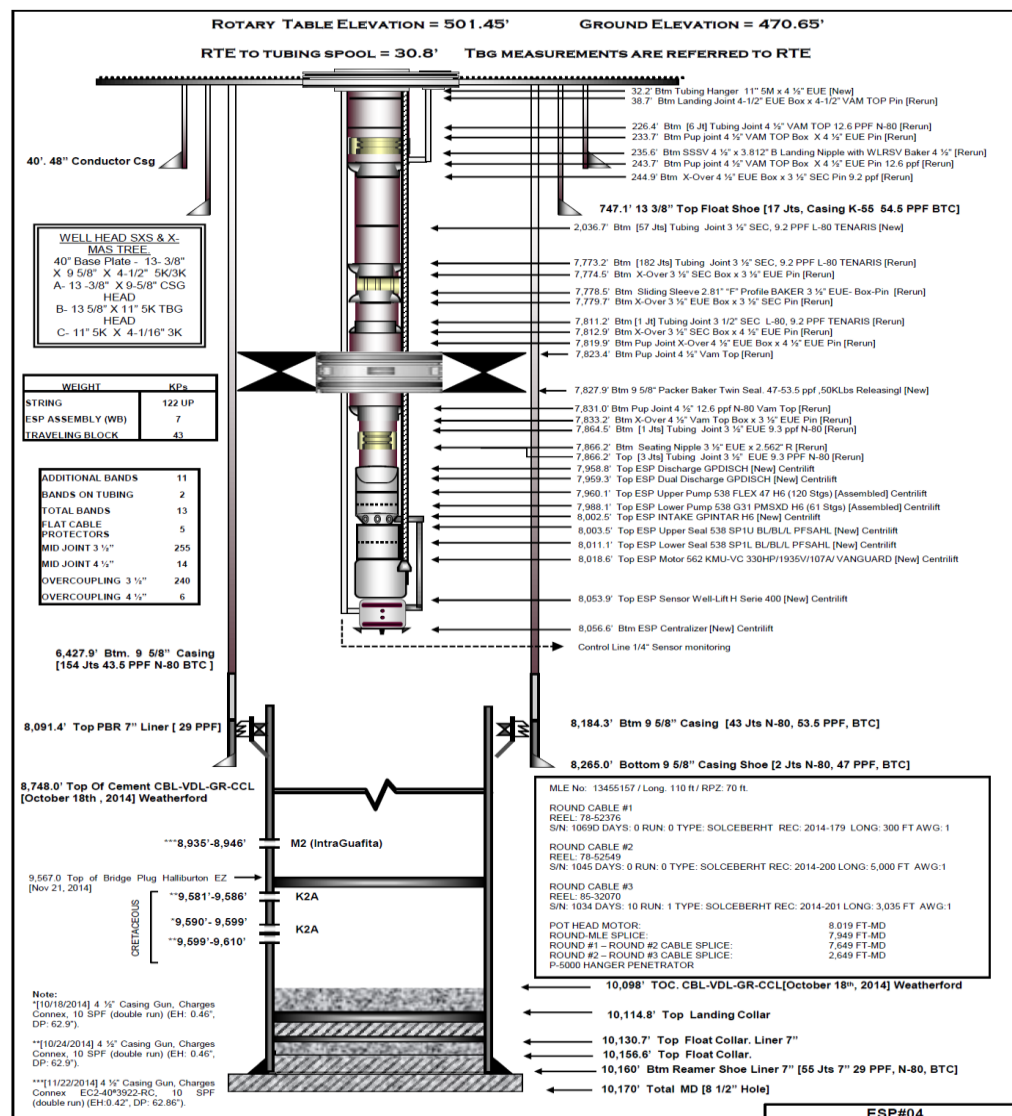


Estado mecánico de los pozos objetivo del estudio.

A continuación, se muestra el estado mecánico generalizado de los pozos en el área de estudio, debido a que todos atraviesan las mismas formaciones geológicas y son pozos verticales con un esquema similar de perforación y cementación.

Figura 13.

Esquema del estado mecánico de un pozo en el área de estudio.



Índice de productividad medido por registros, índice de productividad calculado, Presión de fondo fluyendo calculada.

En la siguiente tabla se registra el índice de productividad medido por registros, índice de productividad calculado y presión de fondo fluyendo calculada en fondo.

Figura 14.

Valores medidos de los pozos objetivo del estudio de incremento de voltaje.

Pozo	PI MRT [BFPD/psi]	PI Calculado [BFPD/psi]	Pwf Calculada [psi]
CL-29	81.44696707		1485.464323
LY-104	16.79691759	17.12749	626.57248
LY-175	45.54624046	45.24006	2417.182221
LY-143	35.34471357	37.09082	2171.620257
LY-247	35.40231573	35.21139	637.3731385
CY-17	7.578482482	7.64042	598.4897452
LY-068	153.7399019	153.70635	2197.50413
LY-162	11.60384854	11.51517	1480.9717
LY-186	2.858904403	0.20204	1208.444075
LY-260	12.51009641	12.5101	2374.323435
CL-07	73.65754688	72.99201	424.6082825

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 la recopilación de datos eléctricos de las ESP, los cuales están expuestos en los Apéndices A y B. Por cada pozo objeto del análisis se generó una estadística en % del incremento de BOPD para identificar los pozos con mayores ganancias en producción.

A continuación, se presentan en orden de mayor a menor producción de BOPD los pozos objetivo del estudio y su aumento o disminución de producción.

4.4.1 Pozo CH-07.

El pozo CH-07 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 1684 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 10), se realizó el estudio dando como resultado una variación de producción ascendente a 1754 BOPD.

Figura 15.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo CH-07 el día 6 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
CH-07	6/08/2017	4210	1684	105,6	1607	49,7	4385	1754	105,6	1833	50,1

El incremento de producción de BOPD corresponde al 4.16% de la producción del pozo CH-07, a la vez que hubo un incremento de BFPD de 175 barriles y de BOPD de 70 barriles (Figura 11).

Figura 16.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo CH-07.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
CH-07	6/08/2017	175	70	4,16

4.4.2 Pozo CY-17.

El pozo CY-17 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 910 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 12), se realizó el estudio dando como resultado una variación de producción ascendente a 940 BOPD.

Figura 17.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo CY-07 el día 6 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
CY-17	6/08/2017	910	300	36	1730	58,7	940	310	35	1936	58,7

El incremento de producción de BOPD corresponde al 3.33% de la producción del pozo CY-17, a la vez que hubo un incremento de BFPD de 30 barriles y de BOPD de 10 Barriles (Figura 13).

Figura 18.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo CY-17.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
CY-17	6/08/2017	30	10	3,33

4.4.3 Pozo LY-104.

El pozo LY-104 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 160 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 14), se realizó el estudio dando como resultado una producción sin variación a 160 BOPD.

Figura 19.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-104 el día 6 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
LY-104	6/08/2017	4570	160	105	2700	58,2	4574	160	104	2730	58,2

El incremento de producción de BOPD corresponde al 0% de la producción del pozo LY-104, a la vez que hubo un incremento de BFPD de 4 barriles y sin incremento de BOPD (Figura 15).

Figura 20.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo LY-104.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
LY-104	6/08/2017	4	0	0,00

4.4.4 Pozo CL-07.

El pozo CL-07 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 126 BOPD el día 05 de agosto de 2017 (Figura 16), se realizó el estudio dando como resultado una variación de producción ascendente a 145 BOPD.

Figura 21.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo CL-07 el día 5 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
CL-07	5/08/2017	1400	126	37	1981	60,4	1610	145	34	2510	52,8

El incremento de producción de BOPD corresponde al 15.08% de la producción del pozo CL-07, a la vez que hubo un incremento de BFPD de 210 barriles y de BOPD de 19 barriles (Figura 17).

Figura 22.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo CL-27.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
CL-07	5/08/2017	210	19	15,08

4.4.5 Pozo LY-247.

El pozo LY-247 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 126 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 18), se realizó el estudio dando como resultado una variación de producción ascendente a 127 BOPD.

Figura 23.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-247 el día 6 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
LY-247	6/08/2017	7400	126	140	2600	56,7	7450	127	140	2650	56,7

El incremento de producción de BOPD corresponde al 0.79% de la producción del pozo LY-247, a la vez que hubo un incremento de BFPD de 50 barriles y de BOPD de 1 barriles (Figura 19).

Figura 24.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo LY-247.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
LY-247	6/08/2017	50	1	0,79

4.4.6 Pozo LY-143.

El pozo LY-143 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 130 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 20), se realizó el estudio dando como resultado una variación de producción ascendente a 131 BOPD.

Figura 25.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-143 el día 6 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
LY-143	6/08/2017	16300	130	102	2508	56,8	16400	131	100	2608	56,8

El incremento de producción de BOPD corresponde al 0.77% de la producción del pozo LY-143, a la vez que hubo un incremento de BFPD de 100 barriles y de BOPD de 1 barriles (Figura 21).

Figura 26.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo LY-143.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
LY-143	6/08/2017	100	1	0,77

4.4.7 Pozo LY-068.

El pozo LY-068 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 93 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 22), se realizó el estudio dando como resultado una producción sin variación a 93 BOPD.

Figura 27.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-068 el día 6 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
LY-068	6/08/2017	7740	93	126,5	2134	65	7740	93	126,5	2134	65

El incremento de producción de BOPD corresponde al 0% de la producción del pozo LY-068, a la vez que no hubo un incremento de BFPD y sin incremento de BOPD (Figura 23).

Figura 28.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo LY-068.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
LY-068	6/08/2017	0	0	0,00

4.4.8 Pozo LY-186.

El pozo LY-186 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 86 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 24), se realizó el estudio dando como resultado una variación de producción ascendente a 88 BOPD.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
LY-186	6/08/2017	5400	86	130	1980	58,5	5500	88	130	2106	58,5

Figura 29. Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-186 el día 06 de agosto de 2017.

El incremento de producción de BOPD corresponde al 2.33% de la producción del pozo LY-186, a la vez que hubo un incremento de BFPD de 100 barriles y de BOPD de 2 barriles (Figura 25).

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
LY-186	6/08/2017	100	2	2,33

Figura 30. Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo LY-186.

4.4.9 Pozo LY-162.

El pozo LY-162 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 73 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 22), se realizó el estudio dando como resultado una producción sin variación a 73 BOPD.

Figura 31.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-162 el día 6 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
LY-162	6/08/2017	3640	73	59	2448	67,8	3640	73	59	2448	67,8

El incremento de producción de BOPD corresponde al 0% de la producción del pozo LY-068, a la vez que no hubo un incremento de BFPD y sin incremento de BOPD (Figura 27).

Figura 32.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo LY-162.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
LY-162	6/08/2017	0	0	0,00

4.4.10 Pozo LY-260.

El pozo LY-260 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 70 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 28), se realizó el estudio dando como resultado una variación de producción ascendente a 72 BOPD.

Figura 33.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-260 el día 06 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
LY-260	6/08/2017	5800	70	94	2321	61,6	5950	72	89	2608	61,6

El incremento de producción de BOPD corresponde al 2.86% de la producción del pozo LY-260, a la vez que hubo un incremento de BFPD de 150 barriles y de BOPD de 2 barriles (Figura 29).

Figura 34.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo LY-260.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
LY-260	6/08/2017	150	2	2,86

4.4.11 Pozo CL-29.

El pozo CL-29 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 61 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 30), se realizó el estudio dando como resultado una variación de producción ascendente a 63 BOPD.

Figura 35.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo CL-29 el día 06 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
CL-29	6/08/2017	11100	61	121,5	2620	55,4	11400	63	121,5	2700	55,4

El incremento de producción de BOPD corresponde al 3.28% de la producción del pozo CL-29, a la vez que hubo un incremento de BFPD de 300 barriles y de BOPD de 2 barriles (Figura 31).

Figura 36.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo CL-29.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
CL-29	6/08/2017	300	2	3,28

4.4.12 Pozo LY-175.

El pozo LY-175 antes de realizar la variación de frecuencia mediante el VFD Robicon Contaba con una producción de 56 BOPD el día 06 de agosto de 2017 (Figura 32), se realizó el estudio dando como resultado una variación de producción ascendente a 57 BOPD.

Figura 37.

Datos eléctricos y producción antes y después del estudio en el pozo LY-175 el día 06 de agosto de 2017.

Pozo	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
LY-175	6/08/2017	5350	56	97	1274	53,4	5400	57	96	1321	53,4

El incremento de producción de BOPD corresponde al 1.79% de la producción del pozo LY-175, a la vez que hubo un incremento de BFPD de 50 barriles y de BOPD de 1 barriles (Figura 33).

Figura 38.

Variación de producción en BFPD, BOPD y en % de BOPD respecto a los datos antes del estudio del Pozo LY-175.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
LY-175	6/08/2017	50	1	1,79

4.5 Fase 5. Análisis de Resultados.

Una vez realizado el incremento de frecuencia, aumento de voltaje y disminución del deslizamiento de forma general e individual para los pozos objeto de estudio, se definieron los siguientes aspectos respecto al incremento de la producción de BOPD y BFPD, a su vez determinar el valor total del voltaje antes del incremento y compararlo con el voltaje después del incremento.

4.5.1 Producción de BOPD:

Al observar los resultados de producción (Tabla 5 y 6) luego del incremento en el voltaje y compararlos con los anteriores se logró aumentar los BOPD en un total de 108 para los 12 pozos, pasando de una producción total de 2965 BOPD a 3073 BOPD. Este incremento se traduce en un aumento del 3.64 % de la producción total de BOPD perteneciente a los 12 pozos.

Tabla 5.

Variables de producción en los pozos objeto del estudio antes y después del mismo.

Pozos	Fecha de incremento	Datos antes del estudio					Datos despues del estudio				
		BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia	BFPD	BOPD	I Motor	Voltaje	Frecuencia
CH-07	6/08/2017	4210	1684	105,6	1607	49,7	4385	1754	105,6	1833	50,1
CY-17	6/08/2017	910	300	36	1730	58,7	940	310	35	1936	58,7
LY-104	6/08/2017	4570	160	105	2700	58,2	4574	160	104	2730	58,2
CL-07	5/08/2017	1400	126	37	1981	60,4	1610	145	34	2510	52,8
LY-247	6/08/2017	7400	126	140	2600	56,7	7450	127	140	2650	56,7
LY-143	6/08/2017	16300	130	102	2508	56,8	16400	131	100	2608	56,8
LY-068	6/08/2017	7740	93	126,5	2134	65	7740	93	126,5	2134	65
LY-186	6/08/2017	5400	86	130	1980	58,5	5500	88	130	2106	58,5
LY-162	6/08/2017	3640	73	59	2448	67,8	3640	73	59	2448	67,8
LY-260	6/08/2017	5800	70	94	2321	61,6	5950	72	89	2608	61,6
CL-29	6/08/2017	11100	61	121,5	2620	55,4	11400	63	121,5	2700	55,4
LY-175	6/08/2017	5350	56	97	1274	53,4	5400	57	96	1321	53,4
TOTAL		73820	2965		25903		74989	3073		27584	

Tabla 6.

Resultados del incremento de producción en los pozos objeto del estudio.

Pozo	Fecha de incremento	Incremento		
		BFPD	BOPD	% De BOPD
CH-07	6/08/2017	175	70	3,99
CY-17	6/08/2017	30	10	3,23
LY-104	6/08/2017	4	0	0,00
CL-07	5/08/2017	210	19	15,08
LY-247	6/08/2017	50	1	0,79
LY-143	6/08/2017	100	1	0,77
LY-068	6/08/2017	0	0	0,00
LY-186	6/08/2017	100	2	2,33
LY-162	6/08/2017	0	0	0,00
LY-260	6/08/2017	150	2	2,86
CL-29	6/08/2017	300	2	3,28
LY-175	6/08/2017	50	1	1,79
TOTAL		1169	108	3,64

Como se evidencia en la Tabla 6, no en todos los pozos el incremento de producción fue uniforme para todos los pozos, esto se debió a que las condiciones operativas de los motores eran diferentes para cada pozo, sin embargo, podemos resaltar el excelente incremento de producción de 4 pozos principalmente.

- CH-07: Incremento de 70 BOPD, un 4.16% de su producción total.
- CL-07: Incremento de 19 BOPD, un 15.08% de su producción total.
- CY-17: Incremento de 10 BOPD, un 3.23% de su producción total.
- CL-29: Incremento de 2 BOPD, un 3.28% de su producción total.

4.5.2 Producción de BFPD.

Para analizar el incremento de producción de BFPD es inevitable constatar la situación de un campo maduro como Caño Limón en donde los pozos tienen un BS&W o Watercut superior al 90% recordando como tal que esta es una prueba que se mide a partir de una muestra líquida del flujo de producción y que incluye agua libre, sedimento y emulsión los cuales se miden como porcentaje de volumen del flujo de producción. A continuación, en la tabla 7 se muestran los BS&W correspondientes para cada pozo objetivo del estudio.

Tabla 7.

BS & W en los pozos objeto del estudio.

Pozo	BS&W (%)
CH-07	60
CY-17	67
LY-104	96,5
CL-07	91
LY-247	98,3
LY-143	99,2
LY-068	98,8
LY-186	98,4
LY-162	98
LY-260	98,8
CL-29	99,45
LY-175	98,96

Teniendo en cuenta lo anterior podemos resaltar que los pozos con mayor incremento de producción en BFPD no serán los mismos que tuvieron los mejores incrementos en BOPD, podemos resaltar el aumento de BFPD en 4 pozos principalmente.

- CL-29: Incremento de 300 BFPD, este pozo cuenta con un BS&W de 99.45%.
- CL-07: Incremento de 210 BFPD, este pozo cuenta con un BS&W de 91%.
- CH-07: Incremento de 175 BFPD, este pozo cuenta con un BS&W de 60%.

- LY-260: Incremento de 150 BFPD, este pozo cuenta con un BS&W de 98.8%.

4.5.3 Incremento de Voltaje.

Un factor clave a analizar y para verificar la disminución del deslizamiento es el incremento de voltaje que permitió realizar los cambios de frecuencia, el voltaje total antes del estudio (Tabla 5) para los 12 pozos era 25903 V, luego de realizar los ajustes tuvo un incremento de 1681 V alcanzando un total de 27584 V y un incremento porcentual de 6,49 % en el total de voltaje en los motores de las ESP.

5. Conclusiones

Se aumento la producción general de fluido de yacimiento en los 12 pozos objetivo de este estudio en un total de 1169 BFPD y 108 BOPD, Un incremento del 3,64% con respecto a la producción antes de la disminución del deslizamiento realizada en este trabajo.

Los pozos con mayor incremento en la producción de BOPD fueron CH-07 con 70 BOPD y CL-07 con 19 BOPD mostrando resultados excepcionales y aumentando porcentualmente su producción diaria un 4,16% y un 15,08% respectivamente.

Las reducciones de pérdidas de energía eléctrica por deslizamiento en los motores de las ESP se ven directamente relacionadas con el incremento de producción en los pozos objetivos del estudio.

Se evidenció que los pozos cuyo incremento de BOPD fue mayor, tenían menor BS& W, lo que muestra una eficacia mayor de las variaciones de parámetros eléctricos para disminuir el deslizamiento por VFD mayor en etapas tempranas de producción.

Los motores de las ESP pasaron a operar en general para los 12 pozos con un 6,49% más de voltaje que antes del estudio, sin embargo, en ningún momento se superó tanto el voltaje nominal, como la corriente nominal de los equipos, garantizando así la integridad física de estos.

El comportamiento de los motores de las ESP en los pozos objetivo de estudio mostró una reacción similar a las variaciones de frecuencia realizadas con el VFD Robicon, la corriente del motor disminuía y con esto el % de carga del motor, se lograba realizar un aumento del voltaje mejorando la eficiencia, el run life del motor y disminuyendo tanto las pérdidas de energía por deslizamiento como la temperatura del motor.

6. Recomendaciones.

Se recomienda realizar el seguimiento al incremento de producción de BOPD alcanzado en este estudio, y monitorear cómo se comporta estas variaciones de parámetros eléctricos en los motores de las ESP con el fin de identificar un plan de optimización a lo largo de toda la vida productiva del pozo, sin recurrir a gastos adicionales por trabajos de workover.

Si bien el estudio se realizó utilizando VFD Robicon, es importante analizar posibles variaciones de parámetros eléctricos para ESP con distinto modelo o controlador, permitiendo estandarizar para cualquier modelo de variador, los distintos ajustes eléctricos a realizarse teniendo en cuenta las condiciones de cada pozo.

Implementar las variaciones de voltajes en diferentes campos con diferentes densidades de fluidos para poder determinar, que tan influyente es la densidad de este en las pérdidas de energía por deslizamiento en los motores de fondo.

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
- Abril, B., Peñaranda, J., & Tovar, C. (2013). Optimización de energía en sistemas de bombeo. *Informador Técnico*, 77, 48-57. doi:10.23850/22565035.44
- 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
- Aller, J. M. (2008). *Maquinas electricas rotativas*. Editorial Equinoccio.
- Autor. (s.f.). *Consolidación de fluido total de levantamiento en campo Caño Limón*.
- Bojacá, F. (2010). *Evaluación de los métodos para la determinación de las pérdidas adicionales en los motores de inducción*. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia. Bogota: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/3767/>
- Bose, B. (2006). *Power electronics and motor drives : advances and trends*. Sheel Print-N-Pack Elsevier. doi:621.317 BOS

- 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.
- Chelliah, T. R., Srivastava, S., & Agarwal, P. (2009). Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor - A Review. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 61-70. doi:10.7763/IJCEE.2009.V1.10
- Cordoba, B., Erazo , P., & Herrera, C. (2006). Bombeo electro sumergible curso basico. Public, Schlumberger. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/130098988/Bombeo-Electro-Sumergible-Partes>
- Khakimyanov, M., Shafikov, I., & Khusainov, F. (01 de 01 de 2016). Electric Submersible Pumps in Oil Production and Their Efficiency Analysis. doi:10.13142/kt10004.07
- Occidental de colombia llc. (2018). OXY. Obtenido de <https://www.oxy.com/OurBusinesses/OilandGas/Colombia/Pages/default.aspx>
- Pinto, C. A. (2012). *Modulo Bombeo Electrosumergible*. Bogota, Colombia: Publicaciones UIS.
- Villegas, J., Aracena, R., Moncada, L., & Muñoz, O. (2006). Aplicación de sistemas de bombeo electrosumergible en campos maduros con condiciones seeras. *3er Congreso de producción mendoza* (pág. 1). Baker Hughes.