

BALANCE ENERGÉTICO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE CRUDO BASADO EN ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

**HERMAN DARIO GONZÁLEZ BARBOSA
ANDRÉS REYES QUINTERO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2016**

BALANCE ENERGÉTICO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE CRUDO BASADO EN ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

**HERMAN DARIO GONZALEZ BARBOSA
ANDRES REYES QUINTERO**

Monografía presentada como requisito para optar al título de:
**ESPECIALISTA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA**

Director:
JOHANN FARITH PETIT SUAREZ
Doctor en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2016**

Agradezco a Dios todo poderoso, el creador de la vida, que nos guía y protege en el camino.

A mi madre, Ana Cely Quintero de Reyes, que con sus consejos y amor a guiado mi camino para lograr mis metas.

A mi hermano José de Jesús Reyes que está en el cielo, que a pesar de su ausencia sé que está presente en mi corazón y en cada recuerdo.

A Mi esposa Laudith Cristina Ariza Arias, que con su amor, comprensión, dedicación y apoyo me acompañado en el cumplimiento de esta meta.

Mis Hijos Juan David Reyes Ariza, Andrés Felipe Reyes Ariza y Diego Alejandro Reyes Rojas, que son el motor de mi vida y me impulsan a seguir adelante.

Andrés Reyes Quintero

A Dios Todopoderoso por la vida. Por dejarme sentir su presencia en cada una de las experiencias y oportunidades que me ha regalado.

A mi madre Hilda, a quien amo con todas las fuerzas de mi alma y mi corazón. Gracias por estar ahí siempre, amándome, cuidándome y protegiéndome. Nunca en la vida tendré como pagarle todo lo que ha dado y ha hecho por mí.

A mi padre Argemiro que desde cielo siempre me está guiando en el camino del bien tus enseñanzas no van a ser en vano.

A mi esposa Viviana Fernández, por siempre brindarme la compañía y el amor que espero cuando estoy con ella.

A mis hijos Andrés Felipe y Maria Paula, por dibujarme una sonrisa todos los días con la maravillosa presencia, y por regalarme una historia mágica cada vez que llego a su casa.

A Jhon, Edward mis muy queridos hermanos, por su alegría, cariño y apoyo incondicional.

Herman Darío González Barbosa

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser el ser supremo que nos concede todas las oportunidades.

Al cuerpo docente de la UIS, quienes a través de la experiencia y sabiduría, forjaron un camino de conocimiento para la práctica profesional de todos sus alumnos.

Al personal administrativo de la UIS quienes siempre estuvieron atentos a nuestras necesidades.

Al director de la Monografía, Johann Petit, por su sabiduría y guía en este proceso.

A todos los compañeros de la especialización que con sus aportes, amistad, y motivación, aportaron al crecimiento profesional.

A todos quienes nos acompañaron en esta etapa que culminó en su parte académica pero que inicia profesionalmente para seguir dejando en el alto el nombre de esta aula mater.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. PROBLEMA	17
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2 OBJETIVOS DE LA MONOGRAFIA	17
1.2.1 Objetivo general.	18
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 JUSTIFICACIÓN	18
2. MARCO TEORICO	20
2.1 ANTECEDENTES	20
2.2 PROCESO INDUSTRIAL DEL PETROLEO	21
2.3 COSTOS DE MAL SUMINISTRO ELÉCTRICO.	22
2.3 MÉTODOLOGIA DE TRABAJO	23
3. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOS SISTEMAS A INTERVENIR	24
3.1 SISTEMAS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (ESP)	24
3.1.1 Equipo de fondo.	24
3.1.2 Equipo de superficie.	25
3.2 SISTEMA DE BOMBEO DE CAVIDAD PROGRESIVA (PCP)	26
3.2.1 Funciones principales del sistema PCP.	26
3.2.2 Equipo de fondo.	27
3.2.3 Equipo de superficie.	27
3.3 SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO	28
3.3.1 Equipo de superficie.	29
3.3.2 Equipo de fondo.	29
3.3.3 Ventajas	29
3.3.4 Desventajas	30
3.4 SISTEMA DE BOMBEO HIDRÁULICO	30
3.4.1 Equipo de superficie	30
4. MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA A LOS EQUIPOS DE SUPERFICIE	32
4.1 MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA A UN POZO TIPO SISTEMA ESP	32
4.2 MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA AL POZO CON SISTEMA PCP	34
4.3 MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA AL POZO CON SISTEMA UBM	36
4.4 MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA AL POZO CON SISTEMA VSH2	38
5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN BASE AL CONSUMO DE ENERGÍA	40
5.1 SISTEMA BES	40
5.1.1 CONSUMO Y EFICIENCIA	40
5.1.2 COSTOS- BENEFICIOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE LENTAMIENTO BES	42
5.2 SISTEMA UNIDAD PCP	42
5.2.1 CONSUMO Y EFICIENCIA	42
5.2.2 COSTOS- BENEFICIOS DE OPERACIÓN DEL POZO	43
5.3 SISTEMA UBM	44

5.3.1	CONSUMO Y EFICIENCIA	44
5.3.2	COSTOS- BENEFICIOS DE OPERACIÓN DEL POZO	45
5.4	SISTEMA VSH2	46
5.4.1	CONSUMO Y EFICIENCIA	46
5.4.2	COSTOS- BENEFICIOS DE OPERACIÓN DEL POZO	46
5.5	EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO	47
6.	FORMULAR ESTRATEGÍAS DE MEJORA PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LOS DIFERENTES SISTEMAS	48
6.1	COMPENSACIÓN ENERGÍA REACTIVA	48
6.2	BALANCE DE CONSUMO	49
7.	CONCLUSIONES	51
	BIBLIOGRAFÍA	52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama unifilar del sistema ESP tipo.	25
Figura 2. Caja de control del sistema de superficie de los sistemas ESP de schlumberger.	26
Figura 3. Diagrama unifilar del sistema PCP.	27
Figura 4. Caja de control del sistema PCP de YASKAWA	28
Figura 5. Equipo de superficie de un sistema UBM.	29
Figura 6. Equipo de superficie de un sistema de bombeo hidráulico tipo VSH2.	31
Figura 7. Comportamiento de tensión de alimentación y corriente de entrada al VFD.	33
Figura 8. Contenido de armónicos de la tensión de alimentación y corriente de entrada al VFD.	33
Figura 9. Comportamiento de tensión de alimentación y corriente de entrada al VFD del pozo.	34
Figura 10. Contenido de armónicos de la tensión de alimentación y corriente de entrada al VFD.	35
Figura 11. Comportamiento de tensión de alimentación y corriente de entrada del Equipo UBM.	36
Figura 12. Contenido de armónicos de la tensión de alimentación y corriente de entrada al UBM	37
Figura 13. Comportamiento de tensión de alimentación y corriente de entrada del Equipo.	38
Figura 14. Contenido de armónicos de la tensión de alimentación y corriente de entrada	39
Figura 15. Triangulo de potencia con ángulo de compensación.	49

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características nominales del equipo de superficie.	32
Tabla 2. Características nominales del equipo PCP.	34
Tabla 3. Características nominales del equipo UBM.	36
Tabla 4. Características nominales del equipo VSH".	38
Tabla 5. Valores de tensión y corriente.	40
Tabla 6. Potencias de entrada y salida.	41
Tabla 7. Energía demandada.	41
Tabla 8. Datos de distorsión armónica en voltajes y corrientes.	41
Tabla 9. Frecuencia y factor de potencia.	41
Tabla 10. Costo consumo hora facturado.	42
Tabla 11. Valores de tensión y corriente.	42
Tabla 12. Energía de entrada.	43
Tabla 13. Datos de distorsión armónica en voltajes y corrientes.	43
Tabla 14. Factor de potencia.	43
Tabla 15. Costo consumo hora facturado.	44
Tabla 16. Valores de tensión y corriente.	44
Tabla 17. Energía de entrada.	44
Tabla 18. Datos de distorsión armónica en voltajes y corrientes.	45
Tabla 19. Frecuencia y factor de potencia.	45
Tabla 20. Costo consumo hora facturado.	45
Tabla 21. Valores de tensión y corriente.	46
Tabla 22. Energía de entrada.	46
Tabla 23. Datos de distorsión armónica en voltajes y corrientes.	46
Tabla 24. Frecuencia y factor de potencia.	46
Tabla 25. Costo consumo hora facturado.	47
Tabla 26. Comparaciones entre los sistemas de levantamiento.	47
Tabla 27. Balance costo-beneficio aproximado del plan.	50

RESUMEN

TITULO: Balance Energético De Los Diferentes Sistemas De Extracción De Crudo Basado En Análisis Costo-Beneficio.*

AUTORES: GONZALEZ BARBOSA, Herman Darío
REYES QUINTERO, Andrés**

PALABRAS CLAVE: Eficiencia energética, sistemas de extracción de crudo, consumo de energía, costo de producción, estrategias de mejora, técnicas de balance energético

DESCRIPCION:

El presente trabajo, está centrado en el análisis de eficiencia energética de los sistemas de extracción de crudo UBM (bombeo mecánico), VSH2 (bombeo hidráulico), PCP (motor de cavidad progresiva) y BES (bombeo electro sumergible) para implementar estrategias que reduzcan el consumo de energía y el costo de producción.

Se realiza un estudio de los diferentes sistemas de extracción de crudo relacionados anteriormente con el objetivo de identificar el más eficiente, entre información y mediciones de campo con ayuda de equipo especializado con el que se toma una muestra aproximada donde se analiza la información que nos arroja de las diferentes variables, tensión, corriente, armónicos, factor de potencia, frecuencia, energía activa, reactiva y aparente.

Con los resultados obtenidos se identifican las deficiencias del sistema eléctrico que generen fallas transitorias o permanentes y/o disminución en el rendimiento de los equipos y su vez la contaminación que genera el sistema de control por ejemplo los variadores de velocidad a la red eléctrica. Estableciendo patrones de costo-beneficio relacionados a la base del consumo de energía y eficiencia de los sistemas de extracción, a partir de esto plantear estrategias de mejora para disminuir el consumo de energía buscando el mejor resultado que genere mayor eficiencia y competitividad de la industria optimizando los recursos con la implementación de buenas técnicas de mantenimiento que proporcionen una mayor rentabilidad económica en todos sus procesos.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Especialización en sistemas de distribución de energía eléctrica. Director Johann Farith Petit Suarez.

ABSTRACT

TITLE: ENERGY BALANCE OF DIFFERENT OIL EXTRACTION SYSTEMS BASED COST-BENEFIT ANALYSIS*

AUTHORS: HERMAN GONZALEZ, Hermán Darío
REYES QUINTERO, Andrés**

KEYWORDS: Energy efficiency, oil extraction systems, energy consumption, production costs, improvement strategies, techniques energy balance

DESCRIPTION:

This work is focused on the analysis of energy efficiency of extraction systems oil UBM (mechanical pump), HSV2 (hydraulic pump), PCP (motor progressive cavity) and BES (pumping electro submersible) to implement strategies to reduce energy consumption and production cost.

A study of the different oil extraction systems previously related with the objective of identifying the most efficient, between information and field measurements with the help of specialized equipment with which an approximate sample is taken where the information that is thrown to us is analyzed Of the different variables, voltage, current, harmonics, power factor, frequency, active, reactive and apparent energy.

The results obtained identify the deficiencies of the electrical system that generate transient or permanent faults and / or decrease in the performance of the equipment and turn the pollution that generates to the control system for example the variable speed drives to the electrical network. Establishing cost-benefit patterns related to the energy consumption base and efficiency of the extraction systems, based on this, to propose improvement strategies to reduce energy consumption, seeking the best result that generates greater efficiency and competitiveness of the industry by optimizing the resources with the implementation of good maintenance techniques that provide a greater economic profitability in all its processes.

* Project of grade

** Faculty of Engineering School of Electrical Engineering physicomechanical, Electronics and Telecommunications Systems Specialization Power Distribution. Director Johann Farith Petit Suarez.

INTRODUCCIÓN

El ahorro de energía inevitablemente presupone la aplicación y control de métodos técnicamente fundamentados, que permiten usar la energía con eficiencia y responsabilidad en cualquier industria, comercio y servicio que se aplique, ya que establece un patrón de diseño acorde a la situación económica con que se cuenta [1].

La aplicación de un diagnóstico energético es un análisis que ayuda a encontrar áreas de oportunidad para la optimización de la utilización de la energía, la falta de atención a estas áreas presupone el seguir haciendo un uso ineficiente de la energía eléctrica como insumo de la producción, lo cual mantendrá un alto costo de la misma, y al final se reflejará en la economía de la empresa. En cambio, si se realiza un diagnóstico energético en la empresa, mostrará las áreas críticas en cuanto al consumo, para la aplicación de tecnología más moderna que ayude al ahorro del consumo de la misma.

Se utilizan equipos de medición de energía, como analizador de redes para tomar muestras en todos los sistemas de levantamiento artificial (BES, VSH2, PCP y UBM) y posteriormente analizar el costo- beneficio del consumo de energía, para la formulación de planes proactivos de mejora en consumo energético. Por lo tanto, el desarrollo de la presente monografía se encuentra integrado por los capítulos que se detallan a continuación:

Capítulo 1, se establece el planteamiento del problema, justificación y los objetivos que se desarrollarán en la monografía.

Capítulo 2, se esboza el marco referencial en el que se hace una revisión teórica y conceptual, fundamentada en el proceso industrial del petróleo y los instrumentos de análisis, que permiten determinar la calidad eléctrica presente en los procesos de extracción. Así mismo, se desarrollará el diseño metodológico estableciendo el tipo de estudio y las fases que integrará el desarrollo de la monografía.

Capítulo 3 y 4, se realiza la recolección de la información, identificando los equipos que componen cada proceso de extracción, dando a conocer su funcionamiento y se visualizan algunas mediciones.

En el capítulo 5, se efectúa un análisis de los resultados obtenidos con base en el consumo de energía y eficiencia de los sistemas para determinar los puntos de mayor consumo.

Capítulo 6. Se formulan estrategias para disminuir el consumo de energía en los diferentes sistemas. Se decide formular una estrategia de ahorro energético con el sistema de levantamiento VHS2, comoquiera que presenta la más baja eficiencia y el más alto consumo energético según su producción.

Capítulo 7, se plasman las conclusiones de la monografía.

1. PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La energía se constituye en un insumo básico necesario para el desarrollo económico de cualquier país, así como para el mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes y por lo tanto, debe ser utilizada bajo la perspectiva de autosuficiencia y sostenibilidad. De igual manera, es necesario que todas las esferas de la sociedad contribuyan a disminuir los consumos de energía eléctrica, a través de la implementación de procesos o ajustes en su cadena productiva.

La industria petrolera dentro de sus procesos es consumidora intensiva de energía, debido a los numerosos hornos y calderas que la integran, así como el accionamiento de motores y el alumbrado de las plantas. Este accionar de las empresas del crudo genera altos costos, los cuales debe asumir generando repercusiones económicas [1].

Los objetivos de conservación de los recursos en la optimización del uso de energía y la reducción de costos de producción de crudo, debe ir encaminado al aprovechamiento de tecnologías eficientes, reposición de equipos con el fin de reacondicionar su confiabilidad e incrementar la productividad, analizar la probabilidad de falla, capacidad de sistemas y equipos, mantenibilidad, disponibilidad, seguridad, nivel de calidad y balance energético, convirtiéndose en un factor estratégico de oportunidad necesario para lograr los objetivos corporativos en las unidades de negocio en un mundo globalizado y competitivo [2].

Por otra parte, sumado a las razones económicas, para mejorar la eficiencia energética, se han sumado las consideraciones medioambientales que hoy día juegan una gran importancia, pues al reducir los consumos de energía, disminuye la emisión de contaminantes formados durante la combustión, SO₂ y NO_x, responsables de la “lluvia ácida”, junto a la reducción del CO₂ emitido, principal acusado de provocar el cambio climático en el planeta a través del “efecto invernadero” [1].

1.2 OBJETIVOS DE LA MONOGRAFIA

A continuación se presenta el objetivo general y los objetivos específicos de la monografía:

1.2.1 Objetivo general.

Analizar la eficiencia energética de los sistemas de extracción de crudo UBM (Bombeo Mecánico), VSH2 (Bombeo Hidráulico), PCP (Motor de Cavidad Progresiva) y BES (Bombeo Electro Sumergible), para implementar estrategias que reduzcan el consumo de energía y el costo de producción.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Identificar las tecnologías que existen en los sistemas ESP, PCP, UBM y VSH2, para obtener la descripción de elementos que conforman cada sistema y la función que realizan.
- Realizar la medición y seguimiento de calidad de energía a los equipos de superficie ESP, PCP, UBM y VSH2.
- Analizar resultados obtenidos en base al consumo de energía y eficiencia de los sistemas para establecer patrones de costo – beneficio.
- Formular estrategias de mejoramiento para disminuir el consumo de energía en los diferentes sistemas de extracción de crudo.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En un mundo cada vez más globalizado, incierto, competitivo y dinámico, es necesario revisar periódicamente el entorno, interpretar el contexto y reformular las estrategias a seguir en el desarrollo de una política de eficiencia y sostenibilidad que conlleve a generar beneficios organizacionales.

Esas estrategias en la actualidad deben encaminar a las empresas y en este caso a las empresas explotadoras de crudo, a la reducción del consumo de energía, en los procesos de extracción, el cual es un tema preocupante no solo por los costos-beneficios, sino también desde el punto de vista ambiental.

Por lo tanto, las empresas petrolíferas deben realizar un diagnóstico energético, a través de un análisis que permita encontrar áreas de oportunidad para la optimización de la energía; estas áreas de oportunidad identificarán las zonas críticas para la aplicación de técnicas que ayude a minorar el consumo de la misma [3] y así alcanzar la máxima eficacia en el logro de ahorro de energía.

La identificación de los puntos críticos, debe generar la aplicación y control de métodos técnicamente fundamentados, que permiten usar la energía con eficiencia y responsabilidad estableciendo un patrón de diseño. Para ello, el proyecto

pretende aplicar las diferentes técnicas de confiabilidad utilizando equipos de medición de energía como analizador de redes y cámara termográfica para tomar muestras en todos los sistemas de levantamiento artificial (BES, VSH2, PCP y UBM), y posteriormente analizar el costo- beneficio del consumo de energía para la formulación de planes proactivos de mejora en consumo eléctrico.

La implementación de técnicas de balance energético, se efectuará para analizar la eficiencia en el consumo de energía, eficiencias totales por fuente y uso. Estas eficiencias se refieren a la conversión final de la energía en los equipos y artefactos de utilización y sus valores, los cuales brindan información importante a tener en cuenta en el análisis de planes de sustitución y mejora.

Es importante mencionar que los beneficios económicos que se aseguran al identificar, analizar y eliminar malos actores en sistemas de extracción de crudo se comprueban al medir costo- beneficio de cada proceso de producción. Con equipos funcionales y disponibles se evitan gastos energéticos, que en resumen representa aumento de ganancias para todas las partes involucradas.

El desarrollo del proyecto mejorará el ciclo de vida útil de cada equipo que se intervenga y se analice obteniendo beneficios empresariales, manteniendo la infraestructura vinculada al cuidado del medio ambiente, aumentando ganancias a las empresas que desarrollen este tipo de actividades.

De cara a las anteriores consideraciones, el desarrollo de la presente propuesta se justifica, pues la aplicación y control de métodos permitirán usar la energía con eficiencia y responsabilidad, mejorará el ciclo de vida útil de cada equipo que se intervenga y redundará en beneficios empresariales, manteniendo la infraestructura vinculada al cuidado del medio ambiente, disminuyen costos y aumentando los beneficios económicos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

En la búsqueda de soportes para sustentar la presente monografía se encontraron los siguientes documentos.

En [1] determina que para efectuar la máxima eficacia en el logro de ahorros de energía es conveniente el establecimiento y desarrollo de un programa que contemple, además de la mentalización de ahorro en todo el personal de algún modo implicado en la operación de mantenimiento de las plantas, un control constantes de las variables más importantes que intervienen en las transformaciones energéticas, con introducción de cambios operacionales y modificaciones en el diseño de unidades ya existentes como Cogeneración de vapor – energía eléctrica, aprovechamiento de purgas, mejoras en los equipos de combustión, pérdidas por las paredes, perdidas por los humos, exceso de aire; así como el establecimiento de nuevos criterios de diseño para futuras unidades.

En [2] se realizó un diagnostico energético en la empresa del sur de sonora dedicada a la distribución y venta de autos nuevos y usados, además de ofrecer servicios de taller mecánico, llevado a cabo a través de la empresa CFE efectiva empresarial el cual da atención a empresas que soliciten diagnostico energético. Con el mismo se consiguió reducir el consumo de energía al detectar áreas de oportunidad para implementar planes de mejora.

En [4] se brindaron herramientas para la evaluación del impacto que tiene el uso adecuado de la energía en los sistemas de levantamiento artificial, permitiendo de esta manera interpretar el conocimiento del personal involucrado en la operación de estos sistemas en esta industria y así enfocar el estudio a los departamentos en los que se tiene mayor impacto, sin duda alguna esta investigación generara una aproximación a lo que los usuarios actualmente tienen y a lo que podrían llegar a tener, teniendo en cuenta los avances tecnológicos en soluciones que permitan incrementar la producción o por lo menos obtener la misma producción pero haciendo uso eficiente de la capacidad instalada, es importante contemplar que este panorama le permitirá a los interesados poder contar con herramientas clave para la correcta toma de decisiones y por consiguiente generar un aporte significativo en sus compañías.

En [5] se presenta una correcta transferencia de tecnología es primordial diseñar y gestionar un efectivo programa de difusión, de esta manera en el programa de transferencia de tecnología, es necesario utilizar herramientas especializadas de difusión como documentos, charlas, talleres y capacitaciones, e incluso difusiones virtuales, a las entidades que necesitan la información generada en todas las fases

del desarrollo del estudio. Este programa de difusión permitió garantizar la continuidad de los logros a largo plazo y en especial la aplicación de las metodologías diseñadas, la evaluación y análisis técnico científico; para esto se considera la publicación de artículos entre la comunidad científica internacional.

2.2 PROCESO INDUSTRIAL DEL PETRÓLEO.

Las empresas petroleras están clasificadas entre las más importantes para la economía y desarrollo global. En cada país del mundo se desarrollan funciones de producción de petróleo y gas natural. Su mayor preocupación es poder producir energía para satisfacer la demanda impuesta por la globalización y acelerado consumo. Para cumplir con sus objetivos se encuentran varios procesos secuenciales:

- Exploración. La tarea de exploración comprende todas las actividades de búsqueda de hidrocarburos. Fundamentalmente se desarrolla mediante la aplicación de métodos de prospección geofísica y la elaboración de mapas de superficie y subsuelo por parte de los geólogos, con la finalidad de inferir sobre la configuración de los estratos del subsuelo y su composición, lo que puede proporcionar claves sobre la existencia de ambientes propicios para la acumulación de petróleo o gas natural [6].
- Perforación de zonas productoras. Diseñar la perforación de pozos, elaborando los programas o diseños particulares de: barrenas; sartas de perforación; tuberías de revestimiento; fluidos de control; registros geofísicos; pruebas de producción (en su caso); cementaciones; desviaciones (en su caso); registro continuo de hidrocarburos (en su caso); obtención de núcleos (en su caso); pescas (en los casos de accidentes mecánicos); programas de control del pozo (en casos de descontrol); terminación de pozos y herramientas a utilizar, tanto en pozos exploratorios como de desarrollo [6] [7].
- Producción de petróleo y gas. La ingeniería de producción se encarga de la aplicación de conocimientos técnicos y científicos hacia el transporte de los recursos desde el yacimiento hasta los puertos o refinerías. Determinan qué método de producción debe ser usado; optimizan las instalaciones de superficie para el tratamiento primario como separadores de fases, tanques de almacenamiento, sistemas de purificación, líneas de flujo y sistemas de bombeo y compresión del petróleo o el gas natural, con el objetivo de llevar el crudo o gas a condiciones específicas a las cuales se puede comercializar o distribuir [6] [7].

- Para la extracción de crudo y gas se utilizan entre otros los siguientes sistemas: Levantamiento con unidad mecánica (UBM), levantamiento con motor de velocidad progresiva (PCP), levantamiento con bomba electro sumergible (BES) y levantamiento con sistema hidráulico (VSH2) [6] [7].

2.3 COSTOS DE MAL SUMINISTRO ELÉCTRICO.

Para poder realizar un análisis confiable de balance energético es necesario contar con el apoyo de instrumentos de medición eléctrica y analizador de redes. La Calidad Eléctrica es un indicador del nivel de adecuación de la instalación para soportar y garantizar un funcionamiento fiable de sus cargas. Una perturbación eléctrica o evento puede afectar la tensión, la corriente o la frecuencia.

Las perturbaciones eléctricas pueden originarse en las instalaciones del usuario, las cargas del usuario o por la compañía eléctrica. Las perturbaciones eléctricas se definen en términos de magnitud y duración. Las perturbaciones varían desde transitorios (Sag – Swell), que duran microsegundos, a cortes de servicio que se prolongan durante horas. Cuando se produce una perturbación eléctrica que hace que el suministro supere los límites de operación, los equipos instalados pueden funcionar de forma incorrecta o incluso pueden dañarse. Todo esto representado en: [8]

- Pérdidas de producción: Cada vez que se interrumpe la producción, su empresa pierde dinero debido a los productos que no se fabrican ni se venden.
- Equipos dañados: Las interrupciones pueden dañar los productos en proceso de fabricación, haciendo que tengan que ser reprocesados o rechazados.
- Costo energético: Las compañías eléctricas pueden aplicar penalizaciones por factores de potencia bajos o por picos elevados de consumo.

La técnica de Análisis de Costo/Beneficio tiene como objetivo fundamental proporcionar una medida de la rentabilidad de un proyecto, mediante la comparación de los costos previstos con los beneficios esperados en la realización del mismo [10].

Esta técnica se debe utilizar al comparar proyectos para la toma de decisiones. Lo cual permitirá definir la factibilidad de las alternativas planteadas o de un proyecto a ser desarrollado [10].

2.4 METODOLOGIA DE TRABAJO

El presente trabajo, se construyó con base en la identificación de factores que permitieron analizar el uso eficiente de la energía eléctrica, en sistemas de extracción de crudo; además, se caracterizó por una serie de componentes con un diseño de investigación flexible, que permitió descubrir factores que no se habían previsto inicialmente. Sin embargo, ayudaron a interpretar el tema central a partir del análisis de resultados.

Para el proceso de recolección y análisis de la información se realizaron las siguientes etapas:

Etapa 1. Recopilación de la información.

- Identificación de equipos que componen el sistema de extracción.
- Descripción de los elementos que conforman cada sistema y sus funciones.

Etapa 2. Medición y seguimiento de calidad de energía a los equipos de superficie de extracción de crudo.

Etapa 3. Análisis de los resultados de medición del consumo de energía y eficiencia de los sistemas para establecer patrones de costo – beneficio.

Etapa 4. Formulación de estrategias en los diferentes equipos de extracción de crudo.

3. RECOPIACION DE LA INFORMACIÓN DE LOS SISTEMAS A INTERVENIR

Al identificar las tecnologías que existen en los sistemas ESP, PCP, UBM y VHS2, se logró obtener la descripción de elementos que conforman cada sistema y la función que realizan.

3.1 SISTEMAS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (ESP)

El sistema ESP consiste en el funcionamiento de una bomba centrífuga, que imprime al fluido la energía necesaria para llegar a la superficie. En ocasiones, es preciso trabajar durante un tiempo en condiciones de carga inferiores a la nominal. El variador de frecuencia se hace necesario para el arranque y parada suave del equipo ESP, generando incremento del fluido producido y ajuste de la altura de elevación. Por otra parte, el sistema ESP trabaja en distintos modos de operación, en presencia de altas frecuencias, variando automáticamente las protecciones con la frecuencia de operación. Así mismo, mejora el FP y la rampa de arranque según la necesidad de operación, para mejorar el consumo de energía [11].

Las ventajas del sistema ESP, se enuncian a continuación:

- Permite el levantamiento de volúmenes extremadamente altos sin dificultad, y a bajo costo.
- Elevado aporte de energía al fluido
- Presenta una alta eficiencia (70%)
- Factible de controlar debido al fácil reajuste según su necesidad
- No ocupa grandes espacios en superficie.
- Igualmente es aplicable a plataformas costa afuera [1].

3.2 Equipo de fondo. Los componentes básicos de fondo de un sistema de Bombeo Electro Sumergible son: motor, protector, sección de entrada a la bomba, bomba, cable de conexión del motor (cable de extensión) y cable de potencia. Entre los elementos complementarios del sistema están el separador de gas, manejador avanzado de gas AGH y la unidad que registra la presión y temperatura, además el motor sumergible trifásico del tipo de inducción de barras que se encuentra lleno de aceite para enfriamiento y lubricación.

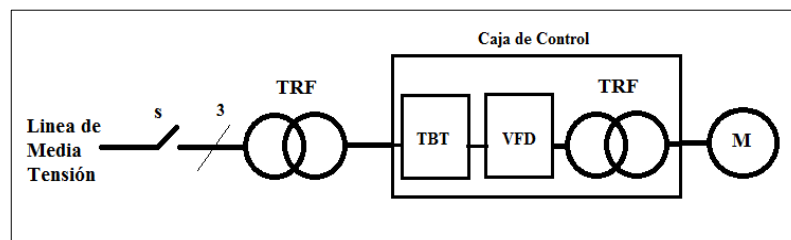
Los principales componentes del motor son: Rotores, estator, cojinete, eje, zapata, bujes, carcaza, aceite dieléctrico, bloque aislante, accesorios entre otros.

Así mismo, el sensor utilizado permite monitorear 3 variables: Presión de succión, Temperatura de Motor y Temperatura de Pozo. Las variables usadas son las mínimas requeridas para realizar un sensor económicamente viable.

Los cables de potencia en campo están cubiertos por un blindaje de acero galvanizado resistente a la penetración del agua y gases, aislante de polipropileno, chaqueta de nitrilo Oil-resistente, cinta y trenza, armadura de acero galvanizado, rango de 4000 voltios y de forma plana.

3.2.1 Equipo de superficie. El equipo de superficie está formado por un cabezal de producción, un transformador reductor de media tensión, una caja de control que incluye un transformador elevador de baja tensión y un tablero de baja tensión, una caja de venteo y un conjunto cable de potencia/conector superficial. El diagrama unifilar (Ver Figura 1) muestra a simple vista las partes más importantes del equipo de superficie del sistema.

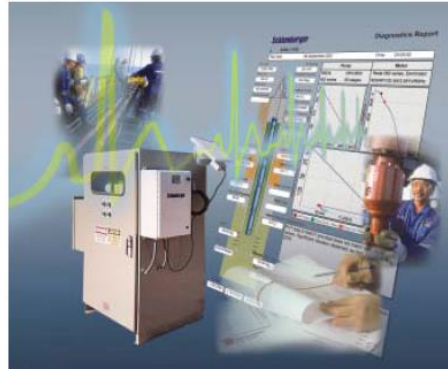
Figura 1. Diagrama unifilar de un sistema ESP tipo.



Fuente: Oliveira, [14]

Este diagrama unifilar es representado en la Figura 2, donde se puede ver las instalaciones normales de un sistema ESP; la red de media tensión que desemboca en un TRF reductor, un tablero de baja tensión, un VFD y un TRF elevador que suministra el voltaje al motor (2160 VAC).

Figura 2. Caja de control del sistema de superficie de los sistemas ESP de Schlumberger



Fuente: Schlumberger [12].

3.3 SISTEMA DE BOMBEO DE CAVIDAD PROGRESIVA (PCP)

El sistema PCP es una bomba de desplazamiento positivo y está basada en la invención de Rene Moineau “Bomba de tornillo helicoidal”. Este invento se aplica desde 1950 en motores de perforación o taladros. Y se inicia su aplicación en la producción de petróleo como un método de levantamiento artificial se da a inicios de la década de los 80 [13].

3.3.1 Funciones principales del sistema PCP.

Entre las funciones se detallan las siguientes:

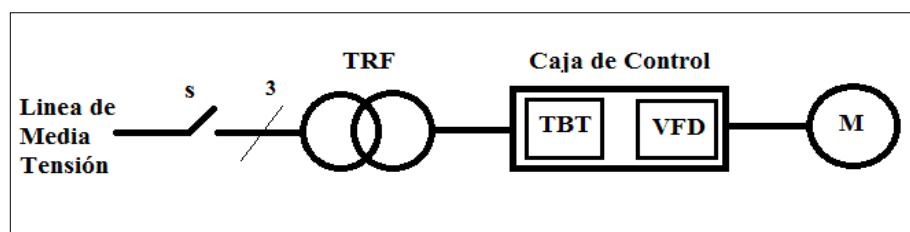
- Red de suministro de alimentación: Potencia del variador.
- Señales de salida: tensión e intensidad adecuada al motor.
- Frecuencias de salida mínima y máxima.
- Tiempo de aceleración y de parada.
- Control del par inicial.
- Protección térmica. Intensidad nominal, sobrecarga y rearme.
- Visualización: indicaciones de la pantalla (frecuencia, intensidad, etc.)
- Señales de alarma y monitorización.
- Entradas/Salidas de control (todo o nada y analógicas)
- Elementos de control (pulsadores, terminales, potenciómetro, contactores, etc.)
- Ajuste de características del motor
- Borrado y reinicio de funciones y parámetros
- Comunicaciones
- Control mediante bucle PI, PID.

3.3.2 Equipo de fondo. La bomba en fondo consiste en dos hélices: el rotor que es una hélice externa sencilla con sección transversal redonda que cuelga y a la vez es accionada por la sarta de varillas. El equipo de superficie consiste en el sistema de rotación, del acople, la cabeza de rotación y la caja de control del sistema [13].

3.3.3 Equipo de superficie. Las cajas de control de los sistemas PCP. Estas presentan una serie de dispositivos que forman un conjunto para el control y buen funcionamiento de la carga, el controlador cerebro del sistema se denomina variador de frecuencia (VFD) y es el encargado de modificar la velocidad del motor o carga según lo requiera las condiciones de subsuelo. Los VFD más usados en los sistemas PCP, son de la marca YASKAWA Y DANFOSS, pues cuentan con la tecnología PWM 6 pulsos, que trabajan con dos controladores proporcionales-*Integradores-Derivativos*- integrados, uno para regular la velocidad y otro para regular los procesos de extracción de crudo. Estos últimos, requieren una velocidad de realimentación, para que vuelva la entrada [13].

- **Regulación de velocidad:** Esta regulación de PID esta optimizada para utilizarla en aplicaciones en que es necesario mantener una determinada velocidad del motor [14].
- **Regulación de Proceso:** El controlador PID mantiene un modo de proceso constante (presión, temperatura, flujo, etc.) y ajusta la velocidad del motor a partir de la referencia/valor de referencia y la señal de realimentación. Un transmisor proporciona al PID una señal de realimentación como expresión del modo real del proceso [14].

Figura 3. Diagrama unifilar del sistema PCP.



Fuente: Oliveira [14].

La red de media tensión varía desde los 13,2 KV hasta los 34,5 KV; de allí se reduce con la ayuda de un transformador de potencia, a una tensión que oscila entre 480 VAC. Con la tensión establecida se llega al variador de frecuencia VFD, donde empieza la acción de control de velocidad. El diagrama unifilar (Ver Figura 3) describe la alimentación desde la red de distribución hasta la bomba PCP [14].

Figura 4. Caja de control del sistema PCP de YASKAWA.



Fuente: Yaskawa [15].

3.4 SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

Es un sistema de levantamiento artificial en el que la unidad de superficie imparte el movimiento de sube y baja a la sarta de varillas de succión, que mueve el pistón de la bomba, colocada en la sarta de producción, a cierta profundidad del fondo del pozo. Este método, consiste fundamentalmente en una bomba de subsuelo de acción recíproca, abastecida con energía suministrada a través de una sarta de varillas. La energía mecánica proviene de un motor eléctrico, la cual moviliza una unidad de superficie mediante un sistema de engranajes y correas, en nuevas tecnologías se pueden encontrar sistemas hidráulicos.

La Unidad de Bombeo Convencional Balanceada en la Manivela, ampliamente conocida y aceptada, es el viejo y confiable “*Caballo de Trabajo*” de los campos petroleros. Estas unidades son de fácil operación y mínimo mantenimiento. El método de mantenimiento de los pozos de petróleo a través del bombeo se aplica a gran escala, debido a la gran ventaja de tener una construcción simple y la facilidad de controlar las unidades. Sin embargo, su principal ventaja consiste en su bajo costo específico por tonelada de petróleo.

Figura 5. Equipo de superficie de un sistema UBM.



Fuente: Koltentb [16].

3.4.1 Equipo de superficie. El equipo de superficie de un sistema de bombeo mecánico (Figura 5) contiene las siguientes partes: [17]

- Unidad de bombeo (Balancín)
- Motor de la unidad
- Cabezal del pozo
- Barra pulida

3.4.2 Equipo de fondo. El equipo de superficie de un sistema de bombeo mecánico contiene las siguientes partes: [18]

- Tubería de producción
- Sarta de varillas
- Bomba de subsuelo
- Ancla de gas
- Ancla de tubería

3.4.3 Ventajas

Se describen a continuación

- Alta eficiencia del sistema
- Controles de optimización disponibles
- Económico para reparar
- Desplazamiento positivo/Fuerte drawdown (caída de presión)

- Materiales mejorados reducen los problemas de corrosión
- Flexibilidad. Ajuste de la producción mediante la longitud de carrera y la velocidad.
- Alto valor de rescate para el equipo de superficie y de subsuelo

3.4.4 Desventajas

Se describen a continuación

- Potencial para el desgaste de tubos y varillas
- Relaciones Gas-Petróleo
- La mayoría de sistemas limitado a la capacidad de manejar las cargas de varillas.
- El volumen decrece con el incremento de profundidad.
- Problemas estéticos

3.5 SISTEMA DE BOMBEO HIDRÁULICO

Este sistema nace como una evolución de los sistemas mecánicos de engranajes y poleas a sistemas hidráulicos con bombas de pistones y ajustes de velocidad variable, fáciles para realizar cambios o setting de recorrido, incluyendo un sistema de electrónica avanzada, que opera la versatilidad del sistema [19].

Este equipo puede manejar hasta 40.000 lbs, profundidades de bomba de 10.000ft @ 7.5 SPM y cambiar la velocidad de funcionamiento con el simple accionamiento de un dial en cualquier dirección.

3.5.1 Equipo de superficie. El equipo de superficie (Figura 5) se clasifica como unidad de bombeo mecánico, con ajuste variables y balanceo hidráulico. Las características más importantes son:

- Unidad de bombeo reciprocante.
- Realiza el movimiento de las varillas de bombeo para transmitir el movimiento desde superficie hasta la bomba en fondo.
- Usa tecnología de nitrógeno sobre hidráulico.
- Usa un montaje directo motor-bomba hidráulica, eliminando la transmisión por correas.
- Funciona con motores eléctricos o a gas.
- Mínimo ajuste inicial y mantenimiento.
- Mayores cargas de varilla con menos requerimiento de potencia.
- La unidad solo tiene 3 partes móviles.
- Cambio de SPM rápido
- La longitud del recorrido puede ser cambiada desde el suelo.

- Gran variedad de aplicaciones.
- Apagados de seguridad – separación de plato, bajo nivel de aceite, temperatura de aceite. Apagados de motor a gas.
- Alta presión de aceite apaga el motor
- Bomba hidráulica de velocidad variable
- Acumulador tipo pistón de nitrógeno sobre hidráulico
- Cilindro de doble efecto de dos etapas.

Figura 6. Equipo de superficie de un sistema de bombeo hidráulico- Tipo VSH2.



Fuente: Networkintl International [20].

4. MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA A LOS EQUIPOS DE SUPERFICIE

La medición de parámetros para el seguimiento de sistemas ESP, PCP, UBM y VHS2, se llevó a cabo con el equipo analizador de redes Fluke 435.

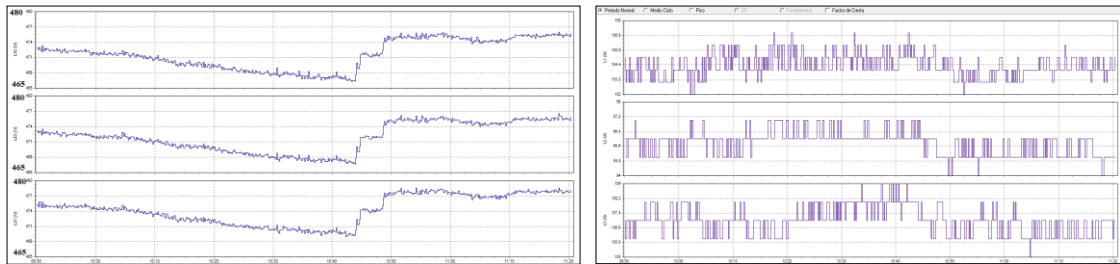
4.1 MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA A UN POZO TIPO SISTEMA ESP

Tabla 1. Características nominales del equipo de superficie.

DATOS ELECTRICOS/EQUIPO SUPERFICIE SISTEMA ESP SCHULUMBERGER		Motor 214 HP
PARTES		VAL. NOM.
TRANSFORMADOR REDUCTOR (TRF) D/Y		
	Capacidad de Potencia	225 kVA
	Tensión Entrada	34,5 kV
	Tensión Salida	460-480 V
TABLERO DE BAJA TENSION (TBT)		
	Tensión Entrada	460-480 V
	Tensión Salida	460-480 V
VARIADOR DE FRECUENCIA (VFD)		
	Tensión Entrada	460 / 217 V
	Tensión Salida	0-460V
	Frecuencia Salida	0.1-80 HZ
TRANSFORMADOR DE FRECUENCIA VARIABLE (TRF) Δ/Y		
	Potencia	200kVA
	Tensión Entrada	480 V
	Tensión Salida	1100-3800 V
	Frecuencia Salida	10-90 Hz

Fuente: [12].

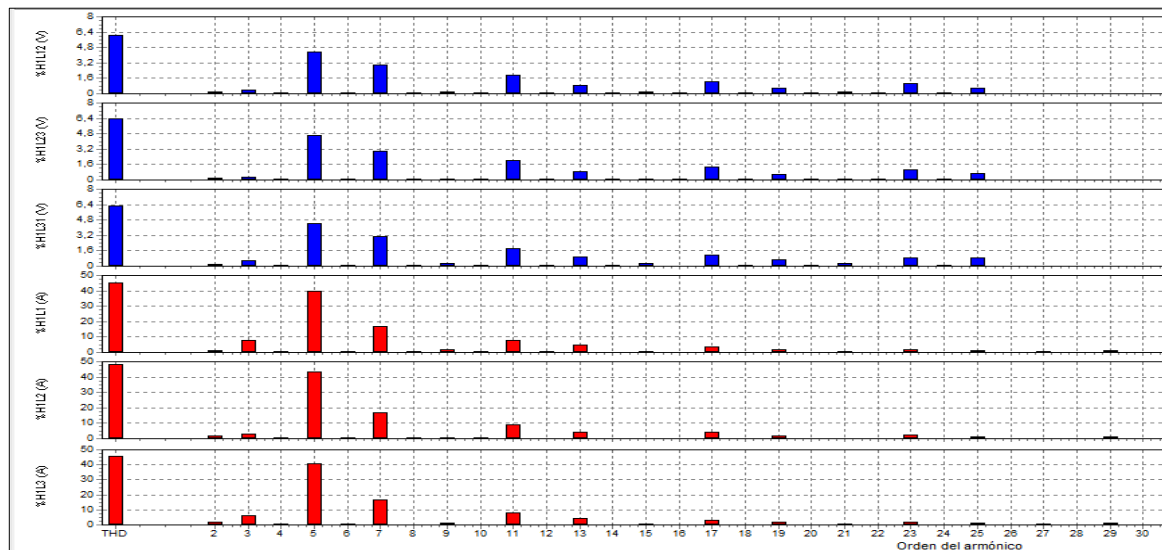
Figura 7. Comportamiento de tensión de alimentación y corriente de entrada al VFD.



Fuente: Software Power Long Fluke 435

En la Figura 7 se puede apreciar que para el caso de estudio la tensión varía en su valor eficaz en un rango de 10 volt para las tres fases y la corriente tiene variaciones en su valor eficaz de 1 A.

Figura 8. Contenido armónico de la tensión de alimentación y la corriente de entrada al VFD.



Fuente: Software Power Long, Fluke 435.

En la figura 8 se observa el contenido armónico de la tensión de alimentación y la corriente de entrada al VFD. Se midieron los primeros 30 armónicos, resultando ser el 5°, el 7°, 11° los mas significativos. El caso de la corriente la distorsión armónica total (THD) fue >40%.

En cuanto al consumo de energía media del sistema, se tiene:

- Energía Activa: 75 kWh
- Energía Reactiva: 15,5 kVARh
- Energía Aparente: 76,5 kVAh
- FP: 0.89

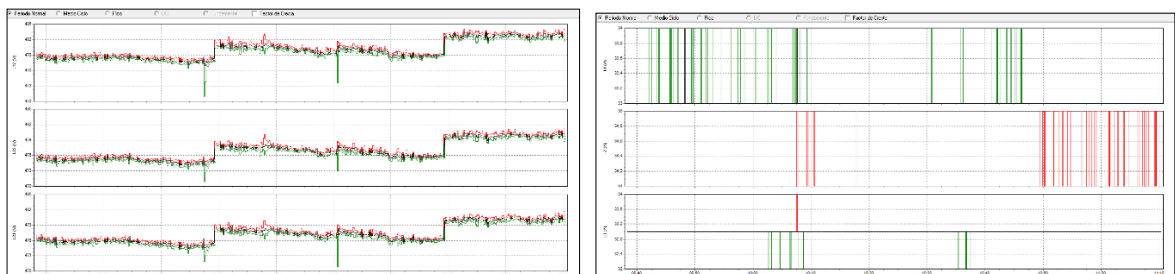
4.2 MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA AL POZO CON SISTEMA PCP

Tabla 2. Características nominales de un equipo PCP.

DATOS ELECTRICOS/ EQUIPO SUPERFICIE SISTEMA PCP		VALORES NOM.
TRANSFORMADOR REDUCTOR (TRF) D/Y		
	Capacidad de potencia	300 kVA
	Tensión entrada	34,5 kV
	Tensión salida	480 V
TABLERO DE BAJA TENSION (TBT)		
	Tensión entrada	480 V
	Tensión de salida	480 V
VARIADOR DE FRECUENCIA YASKAWA (VFD)		
	Potencia motor	75 HP
	Tensión de entrada	480 / 217 V
	Tensión de salida	0-480V
	Frecuencia salida	10-90 HZ

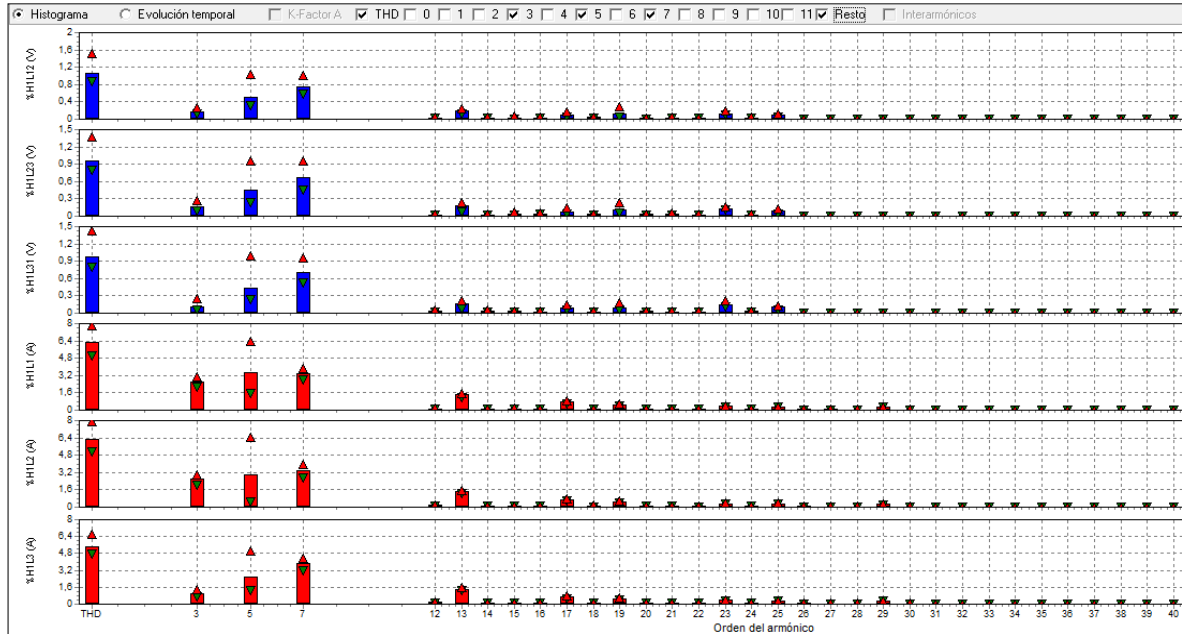
Fuente: [14]

Figura 9. Comportamiento de tensión de alimentación y corriente de entrada al VFD del pozo.



Fuente: Software Power Log, Fluke 435.

Figura 10. Contenido armónico de la tensión de alimentación y la corriente de entrada al VFD.



Fuente: Software Power Long, Fluke 435

En la figura 10 se observa el contenido armónico de la tensión de alimentación y la corriente de entrada al VFD. Se midieron los primeros 40 armónicos, resultando ser el 3°, el 5°, 7° los más significativos. El caso de la corriente la distorsión armónica total (THD) fue >4,8%.

En cuanto al consumo de energía media del sistema, se tiene:

- Energía Activa: 12,07 kWh
- Energía Reactiva: 24,46 kVARh
- Energía Aparente: 27,72 kVAh

4.3 MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA AL POZO CON SISTEMA UBM

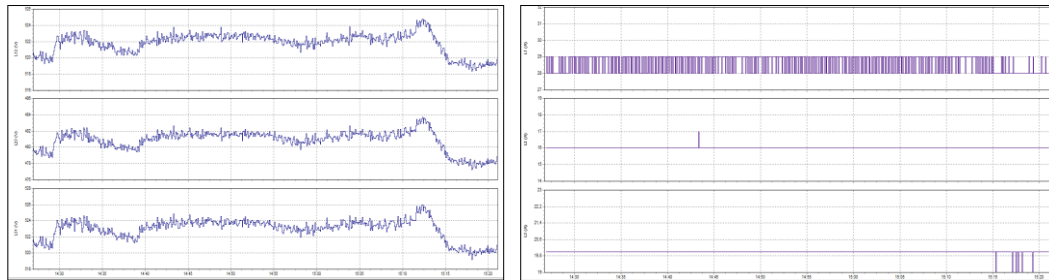
Tabla 3. Características nominales del equipo UBM.

DATOS ELÉCTRICOS / EQUIPO SUPERFICIE SISTEMA UBM	VALORES NOM.
TRANSFORMADOR REDUCTOR (TRF) D/Y	

	Capacidad de potencia	112,5 kVA
	Tensión entrada	13,2 kV
	Tensión salida	480 V
TABLERO DE BAJA TENSION (TBT)		
	Tensión entrada	480 V
	Tensión de salida	480 V
MOTOR		
	Potencia motor	45 HP
	Corriente nominal	50 A.
	Tensión nominal	480 / 217 V
	Frecuencia entrada	60 Hz

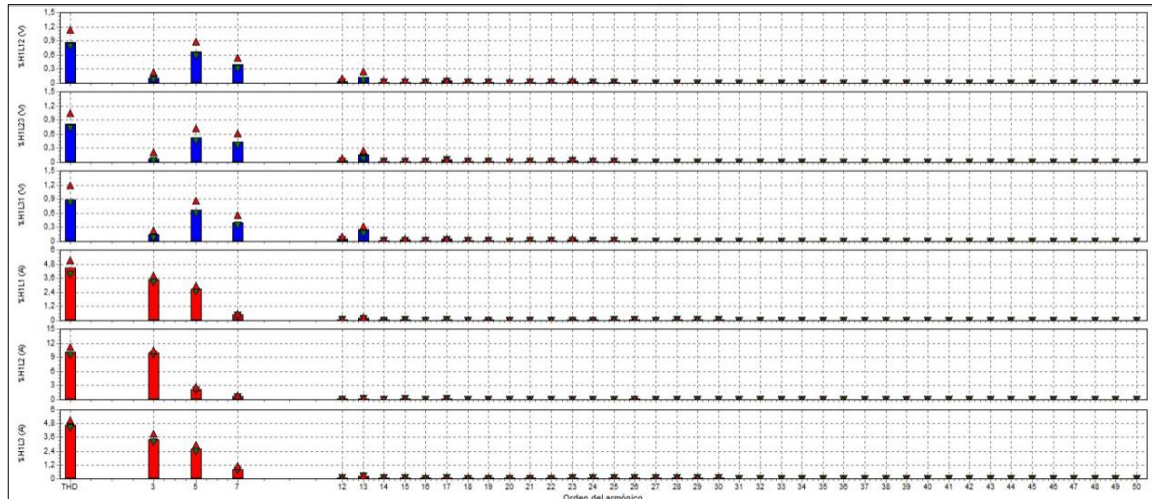
Fuente: [21]

Figura 11. Comportamiento de tensión de alimentación y corriente de entrada del equipo UBM.



Fuente: Software Power Long, Fluke 435

Figura 12. Contenido armónico de la tensión de alimentación y la corriente de entrada al UBM.



Fuente: Software Power Long, Fluke 435

En la figura 12 se observa el contenido armónico de la tensión de alimentación y la corriente de entrada al UBM. Se midieron los primeros 40 armónicos, resultando ser el 3°, el 5°, 7° los mas significativos. El caso de la corriente la distorsión armónica total (THD) fue >4,8%.

En cuanto al consumo de energía media del sistema, se tiene:

- Energía Activa: 4,4 kWh
- Energía Reactiva: 16,9 kVARh
- Energía Aparente: 19,1 kVAh

4.4 MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA AL POZO CON SISTEMA VSH2

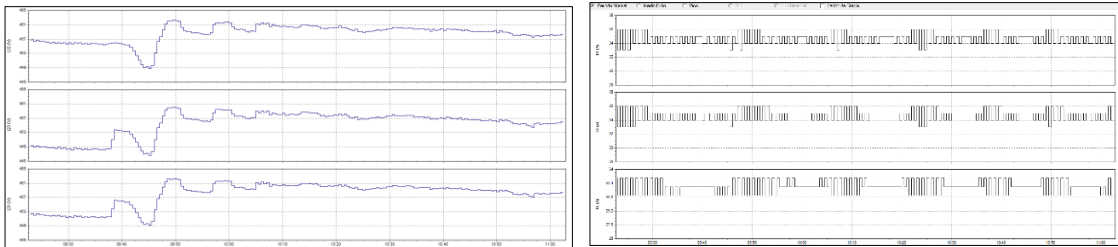
Tabla 4. Características nominales del equipo VSH2.

DATOS ELECTRICOS/ EQUIPO SUPERFICIE SISTEMA VSH2		VALORES NOM.
TRANSFORMADOR REDUCTOR (TRF) D/Y		
	Capacidad de potencia	112,5 kVA
	Tensión entrada	13,2 kV
	Tensión salida	480 V

TABLERO DE BAJA TENSION (TBT)		
	Tensión entrada	480 V
	Tensión de salida	480 V
MOTOR		
	Potencia motor	75 Hp
	Tensión nominal	480 / 217 V
	Velocidad	1800 -3700 rpm

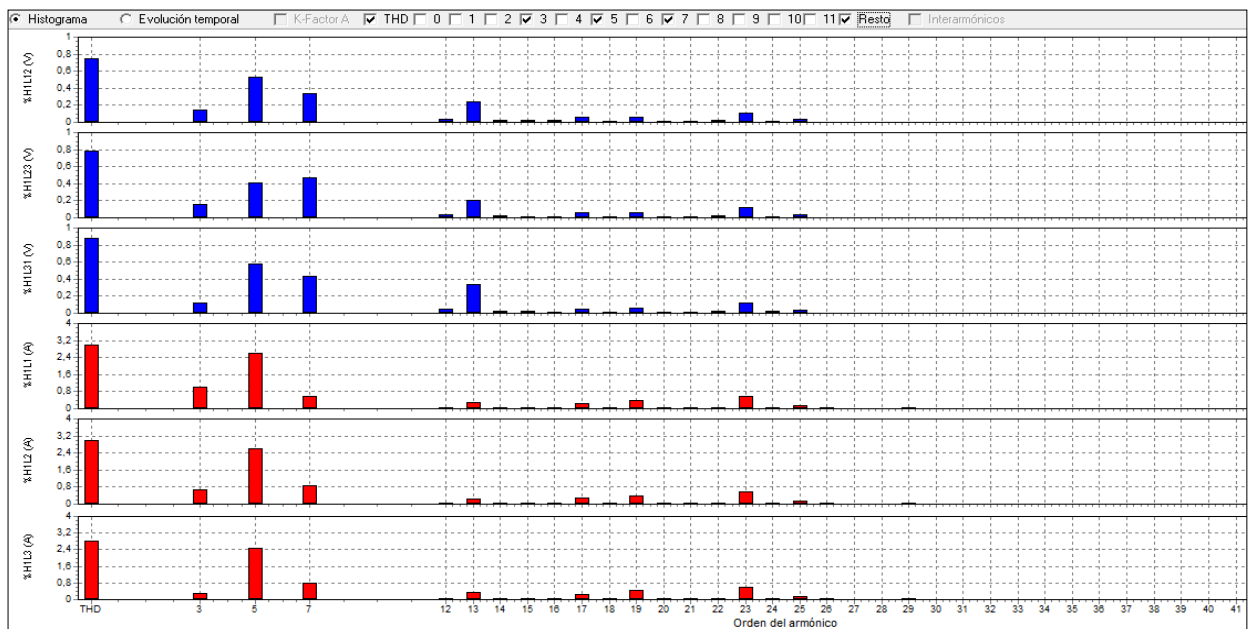
Fuente: [22]

Figura 13. Comportamiento de tensión de alimentación y corriente de entrada del equipo.



Fuente: Software Power Long

Figura 14. Contenido armónico de la tensión de alimentación y la corriente de entrada.



Fuente: Software Power Long, Fluke 435

En la figura 14 se observa el contenido armónico de la tensión de alimentación y la corriente de entrada al UBM. Se midieron los primeros 41 armónicos, resultando ser el 3°, el 5°, 7° los más significativos. El caso de la corriente la distorsión armónica total (THD) fue >2,4%.

En cuanto al consumo de energía media del sistema, se tiene:

- Energía Activa: 19,12 kWh
- Energía Reactiva: 24,46 kVARh
- Energía Aparente: 31,79 kVAh

Como se puede apreciar en los sistemas UBM y la VSH2 la distorsión armónica es menor con relación a los otros sistemas analizados PCP y BES, esto se debe al sistema de control, constituye de un arranque directo hace que se disminuya la generación de armónicos y también se evitan sobrecalentamientos de conductores, afectación al motor y contaminación al sistema eléctrico como resultado el aumento en la eficiencia de los equipos.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN BASE AL CONSUMO DE ENERGÍA Y EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS

Se parte del hecho que la empresa que suministra el servicio de electricidad, presenta una tarifa de \$ 390 pesos moneda colombiana. Los costos de mantenimiento se obtienen de la experiencia a través del tiempo laborado en la industria de los hidrocarburos para realizar los respectivos análisis en los cuatro sistemas de levantamiento. El costo del dólar TRM y barril de crudo se toma del mes de septiembre de 2015:

- Dólar TRM: \$2800 pesos
- Barril de crudo WTI: 44,15 Dólares

5.1 SISTEMA BES

5.1.1 CONSUMO Y EFICIENCIA

Las mediciones se realizaron con el analizador de redes en la entrada del variador de frecuencia dentro de la caja de control del pozo.

Tabla 5. Valores de tensión y corriente.

PARAMETROS DE MEDICION ENTRADA TBT							
Tensión	ENTRADA TBT			Corriente	ENTRADA TBT		
	V12	V23	V31		L1	L2	L3
Mínimo	465,6	466,1	468,4	Mínimo	102,0	94,0	105,0
Promedio	471,6	471,9	474,3	Promedio	104,3	95,7	107,0
Máximo	476,8	477,2	479,3	Máximo	108,0	98,0	109,0

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 6. Potencias de entrada y salida.

Potencia	ENTRADA TBT		
	Activa	Reactiva	Aparente
Mínimo	73600,0	14450,0	75200,0
Promedio	74579,5	15315,9	75949,6
Máximo	75600,0	16150,0	76700,0

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 7. Energía demandada.

ENERGÍA ACTIVA	ENERGÍA APARENTE	ENERGÍA REACTIVA
75 kWh	76,3 kVAh	15,3 kVARh

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 8. Datos de distorsión armónica en voltajes y corrientes.

THD v	ENTRADA TBT		
	L1	L2	L3
Mínimo	5,91	6,19	6,08
Promedio	6,12	6,37	6,24
Máximo	6,26	6,51	6,34
THD i	ENTRADA TBT		
	L1	L2	L3
Mínimo	43,55	46,51	44,47
Promedio	45,38	47,98	45,96
Máximo	47,21	49,62	47,37

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 9. Frecuencia y factor de potencia.

FACTOR DE POTENCIA	ENTRADA
Mínimo	0,89
Promedio	0,89
Máximo	0,90

Fuente: Autoría Propia.

5.1.2 COSTOS- BENEFICIOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO BES

Costo consumo hora facturado: (Energía Activa * costo kWh) = (75 kW-hora * \$390)= \$ 29250

Tabla 10. Costo consumo hora facturado.

COSTOS OPERATIVOS / MES	
Costos Consumo Energía	\$ 21.060.000
Costos de Mantenimiento	\$ 7.910.399
TOTAL:	\$ 28.970.399

Fuente: Autoría Propia.

El potencial del pozo es de 60 barriles día, por lo tanto el costo de levantamiento de un barril para este sistema es de: ($\$ 28.970.399 / \text{USD} / 30$) = 344,88 USD-Día / 60 barriles = 5,7 USD.

5.2 SISTEMA PCP

5.2.1 CONSUMO Y EFICIENCIA

Tabla 11. Valores de tensión y corriente

PARAMETROS DE MEDICION ENTRADA TBT							
TENSIÓN	ENTRADA TBT			CORRIENTE	ENTRADA TBT		
	V12	V23	V31		L1	L2	L3
Mínimo	479,5	476,4	468,4	Mínimo	33,7	34,0	32,9
Promedio	480,0	476,9	474,3	Promedio	34,0	34,2	33,0
Máximo	480,4	477,2	477,3	Máximo	34,0	35	33,0

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 12. Energía demandada.

ENERGÍA ACTIVA	ENERGÍA APARENTE	ENERGÍA REACTIVA
12,07 kWh	27,72 kVA	24,46 kVAR

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 13. Datos de distorsión armónica en voltajes y corrientes.

THD v	ENTRADA TBT		
	L1	L2	L3
Promedio	1,2	1	1,1
THD i	ENTRADA TBT		
	L1	L2	L3
Promedio	6,2	7,0	6,3

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 14. Factor de potencia.

FACTOR DE POTENCIA	ENTRADA
Mínimo	0,84
Promedio	0,85
Máximo	0,86

Fuente: Datos tomados por el Fluke 435.

5.2.2 COSTOS- BENEFICIOS DE OPERACIÓN DEL POZO

Costo consumo hora facturado: (Energía Activa * costo kWh) = (12,07 khora * \$390)= \$ 4707,3 hora

Tabla 15. Costo consumo hora facturado.

COSTOS OPERATIVOS / MES	
Costos Consumo Energía	\$ 3.389.256
Costos de Mantenimiento	\$ 17.147.560
TOTAL:	\$ 20.536.816

Fuente: Autoría Propia.

El potencial del pozo es de 60 barriles día, por lo tanto el costo de levantamiento de un barril para este sistema es de: $(\$20.536.816/USD/30) = 244,49 \text{ USD-Día} / 29 \text{ barriles} = 8,4 \text{ USD}$.

5.3 SISTEMA UBM

5.3.1 CONSUMO Y EFICIENCIA

Tabla 16. Valores de tensión y corriente.

PARAMETROS DE MEDICIÓN ENTRADA TBT							
Tensión	ENTRADA TBT			Corriente	ENTRADA TBT		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
Mínimo	442,42	444,20	444,86	Mínimo	46	34	50
Promedio	458,52	458,49	459,07	Promedio	47,00	34,93	50,02
Máximo	463,44	463,78	464,36	Máximo	48,00	36	52

Fuente: Datos tomados por el Fluke 435.

Tabla 17. Energía de entrada.

Energía Activa	Energía Aparente	Energía Reactiva
4,4 kWh	19,1 kVAh	16,9 kVARh

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 18. Datos de distorsión armónica en voltajes y corrientes.

THD v	ENTRADA TBT		
	L1	L2	L3
Mínimo	1,09	1,57	1,31
Promedio	1,33	1,73	1,57
Máximo	1,55	1,94	1,81
THD i	ENTRADA TBT		
	L1	L2	L3
Mínimo	17,65	39,84	32,93
Promedio	18,40	43,51	34,10
Máximo	19,01	45,42	35,16

Fuente: Datos tomados por el Fluke 435.

Tabla 19. Frecuencia y factor de potencia.

FACTOR DE POTENCIA	ENTRADA
Mínimo	0,91
Promedio	0,91
Máximo	0,92

Fuente: Datos tomados por el Fluke 435.

5.3.2 COSTOS- BENEFICIOS DE OPERACIÓN DEL POZO

Costo consumo hora facturado: (Energía Activa * costo kWh) = (4,4 kW-hora * \$390)= \$ 1716

Tabla 20. Costo consumo hora facturado.

COSTOS OPERATIVOS / MES	
Costos Consumo Energía	\$ 1.235.520
Costos de Mantenimiento	\$ 4.569.444
TOTAL:	\$ 5.804.964

Fuente: Autoría Propia.

El potencial del pozo es de 60 barriles día, por lo tanto el costo de levantamiento de un barril para este sistema es de: $(\$5.804.964/USD/30) = 69,11$ USD-Día / 10 barriles = 6,9 USD.

5.4 SISTEMA VSH2

5.4.1 CONSUMO Y EFICIENCIA

Tabla 21. Valores de tensión y corriente.

PARAMETROS DE MEDICION ENTRADA TBT							
Tensión	ENTRADA TBT			Corriente	ENTRADA TBT		
	V12	V23	V31		L1	L2	L3
Promedio	458,3	455,3	457,8	Promedio	34,6	34,7	32,0

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 22. Energía de entrada.

Energía Activa	Energía Aparente	Energía Reactiva
19,12 kWh	31,79 kVAh	24,46 kVARh

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 23. Datos de distorsión armónica en voltajes y corrientes.

THD v	ENTRADA TBT		
	L1	L2	L3
Promedio	0,77	0,8	0,8
THD i	ENTRADA TBT		
	L1	L2	L3
Promedio	3,0	2,9	3,2

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 24. Frecuencia y factor de potencia.

FRECUENCIA	ENTRADA (Hz)
Promedio	60
Factor de potencia	ENTRADA
Promedio	0,59

Fuente: Autoría Propia.

5.4.2 COSTOS- BENEFICIOS DE OPERACIÓN DEL POZO

Costo consumo hora facturado: (Energía Activa * costo kWh) = (19,12 kW-hora * \$390)= \$ 7456,8.

Tabla 25. Costo consumo hora facturado.

COSTOS OPERATIVOS / MES	
Costos Consumo Energía	\$ 5.368.896
Costos de Mantenimiento	\$ 7.910.399
TOTAL:	\$ 13.279.295

Fuente: Autoría Propia.

El potencial del pozo es de 12 barriles día, por lo tanto el costo de levantamiento de un barril para este sistema es de: $(\$13.279.295/\text{USD}/30) = 158,09 \text{ USD-Día} / 12 \text{ barriles} = 13,17 \text{ USD}$.

5.5 EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO

Tabla 26. Comparaciones entre los sistemas de levantamiento.

SISTEMA	POTENCIAL/ DIA	COSTO ENERGÍA/ DÍA	COSTO DE LEVANTAMINTO X BARRIL	GANANCIA NETA/ DÍA
BES	60 BLS	\$ 702.000,0	5,70 USD	\$ 6.459.600
PCP	29 BLS	\$ 112.975,2	8,40 USD	\$ 2.902.900
UBM	10 BLS	\$ 41.184,0	6,90 USD	\$ 1.043.000
VSH2	12 BLS	\$ 178.963,2	13,17 USD	\$ 1.035.888

Fuente: Autoría Propia.

Con los datos que arrojaron las mediciones se pudo concluir que el sistema de levantamiento más eficiente en cuanto a costos de levantamiento es el Electrosumergible (BES), presenta el más alto consumo de energía eléctrica debido a la elevada potencia necesaria para que el variador de frecuencia mantenga la carga de la bomba. Con los sistemas VSH2 pasa algo muy diferente, su consumo es elevado comparado con su ganancia neta y su costo de levantamiento (Ver tabla 24).

6. FORMULAR ESTRATEGÍAS DE MEJORA PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LOS DIFERENTES SISTEMAS

Se decidió formular una estrategia de ahorro energético con el sistema de levantamiento VHS2 ya que presenta una de las más baja eficiencia y uno de los más altos consumos energéticos según su producción. Se propone aplicar para mejorar el consumo de energía eléctrica en el sistema de levantamiento artificial VSH2 instalado en el pozo, y plantear la posibilidad de instalar los bancos de condensadores en las diferentes unidades VHS2 que presenten baja eficiencia energética. El pozo presenta un motor con baja carga y el sistema con un bajo factor de potencia (0,59), por lo que se hace necesario instalar un sistema de corrección del factor de potencia, que para este caso por la baja distorsión armónica que presenta el sistema VSH2 y por el aislamiento que presenta debido al transformador de alimentación, un banco de condensadores se constituye en una alternativa razonable, de lo contrario se requerirá soluciones más complejas como filtros pasivos o activos.

6.1 COMPENSACIÓN ENERGÍA REACTIVA

Se puede observar en las siguientes ecuaciones el factor de potencia oscila entre los 0.55 y los 0.62 tomando como valor medio 0.59.

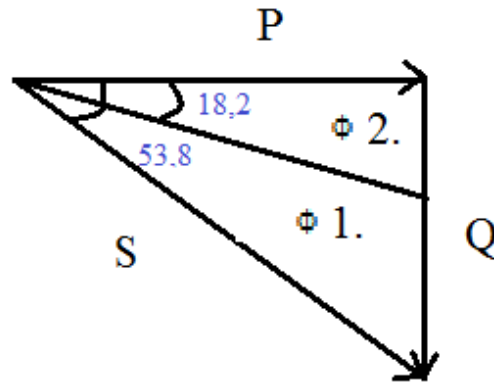
Se procede a calcular la capacidad del banco de condensadores con los parámetros medidos:

$$\begin{aligned} F_p &= P/S = 0,59 \\ \cos \Phi &= 0,59 \\ \Phi 1 &= \arccos (0.59) = 53.8^\circ \end{aligned}$$

El factor de potencia deseado se establece en 0.96

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= 0,96 \\ \Phi 2 &= \arccos (0.96) = 19,2^\circ \end{aligned}$$

Figura 15. Triangulo de potencia con ángulo de compensación.



Fuente.: [1]

La siguiente formula nos permitirá saber el valor del banco de condensadores:

$$\text{kVARc} = P(W) * (\text{Tan } \Phi 1 - \text{Tan } \Phi 2) = 19,12 \text{ kW} * 1,018 = 19465,9 \text{ VAR}$$

Según los valores comerciales de este tipo de dispositivos el que más se aproxima por encima del valor requerido es el banco de 20 kVAR.

6.2 BALANCE DE CONSUMO

Costo promedio kW/h aprox. reportado: \$ 390 moneda colombiana.

- Consumo de potencia activa del sistema VSH2, T-516: 40,5 kWh
- Consumo Potencia Reactiva del sistema VSH2, T-516: 51,0 kVARh

Costo consumo hora facturado: $34,02 \text{ kWh} * \$390 = \$ 13.267,80$

Tabla 27. Balance Costo-Beneficio aproximado del plan.

BALANCE COSTO-BENEFICIO	
COSTOS DE CONSUMO APROX. CON FP= 0.59 SANCIÓN KVAR	
Consumo facturado diario de energía	Costo diario de energía
816,48 kWh	\$ 318.427,20
Consumo facturado mensual de energía	Costo mensual de energía
24.494,4 kWh	\$ 9.552.816,00
Consumo facturado anual de energía	Costo anual de energía
293.932,8 kWh	\$ 114.633.792,00
COSTOS DE CONSUMO APROX. CON FP > 0.9	
Consumo facturado diario de energía	Costo diario de energía
458,88 kWh	\$ 178.963,20
Consumo facturado mensual de energía	Costo mensual de energía
13.766,4 kWh	\$ 5.368.896,00
Consumo facturado anual de energía	Costo anual de energía
165.196,8 kWh	\$ 64.426.752,00

Fuente: Autoría Propia.

7. CONCLUSIONES

Es importante que la industria petrolera intervenga de una forma contundente en el proceso de ahorro energético, adquiriendo sistemas y equipos con tecnologías diseñadas para la optimización del consumo.

Se conocieron los costos de levantamiento de los cuatro sistemas estudiados (BES, VSH2, PCP y UBM) y el beneficio productivo que arroja ligado a su eficacia en el proceso. Es necesario equilibrar las cargas en la red principal, eliminando armónicos, reactivos.

Un bajo factor de potencia implica un aumento de la corriente aparente y por lo tanto un aumento de pérdidas eléctricas, indicando una eficiencia eléctrica baja, lo cual siempre será costoso. Esto se demuestra con el hecho de que se tendrá que suministrar más corriente para suministrar la potencia activa, este exceso de corriente se le cobra a la gerencia por medios de cláusulas impuestas por la empresa que distribuye la energía. Con el método costo - beneficio estudiado se priorizó la formulación de un plan proactivo de optimización en consumo eléctrico que pretende eliminar el consumo de energía reactiva que presentó el sistema VSH2.

Se deben realizar estudios adicionales ya que los diferentes sistemas de extracción de crudo nos muestran un dato del tercer armónico con un valor fuera de lo normal

Los resultados de los análisis de costos arrojaron que el sistema de levantamiento con mayor eficiencia es el de Bombeo Electrosumergible (BES). Presenta mayor rentabilidad al ya que el consumo de energía es proporcional a la potencia que requiere la bomba para extraer más volumen de crudo desde el subsuelo.

Se debe tener un control de medida en diferentes circuitos eléctricos que existan en un campo de extracción de crudo y que suministran energía a los diferentes sistemas de levantamiento, con esto se obtiene información más acertada para la implementación de técnicas de eficiencia energética los que genera sostenibilidad y una disminución de pagos por consumo de energía, dando como resultado un industria más rentable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente. Colciencias., «AHORRO DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO,» [En línea]. Available: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/petroleo.pdf>.
- [2] C. G. Perez Hernandez y J. E. Sanchez Padilla, «Propuesta de ahorro de energia a la empresa sonora con un diagnostico energetico,» Instituto tecnologico de sonora, México, 2008.
- [3] C. Bulcac y E. M. Pisica, «Optimal Distributed Generation Location and Sizing Using Genetic Algorithms,» de *15 th International Conference of Intelligent System Applications to Power System*, 2009.
- [4] Díaz Niño, Andrés Orlando. Impacto sobre el uso eficiente de la energía en sistemas de levantamiento artificial para la producción de petróleo. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería Especialización en Gerencia Integral de Proyectos. Bogotá. 2014.
- [5] L. A. Arcos Salazar, Terminos de referencia en proyectos de ahorro de Energia, Ecuador, 2010.
Weatherford, «Equipos de levantamiento artificial de crudo,» *manuales*, vol. 3, nº 4, pp. 1-5, 2014.
- [6] A. Nieves Ramirez, Ingeniería petrolera. [En línea]. Available: <http://petroleraalejandro.blogspot.com.co/2015/04/herramientas-la-ingenieria-del-petroleo.html>
- [7] Etapas de la industria petrolera [En línea]. Available: http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/15/15978/figuras_petroleo_libro_france.pdf [ultimo acceso:03 01 2015]
- [8] Fluke, «medidores de calidad de energia,» [En línea]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/coes/products/Calidad-Energia-Electrica.htm>. [Último acceso: 02 01 2015]
- [9] Fluke, «Camaras termograficas,» [En línea]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/coes/soluciones/camara-termografica/>. [Último acceso: 02 01 2014].
- [10] Z. C. Pimienta Hernández, Ingeniería Económica. [En línea]. Available: <http://itvh-zcph-ingenieria-economica.blogspot.com.co/2013/01/unidad-iv-evaluacion-por-relacion.html>
- [11] Instituto Argentino de Petróleo y Gas. Sensores. <http://www.iapg.org.ar/seccionalsur/NUEVA/Jornadas2012/Trabajos/22-Uso%20de%20variador%20de%20frecuencia%20y%20sensor%20en%20BES.pdf>
- [12] Schlumberger. [En línea]. Available: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish04/aut04/03_esp_surveillance.pdf
- [13] E.Y. Machete Rojas, Analisis del desempeño de dos sistemas de levantamiento artificial bombeo electrosumergible y bombeo mecanico VSH2 utilizados en el campo Caño Limon, Colombia, 2008. pp 12-17
- [14] A. Oliveira. Manual Danfoss VLT 2800. [En línea]. Available: <http://documents.mx/documents/manual-danfoss-vlt2800.html>

- [14] Yaskawa. Catálogo. [En línea]. Available: <https://www.yaskawa.com/pycprd/download/browse-by/all/all/Catalogs%20-%20Brochures%20-%20Flyers/all>
- [16] Koltentb. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11059964>
- [17] A. Vilorio. Tipos de sistemas de levantamiento artificial. Ecopetrol. <http://documents.mx/documents/tipos-de-sistemas-de-levantamiento-artificial-presentacion-ecopetrol.html>
- [18] S. Sanchez, Escritor, Sistemas de Levantamiento Artificial. [Performance]. PETROGROUP training and consulting company, 2014.
- [19] Área mecánica. Cuaderno de Hidráulica: Regulación de la potencia de los sistemas hidráulicos impulsados por bombas volumétricas. 2012. [En línea]. Available: <https://areamecanica.wordpress.com/2012/06/27/cuaderno-de-hidraulica-regulacion-de-la-potencia-de-los-sistemas-hidraulicos-impulsados-por-bombas-volumetricas/>
- [20] Networkintl International. Equipos. [En línea]. Available: <http://www.networkintl.com/contents/auction/QFPIRA01ELPN/QFPIRA01OIL3/!QFPIRA01OIL5image002.jpg>
- [21] Vargas Delgado, César. "Componentes de bombeo mecánico su uso y aplicación en Chicontepeç" FACULTAD DE INGENIERIA, INGENIERÍA PETROLERA. UNIVERSIDAD NACIONAL. AUTONOMA DE MEXICO. MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2012 <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2180/INFORME.pdf?sequence=1>
- [22] S. Machete. Análisis de desempeño de dos sistemas de levantamiento artificial bombeo electro sumergible y bombeo mecánico VSH2 utilizados en el campo caño limón. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. [En línea]. Available: repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/613/2/124807.pdf

BIBLIOGRAFÍA

ARCOS SALAZAR, L. A. Términos de referencia en proyectos de ahorro de Energía, Ecuador, 2010.

ÁREA MECÁNICA. Cuaderno de Hidráulica: Regulación de la potencia de los sistemas hidráulicos impulsados por bombas volumétricas. 2012. [En línea]. Available: <https://areamecanica.wordpress.com/2012/06/27/cuaderno-de-hidraulica-regulacion-de-la-potencia-de-los-sistemas-hidraulicos-impulsados-por-bombas-volumetricas/>

ÁREA MECÁNICA. Cuaderno de Hidráulica: Regulación de la potencia de los sistemas hidráulicos impulsados por bombas volumétricas. 2012. [En línea]. Available: <https://areamecanica.wordpress.com/2012/06/27/cuaderno-de-hidraulica-regulacion-de-la-potencia-de-los-sistemas-hidraulicos-impulsados-por-bombas-volumetricas/>

BULCAC, C. y Pisica, E. M. «Optimal Distributed Generation Location and Sizing Using Genetic Algorithms,» de 15 th International Conference of Intelligent System Applications to Power System, 2009.

DÍAZ NIÑO, Andrés Orlando. Impacto sobre el uso eficiente de la energía en sistemas de levantamiento artificial para la producción de petróleo. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería Especialización en Gerencia Integral de Proyectos. Bogotá. 2014.

FLUKE CORPORATION, “Cámaras termográficas,” [En línea]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/coes/soluciones/camara-termografica/>. [Último acceso: 02 01 2014].

FLUKE CORPORATION, “medidores de calidad de energía,” [En línea]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/coes/products/Calidad-Energia-Electrica.htm>. [Último acceso: 02 01 2015]

INSTITUTO ARGENTINO DE PETRÓLEO Y GAS. Sensores. <http://www.iapg.org.ar/seccionalsur/NUEVA/Jornadas2012/Trabajos/22-Usode%20variador%20de%20frecuencia%20y%20sensor%20en%20BES.pdf>

KOLTENTB. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11059964>

MACHETE, S. Análisis de desempeño de dos sistemas de levantamiento artificial bombeo electro sumergible y bombeo mecánico VSH2 utilizados en el campo caño limón. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. [En línea]. Available: <repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/613/2/124807.pdf>

NETWORKINTL INTERNATIONAL. Equipos. [En línea]. Available: <http://www.networkintl.com/contents/auction/QFPIRA01ELPN/QFPIRA01OIL3!/QFPIRA01OIL5image002.jpg>

NIEVES RAMIREZ, José Alejandro. Ingeniería petrolera. [En línea]. Available: <http://petroleraalejandro.blogspot.com.co/2015/04/herramientas-la-ingenieria-del-petroleo.html>

OLIVEIRA, B. Manual Danfoss VLT 2800. [En línea]. Available: <http://documents.mx/documents/manual-danfoss-vlt2800.html>

PEREZ HERNANDEZ, C. G. y Sanchez Padilla, J. E. «Propuesta de ahorro de energía a la empresa sonora con un diagnostico energético,» Instituto tecnológico de sonora, México, 2008.

PIMIENTA HERNÁNDEZ, Z. C. Ingeniería Económica. [En línea]. Available: <http://itvh-zcph-ingenieria-economica.blogspot.com.co/2013/01/unidad-iv-evaluacion-por-relacion.html>

SANCHEZ, S. Escritor, Sistemas de Levantamiento Artificial. [Performance]. PETROGROUP training and consulting company, 2014.

SCHLUMBERGER. [En línea]. Available: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish04/aut04/03_esp_surveillance.pdf

UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO Y UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE. Colciencias., «AHORRO DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO,» [En línea]. Available: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/petroleo.pdf>.

VARGAS DELGADO, César. "Componentes de bombeo mecánico su uso y aplicación en Chicontepec" FACULTAD DE INGENIERIA, INGENIERÍA PETROLERA. UNIVERSIDAD NACIONAL. AUTONOMA DE MEXICO. MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2012 <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2180/INFORME.pdf?sequence=1>

VILORIA, B. Tipos de sistemas de levantamiento artificial. Ecopetrol. <http://documents.mx/documents/tipos-de-sistemas-de-levantamiento-artificial-presentacion-ecopetrol.html>

WEATHERFORD, «Equipos de levantamiento artificial de crudo,» manuales, vol. 3, nº 4, pp. 1-5, 2014.

YASKAWA. Catálogo. [En línea]. Available: <https://www.yaskawa.com/pycprd/download/browse-by/all/all/Catalogs%20-%20Brochures%20-%20Flyers/all>