

# Optimización energética en variadores de frecuencia de los bloques 16 y 67 del Oriente ecuatoriano

Energy optimization in frequency variators of 16 and 67 blocks in Ecuador eastern



Maximo Nastacuas Cuichan <sup>1</sup>  
Marco Vergara Murillo <sup>2</sup>  
Angelo Rodríguez Reyes <sup>1</sup>  
David Panchi Quintana <sup>3</sup>  
Christian Reyes Neira <sup>1</sup>  
Italo Ramírez Chávez <sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-5319-6439>  
<https://orcid.org/0000-0002-5027-8719>  
<https://orcid.org/0000-0002-1719-2235>  
<https://orcid.org/0000-0002-1044-5578>  
<https://orcid.org/0000-0001-9454-652X>  
<https://orcid.org/0000-0001-7699-2729>

<sup>1</sup>Society of Petroleum Engineers, SPE | Quito - Ecuador | CP 170510

<sup>2</sup>REPSOL, S.A | Quito - Ecuador | CP 170143

<sup>3</sup>Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE | Quito - Ecuador | CP 170109

✉ maximo-0396@hotmail.com

<http://dx.doi.org/10.26423/rctu.v9i1.669>

Páginas: 35- 47

## Resumen

El bombeo electrosumergible es un método de levantamiento artificial, que se implementa en pozos de baja presión, en el cual se suministra energía eléctrica de superficie al motor y bomba del subsuelo. Las mediciones de calidad de energía registran una elevada distorsión armónica ocasionada por la potencia reactiva, debido a que los equipos de superficie consumen energía y no generan trabajo útil o calor. Esta investigación comprende el análisis del funcionamiento los variadores de frecuencia, conocidos como VSDs, potencia y distorsión armónica del transformador de los pozos A1, A2 Y A3. Se realizó una simulación del sistema bombeo electrosumergible, donde se obtuvo los parámetros eléctricos requeridos en los equipos de superficie. Además, se modeló el sistema eléctrico para contrastar el análisis llevado a cabo en este proyecto. Mediante el análisis económico se confirmó que utilizando los parámetros eléctricos adecuados por el equipo de superficie se obtiene un ahorro económico significativo.

**Palabras clave:** armónicos, bombeo electrosumergible, transformador, variador de frecuencia.

## Abstract

Electrosubmersible pumping is a method of artificial lift, implemented in low-pressure wells, in which surface electrical power is supplied to the subsurface motor and pump. Power quality measurements record high harmonic distortion caused by reactive power, because surface equipment consumes energy and does not generate useful work or heat. This research includes the analysis of the operation of the variable frequency drives, known as VSDs, power and harmonic distortion of the transformer of wells A1, A2 and A3. A simulation of the electrosubmersible pumping system was carried out, where the electrical parameters required in the surface equipment were obtained. In addition, the electrical system was modeled to contrast the analysis carried out in this project. Through the economic analysis it was confirmed that by using the appropriate electrical parameters for the surface equipment a significant economic saving is obtained.

**Keywords:** harmonics, electro submersible pumping, transformer, variable frequency drive

Recepción: 21 febrero 2022 | Aprobación: 10 mayo 2022 | Publicación: 30 junio 2022

## 1. Introducción

Uno de los componentes más importantes del equipo de bombeo electrosumergible es el motor de inducción trifásico, el cual proporciona la potencia necesaria a la bomba centrífuga para llevar los fluidos desde fondo de pozo hasta superficie. Por lo general la velocidad de un motor de corriente alterna es controlada mediante un Variador de frecuencia (VSD), el cual ajusta el voltaje y la frecuencia a la cual trabajará el motor.

En una red eléctrica, los variadores de frecuencia (VSDs) son la principal fuente de armónicos debido a su composición electrónica, los cuales distorsionan las señales de voltaje y corriente. Para el correcto funcionamiento de los equipos de control, monitoreo, y protección deben trabajar con señales de forma óptima, es decir una onda senoidal, por lo tanto, la distorsión armónica provoca disturbios en dichos equipos eléctricos y como resultado reduce su vida útil además de generar un impacto económico en la operación.

Sáchica (2020), en el estudio “Metodología para la optimización del consumo energético bajo el análisis de eficiencia financiera con un alto impacto en la reducción de emisiones de GEI. Caso exitoso de aplicación en el campo más grande de Colombia”, estableció como objetivo crear una metodología aplicable en la industria del petróleo y gas para brindar alternativas de optimización del consumo energético. En la metodología realizó un análisis de técnico y financiero para seleccionar los pozos a optimizar, como resultado, en los pozos se realizaron acciones correctivas y se presentaron ventajas adicionales, tales como; la reducción de carga del VSD y el ajuste de frecuencia portadora del VSD. En esta investigación se busca optimizar el consumo de energía en los VSDs de los bloques 16 y 67 del Ecuador [1].

González (2020), en su investigación “Plan de mejoramiento de distorsiones armónicas presentes en equipos de extracción petrolera por medio de estudio de calidad de potencia”, cuyo objetivo fue mejorar el proceso de atenuación de la distorsión armónica, se realizó un análisis técnico con el histórico de fallas antes, durante y después de cada evento; se implementó simuladores y analizadores de red. La solución a la problemática fue con la implementación de filtros de compensación al sistema de variador de frecuencia. Tal estudio se desarrolló en Colombia, debido a que los problemas de distorsión armónica son un problema que existe en todos los campos petroleros a nivel mundial con sistema de Bombeo Electrosumergible. En este estudio de los autores, se analizan las mediciones de calidad de energía de cada pozo para determinar los problemas que ocurren en los bloques 16 y 67 en Ecuador [2].

En los bloques 16 y 67, los variadores de frecuencia (VSDs) de acuerdo a las mediciones de calidad de energía han determinado valores elevados de distorsión

armónica, superior al 5 %, esto significa que no cumple con la norma para el control de armónicos ANSI/IEEE 519-1992. Por ello es importante el análisis de la distorsión armónica de la red eléctrica para controlar que el suministro de energía se aproveche adecuadamente y así reducir las pérdidas en equipos de superficie.

### 1.1. Exposición de teoría y definiciones

**Variador de Velocidad (VSD):** Es el encargado de proveer una relación entre el voltaje y la frecuencia para las condiciones apropiadas de operación. Debido a esto también se lo conoce con el nombre de variador de frecuencia, ya que permite alterar la frecuencia de un motor y a su vez su velocidad [3].

**Transformadores:** En la mayoría de los casos el voltaje de superficie disponible no es compatible con el voltaje del motor requerido y los transformadores deben usarse para proporcionar el nivel de voltaje requerido.

Los transformadores son unidades llenas de aceite con auto enfriamiento, los cuales aumentan (transformador elevador) o disminuyen (transformador reductor) el voltaje disponible de la red eléctrica de superficie [4].

**Caja de conexiones:** La caja de conexiones o caja de venteo consiste en una caja impermeable ventilada que proporciona la conexión eléctrica entre el fondo del pozo y los cables eléctricos de superficie. Ventea a la atmosfera cualquier gas que haya migrado a través del cable de potencia, con la finalidad de prevenir un incendio o explosión [2].

**Cable:** La energía eléctrica necesaria para impulsar el motor se lleva desde la superficie a través de un cable conductor, debe mantener sus propiedades dieléctricas en condiciones extremas como: altas temperaturas, entornos de fluidos agresivos y la presencia de hidrocarburos y/u otros gases [5].

**Bomba:** La bomba sumergible eléctrica es de tipo centrífugo multietapa, la función de las bombas es agregar presión de elevación o transferencia al fluido para que fluya desde el pozo a la tasa deseada. Imparte energía cinética al fluido mediante fuerza centrífuga y luego convirtiéndola en energía potencial en forma de presión [6].

**Intake:** Se ubica entre el protector y la bomba, reduce la cantidad de gas libre que pasa por la bomba. Su uso es opcional y se utiliza cuando se espera una alta relación gas-petróleo [7].

**Protector:** Su función principal consiste en aislar el motor de los fluidos del pozo para evitar cortocircuitos y la quema del motor debido a que este posee un aceite dieléctrico; por lo general se lo instala entre el motor y la bomba centrífuga del conjunto BES [2].

**Motor:** son motores de inducción de corriente alterna, trifásicos y de tipo jaula de ardilla. Para el uso eficiente de la energía eléctrica en el motor debe tener una combinación perfecta de tensión-corriente [8].

**Sensor:** La señal medida por el sensor debe llevarse mediante el cable que se conecta al motor a la superficie donde se encuentra el controlador del motor. Además, la captura de los datos medidos en el fondo del pozo como propiedades físicas y se almacenan en un software donde su propósito es llevar un monitoreo, vigilancia y análisis [9].

**Potencia total:** Es la energía total de una instalación eléctrica, es decir la suma de energía activa y reactiva, esta se mide en KVA [10].

## 1.2. Objetivos

- Analizar la disminución de pérdidas en los equipos eléctricos de superficie (VSDs y transformadores) para el control y protección del sistema de bombeo electrosumergible de los Bloques 16 y 67 ubicados en el Oriente ecuatoriano.
- Determinar los elementos o parámetros de operación sobre los cuales se pueda ejecutar una determinada acción, que permita optimizar el uso de la energía enfocado en incrementar la vida útil de los equipos BES.

## 2. Materiales y métodos

De acuerdo a las mediciones de calidad de energía de los pozos A1, A2 Y A3 se procedió a realizar el análisis correspondiente a la operación de los VSDs, análisis de la potencia activa del transformador y análisis de la distorsión armónica del sistema asociado entre el 22 de enero y 26 abril en el pozo A1 y entre el 22 de enero y 28 abril en los pozos A1 y A2, respectivamente. La simulación del pozo Prueba se la realizó en el software Pump Desing de la organización Petroleum Engineering Software and Services [11].

De acuerdo con los datos petrofísicos y de diseño del pozo prueba se realizó el dimensionamiento del equipo de fondo con el propósito de determinar los parámetros operativos de la bomba, motor, condiciones eléctricas de los variadores, transformadores y secciones de cable, a fin de lograr un mejor entendimiento con respecto al funcionamiento de los equipos de superficie. Mediante el uso del software ETAP se modeló los equipos eléctricos asociados al pozo A1 para corroborar la distorsión armónica que se genera. Además, se calculó una aproximación con respecto a las pérdidas y ahorro económico. Para ello fue necesario analizar el coste KW/h en Ecuador orientado al sector industrial, sugiriendo algunos cambios en los equipos de superficie para lograr un mayor ahorro económico.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Análisis de los VSDs de los pozos A1, A2 y A3

Entre el 22 de enero y el 26 de abril de 2021 en el pozo A1 se produjo una disminución de potencia del

17,3 % (Tabla 1). El variador de frecuencia en equipos electrosumergibles produce gran parte de distorsión armónicos en el sistema lo que provoca una distorsión en la señal de entrada, generando pérdidas. En los pozos A2 y A3, no existe variación de potencia nominal entre las fechas señaladas, lo que significa que la potencia se mantuvo en ese intervalo de tiempo.

**Tabla 1:** Porcentaje de reducción en potencia nominal de los VSDs

Pozo	Fecha	Potencia nominal (KVA)	Porcentaje de potencia	Porcentaje de reducción
A1	22/01/2019	518	100 %	17,3 %
	26/04/2019	428	82,7 %	
A2	22/01/2019	519	100 %	0 %
	28/02/2019	519	100 %	
A3	22/01/2019	519	100 %	0 %
	28/02/2019	519	100 %	

### 3.2. Análisis de los transformadores de los pozos A1, A2 y A3

Con el análisis de los datos de las Tabla 2 y Tabla 3 se deduce que: en el pozo A1, hay una disminución de 17,7% y 13,6% en potencia activa a la entrada y a la salida del VSD respectivamente; las mediciones de potencia a la salida del variador se aprovecha como potencia útil y se encarga de realizar el trabajo mecánico, lo que se traduce en pérdidas económicas por el coste que se utiliza para generar potencia no utilizable, con el dato de la potencia aparente de la misma manera es posible determinar el rendimiento del transformador. En el pozo A2 hay una disminución de 1,5 % y 0,9 % de la potencia activa a la entrada y a la salida, respectivamente y en el pozo A3 existe una disminución de 21,3 % en la potencia activa de entrada y un aumento del 1,26 % de la potencia activa de salida.

**Tabla 2:** Porcentaje de reducción en potencia activa de entrada

Pozo	Fecha	Potencia activa (KW)	Porcentaje de potencia	Porcentaje de reducción
A1	22/01/2019	141	100 %	17,7 %
	26/04/2019	116	82,3 %	
A2	22/01/2019	343	100 %	1,5 %
	28/02/2019	338	98,5 %	
A3	22/01/2019	94	100 %	21,3 %
	28/02/2019	74	78,7 %	

**Tabla 3:** Porcentaje de reducción en potencia activa de salida.

Pozo	Fecha	Potencia activa (KW)	Porcentaje de potencia	Porcentaje de reducción
A1	22/01/2019	139	100 %	13,6 %
	26/04/2019	120	86,4 %	
A2	22/01/2019	317	100 %	0,9 %
	28/02/2019	314	99,1 %	
A3	22/01/2019	79	100 %	-1,26 %
	28/02/2019	80	101,3 %	

### 3.3. Cálculo del rendimiento de los transformadores de los pozos A1, A2 Y A3

Para un transformador, el rendimiento se tiene que encontrar entre el rango de 95 % - 99 %. Con base al análisis de la Tabla 4 y Tabla 5, se observa cuánto ha sido el aumento de la distorsión armónica total en los transformadores.

**Tabla 4:** Cálculo del rendimiento en transformadores con la potencia activa y aparente de entrada.

Pozo	Fecha	Potencia activa (KW)	Potencia aparente (KVA)	Rendimiento del transformador
A1	22/01/2019	141	185	76,21 %
	26/04/2019	116	134	86,56 %
A2	22/01/2019	343	425	80,7 %
	28/02/2019	338	389	86,88 %
A3	22/01/2019	94	150	62,66 %
	28/02/2019	74	103	71,84 %

**Tabla 5:** Cálculo del rendimiento en transformadores con la potencia activa y aparente de salida

Pozo	Fecha	Potencia activa (KW)	Potencia aparente (KVA)	Rendimiento del transformador
A1	22/01/2019	139	174	79,88 %
	26/04/2019	120	145	82,75 %
A2	22/01/2019	317	433	73,21 %
	28/02/2019	314	429	73,19 %
A3	22/01/2019	79	120	65,83 %
	28/02/2019	80	115	69,57 %

### 3.4. Análisis de la distorsión armónica de voltaje y corriente a la entrada de los VSDs de los pozos A1, A2 y A3

En la Tabla 6, se observa el aumento de la distorsión armónica total en el transformador reductor del pozo A1. La señal del voltaje conforme transcurre el tiempo de uso del transformador va disminuyendo su distorsión armónica, como consecuencia en la señal de corriente del transformador existe una elevación del 14,2 % al 16,5 %, al no ser un valor elevado de distorsión armónica, en

esta sección no se profundiza el análisis para corregir o disminuir dicha perturbación. En el pozo A2, hay un incremento de distorsión armónica en la señal de corriente de 3,7 % al 4,8 % y en pozo A3, una reducción de la distorsión armónica de 9,5 % al 8 %.

**Tabla 6:** Distorsión armónica en el voltaje y corriente a la entrada de los VSDs

Pozo	Fecha	TDH V (%)	TDH I (%)
A1	22/01/2019	1,2 %	14,2 %
	26/04/2019	0,9 %	16,5 %
A2	22/01/2019	1,1 %	3,7 %
	28/02/2019	1,9 %	4,8 %
A3	22/01/2019	1,7 %	9,5 %
	28/02/2019	1,9 %	8 %

### 3.5. Análisis de la distorsión armónica de voltaje y corriente a la salida de los VSDs de los pozos A1, A2 y A3

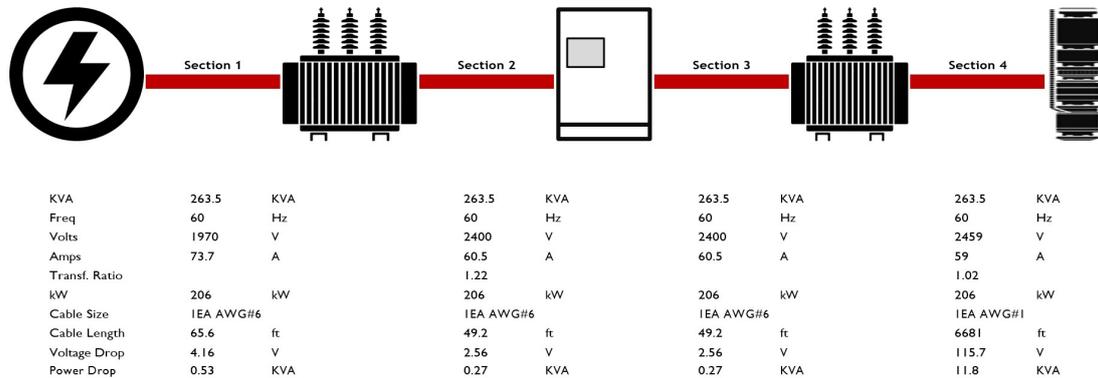
Analizando la Tabla 7, en el pozo A1 existe una elevación en la señal de voltaje y de corriente del transformador; del 29,5 % al 485 % y del 23 % al 409 %, esto implica que está aumentando en gran medida la distorsión armónica, a su vez puede provocar distintas fallas en el equipo, así como también puede provocar calentamiento a los equipos asociados, reduciendo la vida útil de los mismos y pérdidas económicas importantes. En el pozo A2 no existe una elevación en la señal de voltaje y de corriente del transformador, durante el intervalo de tiempo evaluado, no existen anomalías en la distorsión armónica, lo que no generaría daños o fallas en los equipos. En el pozo A3 existe una reducción en la señal del voltaje y de corriente del transformador, del 29,6 % al 9,8 % y del 33,1 % al 12,3 %, esto implica que disminuye la distorsión armónica, lo cual resulta positivo, ya que se reduce el riesgo de posibles fallas en los equipos, es decir, se aumenta la vida útil de los mismos.

**Tabla 7:** Distorsión armónica en el voltaje y corriente a la salida de los VSDs

Pozo	Fecha	TDH V (%)	TDH I (%)
A1	22/01/2019	29,5 %	23 %
	26/04/2019	485,0 %	409,0 %
A2	22/01/2019	29,2 %	28,3 %
	28/02/2019	29,3 %	28,4 %
A3	22/01/2019	29,6 %	33,1 %
	28/02/2019	9,8 %	12,3 %

### 3.6. Simulación del equipo de fondo y superficie del pozo de prueba

Los resultados de la simulación del pozo Prueba en el software Pump Desing se encuentran en la Figura 1 y parámetros requeridos del equipo eléctrico de superficie en la Tabla 8.



**Figura 1:** Esquema de conexión requerido y parámetros eléctricos de los equipos de superficie

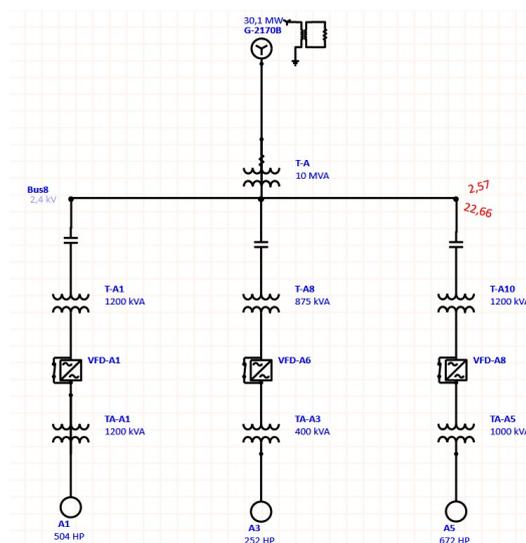
**Tabla 8:** Porcentaje de reducción en potencia activa de entrada

Tipo		Potencia		Amperios		Voltaje	
		KVA		Primario	Secundario	Primario	Secundario
Transformador U1	Aumentador	264		74	60	1 970	2 400
Drive	VSD	264			60		2 400
Transformador U2	Reductor	264		60	59	2 400	2 460

- Energía de la red (total): 264KVA
- Energía de la red (active): 206kW
- Caída de potencia en superficie: 1,07KVA

### 3.7. Contratación de resultados con el software ETAP

Para observar y comparar los resultados reales con los resultados simulados empleando el software ETAP, mostrado en la Figura 2, se determinó que el equipo de superficie está sobredimensionado y esto ocasiona un aumento en la distorsión armónica. La simulación solo considera el análisis de los pozos petroleros A1, A2, A3 y la plataforma en la que se encuentra.



**Figura 2:** Red eléctrica asociada al pozo A1 en el software ETAP

### 3.8. Cálculo de ahorro de energía por el uso eficiente de los equipos de superficie

Para el cálculo del ahorro mensual para el uso eficiente en capacidad de los equipos de superficie en los pozos A1, A2 y A3, detallado en la Tabla 9, se tomó en cuenta un valor máximo y mínimo correspondiente a la potencia activa (KW) de las mediciones de calidad de energía a la entrada del variador de frecuencia.

**Tabla 9:** Ahorro mensual por el uso eficiente en capacidad de los equipos de superficie en los pozos A1, A2 y A3

Medición	Consumos y costos	Pozo A1	Pozo A2	Pozo A3
1	Potencia a la entrada de equipos de superficie	158KW	351KW	94KW
	Energía a la entrada de equipos de superficie	3 792KWh	8 424KWh	2 256KWh
	Coste por día	341,28\$	758,16\$	203,04\$
	Coste por mes	10 238,4\$	22 744,8\$	6 091,2\$
2	Potencia a la entrada de equipos de superficie	112KW	325KW	74KW
	Energía a la entrada de equipos de superficie	2 688KWh	7 800KWh	1 776KWh
	Coste por día	241,92\$	702\$	159,84\$
	Coste por mes	7 257,6\$	21 060\$	4 795,2\$
Ahorro mensual por el uso eficiente en capacidad de los equipos de superficie		2 980,8\$	1 684,8\$	1 296\$

El valor asumido para el análisis económico corresponde al sector energético de Ecuador; el mismo que puede variar con el tiempo [12]; como se detalla en la Tabla 10.

**Tabla 10:** Ahorro mensual total por el uso eficiente en capacidad de los equipos de superficie

Coste KW Hora Ecuador	0,09 \$/KWh
Coste total por mes	33 112,8
Ahorro mensual total por el uso eficiente en capacidad de los equipos de superficie	5 961,6

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

Como los equipos de superficie están sobredimensionados ocasionan pérdidas debido a que existe un mayor consumo eléctrico, entonces va a requerir de mayor consumo de combustible para los generadores y por ende el costo para la operación se eleva. Las corrientes armónicas, a lo largo del tiempo producen la quema de los motores o se vayan una fase a tierra, cuando se queda sin una fase de alimentación de energía al motor.

Los parámetros obtenidos en el software proporcionan el dimensionamiento de los equipos de fondo; además, indican los parámetros operativos necesarios que requieren los equipos de superficie, por esta razón se debe hacer más énfasis en el dimensionamiento del equipo de superficie como en los variadores de frecuencia.

El equipo correspondiente al pozo A1, tiene un sobredimensionamiento del 60%, lo que se traduce en pérdidas de corriente y un funcionamiento deficiente del variador de frecuencia. A mayor capacidad de carga del VSD va a trabajar de mejor manera y sus componentes electrónicos van a ser más eficientes y por ende habrá menor distorsión armónica del sistema.

Se ha asumido el coste de KWh con respecto al tema industrial, pero se debe tomar en consideración que ciertas plataformas petroleras tienen su propia autogeneración a través de unidades térmicas que trabajan con diésel o petróleo.

Los resultados reales con los resultados simulados por medio del software ETAP, determinaron que los equipos de superficie se encuentran sobredimensionados y esto provoca una elevación en la distorsión armónica.

### 4.2. Recomendaciones

Según experiencia en campo, se recomienda que el VSD funcione de óptima forma, es que trabaje al menos al 70% de su capacidad nominal, caso contrario la forma de onda se distorsiona y los elementos electrónicos no trabajan de manera eficiente, esto hace que se generen corrientes parasitas que son llevadas a los equipos de fondo y hacia aguas arriba de donde se provee de energía los equipos de superficie.

Implementar filtros de armónicos activos o pasivos, los mismos que pueden ser utilizados a la entrada y a la salida de los variadores, ya que estos filtros hacen que los equipos tienen un mayor ciclo de vida disminuyendo la distorsión armónica en la señal producida mayormente por el VSD.

Dimensionar los equipos de superficie de acuerdo a los requerimientos del equipo de fondo, para evitar el sobredimensionamiento del conjunto BES.

Realizar un análisis utilizando la metodología empleada en posteriores casos de estudio relacionados al Machine Learning o Inteligencia Artificial, debido a que es un problema contractual técnico de campo, para así evitar una parada inesperada del equipo BES, lo que ocasiona pérdidas en producción y costos de reparación.

## 5. Nomenclatura

A: Amperio

AWG: Calibre de Cable Americano

BFPD: Barriles de fluido por día

KVA: Kilo-Voltio-Amperio

KW: Kilovatio

KWh: Kilovatio-hora

TDH I: Distorsión armónica total corriente

TDH V: Distorsión armónica total voltaje

VSDs: Variable Speed Drives

## 6. Referencias

- SÁCHICA, Jorge. Metodología para la optimización del consumo energético bajo el análisis de eficiencia financiera con un alto impacto en la reducción de emisiones de GEI. Caso exitoso de aplicación en el campo más grande de Colombia. *Revista Fuentes: El reventón energético*. julio-diciembre 2020, págs. 107-122. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/11895>,
- GONZÁLEZ, Laura. *Plan de mejoramiento de distorsiones armónicas presentes en equipos de extracción petrolera por medio de estudio de calidad de potencia*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá, Colombia, 2020. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/25686>,
- GABOR, Takacs. *Electrical Submersible Pumps Manual. Design, Operations and Maintenance*. s.l. 2018, vol. 2, págs. 11-366. Disponible en: [https://www.academia.edu/27844918/Electrical\\_Submersible\\_Pumps\\_Manual\\_Design\\_Operations\\_and\\_Maintenance](https://www.academia.edu/27844918/Electrical_Submersible_Pumps_Manual_Design_Operations_and_Maintenance),
- NARVÁEZ, Kimberly y SANTOS, Juan. *Estudio técnico económico para la optimización de producción mediante el cambio de sistema de levantamiento artificial de bombeo hidráulico a bombeo electrosumergible en pozos candidatos del bloque 44*. Quito : Universidad Central del Ecuador, 2020. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/22348>,
- OROZCO, Jessica. *Análisis nodal del sistema de bombeo electrosumergible en los campos Jivino y Limoncocha del bloque 15*. Quito : Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- NEIRA, Ana. *Evaluación técnico financiera de la eficiencia de una nueva tecnología en bombeo electrosumergible para pozos en Colombia y Ecuador*. Bogotá : Fundación Universidad de América, 2019. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20409>,
- WILLIAMS, A. y SHIPP, David. *ESP Downhole Power Quality - Do We have a Healthy Cardiovascular System?* Society of Petroleum Engineers, 2019. Disp. desde DOI: 10.2118/194411-MS.
- ARELLANO, Diana y GUAJALA, Gina. *Estudio comparativo entre el sistema de bombeo electrosumergible con motor de induccion y el sistema de bombeo electrosumergible con motor de imán permanente en el campo Sacha*. Quito : Escuela Politécnica Nacional, 2019. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20410>,
- AGUIRRE, Bryan. *Análisis técnico económico de la optimización de levantamiento artificial en pozos petroleros por medio del software PIPESIM en el oriente ecuatoriano*. Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador, 2018. Disponible en: <http://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/18500>,
- VILLAREAL, Katherine. *Análisis técnico económico de la implementación de bombas electrosumergibles con tecnología Power Save en pozos del campo Sacha*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2018. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19629>,
- DON, Wolcott; TUZOVSKIY, Mikhail; KARMANOV, Andrey; GUK, Vyacheslav; BONDARENKO, Alexander; VELOLIPETSKIY, Pavel; FROLENKOV, Igor; NAZHALOV, Maxim; PROTSYKOV, Georgiy y BYCHINA, Mariya. *Pengtools.com. Petroleum Engineering Software and Service* [Software]. [Consulta: 11 feb. 2021]. Disponible en: <https://www.pengtools.com/>,
- MACIAS, Juan. *Los Diferentes Costos que Tiene la Energía Eléctrica en el Ecuador Considerando los Cambios de la Estructura Actual*. Ecuador : Riemat, 2018. Disponible en: <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Riemat/article/view/1628/1823>,

## 7. Apéndices

### 7.1. Apéndice A - Potencia nominal del VSD de los pozos A1, A2 Y A3

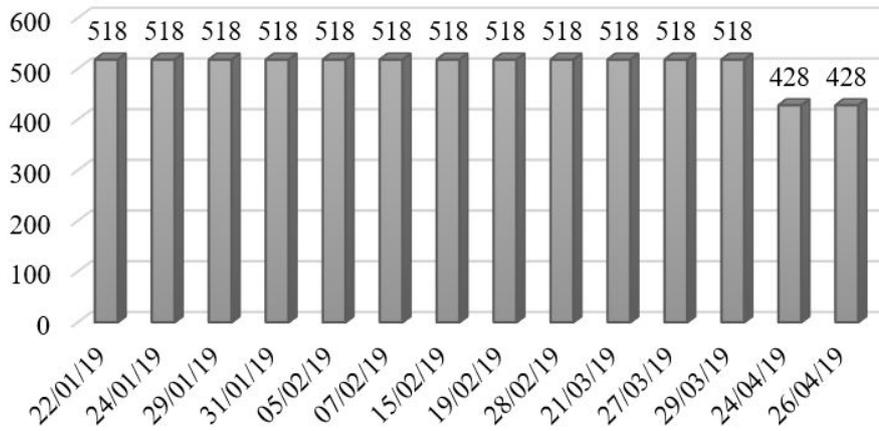


Figura 3: Potencia del VSD (KVA) del pozo A1

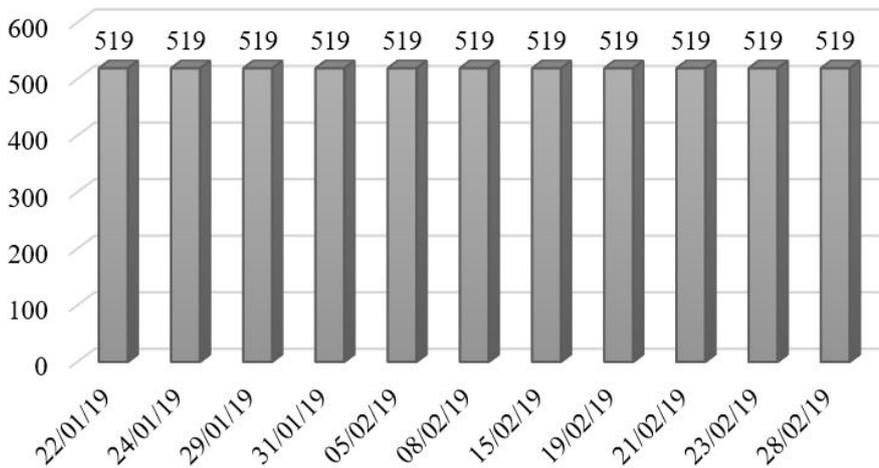


Figura 4: Potencia del VSD (KVA) del pozo A2

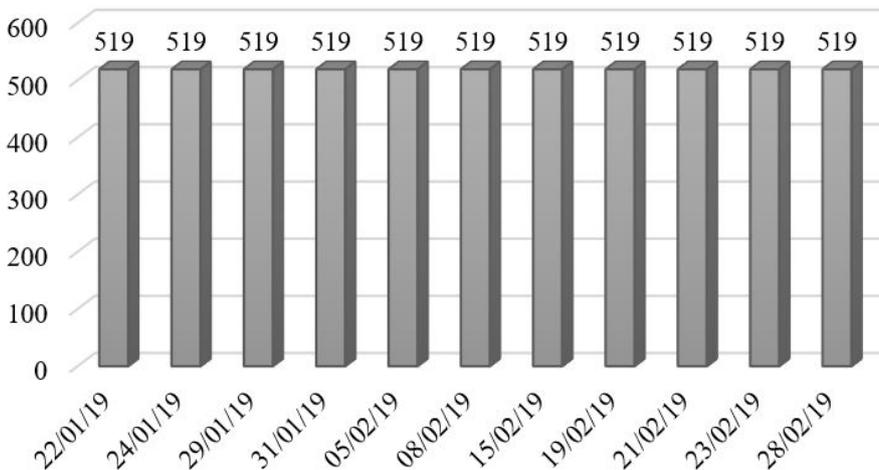
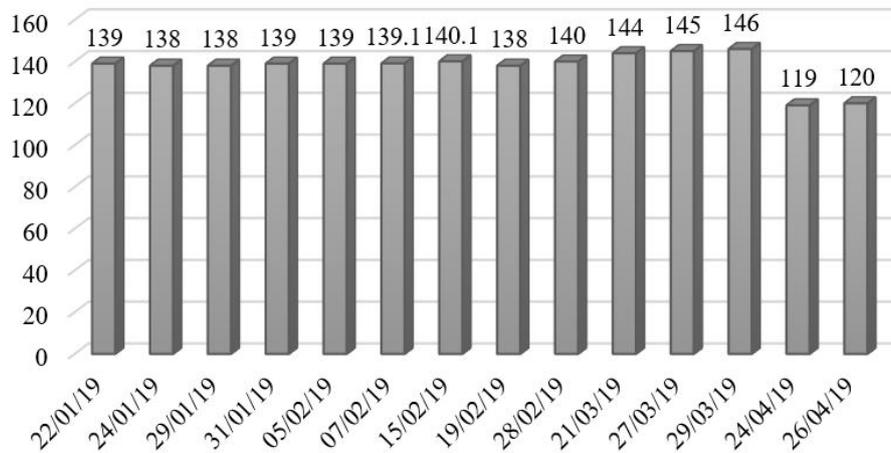
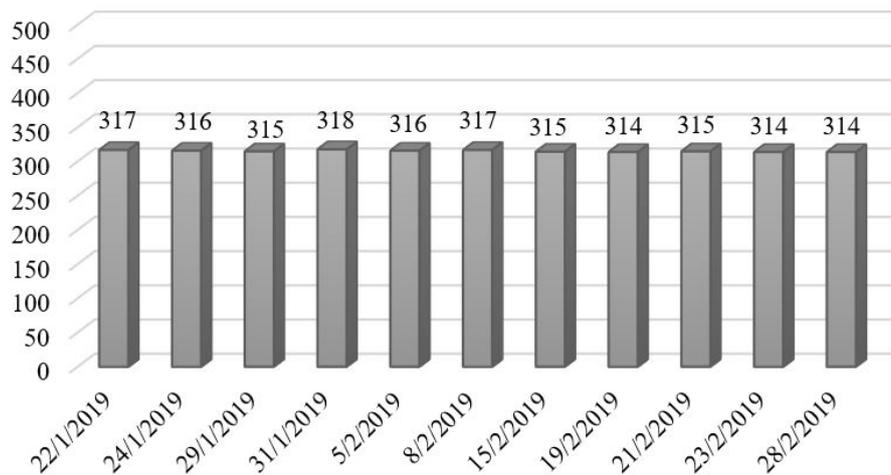


Figura 5: Potencia del VSD (KVA) del pozo A3

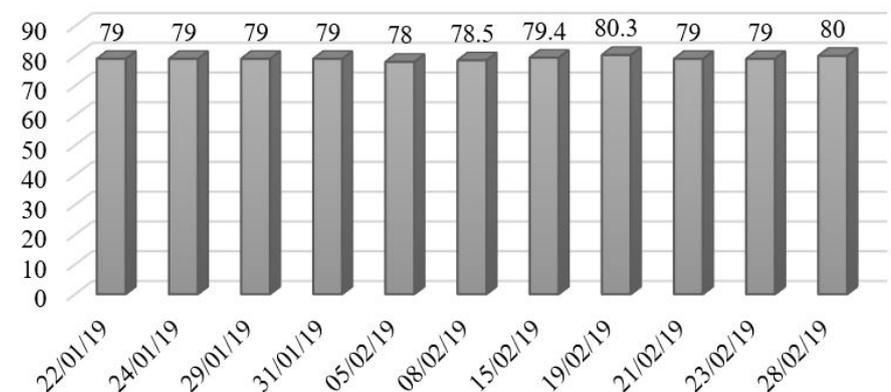
## 7.2. Apéndice B - Potencia del transformador a la salida del VSD de los pozos A1, A2 y A3



**Figura 6:** Potencia del transformador (KVA) del pozo A1

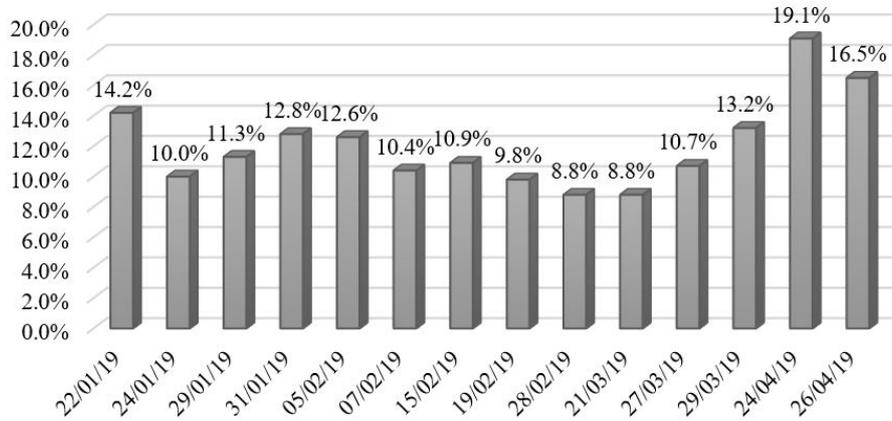


**Figura 7:** Potencia del transformador (KVA) del pozo A2

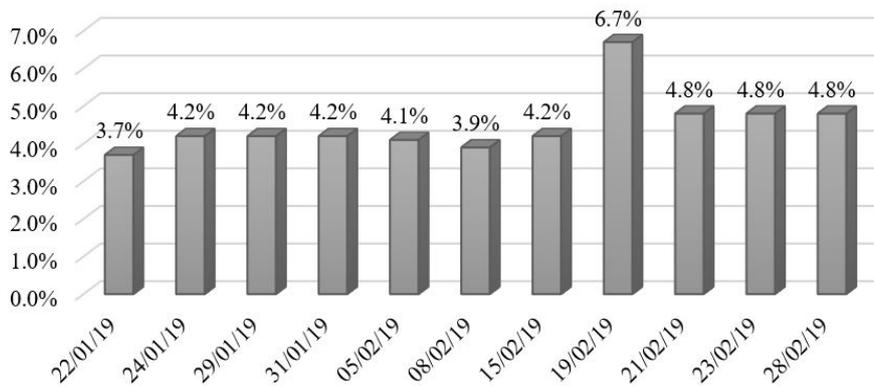


**Figura 8:** Potencia del transformador (KVA) del pozo A3

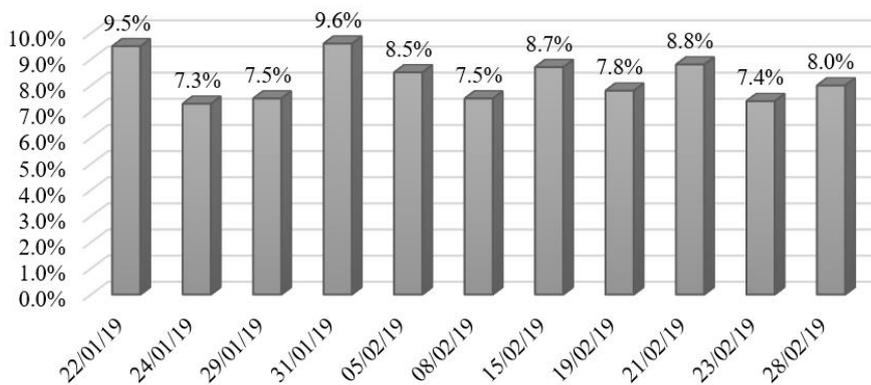
### 7.3. Apéndice C – Distorsión armónica de voltaje y corriente a la entrada del VSD de los pozos A1, A2 y A3



**Figura 9:** Distorsión armónica de corriente medida en del transformador reductor del VSD del pozo A1

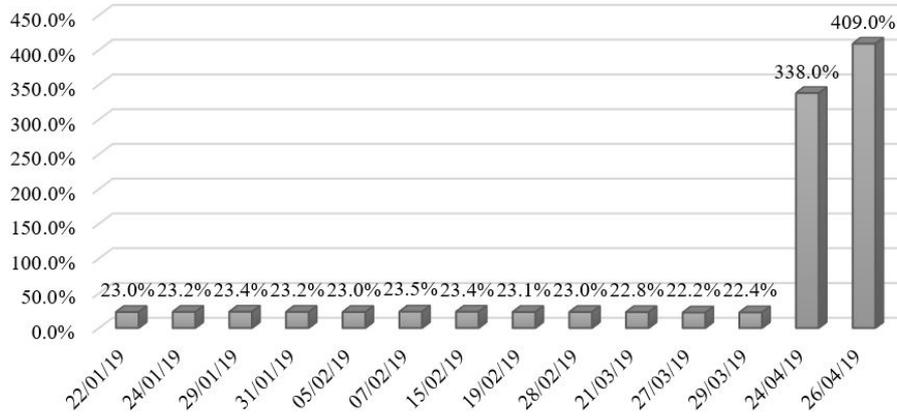


**Figura 10:** Distorsión armónica de corriente medida en del transformador reductor del VSD del pozo A2

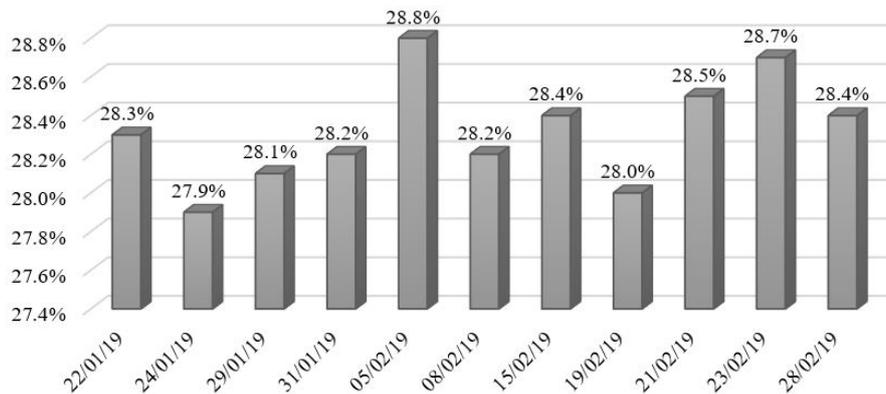


**Figura 11:** Distorsión armónica de corriente medida en del transformador reductor del VSD del pozo A3

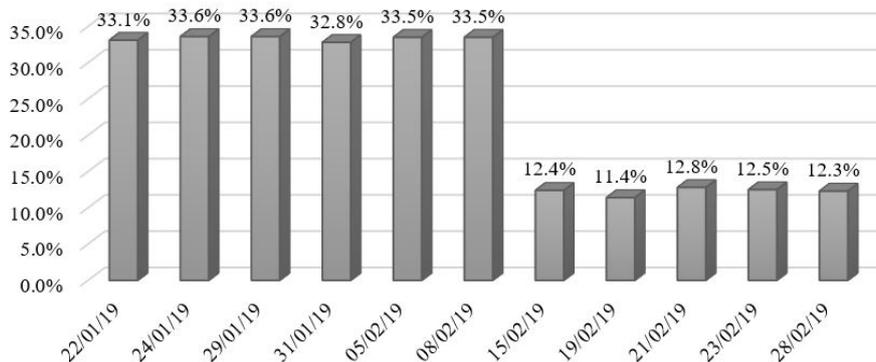
### 7.4. Apéndice D - Distorsión armónica de voltaje y corriente a la salida del VSD de los pozos A1, A2 y A3



**Figura 12:** Distorsión armónica de corriente medida en del transformador elevador del VSD del pozo A1



**Figura 13:** Distorsión armónica de corriente medida en del transformador elevador del VSD del pozo A2



**Figura 14:** Distorsión armónica de corriente medida en del transformador elevador del VSD del pozo A3

### 7.5. Apéndice E - Comparación de los resultados de simulación en el software ETAP

**System Harmonics Branch Information**

Bus		Current Distortion											
From Bus ID	To Bus ID	Fund. Amp	RMS Amp	ASUM Amp	THD %	TIF	IT Amp	ITB Amp	ITR Amp	TIHD %	TSHD %	THDG %	THDS %
Bus8	Bus23	124.15	271.96	590.82	194.91	3032.86	824830.70	824830.70	0.00	0.00	0.00	194.91	194.91
	T-A1~	50.29	58.97	109.69	61.25	1780.77	105015.30	105015.30	0.00	0.00	0.00	61.25	61.25
	T-A8~	20.28	24.46	46.66	67.39	1907.64	46656.51	46656.51	0.00	0.00	0.00	67.39	67.39
	T-A10~	55.09	59.53	98.51	40.93	1288.90	76727.55	76727.55	0.00	0.00	0.00	40.93	40.93
Bus9	Bus12	251.45	255.73	341.29	18.53	624.54	159711.50	159711.50	0.00	0.00	0.00	18.53	18.53
	T-A1~	251.45	266.85	422.08	35.54	1199.89	320191.40	320191.40	0.00	0.00	0.00	35.54	35.54
Bus12	Bus9	50.29	51.15	68.26	18.53	624.54	31942.30	31942.30	0.00	0.00	0.00	18.53	18.53
Bus17	Bus18	20.28	20.75	28.76	21.64	723.60	15015.85	15015.85	0.00	0.00	0.00	21.64	21.64
Bus18	Bus17	101.41	103.76	143.79	21.64	723.60	75079.26	75079.26	0.00	0.00	0.00	21.64	21.64
	T-A8~	101.41	104.04	143.35	22.90	834.47	86817.03	86817.03	0.00	0.00	0.00	22.90	22.90
Bus21	Bus22	55.09	55.96	74.14	17.77	605.05	33856.69	33856.69	0.00	0.00	0.00	17.77	17.77
Bus22	Bus21	275.47	279.78	370.71	17.77	605.05	169283.50	169283.50	0.00	0.00	0.00	17.77	17.77
	T-A10~	275.47	281.75	380.94	21.48	793.85	223666.40	223666.40	0.00	0.00	0.00	21.48	21.48
Bus23	SPLICE	9.09	28.70	61.72	299.46	3243.31	93086.33	93086.33	0.00	0.00	0.00	299.46	299.46
	Bus8	9.09	20.02	43.57	196.21	3044.89	60959.04	60959.04	0.00	0.00	0.00	196.21	196.21
SPLICE	Bus23	9.09	28.70	61.72	299.46	3243.31	93086.33	93086.33	0.00	0.00	0.00	299.46	299.46
T-A1~	Bus8	251.45	294.86	548.44	61.25	1780.77	525076.60	525076.60	0.00	0.00	0.00	61.25	61.25
	Bus9	251.45	266.85	422.08	35.54	1199.89	320191.40	320191.40	0.00	0.00	0.00	35.54	35.54
T-A8~	Bus8	101.41	122.29	233.28	67.39	1907.64	233282.50	233282.50	0.00	0.00	0.00	67.39	67.39
	Bus18	101.41	104.04	143.35	22.90	834.47	86817.03	86817.03	0.00	0.00	0.00	22.90	22.90
T-A10~	Bus8	275.47	297.65	492.54	40.93	1288.90	383637.70	383637.70	0.00	0.00	0.00	40.93	40.93
	Bus22	275.47	281.75	380.94	21.48	793.85	223666.40	223666.40	0.00	0.00	0.00	21.48	21.48

**Figura 15:** Resultados del software ETAP sin modificaciones en los parámetros operativos de los equipos de fondo y superficie

**System Harmonics Branch Information**

Bus		Current Distortion											
From Bus ID	To Bus ID	Fund. Amp	RMS Amp	ASUM Amp	THD %	TIF	IT Amp	ITB Amp	ITR Amp	TIHD %	TSHD %	THDG %	THDS %
Bus8	Bus23	352.01	426.52	811.81	68.42	1900.36	810544.70	810544.70	0.00	0.00	0.00	68.42	68.42
	T-A1~	111.68	115.88	171.15	27.68	906.15	105000.50	105000.50	0.00	0.00	0.00	27.68	27.68
	T-A8~	61.15	62.68	87.65	22.47	746.83	46808.34	46808.34	0.00	0.00	0.00	22.47	22.47
	T-A10~	179.19	180.64	222.95	12.73	427.49	77223.18	77223.18	0.00	0.00	0.00	12.73	12.73
Bus9	Bus12	558.38	560.23	646.90	8.16	286.08	160274.20	160274.20	0.00	0.00	0.00	8.16	8.16
	T-A1~	558.38	566.10	737.29	16.69	605.45	342746.60	342746.60	0.00	0.00	0.00	16.69	16.69
Bus12	Bus9	111.68	112.05	129.38	8.16	286.08	32054.84	32054.84	0.00	0.00	0.00	8.16	8.16
Bus17	Bus18	61.15	61.30	69.42	6.99	239.55	14684.56	14684.56	0.00	0.00	0.00	6.99	6.99
Bus18	Bus17	305.75	306.50	347.10	6.99	239.55	73422.80	73422.80	0.00	0.00	0.00	6.99	6.99
	T-A8~	305.75	306.78	349.83	8.21	317.04	97263.71	97263.71	0.00	0.00	0.00	8.21	8.21
Bus21	Bus22	179.19	179.45	197.39	5.34	191.25	34319.82	34319.82	0.00	0.00	0.00	5.34	5.34
Bus22	Bus21	895.97	897.25	986.97	5.34	191.25	171599.10	171599.10	0.00	0.00	0.00	5.34	5.34
	T-A10~	895.97	898.74	1026.76	7.87	314.33	282505.10	282505.10	0.00	0.00	0.00	7.87	7.87
Bus23	SPLICE	25.78	37.40	77.80	105.11	2455.97	91842.93	91842.93	0.00	0.00	0.00	105.11	105.11
	Bus8	25.78	31.32	59.81	69.00	1917.21	60041.79	60041.79	0.00	0.00	0.00	69.00	69.00
SPLICE	Bus23	25.78	37.40	77.80	105.11	2455.97	91842.93	91842.93	0.00	0.00	0.00	105.11	105.11
T-A1~	Bus8	558.38	579.38	855.73	27.68	906.15	525002.60	525002.60	0.00	0.00	0.00	27.68	27.68
	Bus9	558.38	566.10	737.29	16.69	605.45	342746.60	342746.60	0.00	0.00	0.00	16.69	16.69
T-A8~	Bus8	305.75	313.38	438.24	22.47	746.83	234041.70	234041.70	0.00	0.00	0.00	22.47	22.47
	Bus18	305.75	306.78	349.83	8.21	317.04	97263.71	97263.71	0.00	0.00	0.00	8.21	8.21
T-A10~	Bus8	895.97	903.21	1114.74	12.73	427.49	386115.90	386115.90	0.00	0.00	0.00	12.73	12.73
	Bus22	895.97	898.74	1026.76	7.87	314.33	282505.10	282505.10	0.00	0.00	0.00	7.87	7.87

**Figura 16:** Resultados del software ETAP con modificaciones en los parámetros operativos de los equipos de fondo y superficie

### 7.6. Apéndice F - Cálculo del porcentaje de trabajo del VSD de los pozos A1, A2 y A3

En la Tabla 11 se observa que en el pozo A1, durante el transcurso de uso del VSD este se encuentra trabajando a menos del 70 % de su capacidad, lo cual aumenta la distorsión armónica en la señal de corriente.

**Tabla 11:** Porcentaje de reducción en potencia activa de entrada

Fecha	Promedio de corriente del VSD (A)	Porcentaje de trabajo del VSD	Potencia activa (KW)	Distorsión armónica de la corriente (A)
24/01/2019	225	36,06 %	158	10 %
24/04/2019	211,66	33,92 %	112	19,1 %

De acuerdo a la Tabla 12, en el pozo A2, durante el transcurso de uso del VSD este se encuentra trabajando a más del 70 % de su capacidad, lo cual disminuye la distorsión armónica en la señal de corriente.

**Tabla 12:** Respuesta de la corriente del VSD en la potencia activa y distorsión armónica en los equipos de superficie del pozo A2

Fecha	Promedio de corriente del VSD (A)	Porcentaje de trabajo del VSD	Potencia activa (KW)	Distorsión armónica de la corriente (A)
31/01/2019	553	88,62 %	351	4,2 %
19/02/2019	550,33	88,19 %	325	6,7 %

Según la Tabla 13, en el pozo A3, en el transcurso del uso del equipo este no llega a trabajar a un 70 % de su capacidad, el cual es una recomendación para el correcto funcionamiento del mismo, como se observa la relación es inversamente proporcional con respecto a la potencia activa, mientras menos corriente se suministre al VSD mayor será la potencia activa, sin embargo esto me genera una mayor cantidad de distorsión armónica de la señal, a diferencia de que si se aumenta la corriente en el VSD, va a disponer de una menor potencia activa, como consecuencia la distorsión armónica también disminuye.

**Tabla 13:** Respuesta de la corriente del VSD en la potencia activa y distorsión armónica en los equipos de superficie del pozo A3

Fecha	Promedio de corriente del VSD (A)	Porcentaje de trabajo del VSD	Potencia activa (KW)	Distorsión armónica de la corriente (A)
22/01/2019	166,33	26,65 %	94	9,5 %
28/02/2019	177,33	28,41 %	74	8,0 %

### 7.7. Apéndice G - Datos de simulación para equipos de superficie y fondo del pozo de prueba

**Tabla 14:** Datos implementados en el software de diseño de la bomba para el pozo de prueba

Datos físicos del pozo	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro interior del casing	$ID_{casing}$	7	in
Diámetro interior del tubing	$ID_{tub}$	2,992	in
Diámetro exterior del tubing	$OD_{tub}$	3,5	in
Profundidad de asentamiento de la bomba	$H_{pump1}$ $H_{pump2}$ $H_{pump3}$	6 589,85 6 607,37 6 630,9	ft
Datos de comportamiento del pozo			
Presión promedio del reservorio	$P_{res}$	2 753	psi
Presión en cabeza en tubing	THP	320	psi
Temperatura en cabeza en tubing	THT	190	
Corte de agua	WCUT	88,39	%
Razón gas/petróleo de producción	GOR	56	%
Temperatura del reservorio	$T_{res}$	217	
Tasa deseada de líquido	$q_{liq}$	950	BFPD
Presión de burbuja	$P_b$	410	psi
Presión de fondo fluyente	$P_{wf}$	1 635	psi
Índice de productividad	J	0,84	BPD/psi
Propiedades del fluido			
Gravedad específica del petróleo	$SG_{oil}$	13,9	-
Gravedad específica del agua	$SG_{water}$	1,03	-
Gravedad específica del gas	$SG_{gas}$	1,356	-
Datos de suministro eléctrico			
Voltaje en superficie @50 Hz	V	1 970	V

**Tabla 15:** Parámetros operativos de la bomba obtenidos de la simulación del pozo de prueba

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Presión de fondo fluyente	$P_{wf}$	1 635	psia
Presión de entrada de la bomba	PIP	490,8	psia
Presión de descarga de la bomba	PDP	3 013	psia
Caudal del líquido	$q_{liq}$	939,1	STB/day
Caudal de la mezcla en intake	$q_{mixture}$	950,2	bpd
Gas dentro de la bomba	$GIP_{(before,sep)}$	0,21	%
Gas fuera de la bomba	$GIP_{(after,sep)}$	0	%
Cabeza dinámica total	TDH	3 410	ft
Presión de fondo del pozo	BHP	114,7	hp

**Tabla 16:** Características del motor y parámetros operativos de la bomba obtenidos de la simulación del pozo de prueba

Motor			
Serie	450	Longitud (ft)	34.2
Potencia (hp)	216	Frecuencia (Hz)	60
Voltaje (V)	2 344	Shaft (hp)	42
Corriente (Amps)	59	Motor load (%)	80
Peso (lbm)	1 711	Motor RPM	3 492
Temperatura máxima (°F)	250	Motor (Amps)	11,5
Cable			
Caída de voltaje (V)	115,7	Conductor	Cobre
Voltaje operativo (V)	2 460	Aislamiento	Polipropileno
Resistencia activa (ohm)	1,96	Jacket	Nitrilo
Temperatura máxima (°F)	204,8	Armadura	Galvanizada
Cable (Sección de superficie)		Cable (Sección de fondo)	
Longitud (ft)	164	Longitud (ft)	6 681
Tipo	Redondo	Tipo	Redondo
AWG	#1	AWG	#1
Surface Vdrop (V)	0,86	Main Vdrop (V)	114,8
Voltage rating (V)	5 000	Voltage rating (V)	5 000