

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“MAGÍSTER EN SISTEMAS DE ENERGÍA”

TEMA:

DESARROLLO DE INDICADORES ENERGÉTICOS Y EVALUACIÓN DE
DESEMPEÑO APLICADOS A LA PLATAFORMA DE PRODUCCIÓN DE
HIDROCARBUROS DEL CAMPO SINGUE – BLOQUE 53

AUTOR:

Cristopher Bastidas León

Guayaquil - Ecuador

2024

RESUMEN

Este estudio presenta una evaluación energética de las plataformas A y B del campo SINGUE, donde se procesa, deshidrata, separa y reinyecta los fluidos producidos (agua, petróleo y gas). Para llevar a cabo estos procesos se requiere de un sistema de generación de energía a través de generadores con motores de combustión alimentados con diesel industrial como combustible.

Debido a que la zona se encuentra en una locación remota, no cuenta con conexión directa a la red del Sistema Nacional de Interconexión (SNI) a pesar de que existen proyectos para extender estas líneas de energía hasta los campos petroleros ubicados al nororiente del país, aun no se han concretado estos proyectos.

El costo de generación representa el 70% del costo de producción por barril de crudo producido, es por esto la necesidad de determinar los USEs e implementar un control operacional para reducir consumos de energía basados en la norma ISO 50001 de gestión energética.

La evaluación de este estudio parte de la definición de la línea base a través de la relación de variables relevantes que permitirán determinar el estatus y consumo actual de energía según el histórico de barriles de fluido producidos. Posteriormente se determinan los USEs que manejan el fluido producido, se calculan las potencias requeridas y se realiza una evaluación de consumo y eficiencia de la energía en equipos industriales usados en las plataformas. Finalmente se plantea mejoras operativas y se estima ahorros de consumo energético y económico anual.

Palabras claves: eficiencia energética industrial, USEs, línea base, indicador energético, petróleo, ISO 50001:2018, ahorro energético.

ABSTRACT

This study presents an energy evaluation of platforms A and B of the SINGUE field, where the produced fluids (water, oil and gas) are processed, dehydrated, separated and reinjected. To carry out these processes, an energy generation system is required through generators with combustion engines fed with industrial diesel as fuel.

Due the field is in a remote location, it doesn't have a direct connection to the National Interconnection System (SNI) network, although there are projects to extend these power lines to the oil fields located in the northeast of the country. These projects haven't yet been finalized.

The generation cost represents 70% of the production cost per barrel of crude oil produced, which is why it is necessary to determine the USEs and implement operational control to reduce energy consumption based on the ISO 50001 energy management standard.

The evaluation of this study starts from the definition of the baseline through the relationship of relevant variables that will allow determining the status and current energy consumption according to the history of barrels of fluid produced. Subsequently, the USEs that handle the produced fluid are determined, the required powers are calculated and an evaluation of energy consumption and efficiency is carried out in industrial equipment used on the platforms. Finally, operational improvements are proposed and savings in annual energy and economic consumption are estimated.

Keywords: industrial energy efficiency, USEs, baseline, energy indicator, oil, ISO 50001:2018, energy savings.

DEDICATORIA

A todos los individuos que puedan hacer uso de este material para el desarrollo sustentable de la sociedad futura.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad ESPOLE por su aporte valioso al desarrollo científico y por su inspiración al fomentar el conocimiento en la sociedad.

Al Ph.D. Jorge Abad por su valioso soporte e inspiración.

A la Compañía Gente Oil Ecuador Pte. Ltd. y a todos los involucrados por permitirme realizar este estudio y hacer uso de la información.

A mis compañeros por sus conocimientos compartidos.

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Titulación me corresponde exclusivamente y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría. El patrimonio intelectual del mismo corresponde exclusivamente a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Cristopher Bastidas León

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ph.D. Jorge Abad Morán
Tutor del Proyecto

Ph.D. Juan Peralta
Vocal del Proyecto

ABREVIATURAS O SIGLAS

SIN	Sistema Nacional Interconectado
EAR	Energías Alternas Renovables
STNO	Sistema de Transmisión Nororiental
KPI	Key Performance Indicator
HMI	Human Machine Interface
MW	Mega Watios
PHVA	Planificar-Hacer-Verificar-Actuar
kWh	Kilo Watios hora
LBE _n	Linea Base Energética
BOPD	Barriles de petróleo por día
BFPD	Barriles de fluido por día
IDEn	Indicadores de Desempeño Energético
HPS	Horizontal Pump Survey
ALS	Artificial Lift System
KOD	Knock Out Drums
USE	Usos Significativos de Energía
VSD	Variable Speed Drive
rpm	Revoluciones por minuto
Hz	Hertz
BES	Bomba Electro Sumergible
DWSIM	Simulador de procesos químicos
SCADA	Supervisión de Control y Adquisición de Datos
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
psi	Libras por pulgada cuadrada
TDH	Total Dynamic Head
FC	Factor de carga
FP	Factor de potencia
Eff	Eficiencia
Amp	Amperaje
Volt	Voltaje
HP	Horse Power
Pa	Pascales
bls	Barriles
Q	Caudal
DH	Diferencial de altura

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
Declaración expresa.....	V
ABREVIATURAS O SIGLAS	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
LISTA DE TABLAS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	X
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
CAPITULO 2	
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Justificativa.....	4
2.2 Línea base energética (LBEn).....	5
2.2.1 Variables Relevantes	6
2.2.2 Factores estáticos.....	6
2.2.3 Metodología diseño LBEn.....	7
2.2.4 Análisis de Indicador de Desempeño energético.....	9
2.3 Usos significativos de energía (USEs)	10
2.3.1 Sistema de Levantamiento Artificial	14

2.3.2	Sistema de Reinyección de Agua	15
CAPITULO 3		
3.	MEDICIÓN Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS USEs.....	18
3.1	Bombas HPS de reinyección – Sistema de Reinyección de agua.....	18
3.1.1	Eficiencia Energética del Sistema de Reinyección	19
3.2	Bombas ESP – Sistema de Levantamiento Artificial	22
3.2.1	Eficiencia Energética del Sistema de Levantamiento Artificial.....	23
CAPITULO 4		
4.	PROPUESTAS OPTIMIZACIÓN Y AHORRO	27
4.1	Uso de motores de Imán permanente	27
4.2	Mejora de eficiencia curvas de Bombas	29
4.2.1	Bombas electrosumergibles para ALS.....	29
4.2.2	Bombas HPS para reinyección de Agua.....	31
4.3	Otras propuestas.....	33
CAPITULO 5		
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	34
BIBLIOGRAFÍA		36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resumen del modelo.....	8
Tabla 2 Análisis de Varianza	9
Tabla 3 Criterio Operativo de los USEs.....	14
Tabla 4 Consumo kWh de los Sistemas ALS	15
Tabla 5 Consumo kWh del Sistema de Reinyección de Agua.....	16
Tabla 6 Parámetros de las bombas HPS.....	20
Tabla 7 Factor de Carga motores HPS	21
Tabla 8 Eficiencia sistema bomba - motor HPS	21
Tabla 9 Eficiencia de las bombas HPS.....	22
Tabla 10 Parámetros de las bombas BES.....	24
Tabla 11 Factor de Carga motores BES.....	24
Tabla 12 Eficiencia sistema bomba - motor BES.....	25
Tabla 13 Eficiencia de las bombas BES.....	25
Tabla 14 Ahorro propuesto motores BES.....	28
Tabla 15 Propuesta ahorro bombas ESP	31
Tabla 16 Propuesta ahorro bombas HPS.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Metodología para establecer la línea base.....	7
Figura 2 Regresión lineal kWh/bfpd e Histograma datos de producción	8
Figura 3 Análisis de Consumo kWh/d.....	10
Figura 4 Diagrama de Proceso Producción de Hidrocarburo	11
Figura 5 USEs plataformas SINGUE A y B	13
Figura 6 Pareto de los USEs	17
Figura 7 Sistema SCADA bombas de Reinyección HPS.....	19
Figura 8 Histórico demanda de corriente (Amp)	23
Figura 9 Curva Operativa y de Eff bomba BES	30
Figura 10 Curva Operativa y de Eff bomba HPS.....	33

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria petrolera son pocos los campos que pueden aprovechar el uso de la energía a través del Sistema Nacional Interconectado (SIN), debido a la posición geográfica que favorece la interconexión con los campos, esta ventaja favorece a un menor gasto de producción por barril de crudo. Es importante mencionar la importancia del costo de la generación en la producción de hidrocarburos ya que es un alto porcentaje del costo total dependiendo del tipo de generación.

La implementación de fuentes de Energías Alternas Renovables (EAR) no se ha desarrollado en la zona y se considera el proyecto Sistema de Transmisión Nororiental (STNO) como la mejor alternativa para un mayor alcance de la red de distribución. Adicionalmente la implementación de plantas de fuentes de energía in situ queda a cargo de la compañía con autofinanciamiento disminuyendo las perspectivas económicas de autogestionar un proyecto de EAR en estas zonas. Es necesario el estudio de una propuesta económica, factible y contractual para la autogeneración considerando la venta de excedente de energía como aplicado en otras compañías del país. Una alternativa ya aplicable actualmente en el ámbito nacional es el uso de gas asociado producido con el petróleo “aprovechando este gas en generación eléctrica y sistemas de calentamiento para incrementar la temperatura en el proceso de deshidratación de crudo” (Petroenergía, 2023), sin embargo, es importante mencionar que dependiendo del tipo de gas y su poder calorífico puede ser ineficiente y de baja calidad para generación. La tecnología para este tipo de generación representa un alto costo de financiamiento.

En este proyecto se pretende realizar un levantamiento de análisis energético a una plataforma de producción de crudo de un campo privado que actualmente produce en promedio de 3000 barriles de crudo por día, considerando el gasto por generación y los costos operativos. Finalmente se presentarán propuestas de mejora considerando diferentes escenarios de inversión.

1.1 Descripción del problema

El costo por barril de petróleo en las empresas productoras de hidrocarburos, incluidas Petroecuador, se ven afectadas por el costo de consumo de combustible para generación de electricidad. Este es el caso de la compañía operadora de producción a cargo del campo Singue, la cual presenta un gasto del 70% del valor de producción de crudo asociado al consumo de diesel para generación de electricidad por medio de generadores. Los generadores, máquinas de combustión interna a base de diésel, generan toda la energía requerida en las plataformas de producción de hidrocarburo, alimentando bombas, uso de tipo doméstico para oficinas, iluminación y facilidades de superficie.

1.2 Justificación del problema

Al no contar con un análisis energético de generación en la plataforma, no se ha estimado los puntos críticos de consumo (Abad, 2023), mientras las medidas aplicadas han representado altos costos con lo que se ha optimizado el 20% de la generación de energía mediante el uso de gas asociado producido del campo que actualmente es quemado en su totalidad. Actualmente se estudia la posibilidad y factibilidad del incremento del uso de este gas asociado mediante el uso de turbinas a gas, sin embargo, esta tecnología representa una alta inversión.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Crear indicadores de consumo energético sobre la producción de barriles de petróleo en un Campo privado ubicado al noreste del país a través de la inspección, el estudio y el análisis del consumo energético de los sistemas de producción, para que se optimice la generación de energía en estos sistemas calculando sus eficiencias de consumo ofreciendo una respuesta cuantitativa de los costos de producción asociados a la generación.

1.3.2 Objetivos Específicos

Identificar los sistemas de consumo de energía dentro de la plataforma de producción de crudo a través de mediciones del consumo de energía de cada sistema.

Crear indicadores de performance de consumo de energía a través de Key Performance Index (KPI) económicos y energéticos para evaluación del estudio.

Calcular eficiencias de sistemas de producción tomando mediciones de los equipos y del sistema de monitoreo Human Machine Interface (HMI).

Determinar costos y porcentaje de ahorro considerando el escenario P10.

Identificar medidas de mejor aprovechamiento de la energía con una guía base aplicaba a las diferentes industrias

CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Justificativa

La reducción de contaminantes emitidos al ambiente y el apagado de mecheros son los objetivos del sector petrolero ecuatoriano (Hugo Del Pozo Barrezueta, 2018) en este contexto, se deben proponer medidas centradas en la transición energética, eficiencia y legislación energéticas para reducir la contaminación. La transición energética busca reemplazar las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles con renovables, la eficiencia energética se enfoca en un consumo responsable mediante tecnologías innovadoras y gestión eficiente, mientras que la legislación busca implementar normas como la ISO 50001 para la industria, con el objetivo de disminuir el consumo global de combustibles fósiles (Romero, 2018)

Previo a establecer un sistema de gestión energética, es necesario la realización de una auditoría energética conforme la norma ISO 50001, un ejemplo se desarrolló en una central termoeléctrica de biomasa con una potencia media de 26 MW desarrollando un proceso de etapas para la mejora continua. La auditoría evalúa el estado actual de la central mediante indicadores de desempeño energético, identifica áreas de mejora y propone medidas para aumentar la eficiencia. Este ejemplo muestra que a través de la implementación de un Sistema de Gestión de la Energía (SGEn) la eficiencia mejora 14% el consumo de energía, destacando que el control del combustible en la caldera ha contribuido significativamente en este resultado, evidenciando como la auditoría energética permite identificar y abordar áreas clave para mejorar la eficiencia energética (Eugenio & Fuentes, 2020)

La implementación de la gestión energética, basada en la norma ISO 50001 tiene un enfoque en la mejora continua cuando se aplica la metodología Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA), que se presenta como una solución para el sector hidrocarburífero. La implementación de este sistema de gestión permite reducir la contaminación ambiental por emisión de gases a la atmosfera además de garantizar la sostenibilidad de la industria y lograr ahorros económicos enfocados al consumo

de energía. Desarrollando la metodología PHVA, se establece una mejora continua en la eficiencia energética a través de estructuras de trabajo donde se tienen que incluir el desarrollo de políticas para el uso eficiente de la energía, también la implementación de objetivos y metas alcanzables dentro de la organización. La primera etapa debe ser la recopilación de datos sobre el uso de energía con indicadores como kWh por unidad de producción, y la evaluación de resultados para finalmente proponer alternativas de mejora (Sánchez, 2018).

Algunas de las empresas consideradas como contaminantes se encuentran las del sector petrolero, generadoras de electricidad y gas que podrían adoptar sistemas de gestión energética basados en la norma ISO 50001 para implementar proyectos piloto que permitan detectar problemas y buscar oportunidades de mejora mediante el análisis histórico y con la participación de grupos multidisciplinarios como la alta gerencia. Esta iniciativa no solo brinda un beneficio económico, así como también ambiental y cultural que requiere un cambio de mentalidad en las personas de la organización para lograr un proceso de producción más eficiente y sostenible (TF - Federico Iraola, 2021.)

La alternativa a corto plazo para mejoras inmediatas del alto consumo de energía en una plataforma petrolera con uso de diesel como fuente de generación, es una auditoría que permita buscar los puntos de alto consumo del sistema y plantear puntos críticos y de mejora. Estos puntos se pueden profundizar y aplicar soluciones propuestas con un menor costo del estimado para proyectos actuales de eficiencia.

2.2 Línea base energética (LBEn)

La línea base es una medida de consumo teórico ideal que permite tener una referencia cuantitativa del desempeño energético.

En este caso de estudio, se presenta la línea base de consumo de una plataforma de hidrocarburos que produce y separa el fluido hasta obtener como producto final el crudo neto que es finalmente vendido al estado ecuatoriano. Para estos procesos, es necesario del uso de equipos que requieren energía para operar, la cual es obtenida a partir de generadores de combustión a base de diésel.

Para el ajuste de la línea base, se debe considerar la naturaleza del caso presentado y el modelo de regresión lineal al cual se ajusta, este modelo vincula matemáticamente el consumo de energía con la producción de fluido (Alex Barraza, 2023).

A continuación, se describe la metodología usada para la construcción de la LBE.

2.2.1 Variables Relevantes

Es el factor cuantificable que impacta de forma directa o significativa en el desempeño energético y puede variar su tendencia. Entre las variables relevantes se puede clasificar a la producción de crudo como variable independiente de la operación, ya que la producción depende de la inversión de nuevos pozos y de la calidad del reservorio, mientras que las operaciones que demandan energía se ejecutan para garantizar la calidad, continuidad y seguridad de la producción de petróleo.

Dentro de las variables relevantes también se las puede clasificar en controladas y no controladas que se diferencian principalmente en que se puedan o no ejercer una acción para modificarlas. A continuación, se describe estas variables (Alex Barraza, 2023).

Variables controlables

- Flujo de diésel

Variables no controladas

- Temperatura ambiente

2.2.2 Factores estáticos

Es el factor identificado que impacta en forma significativa en el desempeño energético y no cambia de manera rutinaria (Alex Barraza, 2023). Los factores se describen a continuación.

1. Generadores (Cambio de generadores por tanto eficiencia variable)
2. Motor de combustión

2.2.3 Metodología diseño LBEn

Se establece una línea base siguiendo la guía según la norma técnica ecuatoriana ISO 50001:2018. La metodología aplicada se describe a continuación.

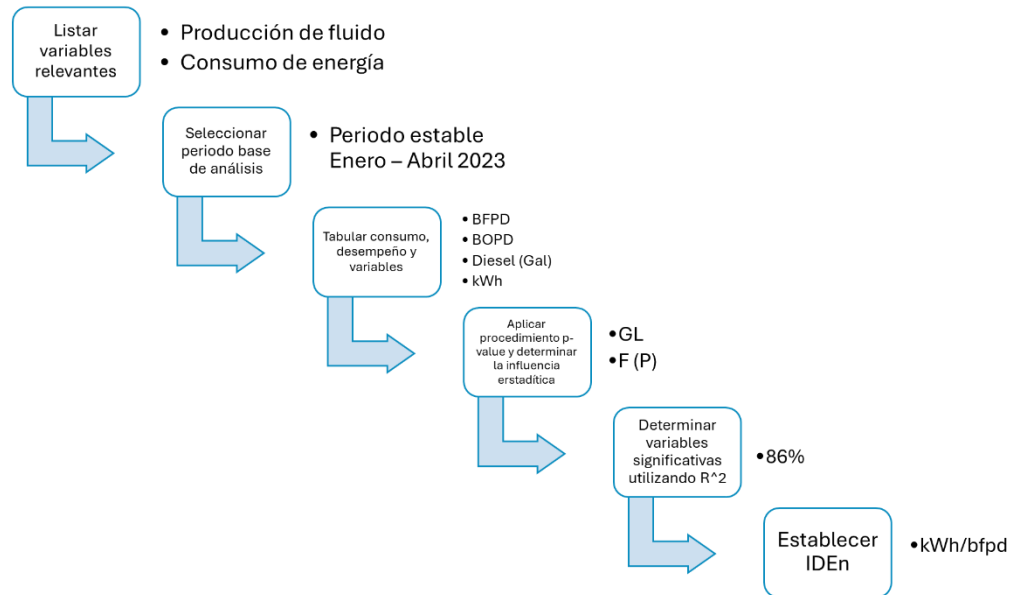
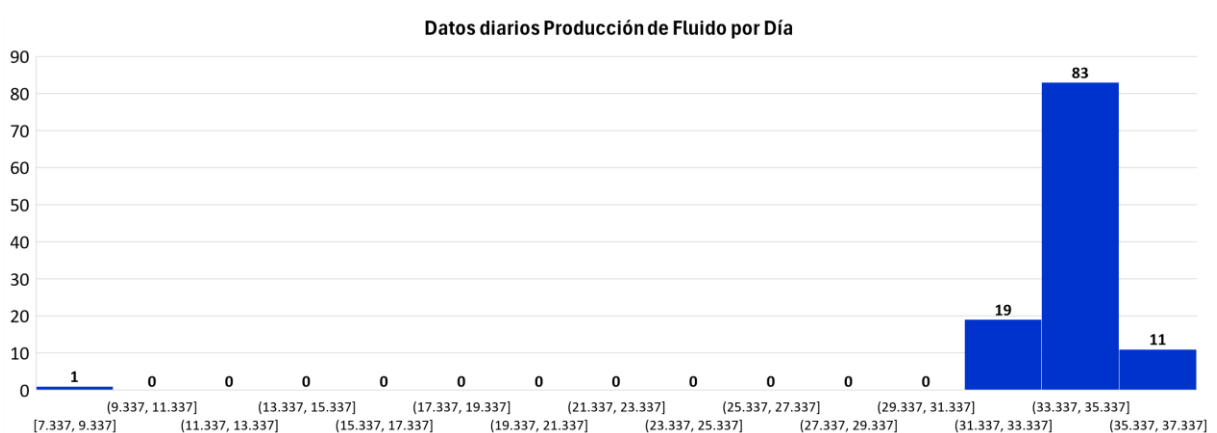


Figura 1

Metodología para establecer la línea base

Aplicando esta metodología se ajusta la línea base definiendo como indicador el consumo kWh por barriles de fluido producido. Se obtiene un ajuste del 86% en la regresión de tipo lineal. El 72% de los datos del fluido producido por día se agrupan en el rango de 33.337 a 35.337 bfpd con un consumo entre un rango de 50k a 70k kWh de energía eléctrica como muestra la figura 2 y calculado con el histograma.



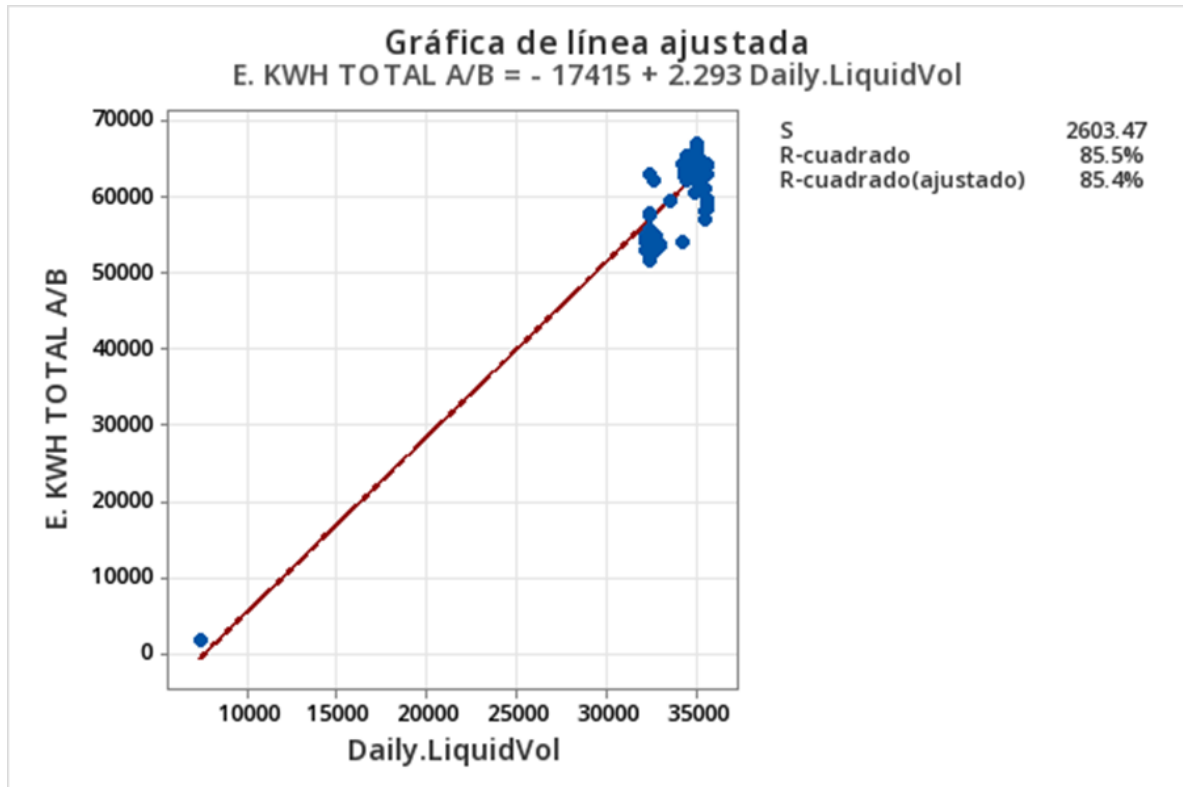


Figura 2

Regresión lineal kWh/bfpd e Histograma datos de producción

La ecuación de regresión lineal obtenido en *Minitab Software*, donde E.KWH TOTAL A/B se refiere al consumo de energía en las plataformas Singue A y Singue B mientras Daily.LiquidVol es la variable de los barriles de fluido por día producidos en la plataforma Singue B, se detalla a continuación:

$$E. KWH TOTAL A/B = - 17415 + 2.293 \text{ Daily.LiquidVol}$$

La relación de las variables de producción de barriles de fluido y consumo de energía es proporcionalmente fuerte, es decir el consumo de energía varía directamente proporcional con la producción de fluido de pozos.

Tabla 1

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)
2603.47	85.52%	85.39%

Según el coeficiente de determinación R^2 (relación) entre las variables dependiente e independiente se ajusta al 86%, es decir tiene un buen ajuste de la relación entre las variables. Ya que solo se considera una variable independiente (producción de fluido) no se toma relevancia el R^2 ajustado.

La Tabla siguiente de “Análisis de Varianza” (ANOVA) analizaremos solamente el resultado estadístico del coeficiente de Fisher (F) que analiza la variación de la regresión, es decir que tanto se alejan los datos de la estimación y también si ambas variables independiente e independiente están asociadas (Díaz & Fernández, n.d.). Vemos que el Valor Crítico de F (P) es igual a 0 menor a 0.05 por lo tanto las variables de producción de fluido justifican el comportamiento de la variable de consumo de energía.

El error de las variables muestra que los datos de producción varían en promedio 112 kWh de la predicción de la regresión lineal.

Tabla 2

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	4484174668	4484174668	661.57	0.000
Error	112	759144912	6778080		
Total	113	5243319579			

2.2.4 Análisis de Indicador de Desempeño energético

Se observa en la figura 3 que durante enero de 2023 existe un sobreconsumo referente a la línea base, con un promedio de 2190 kWh/d adicional de consumo, posteriormente a finales de enero el sobreconsumo se reduce llegando a niveles base con puntos de ahorro hasta inicios de abril donde se observa un ahorro significativo marcando otra tendencia.

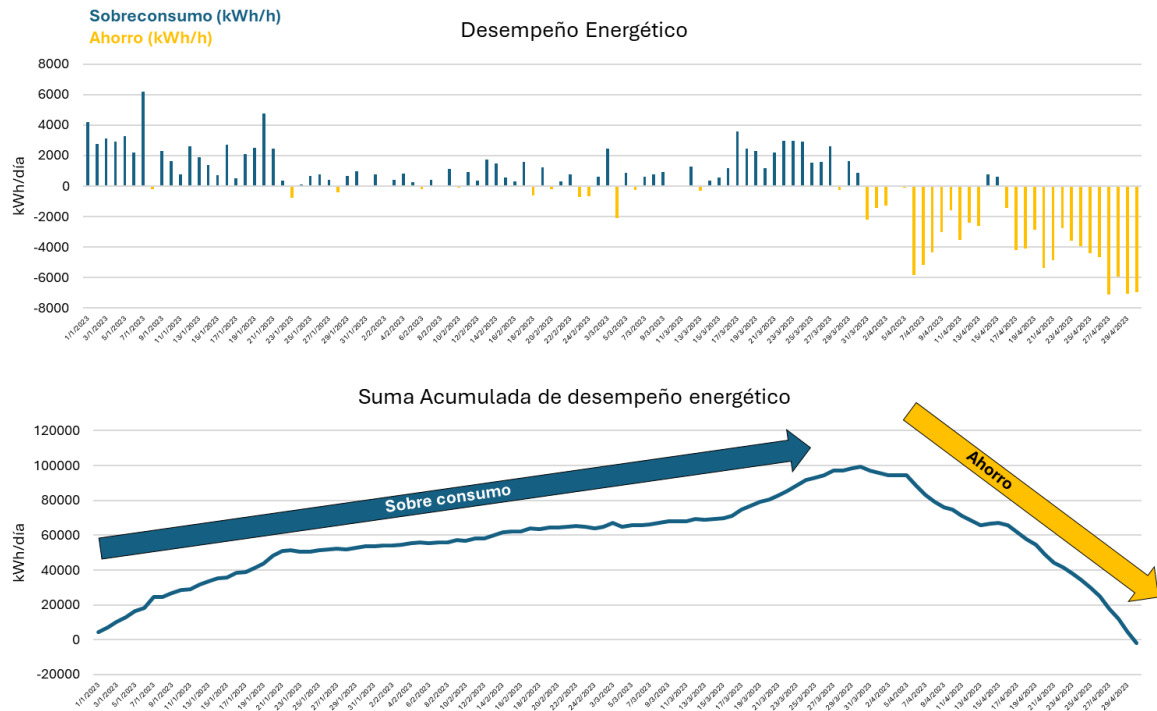


Figura 3
Análisis de Consumo kWh/d

2.3 Usos significativos de energía (USEs)

Según la norma ISO 50001:2018, los USE son los usos que se le da a la energía que representan un consumo sustancial y/o ofrece una oportunidad potencial de mejora de desempeño energético.

Para este caso de estudio se considera los siguientes procesos para la producción de hidrocarburo mostrado en la figura 4, donde el petróleo se extrae de los pozos petroleros mezclado con el agua y el gas para después ser separado (deshidratado) en las facilidades de superficie en la plataforma Singue B y finalmente ser vendido al estado ecuatoriano, mientras el agua separada es tratada y reinyectada en pozos de agua ubicados en la plataforma Singue A. Para mover el fluido desde los pozos productores a través de la planta Singue B y Singue A, es necesario el uso de bombas y equipos industriales, los cuales operan con energía proporcionada con generadores.

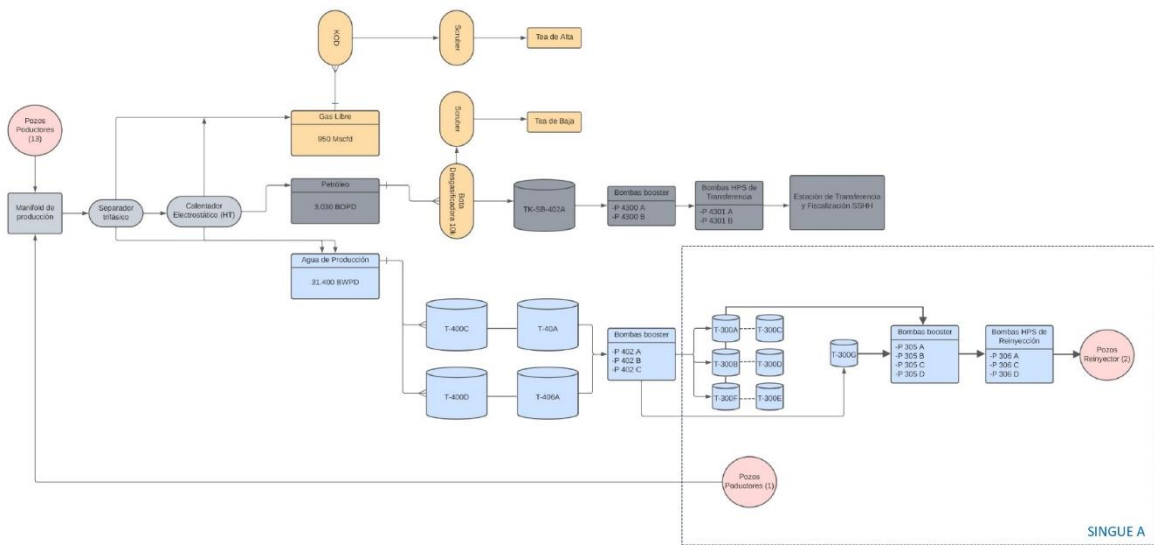


Figura 4

Diagrama de Proceso Producción de Hidrocarburo

En el proceso para deshidratación de crudo y reinyección de agua presentados en la figura 4, se determinan 4 sistemas de uso de la energía como se describe a continuación.

Sistema de reinyección de agua

- Bombas Horizontal Pump Survey (HPS) 306 (A/B/D)
- Bombas booster P 402 (A/B/C)
- Bombas booster P-4300C, 304A & P305

Sistemas de Levantamiento Artificial (ALS)

- Bombas electrosumergibles (BES)
- Rotaflex bombeo mecánico

Sistema de Separación y transporte de crudo

- Separador
- Calentador Electrostático
- Bombas booster P-4300 (A/B)
- Bombas HPS P-4301 (A/B)

Sistema Manejo de Gas

- Kick Off Drum (KOD)

Adicionalmente se considera el uso de la energía para sistema de confort y telecomunicaciones, transmisores de señal necesarios en las plataformas para monitoreo y control de los equipos y sistemas.

Sistemas de Confort & Redes

- Aire Acondicionado
- Luz
- Iluminación
- Electrónico
- Conexión digital

Se determinó la demanda real de potencia de las USEs a través de las medidas tomadas de consumo de corriente y voltaje de los equipos, conociendo sus factores de potencia de diseño se calcula la demanda de todos los sistemas. Los valores de Volt y Amp son tomados de los Variadores de Frecuencia (VSD) que registran estas medidas eléctricas de los motores y bombas usados en las plantas. Estas medidas se llevan a través de un registro diario de parámetros para monitoreo y control de equipos y pozos.

Los equipos usados para la separación y deshidratación del crudo como el Separador trifásico V-400 y el Calentador electrostático V-401, no reportan consumo de energía adicional a la de los sensores y comunicación debido a que son equipos mecánicos que usan la diferencia de densidad del agua y del crudo para separarlos a través de placas de choque y tiempos de residencia.

La demanda en los sistemas de confort y redes son medidos a través de medidores de consumo de energía instalados en las plataformas Singue A y Singue B. Finalmente, la diferencia entre el consumo total y los consumos de los USEs descritos anteriormente es asignado al manejo del sistema de control del gas.

En la figura 5 se muestra el total de consumo diario de energía de cada Sistema establecido necesario para la producción de hidrocarburo. La curva amarilla muestra

el diagrama de Pareto donde el 53% del consumo de todo el proceso es para los sistemas de levantamiento artificial comprendidos por bombas multietapas instaladas dentro del pozo a una profundidad determinada para subir el fluido desde el nivel estático de los pozos hasta la superficie y posteriormente ser separado en crudo, agua y gas. El siguiente USE es el sistema de reinyección de agua, que comprende a las bombas booster las cuales generan presión para que el agua separada del crudo pueda ser transportada desde la planta Singue B hacia la planta de tratamiento Singue A, adicional las bombas HPS ubicadas en Singue A que son usadas para reinyección del agua desde superficie hasta el fondo de subsuelo a través de dos pozos reinyectores representan el 43% de consumo total de generación del Campo. Finalmente los otros 3 sistemas establecidos, representan apenas el 4% del consumo del campo por lo que no serán analizados en este estudio.

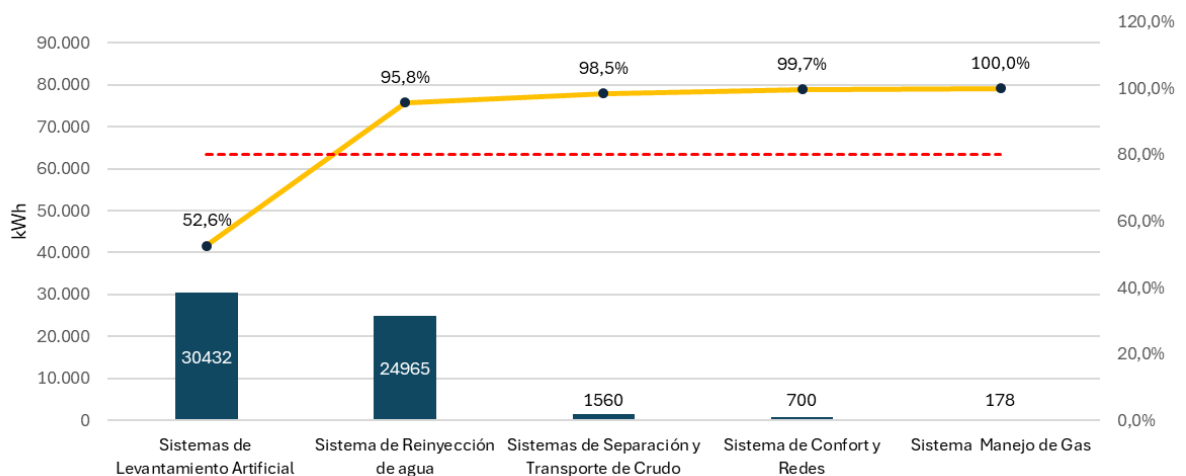


Figura 5
USEs plataformas SINGUE A y B

En la tabla 3, se definen los criterios de operación de los USEs considerando el tipo de energía que usa cada equipo, el criterio operativo de medición de consumo y los parámetros usados para la medición del consumo.

Tabla 3
Criterio Operativo de los USEs

Uso significativo de Energía (USE)	Energético	Criterio operativo	Parámetro unidad	
	Bombas HPS A	Energía Eléctrica	kWh	bwpd, °F, psi
	Bombas HPS B	Energía Eléctrica	kWh	bwpd, °F, psi
	Bombas HPS C	Energía Eléctrica	kWh	bwpd, °F, psi
Sistema de Reinyección de Agua	Bombas booster P402A	Energía Eléctrica	kWh	bwpd, °F, psi
	Bombas booster P402B	Energía Eléctrica	kWh	bwpd, °F, psi
	Bombas booster P402C	Energía Eléctrica	kWh	bwpd, °F, psi
	Bombas booster P4300C	Energía Eléctrica	kWh	bwpd, °F, psi
	Bombas booster 304A	Energía Eléctrica	kWh	bwpd, °F, psi
	Bombas booster 305	Energía Eléctrica	kWh	bwpd, °F, psi
	30-225-RHBC-32-6-2-2	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	DN1750/218/180/7420	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	P35/156/165/6002	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	DN1750/327/180/7675	Energía Eléctrica	kWh	I, V
Sistemas de Levantamiento Artificial	FLEX47/59/175/5260	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	FLEX 17.5H6/232/125/8005	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	P35XH6SSD/234/294/7009	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	FLEX47SXDH6/39/175/5006	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	FLEX 17.5H6/196/66/6800	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	FLEX47XH6/46/175/5104	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	FLEX 17.5XH6/402/175/8045	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	FLEX80 SSD XH6/59/275/5108	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	FLEX17.5 SSD XH6/366/175/8006	Energía Eléctrica	kWh	I, V
	FLEX80 SSD XH6/88/350/5106	Energía Eléctrica	kWh	I, V

2.3.1 Sistema de Levantamiento Artificial

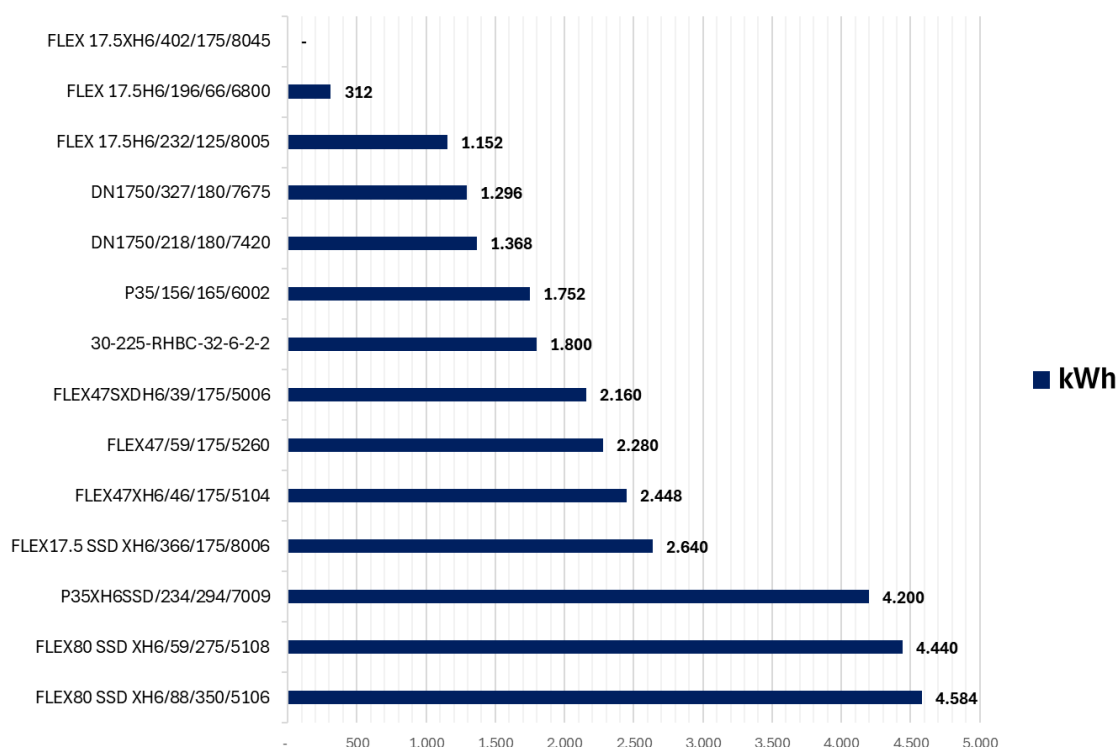
Este tipo de bombas, instaladas en fondo de pozo a una profundidad determinada, son utilizadas para levantar el fluido desde el nivel dinámico del pozo hasta la superficie, en donde posteriormente el fluido es separado en agua y petróleo. Estas bombas cuentan con motor de tipo trifásico que consume energía eléctrica para generar una potencia de giro a la bomba acoplada permitiendo rotar las multietapas que elevan el fluido a la superficie. Las bombas cuentan con variadores de velocidad de rotación (rpm) traducidas a frecuencia (Hz) para incrementar el aporte de fluido a superficie en menor tiempo, permitiendo aumentar el volumen final de producción. A través de los VSD se registra el consumo de corriente y voltaje del motor, estos parámetros permiten obtener la demanda de la potencia (kW). Se obtiene la energía considerando que los equipos se mantienen operativos 24/7 durante todo el año hasta sufrir algún tipo de falla o cambio de la completación de fondo.

La siguiente tabla 4 muestra el consumo de energía de los motores-bombas de los sistemas de levantamiento artificial instalados en los pozos durante un periodo de 24 horas. Es importante mencionar que de los 14 pozos actuales, 13 producen con

bombas electrosumergibles de multietapas y un pozo con bombeo mecánico que utiliza un motor para mover el “balancín” conocido también como Equipo Rotaflex.

Tabla 4
Consumo kWh de los Sistemas ALS

Uso significativo de Energía (USE)	Bomba	Consumo kW	kWh
Sistemas de Levantamiento Artificial	FLEX80 SSD XH6/88/350/5106	191,00	4.584
Sistemas de Levantamiento Artificial	FLEX80 SSD XH6/59/275/5108	185,00	4.440
Sistemas de Levantamiento Artificial	P35XH6SSD/234/294/7009	175,00	4.200
Sistemas de Levantamiento Artificial	FLEX17.5 SSD XH6/366/175/8006	110,00	2.640
Sistemas de Levantamiento Artificial	FLEX47XH6/46/175/5104	102,00	2.448
Sistemas de Levantamiento Artificial	FLEX47/59/175/5260	95,00	2.280
Sistemas de Levantamiento Artificial	FLEX47SXDH6/39/175/5006	90,00	2.160
Sistemas de Levantamiento Artificial	30-225-RHBC-32-6-2-2	75,00	1.800
Sistemas de Levantamiento Artificial	P35/156/165/6002	73,00	1.752
Sistemas de Levantamiento Artificial	DN1750/218/180/7420	57,00	1.368
Sistemas de Levantamiento Artificial	DN1750/327/180/7675	54,00	1.296
Sistemas de Levantamiento Artificial	FLEX 17.5H6/232/125/8005	48,00	1.152
Sistemas de Levantamiento Artificial	FLEX 17.5H6/196/66/6800	13,00	312
Sistemas de Levantamiento Artificial	FLEX 17.5XH6/402/175/8045	0,00	-



2.3.2 Sistema de Reinyección de Agua

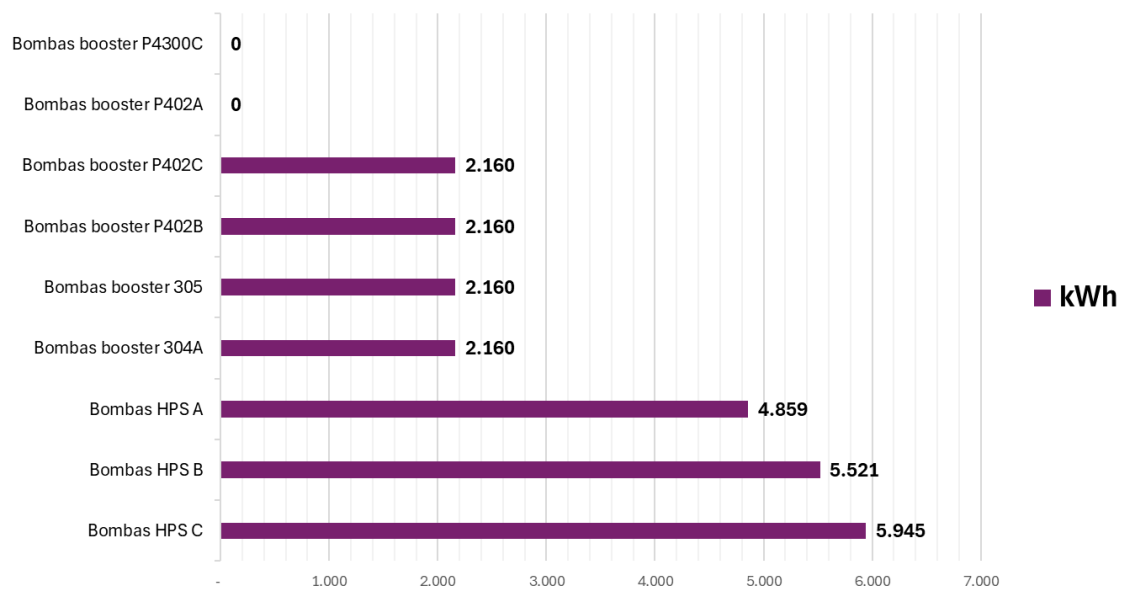
El sistema de reinyección de agua cuenta con bombas booster usadas para incrementar la presión en las líneas de agua y poder desplazar el volumen de agua

desde los tanques de residencia en Singue B hacia la planta de tratamiento Singue A. Existe otro tipo de bombas usadas para el sistema de reinyección que sirven para empujar la columna de fluido desde la superficie a través del pozo hacia el reservorio en subsuelo. Este tipo de bombas son de multietapas (HPS) que permiten desplazar un volumen determinado de agua a una velocidad establecida por la frecuencia solicitadas por el operador y transmitidas hacia un variador de frecuencia que monitorea la corriente y voltaje de consumo del motor. Con estos parámetros y una simulación con el software DWSIM se obtuvo las potencias de demanda del motor de todos los equipos. En el caso de las bombas tipo booster no se cuenta con datos de caudal en cada una, solamente se cuenta con el volumen total que pasa a través de los equipos por lo que se usó DWSIM para simular la potencia de cada equipo. Los resultados se muestran en la tabla 5, siendo las bombas HPS las que ocupan el 70% del consumo del sistema de reinyección.

Tabla 5

Consumo kWh del Sistema de Reinyección de Agua

Uso significativo de Energía (USE)	Bomba	Consumo kW	kWh
Sistema de Reinyección de agua	Bombas HPS C	495	5.945
Sistema de Reinyección de agua	Bombas HPS B	425	5.521
Sistema de Reinyección de agua	Bombas HPS A	405	4.859
Sistema de Reinyección de agua	Bombas booster 304A	90	2.160
Sistema de Reinyección de agua	Bombas booster 305	90	2.160
Sistema de Reinyección de agua	Bombas booster P402B	90	2.160
Sistema de Reinyección de agua	Bombas booster P402C	90	2.160
Sistema de Reinyección de agua	Bombas booster P402A	90	-
Sistema de Reinyección de agua	Bombas booster P4300C	90	-



Finalmente con los resultados obtenidos se realiza el análisis de prioridades con el diagrama de Pareto mostrado a continuación en la figura 6 para determinar los equipos donde implementar mejoras. Las tres bombas HPS y seis bombas de tipo BES de los pozos consumen el 67% de la demanda del proceso de producción de hidrocarburo, por lo tanto se aplicaran medidas hacia estos equipos.

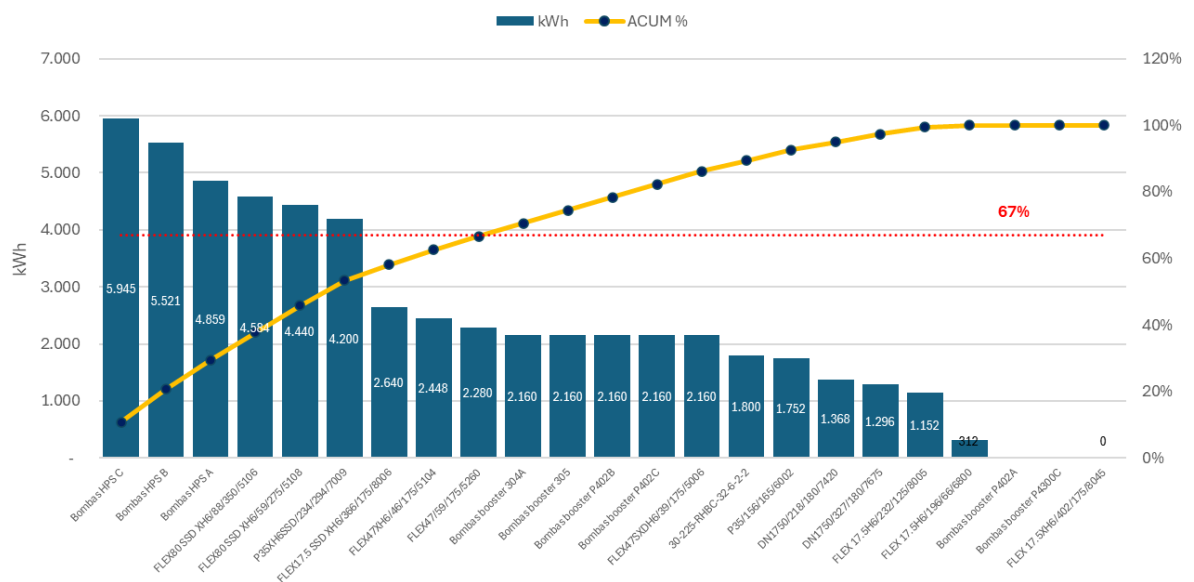


Figura 6
Pareto de los USEs

CAPITULO 3

3. MEDICIÓN Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS USEs

3.1 Bombas HPS de reinyección – Sistema de Reinyección de agua

A través de la conexión HMI que se cuenta en las plataformas de producción, esta permite ser monitoreada en tiempo real los parámetros del sistema de la planta. En la figura siguiente se muestra el esquema de las bombas HPS tomando fluido de la línea del acueducto y empujando un volumen de fluido al pozo reinyector y finalmente a la formación. El incremento de presión es dado debido a restricciones a lo largo de la línea (tubería) que baja hacia el pozo, esta presión es necesaria para que el agua en superficie pueda ser reinyectada en la formación. La frecuencia es monitoreada por el Operador de Control, encargado de monitorear parámetros. Las frecuencias se tomaron de una base de datos extraída del sistema de Supervisión de Control y Adquisición de Datos (SCADA) como se muestra en la figura 7.

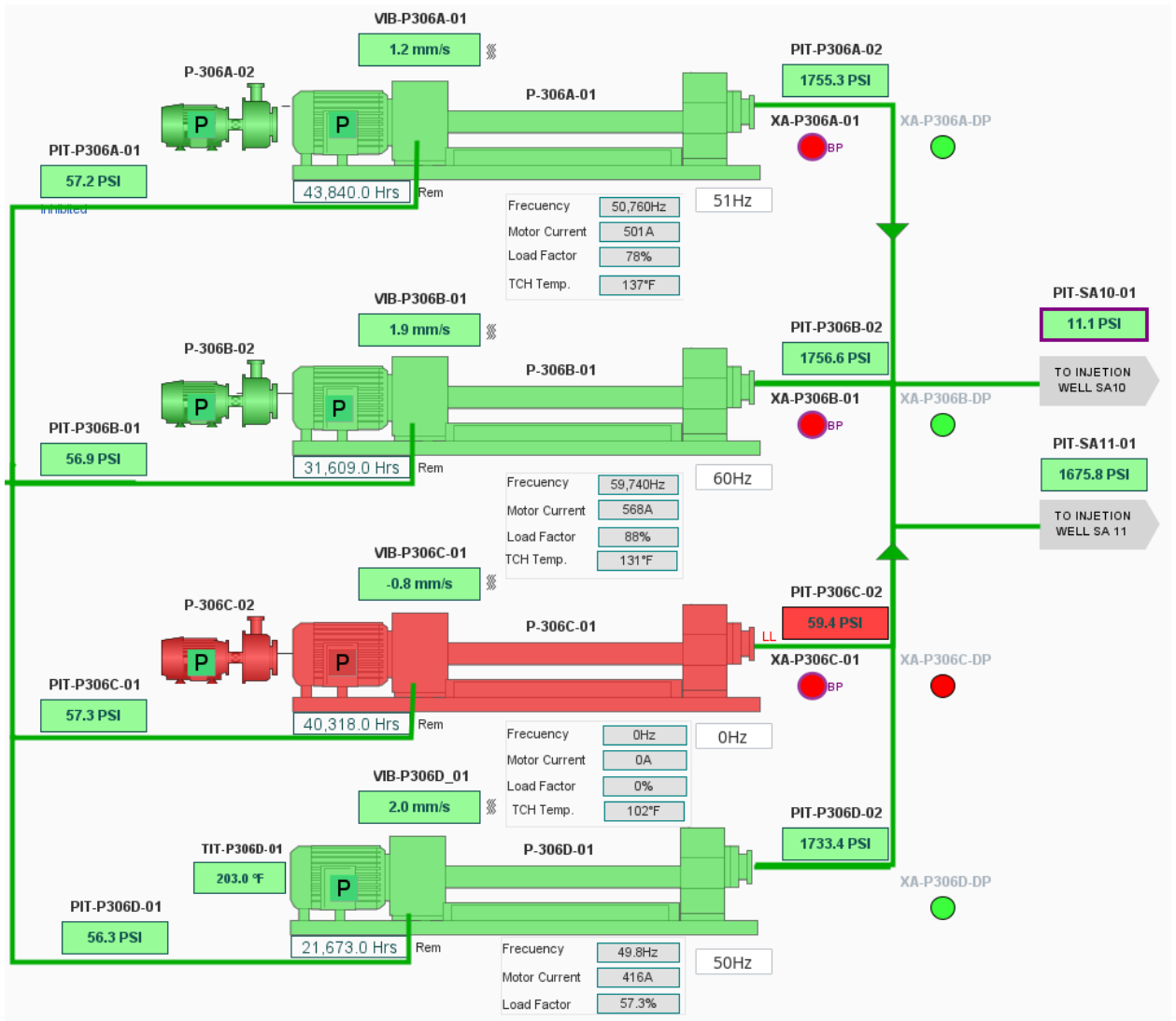


Figura 7

Sistema SCADA bombas de Reinyección HPS

3.1.1 Eficiencia Energética del Sistema de Reinyección

La tabla 6 muestra los parámetros tomados para el cálculo de presión hidrostática con la que se determinará la eficiencia (Eff) del sistema bomba motor. Se obtiene los caudales a través de un contador de flujo acoplado a la salida de las líneas de las HPS, mientras las presiones de entrada y descarga son tomadas de los sensores de presión a la entrada y a la salida de la bomba.

Tabla 6

Parámetros de las bombas HPS

BOMBA	Caudal		Presión de entrada	Presión de descarga	TDH	
	BFPD	m ³ /s	psi	psi	psi	Pa
HPS P-306A	10.814	0,019900	57	1755	1698	11.707.302
HPS P-306B	11.555	0,021263	57	1756	1699	11.714.197
HPS P-306D	13.024	0,023965	56	1733	1677	11.562.513

$$Potencia Hidráulica = Presión (TDH) * Caudal$$

$$Total Dynamic Head (psi) = P_{descarga} - P_{entrada}$$

En la tabla 7 se muestra los parámetros de corriente promedio y voltaje promedio tomados de los sensores en los motores, después se determina la potencia de demanda calculada en kW según la ecuación:

$$Potencia eléctrica = \frac{\sqrt{3} * V * I * FP}{1000}$$

Donde se considera un factor de potencia del fabricante del 85% (WEG, 2024).

Los Factores de carga (FC) se calculan asumiendo una eficiencia real del motor y la eficiencia de diseño del motor iguales, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$FC = \frac{Potencia en el eje real}{Potencia de la placa} = \frac{P_{elec} * Eff_{motor real}}{P_{elec} * Eff_{motor placa}}$$

$$Eff_{motor carga} = \frac{Eff_{motor real}}{Eff_{motor placa}}$$

Se considera una eficiencia de carga del motor del 100%, el motor está en excelentes condiciones proporcionando toda la energía de la demanda de potencia en energía real en el eje. Es decir, la eficiencia real o la entregada al eje es igual a la de diseño marcado en la placa.

$$Eff_{motor real} = Eff_{motor placa}$$

$$FC = \frac{\text{Potencia en el eje real}}{\text{Potencia de la placa}} = \frac{\text{Pelec entrada (demanda)}}{\text{Pelec placa}}$$

En la tabla 7 se obtienen FC superior al 75% es decir que el motor operativamente se encuentra en excelentes condiciones por lo tanto no ofrece opciones de mejora significativas (Perez, 2023).

Tabla 7
Factor de Carga motores HPS

BOMBA	Amp motor	Volt Motor	Potencia de Demanda (Eléctrica real motor)	Potencia de la placa Motor		FC
			kW	HP	kW	
HPS P-306A	573	480	405	600	447	91%
HPS P-306B	601	480	425	600	447	95%
HPS P-306D	701	480	495	700	522	95%

Con la potencia hidráulica calculada y la potencia del consumo eléctrico se obtiene la eficiencia del sistema bomba – motor obtenido de la siguiente ecuación:

$$Eff_{bomba-motor} = \frac{\text{Caudal} * TDH}{\text{Consumo eléctrico}}$$

Se muestra los resultados en la tabla 8.

Tabla 8
Eficiencia sistema bomba - motor HPS

BOMBA	Caudal		TDH	Amp motor	Volt Motor	Potencia de Demanda (Eléctrica real motor)	Eficiencia s B-M
	BFPD	m ³ /s					
HPS P-306A	10.814	0,019900	11.707.302	573	480	405	58%
HPS P-306B	11.555	0,021263	11.714.197	601	480	425	59%
HPS P-306D	13.024	0,023965	11.562.513	701	480	495	56%

Se observa que el sistema posee eficiencia por encima del 50% por lo tanto se busca opciones de mejora en las eficiencias de las bombas. Para determinar estas eficiencias se considera lo asumido anteriormente que la Eff real del motor sería igual a la Eff de la placa del motor. Sabiendo que:

$$Eff_{bomba-motor} = Eff_{motor} * Eff_{bomba}$$

Se determina la Eff de la bomba y se obtiene los resultados mostrados en la tabla 9.

Tabla 9

Eficiencia de las bombas HPS

BOMBA	Eficiencias B-M	Eficiencia Motor	Eficiencia Bomba
HPS P-306A	58%	94%	61%
HPS P-306B	59%	94%	63%
HPS P-306D	56%	94%	60%

Se observa que las bombas trabajan en un 60% aprox de su eficiencia, lo que se considera como razonable según la curva de eficiencia de esta bomba. En base a los diseños de estas bombas, se considera 65% de eficiencia como la óptima en funcionamiento.

3.2 Bombas ESP – Sistema de Levantamiento Artificial

El sistema bomba motor instalado dentro del pozo, permite levantar el fluido hasta la superficie, la velocidad de giro de las multietapas de esta bomba es monitoreada y controlada a través de los VSD instalados en superficie. A partir de los datos de corriente puntual y voltaje como se muestra en la figura 8, se estima la potencia de la demanda de cada motor acoplado a una de las bombas ESP, los rangos de fluido producido por cada bomba son tomados a través de pruebas de volumen total producido en 24 horas, la medida se la realiza en superficie en tanques de aforo de 500 bls calibrados con tablas de diseño y espesores.

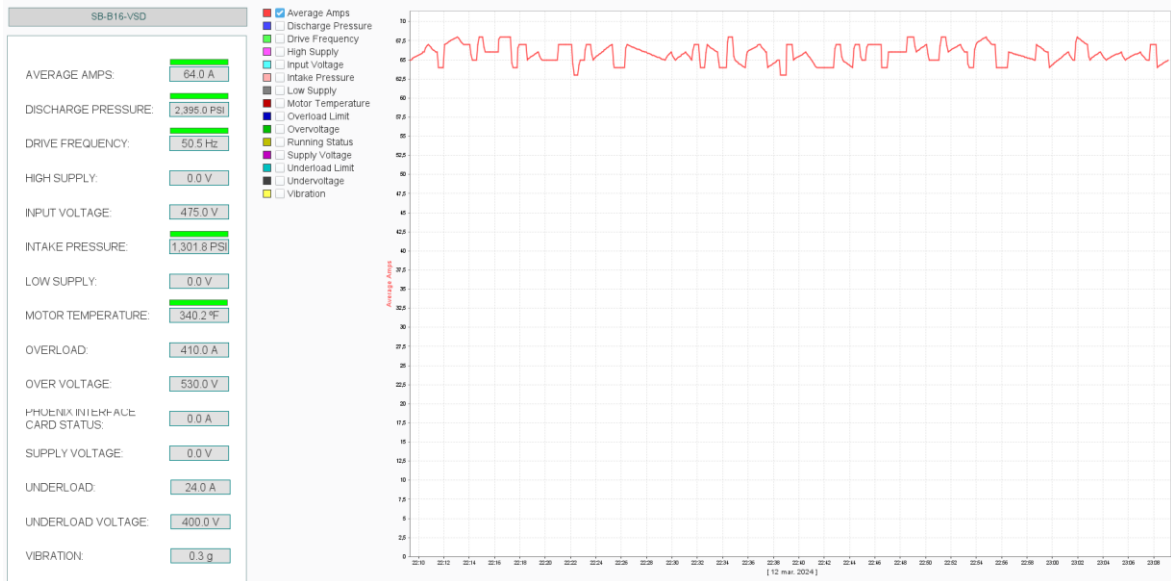


Figura 8

Histórico demanda de corriente (Amp)

3.2.1 Eficiencia Energética del Sistema de Levantamiento Artificial

Los equipos acoplados bomba – motores utilizados para el levantamiento del volumen de fluido, cumplen el mismo principio mecánico que una bomba HPS, que no es más que una bomba multietapa que mueve el fluido de manera horizontal mientras una bomba de tipo BES mueve el fluido en sentido vertical. El problema de un equipo BES es que al estar en fondo de pozo es necesario contar con transmisores de presión a la entrada y a la salida de la bomba que envíen la señal hasta superficie. Afortunadamente todos los equipos instalados cuentan con tales sensores sin embargo están sujetos a fallas por deterioro.

Las presiones de entrada (intake) y descarga son tomadas desde el panel del VSD y se calcula la potencia hidráulica conociendo el Nivel de Levantamiento Dinámico (TDH) y los caudales producidos de cada bomba. Los resultados se muestran en la siguiente tabla 10.

Tabla 10

Parámetros de las bombas BES

WELL	PUMP	Caudal		Presión de entrada	Presión de descarga
		BFPD	m ³ /s	psi	psi
SB-5 "UI"	FLEX47/59/175/5260	4259	0,007837117	1317	2257
SB-7 "TS+UI"	P35XH6SSD/234/294/7009(0)	3497	0,006434937	1130	2908
SB-12H "UI"	FLEX47XH6/46/175/5104	5106	0,009395708	1598	2217
SB-14H "UI"	FLEX80 SSD XH6/59/275/5108	4130	0,00759974	-	-
SB-15H "UI"	FLEX17.5 SSD XH6/366/175/8006	727	0,001337775	518	2807
SB-16H "UI"	FLEX80 SSD XH6/88/350/5106	6035	0,011105189	1295	2397

De igual manera como en el caso de los motores del sistema de reinyección, en el caso del sistema motor – bomba ALS se determina la corriente y voltaje consumidos mostrados en el VSD, se saca el promedio mensual de consumo y se determina la potencia eléctrica considerando un Factor de Potencia del 80% definido por la proveedora de la renta de los equipos. Para el Factor de Carga del motor se asumió que:

$$Eff_{motor\ real} = Eff_{motor\ placa}$$

Por lo tanto, la demanda de potencia del motor se asume que se transforma 100% en la potencia real entregada en el eje solamente afectada por la eficiencia de la placa del motor. Los resultados obtenidos se los muestra en la tabla 11 a continuación.

Tabla 11

Factor de Carga motores BES

WELL	PUMP	Caudal		Potencia de Demanda (Eléctrica real motor)	Potencia de la placa Motor		FC motor
		BFPD	m ³ /s	kW	HP	kW	
SB-5 "UI"	FLEX47/59/175/5260	4259	0,007837117	95	175	130	73%
SB-7 "TS+UI"	P35XH6SSD/234/294/7009(0)	3497	0,006434937	176	250	186	94%
SB-12H "UI"	FLEX47XH6/46/175/5104	5106	0,009395708	102	175	130	78%
SB-14H "UI"	FLEX80 SSD XH6/59/275/5108	4130	0,00759974	185	275	205	90%
SB-15H "UI"	FLEX17.5 SSD XH6/366/175/8006	727	0,001337775	110	175	130	84%
SB-16H "UI"	FLEX80 SSD XH6/88/350/5106	6035	0,011105189	191	350	261	73%

Se observa de la tabla 11 que los motores de las bombas con factores de potencia menor al 75% corresponden a los pozos SB-5 y SB-16H, por lo tanto se argumenta que son candidatos a mejoras de eficiencia.

Con la potencia hidráulica y la potencia eléctrica de demanda calculadas, se obtiene la eficiencia del sistema bomba-motor y se muestra en la tabla 12 siguiente.

Tabla 12
Eficiencia sistema bomba - motor BES

WELL	PUMP	Caudal		TDH	Potencia de Demanda (Eléctrica real motor) kW	Eficiencias B-M
		BFPD	m ³ /s			
SB-5 "UI"	FLEX47/59/175/5260	4259	0,007837117	6.481.074	95	53%
SB-7 "TS+UI"	P35XH6SSD/234/294/7009(0)	3497	0,006434937	12.258.883	176	45%
SB-12H "UI"	FLEX47XH6/46/175/5104	5106	0,009395708	4.267.856	102	39%
SB-14H "UI"	FLEX80 SSD XH6/59/275/5108	4130	0,00759974	-	185	0%
SB-15H "UI"	FLEX17.5 SSD XH6/366/175/8006	727	0,001337775	15.782.106	110	19%
SB-16H "UI"	FLEX80 SSD XH6/88/350/5106	6035	0,011105189	7.598.026	191	44%

Se observa que el sistema posee eficiencia por debajo del 50% por lo tanto se busca opciones de mejora en las eficiencias de las bombas considerando lo asumido anteriormente que la Eff real del motor sería igual a la Eff de la placa del motor. Sabiendo que:

$$Eff_{bomba-motor} = Eff_{motor} * Eff_{bomba}$$

Se determina la Eff de la bomba y se obtiene los resultados mostrados en la tabla 13.

Tabla 13
Eficiencia de las bombas BES

WELL	PUMP	Eficiencias B-M	Eficiencia Motor	Eficiencia Bomba
SB-5 "UI"	FLEX47/59/175/5260	53%	87%	61%
SB-7 "TS+UI"	P35XH6SSD/234/294/7009(0)	45%	86%	52%
SB-12H "UI"	FLEX47XH6/46/175/5104	39%	88%	45%
SB-14H "UI"	FLEX80 SSD XH6/59/275/5108	0%	88%	0%
SB-15H "UI"	FLEX17.5 SSD XH6/366/175/8006	19%	88%	22%
SB-16H "UI"	FLEX80 SSD XH6/88/350/5106	44%	86%	51%

Se observa que existe oportunidad de mejora en las eficiencias de las bombas de los equipos. Considerando que según el tipo de diseño, un 65% es considerado óptimo. Es importante mencionar que hay restricciones a ser tomadas en cuenta para la

mejora de eficiencias. Alguno de los inconvenientes en este tipo de bombas en pozos que hay que considerar se mencionan a continuación:

- Presiones de burbuja del hidrocarburo: la formación de gas puede perjudicar el rendimiento de la bomba.
- Formación de scale: la composición del fluido extraído altas temperaturas puede producir depósitos de carbonatos perjudicando el rendimiento de la bomba.
- Potencial el pozo: La energía del pozo es limitada y la bomba puede verse mal dimensionada si no se estima un potencial de producción adecuado.

CAPITULO 4

4. PROPUESTAS OPTIMIZACIÓN Y AHORRO

4.1 Uso de motores de Imán permanente

La tecnología de motores de imán permanente es un avance significativo en la ingeniería de motores eléctricos que ha revolucionado diversas industrias al ofrecer una mayor eficiencia energética y un rendimiento mejorado en comparación con los motores tradicionales. Estos motores utilizan imanes permanentes en lugar de bobinas de campo magnético, lo que resulta en una serie de beneficios tanto en términos de rendimiento como de eficiencia energética.

Los motores de imán permanente son conocidos por su alta eficiencia energética. Esto se debe a la capacidad de los imanes permanentes para generar un campo magnético constante sin la necesidad de energía externa. Al eliminar la necesidad de energía para excitar el campo magnético, estos motores reducen las pérdidas de energía y aumentan la eficiencia general del sistema (AimanGZ, 2023).

Según un caso de estudio presentado por la empresa NOVOMET (Artificial Lift Services, 2021), los motores de imán permanente usados con los sistemas de bombeo con ESP, permiten la reducción de alrededor del 20% del consumo de potencia de los motores de equipos de producción de fluido. Al aplicar esta tecnología en los análisis de eficiencia de este estudio se considera dos escenarios:

1. Aplicar la tecnología a los motores que presenten menor FC, motores asociados a los pozos SB-5, SB-12H y SB-16H como se muestra en la primera columna de "AHORRO" de la tabla 14. Esto representa un ahorro energético de **680.461 kWh por año**, es decir un **2%** del consumo energético anual. En términos de ahorro económico se calcula en **\$163.951** anuales considerando el costo por kWh.
2. Al aplicar la misma tecnología en todos los pozos que usan el sistema BES, se propone en la segunda columna de la tabla 14 "AHORRO" un ahorro del 20% del consumo de potencia, esto representa un ahorro energético anual de **1.504.809 kWh/año**, es decir el **5%** de economía del consumo anual de kWh. Finalmente en término de costos el ahorro representa **\$362.571** al monto anual.

Tabla 14
Ahorro propuesto motores BES

WELL	PUMP	Potencia de Demanda (Eléctrica real motor)	FC motor	AHORRO	
		kW		Motores de Imán permanente	
SB-5 "UI"	FLEX47/59/175/5260	95	73%	76	76
SB-7 "TS+UI"	P35XH6SSD/234/294/7009(0)	176	94%	176	141
SB-12H "UI"	FLEX47XH6/46/175/5104	102	78%	82	82
SB-14H "UI"	FLEX80 SSD XH6/59/275/5108	185	90%	185	148
SB-15H "UI"	FLEX17.5 SSD XH6/366/175/8006	110	84%	110	88
SB-16H "UI"	FLEX80 SSD XH6/88/350/5106	191	73%	153	153
TOTAL		859		781	687
Ahorro energético anual (kWh/año)				680.461	1.504.809
Ahorro energético				2%	5%
Ahorro economico (\$/año)				\$ 163.951	\$ 362.571
Potencia Requerida/día (kW/d)		3.133			
Potencia Requerida/anual (kW/año)		27.445.080			
\$/kWh		0,24094			

Cabe mencionar que estos motores presentan otros beneficios como un tiempo de vida operativo mayor de los equipos y menor gasto de mantenimiento.

El costo de inversión de cada trabajo de cambio de bomba en los pozos mencionados en la tabla 14 es de aproximadamente \$300.000, es decir un costo total de \$1.800.000 para la optimización en los 6 pozos. El tiempo de recobro de la inversión considerando el ahorro calculado, se calcula a seguir:

$$Tiempo\ de\ recobro = \frac{Total\ Inversión}{Flujo\ de\ cash\ anual}$$

$$Tiempo\ de\ recobro = \frac{1800000}{362571}$$

$$Tiempo\ de\ recobro = \frac{1800000}{362571} = 4,96\ años$$

Considerando que una bomba vez tiene un promedio de vida de 2500 días continuos, es decir 6,84 años, la inversión se encuentra cubierta.

4.2 Mejora de eficiencia curvas de Bombas

4.2.1 Bombas electrosumergibles para ALS

El Bombeo Electrosumergible es un sistema de levantamiento artificial que utiliza un sistema de bombeo de fondo de pozo accionado eléctricamente. Este método de extracción de fluidos de pozos petroleros se ha convertido en una técnica ampliamente utilizada en la industria debido a su eficacia y versatilidad. Consiste en secciones de bombas centrífugas de varias etapas que pueden ser configuradas específicamente para adaptarse a las características de producción y de pozo de una aplicación dada. Los sistemas de bombeo electrosumergibles ofrecen una flexibilidad y rango de capacidades de flujo de salida. Se consideran rentables para producir grandes cantidades de flujo en pozos profundos y someros. Dentro de la industria petrolera ecuatoriana, estos dispositivos son los más utilizados para producir fluido debido a su tiempo de vida operativo, rangos operativos e instalación.

La potencia hidráulica usada para determinar la eficiencia del sistema bomba motor se la obtiene de la curva de diseño de la bomba multiplicando el caudal y la altura dinámica total medida en presión. Estas curvas Q vs ΔH de diseño también muestran la eficiencia a la cual un equipo opera según el caudal operativo, como ejemplo la figura 9 muestra una curva de una bomba BES operando a 950 bfpd con una eficiencia del 64%, considerada optima en este tipo de equipos.

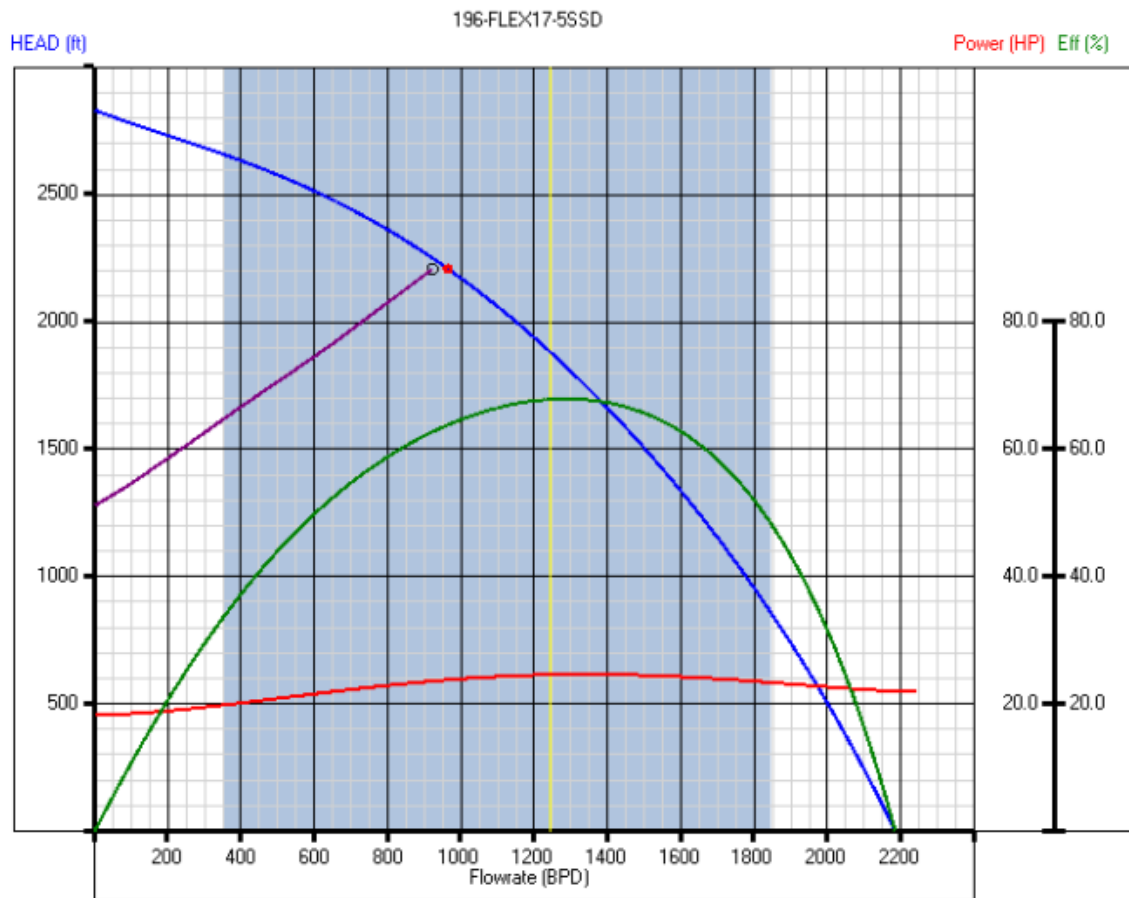


Figura 9

Curva Operativa y de Eff bomba BES

Basados en este principio de trabajo y considerando las condiciones operacionales mencionadas en el punto 5.2.1, se propone mejorar la eficiencia de las bombas en rangos aceptables entre el 3 al 5% en cada equipo como se muestra en la tabla 15 en la columna "AHORRO".

Tabla 15
Propuesta ahorro bombas ESP

WELL	PUMP	Potencia de Demanda (Eléctrica real motor)	Eficiencia Bomba	AHORRO	
		kW		Eficiencias Bomba	
SB-5 "UI"	FLEX47/59/175/5260	95	61%	65%	90
SB-7 "TS+UI"	P35XH6SSD/234/294/7009(0)	176	52%	55%	167
SB-12H "UI"	FLEX47XH6/46/175/5104	102	45%	50%	91
SB-14H "UI"	FLEX80 SSD XH6/59/275/5108	185	0%		
SB-15H "UI"	FLEX17.5 SSD XH6/366/175/8006	110	22%	25%	96
SB-16H "UI"	FLEX80 SSD XH6/88/350/5106	191	51%	55%	178
TOTAL		859			622
Ahorro energético anual (kWh/año)					2.074.565
Ahorro energético					8%
Ahorro economico (\$/año)					\$ 499.848
Potencia Requerida/día (kW/d)		3.133			
Potencia Requerida/anual (kW/año)		27.445.080			
\$/kWh		0,24094			

Para mejorar las eficiencias de las bombas y mantener el caudal de producción se propone dos alternativas:

1. Incrementar la presión de salida de la bomba y aumentar los rpm.
2. Aumentar rpm hasta alcanzar un caudal óptimo.

Con estas alternativas se describen los resultados obtenidos en la tabla 15 con los ahorros propuestos. Un ahorro energético anual de **2.074.565 kWh/año**, es decir un ahorro del **8%** del consumo energético por año y en términos económicos un ahorro de **\$ 499.848 anuales**.

Al ser una operación mecánica de control operacional los ajustes de curva de eficiencia se optimizan a través de válvulas de presión ubicadas en el cabezal de cada pozo y no se requiere inversión para la optimización.

4.2.2 Bombas HPS para reinyección de Agua

Los sistemas de bombeo horizontal representan un avance significativo en la tecnología de bombeo, aprovechando diseños de bombas superiores originalmente concebidos para la eficiencia en la producción de Bombeo Electrosumergible. Estas

bombas, se pueden configurar de forma horizontal montada sobre patines, controladas a través del variador de velocidad. Este enfoque mejora la eficiencia de los procesos de bombeo de fluidos gaseosos y se adapta a una variedad de aplicaciones industriales y petroleras como la inyección de fluidos en formaciones del subsuelo.

Al ser del mismo tipo de configuración y principio que las BES, estas bombas HPS permiten un mismo análisis de eficiencia de curvas de desempeño, por lo que se propone en este caso al igual que en el punto 6.2.1, mejorar las eficiencias entre un 2 al 5% como se describe en la tabla 16.

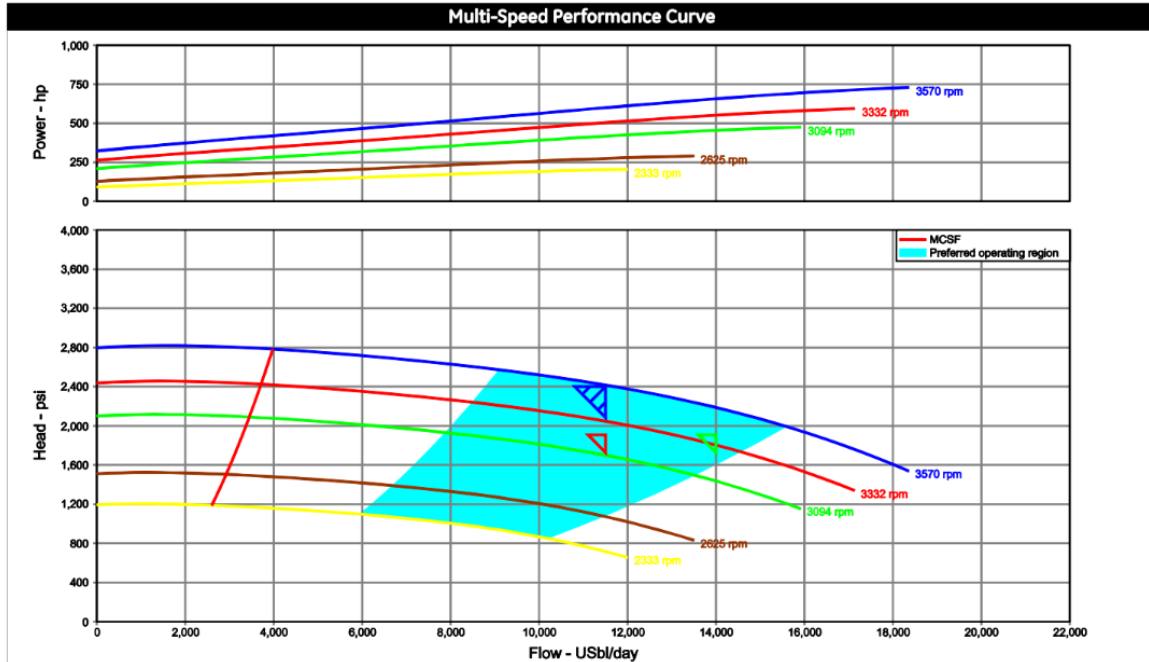
Tabla 16

Propuesta ahorro bombas HPS

BOMBA	Potencia de Demanda (Eléctrica real motor)	Eficiencia Bomba	AHORRO	
	kW		Eficiencia de bombas	
HPS P-306A	405	61%	65%	383
HPS P-306B	425	63%	65%	409
HPS P-306D	495	60%	65%	455
TOTAL	1325			1248
Ahorro energético anual (kWh/año)				676.697
Ahorro energético				2%
Ahorro economico (\$/año)				\$ 163.044
Potencia Requerida/día (kW/d)	3.133			
Potencia Requerida/anual (kW/año)	27.445.080			
\$/kWh	0,24094			

A diferencia de las bombas ESP, estas no se pueden regular el caudal ya que trabajan con un flujo estable de agua. Por lo tanto la única alternativa sería instalar una válvula de estrangulamiento a la salida de la bomba e incrementar los rpm.

Como se muestra en la figura 10, es necesario conocer las curvas de las bombas para saber su punto de eficiencia optimo y condiciones de caudal y presión que determinan estas curvas.

**Figura 10**

Curva Operativa y de Eff bomba HPS

Una vez analizado la opción de mejorar las eficiencias, se propone las mejoras en los 3 equipos HPS presentadas en la tabla 16, con un ahorro energético anual de **676.697 kWh/año**, lo que representa un ahorro del **2%** del consumo anual y en términos económicos un ahorro de **\$163.044** por año.

Al ser una operación mecánica de control operacional los ajustes de curva de eficiencia se optimizan a través de válvulas de presión que pueden ser instaladas en la salida de cada bomba y no se requiere inversión para la optimización.

4.3 Otras propuestas

Durante el estudio se presentan otras soluciones que pueden adicionarse a las ya analizadas, sin embargo serán solo mencionadas para un desarrollo más profundo a futuro.

1. Motores de alta eficiencia y cambio de válvula.
2. Reducción del impeler de las bombas.
3. Variadores de frecuencia sin válvula reguladora.

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se establece la relación lineal entre las variables de fluido producido y consumo energético de las plataformas A y B, la relación se ajusta en un 86% considerada como “buena”, Por lo tanto, se puede asegurar que la variación de la variable dependiente (kWh) está en función directa de la producción de fluido del campo.
- Durante el periodo estudiado en 2023 que comprende el primer cuatrimestre, se observa una tendencia de mejora del consumo energético. Durante enero se observa un sobreconsumo de 2190 kWh/d que luego se reduce hasta el valor de base y se mantiene hasta el 15 de marzo cuando se evidencia nuevamente un sobreconsumo. Finalmente, el mes de abril cambia la tendencia y se reporta un ahorro promedio de 3424 kWh/d sobre el consumo respecto a la base.
- El balance final dentro del periodo estudiado es que al final del cuatrimestre se logra alcanzar un buen desempeño y se logró un ahorro.
- En base a las mediciones realizadas en campo, se determina que el sistema de levantamiento artificial representa el 53% de la demanda de energía de las plataformas, mientras el sistema de reinyección de agua representa el 43% de la demanda. El resto de USEs suman el restante 6% de demanda por lo que no se considera relevante para el análisis de eficiencia energética.
- El análisis de eficiencia energética de este estudio se lo realizó a los 9 equipos industriales bomba-motor que acumulan el 67% de la demanda energética de las plataformas. Tres equipos corresponden al sistema de reinyección de agua y 6 equipos al sistema de levantamiento artificial.
- Los motores de los equipos HPS presentan factores de carga por encima del 75% por lo que se considera que trabajan eficientemente. Los motores de los equipos de ALS presentan factores de carga en el rango de 73 al 94%. Los motores con FC menor al 75% pueden ser considerados para optimización.
- La inversión para cambio de motores de imán permanente presenta un tiempo de recobro de 5 años de inversión considerando el ahorro anual que representa.

- Las bombas de los equipos HPS se encuentran trabajando de forma óptima en un rango del 60 al 63%. Las bombas de los sistemas ALS, presentan eficiencias entre 22 al 61% por lo que son claras oportunidades a mejoras de eficiencia.
- Se propone obtener un ahorro sin inversión aplicando control operacional, solamente con el ajuste de eficiencias de las bombas de los sistemas HPS y ALS. Ajustando frecuencias de las bombas entre el 2 al 5% de estos equipos se obtiene un ahorro económico del 10%.
- Es necesario redefinir los diseños de las bombas y motores del sistema de ALS para mejorar las eficiencias.
- Implementar procedimientos de mantenimiento periódico a los equipos HPS que garanticen el correcto funcionamiento de estos.
- Para obtener ahorro energético mayor al 10% es necesario invertir en trabajos de reacondicionamiento de pozos.
- La demanda de potencia está directamente relacionada a la producción de fluido (agua, petróleo, gas), si se considera el agua como un producto residual sin valor económico para la Compañía, se debe considerar alternativas para reducir el agua manteniendo la producción de petróleo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, J. (2023). Gestion de Auditoría Energética. *Maestría Sistemas de Energía* (pág. 12). Guayaquil: Jorge Abad, PhD.
- Alex, I. M., & Cantillo, B. (n.d.). CONSTRUCCIÓN DE LÍNEA DE BASE ENERGÉTICA BAJO LA NORMA ISO 50001:2018.
- Artificial Lift Services, N. (2021). Permanent Magnet Motors Used in Two Motor-Killing High-Gas Wells, Still Running 4 Years Later.
- AimanGZ. (marzo de 2023). *Sistemas Magneticos* . Obtenido de AimanGZ Corporacion: <https://aimangz.es/blog-sobre-imaness/utillidades/aplicaciones-imaness-uso-vida-cotidiana>
- Barreiro, P. (Abril de 2022). *Corporación Electrica del Ecuador - CELEC EP*. Obtenido de celec.gob.ec: <https://www.celec.gob.ec/hidronacion/noticias/sala-de-prensa/439-cuatro-empresas-precalificadas-para-participar-en-el-proceso-p%C3%BAblico-de-selecci%C3%B3n-del-sistema-de-transmisi%C3%B3n-nororiental>
- De Maestría, P. (n.d.). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA FACULTAD DE INGENIERÍA ÁREA DE POSGRADO.
- Díaz, P., & Fernández, P. (n.d.). 304 CADERNOS DE ATENCIÓN PRIMARIA Investigación Asociación de variables cualitativas: El test exacto de Fisher y el test de McNemar.
- Eugenio, V., & Fuentes, R. (n.d.). AUDITORÍA ENERGÉTICA: HERRAMIENTA PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO.
- EP, C. (5 de Septiembre de 2017). *Corporación Electrica del Ecuador* . Obtenido de CELEC EP: <https://www.celec.gob.ec/transelectric/index.php/18-institucional/contenido-documentos/260-2017-09-05-22-40-46>
- Hugo Del Pozo Barrezueta Director Del Registro Oficial En su despacho-, I. (n.d.). LEY ORGÁNICA PARA LA PLANIFICACIÓN INTEGRAL DE LA CIRCUNSCRIPCIÓN TERRITORIAL ESPECIAL AMAZÓNICA.
- Iraola, F. (2021). *Los impactos de la Eficiencia Energética en Petróleo y Gas Argentino* S.A. Argentina: Universidad Empresarial Siglo 21.
- Koo, K. (Marzo de 2016). *Petrol Malaysia*. Obtenido de Petrol Malaysia: <http://www.petrolmalaysia.com/2016/09/upstream-midstream-downstream.html>

- LEY ORGÁNICA PARA LA PLANIFICACIÓN INTEGRAL DE LA, SAN-2018-0831 (Asamblea Nacional República del Ecuador Mayo de 2018).
- Pérez, D. (2016). Caso práctico de Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía en la Industria . *VII Latin American and the Caribbean Energy Efficiency Seminar*. Montevideo: Olade .
- Perez, G. (n.d.). MAESTRIA ESPOL - SISTEMAS ENERGETICOS (G. Perez, Ed.). 2023.
- Petroenergía. (2023). Petroecuador apagó 112 mecheros cercanos a centros poblados de Orellana y Sucumbíos. *Petroenergía*, 1.
- R., Q. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de America Latina y el Caribe*. Guía , Comisión Económica para America Latina y el Caribe, Estadísticas y proyecciones económicas, Satiago.
- Renovables, A. d. (2021). *Reglamento de Operaciones Hidrocarburíferas*. Control Recursos y Energia.
- Renovables, M. d. (Junio de 2022). *Proyectos Energéticos Ecuador*. Obtenido de energiyminas.gob.ec: <https://proyectos.energiayminas.gob.ec>
- Romero, R. U. (2018). Desarrollo de una Metodología Innovadora que Agiliza la Implementación del Ssistema de Gestión Energética ISO50001. Baja California , México: Universidad Autónoma de Baja California.
- Ruis, V. (2020). *Auditoría Energética: Herramienta para la Mejora del Desempeño Energético*. Chile: Universidad de Desarrollo. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11447/4695>
- Sánchez, M. (18 de Diciembre de 2018). *Olade.org*. Obtenido de Eficiencia Energética en Refinerías de Petróleo: <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/download/49/92?inline=1>
- WEG. (2024). *W50 600 HP*. Obtenido de WEG Catalogo de motores: <https://www.weg.net/catalog/weg/US/es/Motores-EI%C3%A9ctricos/Motores-de-Inducci%C3%B3n-de-Gran-Porte/TEFC/L%C3%ADnea-W50/W50-600-HP-4P-5809-10-3F-2300-4160-V-60-Hz-IC411---TEFC---Con-pies/p/13299661>