ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

ESTUDIO PROSPECTIVO Y DE GESTIÓN DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS MULTIFÁSICAS DEL BOQUE 31 DE PETROAMAZONAS E.P.

PROYECTO DE DESARROLLO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN GESTIÓN PARA LA EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO

OSWALDO SANTIAGO BONILLA BÁEZ
bonilla_santiago@hotmail.com

Director: Ing. VÍCTOR HUGO HIDALGO DSc.
victor.hidalgo@epn.edu.ec

Quito, noviembre 2019

CERTIFICACIÓN

Como director del trabajo de titulación ESTUDIO PROSPECTIVO Y DE GESTIÓN DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS MULTIFÁSICAS DEL BLOQUE 31 DE PETROAMAZONAS E.P. desarrollado por Oswaldo Santiago Bonilla Báez, estudiante de la MAESTRÍA EN GESTIÓN PARA LA EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO, habiendo supervisado la realización de este trabajo y realizado las correcciones correspondientes, doy por aprobada la redacción final del documento escrito para que prosiga con los trámites correspondientes a la sustentación de la Defensa oral.

Ing. Víctor Hugo Hidalgo, DSc.

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Oswaldo Santiago Bonilla Báez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Oswaldo Santiago Bonilla Báez

DEDICATORIA

A mi esposa e hijos,
por no dejarme caer.

Santiago

AGRADECIMIENTO

A la ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL por el valioso conocimiento que comparten con sus estudiantes, en especial al Ing. Víctor Hugo Hidalgo por su dirección al presente trabajo de titulación.

Al personal de Petroamazonas E.P. por su apertura con la información referente al presente estudio.

A Oswaldo y Medardo por el ejemplo y Alejandro, Martín y Lucas por asimilar.

A Dios por el balance adecuado.

Santiago

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA ii
DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTO iv
ÍNDICE DE CONTENIDO v
LISTA DE ECUACIONES vii
LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE GRAFICAS ix
LISTA DE TABLAS x
LISTA DE ANEXOS xi
RESUMEN xii
ABSTRACT xiii

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 1
1.2. OBJETIVO GENERAL 1
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2
1.4. ALCANCE 2
1.5. MARCO TEÓRICO 2
1.5.1. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO 3
1.5.2. PRINCIPIOS DEL DIMENSIONAMIENTO 5
1.5.3. PARÁMETROS DE SELECCIÓN 6
1.5.4. CURVAS CARACTERÍSTICAS 6
1.5.5. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA ÚTIL EN BOMBAS 7
1.5.6. PETROAMAZONAS BLOQUE 31 APAIKA. 8
2. METODOLOGÍA 9
2.1. ESTRATEGIA METODOLÓGICA 9
2.2. MONITOREO DE DATOS 10
2.3. UNIFICACIÓN DE DATOS 12
2.4. DIAGRAMA DE PARETO 15
2.5. ANÁLISIS DE POTENCIA 17

2.6. ANÁLISIS DE VIBRACIONES Y TEMPERATURA 18
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 22
3.1. VERIFICACIÓN DEL PRI Y POTENCIA SUGERIDA 22
3.2. PROSPECCIÓN Y PROYECCIÓN 23
3.3. GESTIÓN DE RECURSOS 24
4. CONCLUSIONES 26
4.1. TRABAJOS FUTUROS 28
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 29
ANEXOS 30

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1.1……..5
Ecuación 1.2……..5
Ecuación 1.3……..5
Ecuación 1.4……..5
Ecuación 1.5……..5

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquematización de instalaciones sin y con bombeo multifásico 3
Figura 1.2 Grafico de compresión por tornillos 4
Figura 1.3 Distribución de presiones. 4
Figura 1.4 Grafico de compresión por tornillos 5
Figura 1.5 Curvas características de las bombas multifásicas 7
Figura 1.6 Análisis de ciclo de vida útil. 8
Figura 2.1 Metodología de desarrollo para el Estudio Prospectivo 9
Figura 2.2 Datos de operación del skid conjunto de bombeo 10
Figura 2.3 Datos de operación de las bombas 11
Figura 2.4 Datos de condiciones de mantenimiento de las bombas 12
Figura 2.5 Formato de datos de operación y mantenimiento para el monitoreo de las bombas 14
Figura 3.1 Fotografías de desgaste por erosión. 22

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 2.1 Diagramas de Pareto.....16
Grafica 2.2 Gráficos de tasa de Presión PRI.....18
Grafica 2.3 Gráficos de vibraciones de la bomba.....19
Grafica 2.4 Gráficos de temperatura de los rodamientos de la bomba 2015, 2016 y 2017 20
Grafica 2.5 Gráficos de temperatura de los rodamientos del motor 2015, 2016 y 2017 ...21

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 PRI vs Repeticiones de los 3 años de análisis. 23
Tabla 3.2 Caudal de Bombeo del Bloque 31 24
Tabla 3.3 Análisis Económico de bombas multifásicas 26

LISTA DE ANEXOS

Anexo I - Resumen Ejecutivo Bloque 31. 31

RESUMEN

Este trabajo de Maestría se desarrolló con la intención de mejorar la gestión de recursos mediante un estudio prospectivo en las condiciones de operación y mantenimiento de las bombas multifásicas utilizadas en los campos petroleros del Ecuador. Las bombas multifásicas son utilizadas en campos petroleros donde se requiere minimizar el equipamiento superficial para utilizar la menor área posible, en el Ecuador debido a la ubicación geográfica de los pozos en reservas o áreas protegidas se vuelve una necesidad el realizar un estudio de estas bombas ya que se requiere minimizar el impacto ambiental. Por otro lado, la carencia del fluido eléctrico por la ubicación de los pozos impulsa a realizar el análisis de las bombas multifásicas ya que estas son desarrolladas, fabricadas y probadas en condiciones ideales las cuales difieren de las condiciones particulares o locales de los campos petroleros del Ecuador. Con los resultados de la evaluación en las condiciones de operación y mantenimiento se determinó el mejor punto de operación donde las bombas multifásicas aportan mejor transferencia de energía y su consumo energético es óptimo, este resultado es contrastado con los mantenimientos mayores realizados durante el periodo de evaluación, así mismo se compararon con los datos de vibraciones y temperatura de la bomba y el motor. Finalmente se estableció y proyecto económicamente el punto de operación comparando los resultados con sus respectivos TIR, VAN e IVAN de cada escenario.

Palabras clave: Bombas Multifásicas, Campos Petroleros del Ecuador, Estudio Prospectivo, Gestión de Recursos.

ABSTRACT

This project work was developed with the intention of improving resource management through a prospective study on the operation and maintenance conditions of the multiphase pumps used in the oil fields of Ecuador. Multiphase pumps are used in oil fields for the requirement of minimizing the surface equipment and therefore use the smallest possible area, in Ecuador due to the geographical location of the wells in reserves or protected areas, it becomes a necessity to carry out a study of these pumps since it is required to minimize the environmental impact. On the other hand, the lack of electricity due to the location of these wells prompted us to carry out an analysis of the multiphase pumps, since these pumps are developed, manufactured and tested in ideal conditions which differ from the particular or local conditions of the oil fields of Ecuador. With the results of the evaluation on the operations and maintenance conditions, the best point of operation was determined where multiphase pumps provide a better energy transfer and their optimal energy consumption, this result is contrasted with the major maintenance performed during the evaluation period, likewise they were compared with the vibration and temperature data of the pump and the motor. Finally, the operating point was established and economically comparing the results with their respective IRR, NPV and INPV of each scenario.

Keywords: Ecuadorian Oil Fields, Multiphase Pumps, Prospective Study, Resource Management.

1. INTRODUCCIÓN

El bombeo multifásico es una alternativa utilizada en distintos campos petroleros del mundo debido a sus ventajas como el incremento en la producción (Dal Porto & Larson, 1997), disminución de facilidades, reducción de costos en operación y mantenimiento, reducción de la quema del gas en mechero y mayor vida útil de los pozos (Reyes, 2017).

Su funcionamiento básicamente es la transferencia de energía al fluido sin estabilizarlo para transportar crudo, agua de formación, gas y en ocasiones arena por un solo medio, de esta manera se disminuye la presión de cabeza del pozo y se incrementa la producción total (Reyes, 2017).

Las pruebas de desempeño a las que son sometidas las bombas luego de su fabricación son con una mezcla de agua/aire hasta una fracción del 95% (Neumann, 1991), para posterior realizar la prueba en cierto campo petróleo. Estas pruebas de desempeño difieren de las condiciones locales que tenemos en los campos petroleros del Ecuador y específicamente del bloque 31 operado por Petroamazonas E.P.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene por objetivo analizar prospectivamente las condiciones de operación para mejora de la gestión de los recursos económicos del campo Apaika del Bloque 31 de Petroamazonas E.P. analizando las particularidades que tiene la operación de las bombas multifásicas, para así determinar el mejor punto de operación posible donde el consumo energético sea el más optimo, de la misma manera se analiza las condiciones de vibración, temperatura y los desgastes o mantenimientos mayores que han tenido las bombas dentro de cierto periodo de tiempo. Finalmente se coloca escenarios de flujos para así soportar la sugerencia de operación.

1.1. Pregunta de investigación

¿Es posible mejorar la operación de las bombas multifásicas para optimizar los recursos del Bloque 31?

1.2. Objetivo general

Realizar un estudio de gestión mediante la prospección y determinación de la mejora en condiciones de funcionamiento y mantenimiento de las bombas multifásicas, favoreciendo

un consumo óptimo de energía y mejorando la administración y gestión de recursos económicos en el Bloque 31 de Petroamazonas E.P.

1.3. Objetivos específicos

- Determinar los datos de operación y mantenimiento como línea base en la prospección y mejora de gestión.
- Desarrollar escenarios prospectivos y de gestión que influyen en la operación y mantenimiento de las bombas multifásicas.
- Establecer los parámetros que inciden en la gestión del recurso económico de las bombas.
- Determinar qué escenario presenta las mejores condiciones para manejo de los recursos.
- Evaluar económicamente el óptimo funcionamiento de las bombas multifásicas.
- Desarrollar recomendaciones en base al estudio prospectivo.

1.4. Alcance

El estudio prospectivo abarcará el análisis de información operacional y de mantenimiento de las bombas multifásicas a partir del año 2015 hasta el año 2017 como años base y se realizará una proyección con escenarios a futuro, para la gestión y mejora de los recursos.

1.5. Marco Teórico

El bombeo multifásico es la transferencia de energía al fluido que está compuesto por crudo, agua de formación, gas asociado y en ocasiones acompañado por arena de la formación.

Las principales ventajas del bombeo multifásico son:

- Reducción de Instalaciones
- Reducción de Costos de Operación y Mantenimiento
- Reducción de Quema de gas
- Aumento de la Vida útil del pozo.

En la Figura 1.1 (Bornemann Pumps, 2017) se pueden apreciar parte de las ventajas descritas.

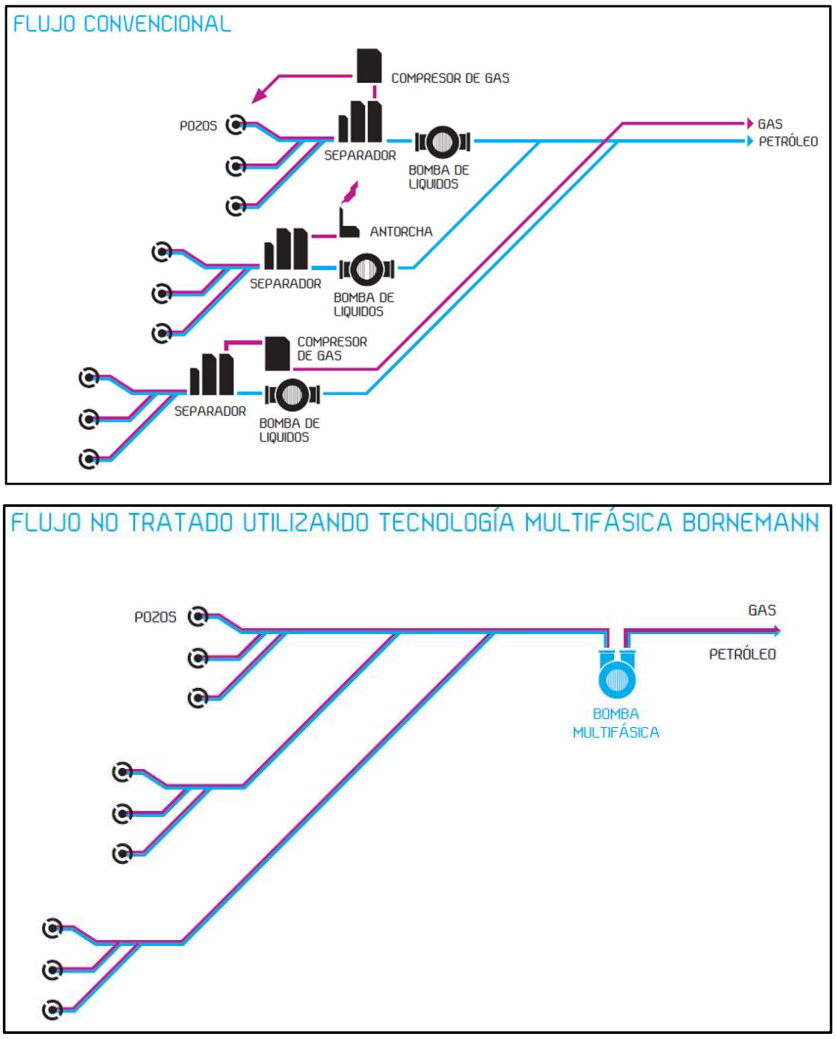


Figura 1.1 Esquematización de instalaciones sin y con bombeo multifásico
(Fuente: (Bornemann Pumps, 2017))

1.5.1. Principios de Funcionamiento

Los principales componentes internos de una bomba multifásica son:

- Carcaza
- Camisas
- Tornillos
- Ejes
- Engranajes
- Sellos Mecánicos

El fluido ingresa por la brida de admisión a la carcaza para luego pasar a la camisa y gracias al movimiento del eje que transmite potencia a los tornillos comienza el desplazamiento positivo del fluido y compresión del gas como se muestra en la Figura 1.2 (Introducción al Bombeo Multifásico, 2016).

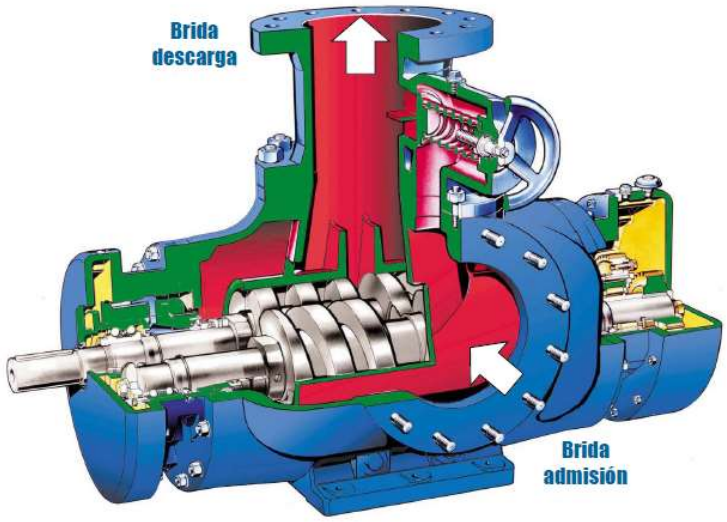


Figura 1.2 Grafico de compresión por tornillos
(Fuente: (Introducción al Bombeo Multifásico, 2016))

El fluido incrementa de presión por el desplazamiento positivo otorgado por los tornillos, de la misma manera el gas va comprimiéndose hacia la zona céntrica de los tornillos donde la presión es mayor como se muestra en la Figura 1.3 (Vetter, et al., 2000). Por consecuencia la distribución de presión no será lineal comparado cuando es en una sola fase como se muestra en la Figura 1.4 (Vetter, et al., 2000).

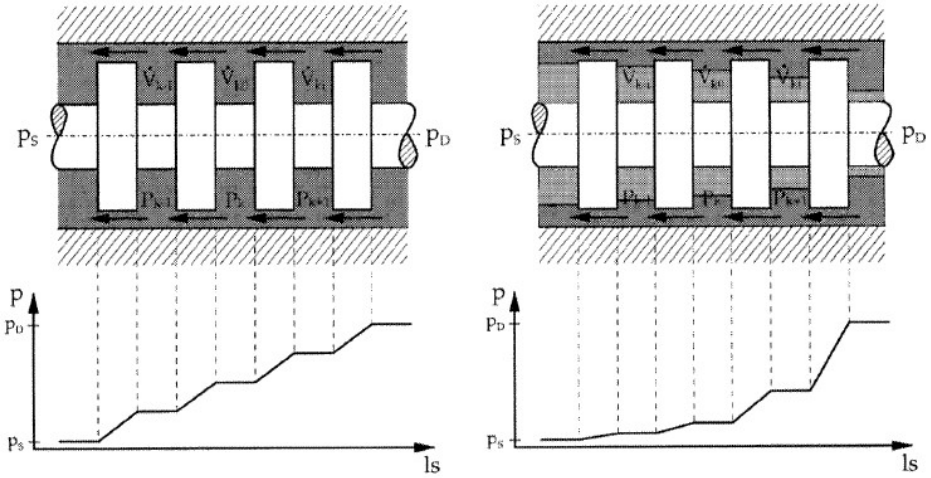


Figura 1.3 Distribución de presiones.
(Fuente: (Vetter, et al., 2000))

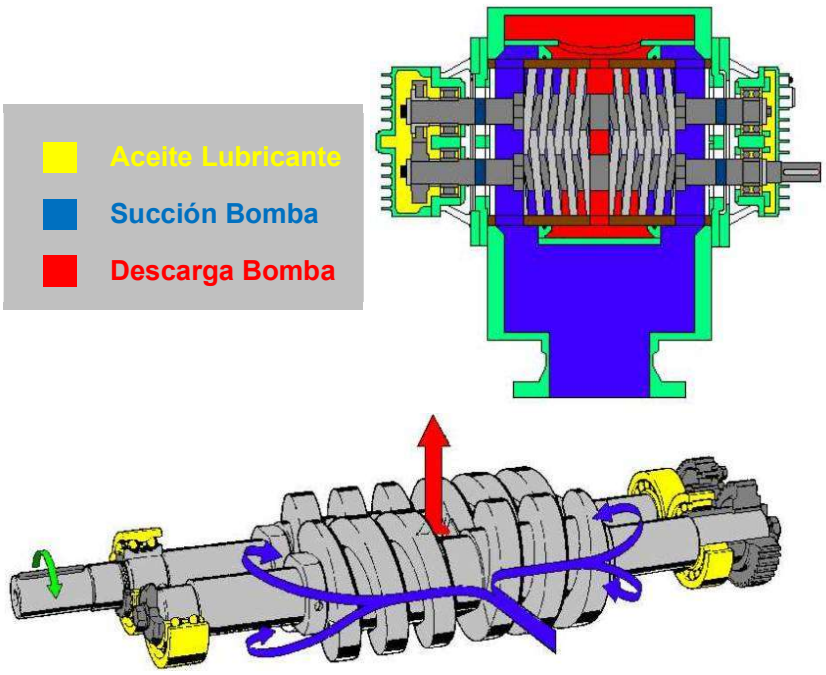


Figura 1.4 Grafico de compresión por tornillos
(Fuente: (Reyes, 2017))

1.5.2. Principios del Dimensionamiento

Los parámetros para el dimensionamiento de las bombas multifásicas son:

Caudal de la Mezcla: $$\boldsymbol{Q_{mix} = Q_{crudo} + Q_{agua} + Q_{gas-ad}}$$ Ecuación 1.1

Gas en condiciones de Admisión:

$$\boldsymbol{Q_{gas-ad} = Q_{gas-std} \times \frac{p_{std}}{p_1} \times \frac{T_1}{T_{std}} = Q_{std} \frac{1.013bar}{p_1} \times \frac{T_1}{288K}}$$ Ecuación 1.2

Fracción de Volumen del Gas: $$\boldsymbol{GVF = \frac{Q_{gas-ad}}{Q_{mix}}}$$ Ecuación 1.3

Relación Gas-Petróleo: $$\boldsymbol{GOR = \frac{Q_{gas-std}\,[scfd]}{Q_{crudo}\,[bpd]}}$$ Ecuación 1.4

Relación de compresión: $$\boldsymbol{\varphi = \frac{p_2}{p_1}}$$ Ecuación 1.5

Donde: $p_1 = Presión\ de\ Admisión$

$p_2 = Presión\ de\ Descarga$

$p_{std} = Presión\ estandar = 1.013bar$

$T_1 = Temperatura\ de\ Admisión$

$T_{std} = Temperatura\ estandar = 15°C\ (288K)$

$Q_{gas-std} = Caudal\ de\ gas\ en\ condiciones\ estandar\ de\ p\ y\ T$

Las condiciones del proceso como Q_{mix}, GFV y φ definen el tamaño del equipo, pero existen otros parámetros que también deben ser evaluados como Máxima Temperatura Admisible de Descarga, así como la Viscosidad del crudo.

Finalmente, también es importante la agresividad química del fluido, así como la cantidad y diámetro de sólidos (Introducción al Bombeo Multifásico, 2016).

1.5.3. Parámetros de Selección

Uno de los principales parámetros de selección es el costo, el cual abarca 4 factores decisivos como la adquisición del equipo, instalación, operación, mantenimiento y servicio.

La adquisición está relacionada principalmente con el dimensionamiento del equipo como se citó en el punto anterior éste a su vez está determinado por las presiones, temperaturas y caudales.

Los costos asociados con la instalación son toda la infraestructura necesaria para el montaje de las bombas como las bases de cimentación y cobertizos, por otro lado, se debe considerar también los accesorios y protecciones de las bombas donde necesitan de ciertos requerimientos como de fluido neumático y la accesibilidad a la energía eléctrica.

El costo relacionado con la operación está asociado con el consumo energético, eficiencia, consumibles y su confiabilidad.

El mantenimiento y servicio está relacionado con la facilidad de reparación, frecuencia en servicio, disponibilidad de repuestos y cercanía del servicio técnico.

1.5.4. Curvas Características

Las curvas características de las bombas multifásicas están representadas por el caudal y la potencia en función del diferencial de presión; un ejemplo es mostrado en la Figura 1.5 (Linck, 2010).

El caudal no tiene mayor diferencia a medida que el diferencial de presión se incrementa, no obstante, cuando se incrementa el diferencial de presión la potencia requerida es mayor.

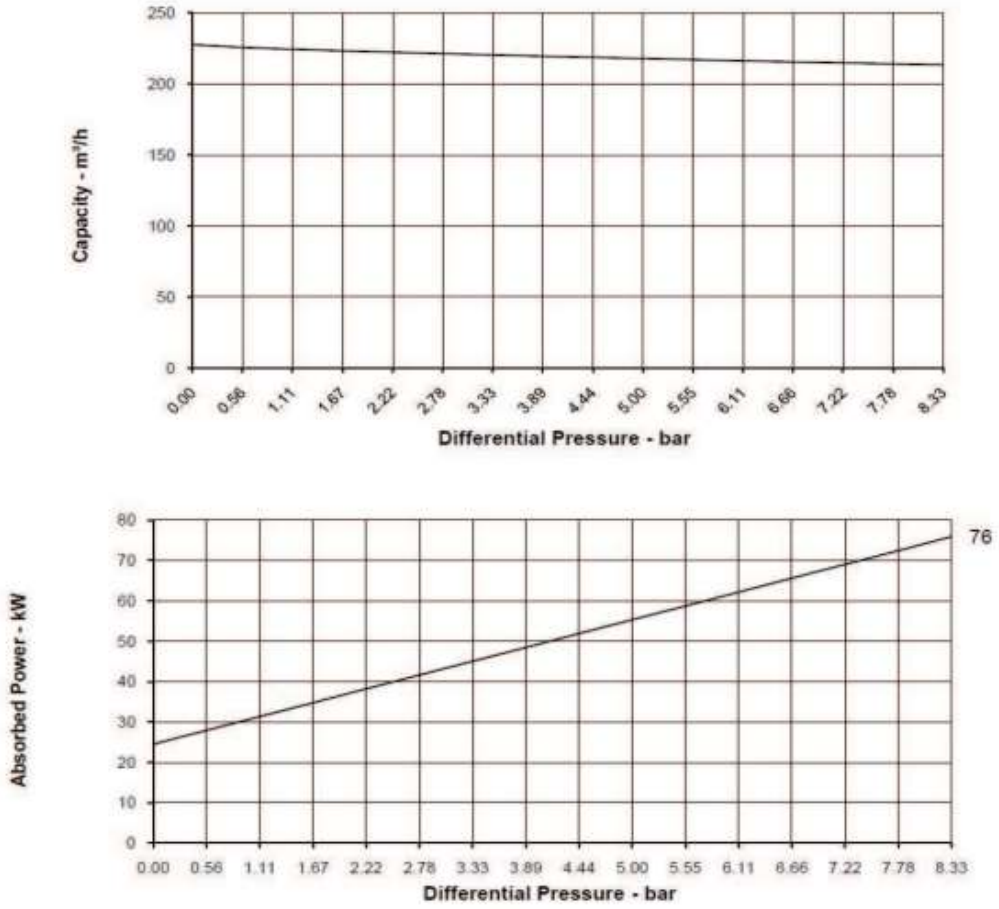


Figura 1.5 Curvas características de las bombas multifásicas
(Fuente: (Linck, 2010))

1.5.5. Análisis del Ciclo de vida útil en bombas

El análisis de ciclo de vida útil es una herramienta de gestión que ayuda a las compañías a minimizar el desperdicio y a maximizar la eficiencia energética para muchos sistemas, incluidos los sistemas de bombeo. De hecho, un completo entendimiento de todas las contribuciones que componen el costo total de un sistema a lo largo de su vida útil proporcionará una oportunidad para reducir drásticamente la energía, operaciones y costos de mantenimiento lo que conlleva a importantes beneficios (How to Calculate Life Cycle Costs and payback times: An example, 2017).

Como se muestra en la Figura 1.6 (How to Calculate Life Cycle Costs and payback times: An example, 2017), alrededor del 83% del costo total de vida útil de un sistema de bombeo están involucrados aspectos como Consumo de Energía, Mantenimiento, Operación, Costo Ambiental y Paras Inesperadas. Realizando un análisis más profundo de este costo de vida

útil el Consumo Energético llega al 45% mientras que el mantenimiento al 25%; sin duda son dos aspectos que se deben focalizar ya que representan gran parte del costo total en sistemas de bombeo.

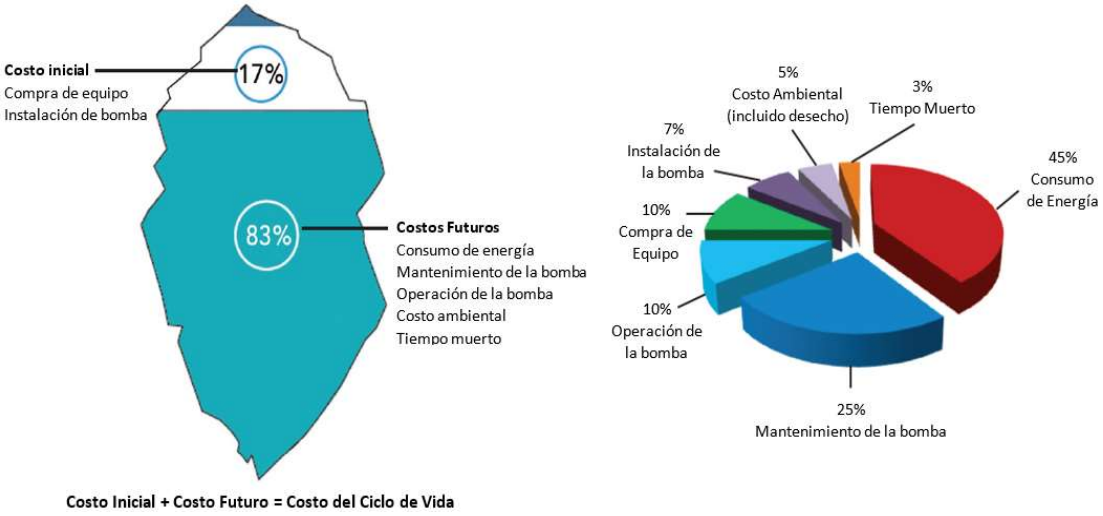


Figura 1.6 Análisis de ciclo de vida útil.
(Fuente: (How to Calculate Life Cycle Costs and payback times: An example, 2017))

1.5.6. Petroamazonas Bloque 31 Apaika.

El campo Apaika se localiza dentro del Bloque 31, cantón Aguarico, provincia de Orellana. En el campo Apaika se han perforado 14 pozos y se ha construido una central de bombeo.

En la central de bombeo se han instalado 3 bombas multifásicas. En la actualidad, se encuentran operativas 2 bombas, de las cuales una de ellas tiene afectada significativamente su eficiencia por desgaste de sus tornillos. La tercera bomba no es operativa por falta de repuestos de mantenimiento; para mayor detalle ver Anexo I.

2. METODOLOGÍA

Mediante la metodología de investigación deductiva se observó las causas de las condiciones a las que están sujetas las bombas, con esto se estableció la recolección de datos del 2015 al 2017 para análisis de su contenido. Se realiza un enfoque cuantitativo donde se determina la inferencia de los datos entre sí para obtener conclusiones. Posteriormente pasamos a la fase explicativa de la investigación descubriendo las causas que originaron las condiciones de operación y mantenimientos para finalmente proponer una mejora de gestión de recursos mediante el estudio prospectivo y proyección de las condiciones de operación y mantenimientos de las bombas multifásicas del Bloque 31 de Petroamazonas E.P.

2.1. Estrategia Metodológica

La metodología que permite proponer la mejora de gestión de los recursos en el Bloque 31 de Petroamazonas E.P., se muestra en la Figura 2.1.

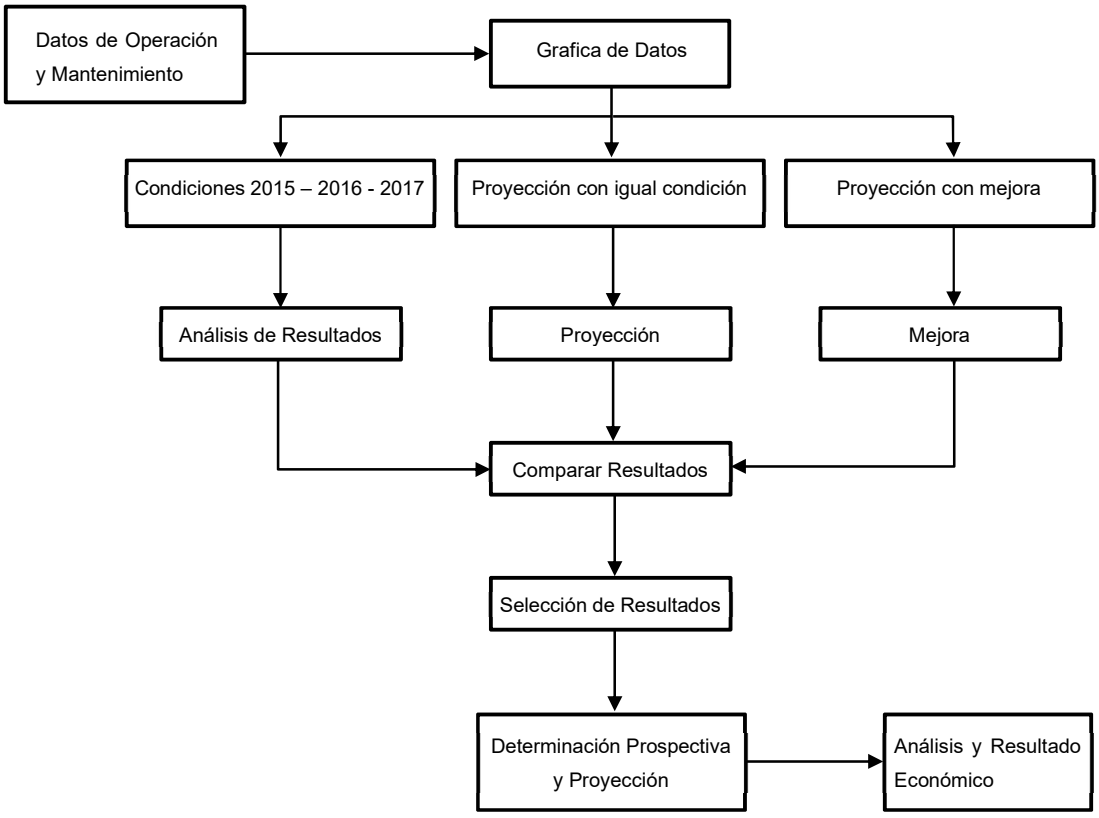


Figura 2.1 Metodología de desarrollo para el Estudio Prospectivo
(Fuente: Bonilla, 2019)

Esta metodología se realiza primeramente evaluando y discretizando los datos relevantes de operación y mantenimiento para graficarlos y entender su comportamiento, así también se puede identificar su interferencia y relación entre ellos. Se evidencia el resultado en los años 2015, 2016 y 2017 y su comportamiento global en todo el periodo de análisis y la proyección en las mismas condiciones, como segunda opción la operación con el valor más común es proyectada en el mismo periodo. Como tercera y última opción la condición sugerida en base al estudio de operación de proyección con mejora es plasmada en el mismo periodo de análisis. Finalmente se realiza el estudio prospectivo comparando todos los resultados y se sugiere el más adecuado, de la misma manera todos estos resultados son evaluados económicamente para sugerir la mejora en operación, administración y gestión de los recursos en general.

2.2. Monitoreo de Datos

Se analizaron datos de operación y condiciones de mantenimiento de los años 2015, 2016 y 2017, de la que se extrajo información.

En la Figura 2.2 se observar información relevante de las condiciones del conjunto de bombeo, como: apertura de válvulas, presión de entrada en el múltiple PIT-51903, presión diferencial PDI-51903, presiones de salida del conjunto de bombeo PIT-51071 y PIT-51072.

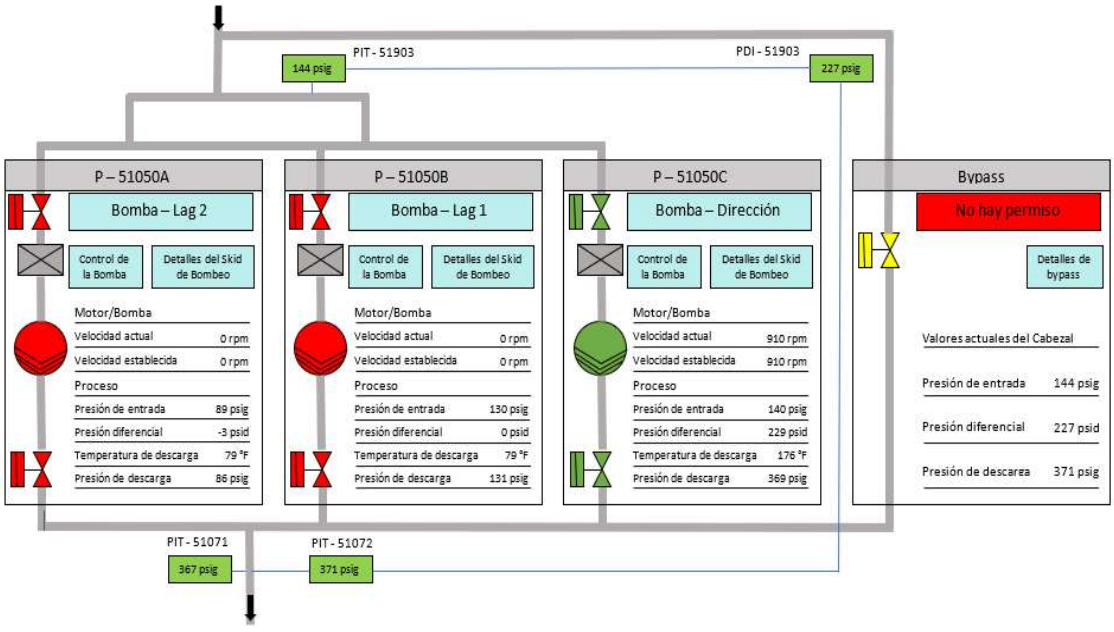


Figura 2.2 Datos de operación del skid conjunto de bombeo
(Fuente: Bonilla, 2019)

En la Figura 2.3 se visualizan las condiciones particulares de la bomba que se encuentra en funcionamiento, estos son: datos de presión diferencial del filtro PDIT-51050, presión de ingreso a la bomba PIT-51051, diferencial de presión PDI-51050, tasa o relación de presión de la bomba PRI-51050, presión de descarga de la bomba PIT-51054, redundancia de presión de descarga PIT-51055. También se monitorean datos al ingreso de la bomba como presión de entrada a la bomba PIT-51052, temperaturas de salida TIT-51053 y su redundancia TIT-51054.

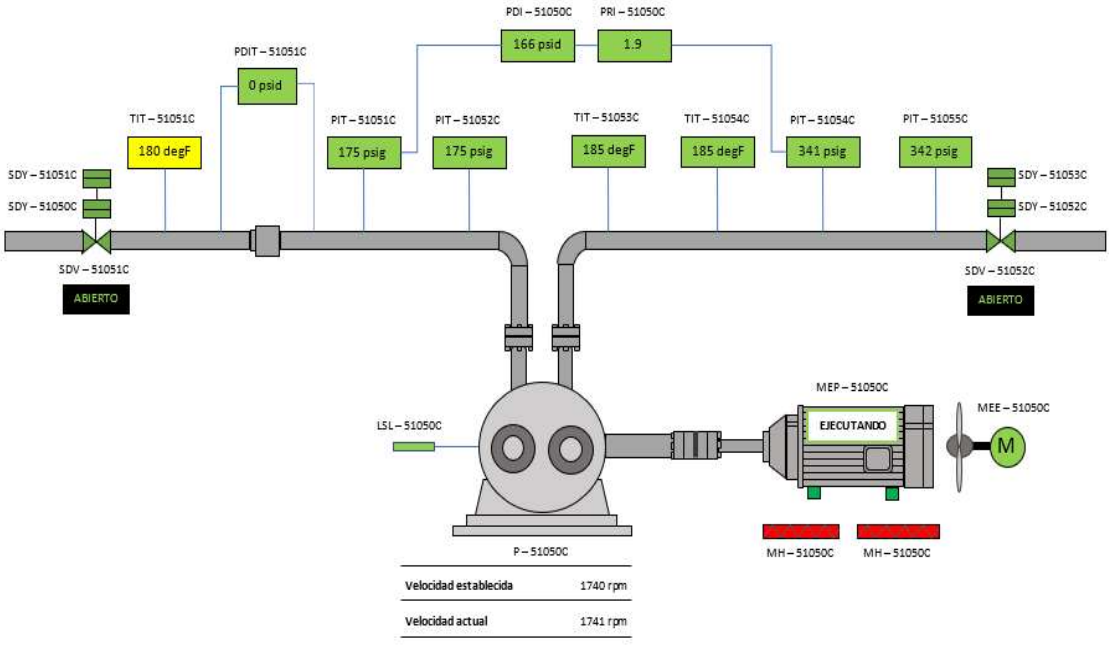


Figura 2.3 Datos de operación de las bombas
(Fuente: Bonilla, 2019)

En la Figura 2.4 se visualizan los datos de las condiciones de mantenimiento tanto de la bomba como el motor que está en funcionamiento, entre ellos están vibraciones de los cojinetes de la bomba VT-51054 y VT-51055, temperatura de los cojinetes de la bomba TE-51056, TE-51057, TE-51058 y TE-51059, temperatura de la carcaza de la bomba TIT-51055. Por el lado del motor se tiene vibraciones de los cojinetes VT-51057 y VT-51058, y temperatura del motor TE-51150 y TE-51250, también dispone de temperatura de los devanados del motor TE-51151, TE-51152 y TE-51153.

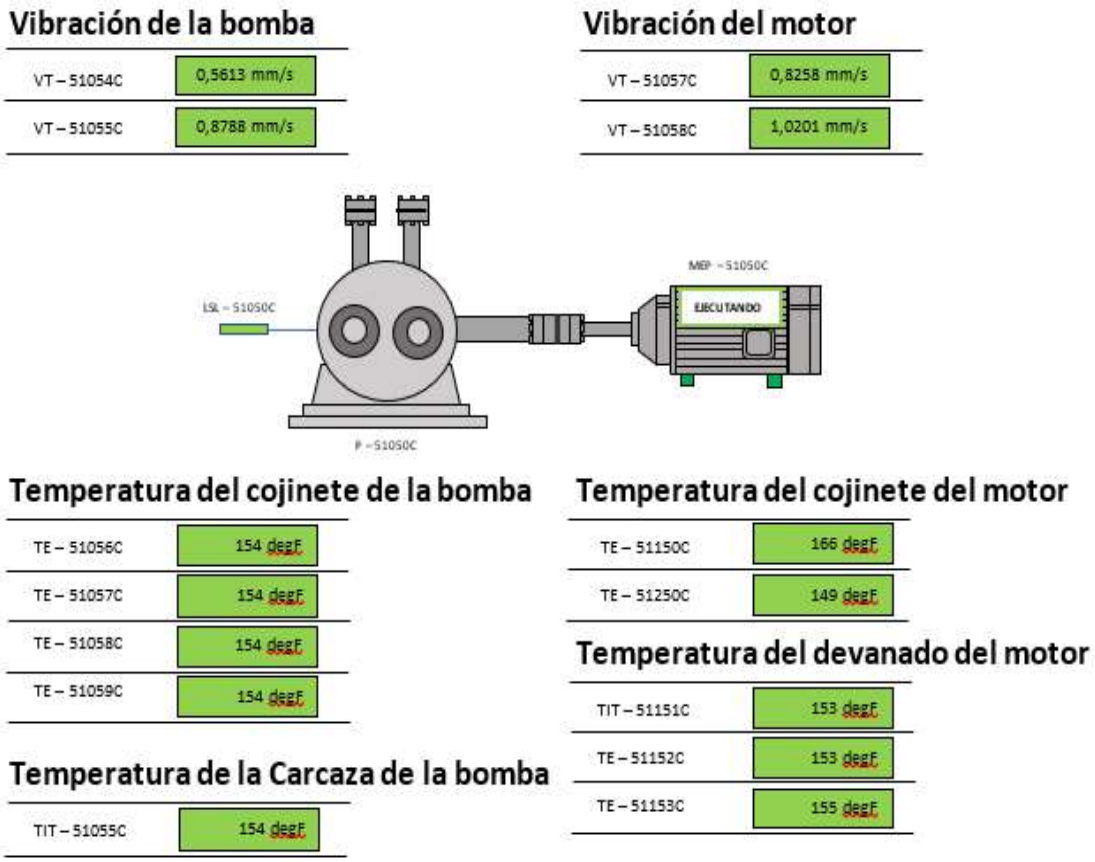


Figura 2.4 Datos de condiciones de mantenimiento de las bombas
(Fuente: Bonilla, 2019)

2.3. Unificación de Datos

Los datos descritos anteriormente se condensan en los membretes de la Figura 2.5. Petroamazonas E.P. facilitó la información de los 365 archivos por cada año de operación de las bombas y dentro de cada archivo están los datos de operación y mantenimiento por cada hora de funcionamiento, contabilizados desde las 05:00 hasta las 04:00 del día siguiente.

Los 365 archivos fueron unificados en un solo archivo por cada año de operación, obteniendo 8760 datos por año para así realizar el análisis de operaciones y condiciones de mantenimiento.

En los días que las bombas no operaban por condiciones de operación o mantenimiento, se indica como valor 0 en cada registro.

Los datos de potencia, relación de presión, vibraciones y temperatura fueron unificados en un solo archivo para poder analizar las condiciones y comportamiento en todo el periodo indicado del 2015 al 2017.

La unificación de datos permite observar e identificar comportamientos de la información del funcionamiento del grupo de bombeo, para posteriormente ver su incidencia en las condiciones de mantenimiento de la bomba en funcionamiento. Todo esto permite sugerir el punto de operación más adecuado para que la gestión del campo Apaika mejore en términos económicos.

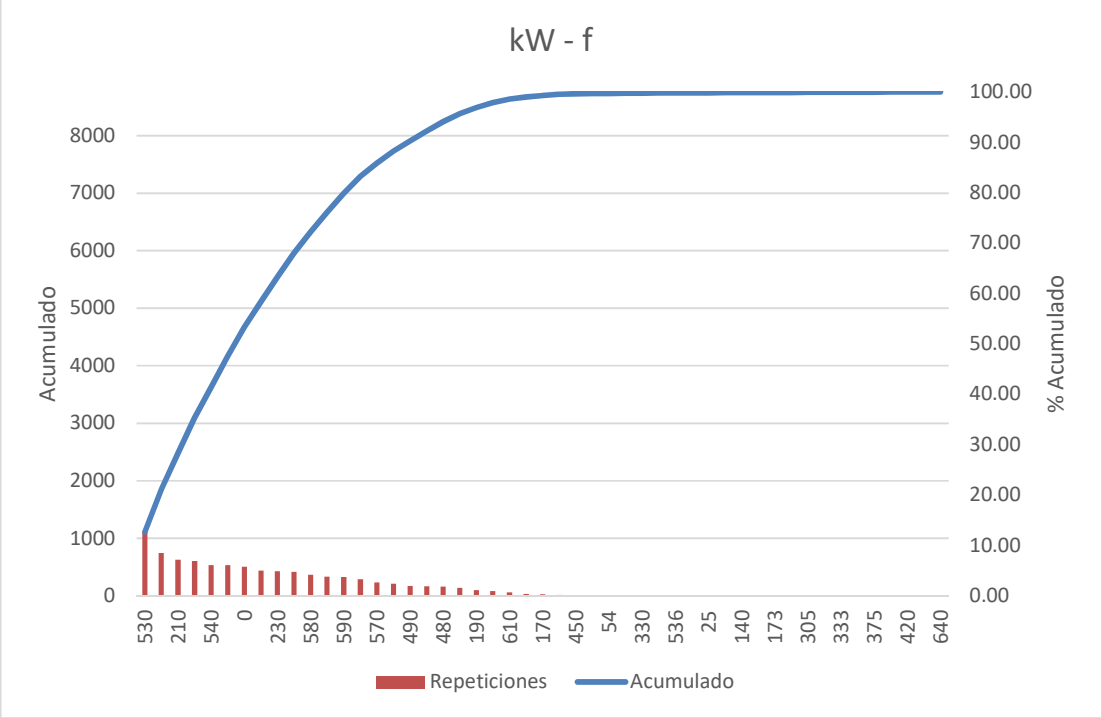
PETROAMAZONAS EP								BOMBEO MULTIFASICO										
				PUMP SKID P-51050A/B/C														
				Horometros	P-51050A	P-51050B	P-51050C											
1-Jan-15					OFF-753 HORAS	OFF-622 HORAS	ON-909 HORAS											
	VALVULA	VALVULA	PIT-51903	PIT-51051A/B/C	PIT-51052A/B/C	TIT-51051A/B/C	PDIT-51050A/B/C	PDI-51050A/B/C	PRI- 51050	PIT-51054A/B/C	PIT-51071	PIT-51072	PIT-51516	TIT-51053A/B/C	TIT-51054A/B/C	PIT-51055A/B/C		
	DE 16"	DE 16"	SUCTION HEADER	SKID	SKID	SKID	SKID	SKID	SKID	SKID	HACIA EL SEPA	HACIA EL SEPA	AIRE INST	SKID	SKID	DISCHARGE HEADER		
			SHUT DOW HH 560	SHUT DOW HH 560	ÀLARM HH 560	ÀLARM.HH 185	ÀLARM.HH 25.0	ÀLARM.HH 25.0	HH 8.5	ÀLARM.HH 1060	ÀLARM.HH 1060	ÀLARM.HH 1060	ÀLARM.HH 160	ÀLARM.HH 200	ÀLARM.HH 200	ÀLARM.HH 1.080		
	Filtro A	Filtro B	ALARMA H 540	ÀLARM H 540	ÀLARM H 560	ÀLARM.H 180	ÀLARM.H 21.5	ÀLARM.H 21.5	H 8.0	ÀLARM.H 1040	ÀLARM.H 1040	ÀLARM.H 1040	ÀLARM.H 150	ÀLARM.H 195		ÀLARM.H		
			ALARMA L 45	ÀLARM L 45	ÀLARM L 45				PRESION RELACION				ÀLARM.L 80		ÀLARM.H			
	Open %	Open%	ALARMA LL 30	SHUT DOW LL 30	ÀLARM LL 30				BOMBA				ÀLARM.LL 70					

RPM	Pump Bearing				Pump Vibration		Motor Bearing		Motor	Motor	Motor	FILTROS	FILTROS	APERTURA DE
	TE-51056A/B/C	TE-51057A/B/C	TE-51058A/B/C	TE-51059A/B/C	VT-51054 A/B/C	VT-51055 A/B/C	TE-51150A/B/C	TE-51250A/B/C				PDIT-51902 A	PDIT-51902 B	VALVULA
	ÀLARM.HH 240	ÀLARM.HH 240	ÀLARM.HH 240	ÀLARM.HH 240	ÀLARM.HH 0.15	ÀLARM.HH 0.15	ÀLARM.HH 221	ÀLARM.HH 221						BY-PASS
	ÀLARM.H 230	ÀLARM.H 230	ÀLARM.H 230	ÀLARM.H 230	ÀLARM.H 0.10	ÀLARM.H 0.10	ÀLARM.H 212	ÀLARM.H 212	KW	AMP.	Voltage	H 1.5	H 1.5	

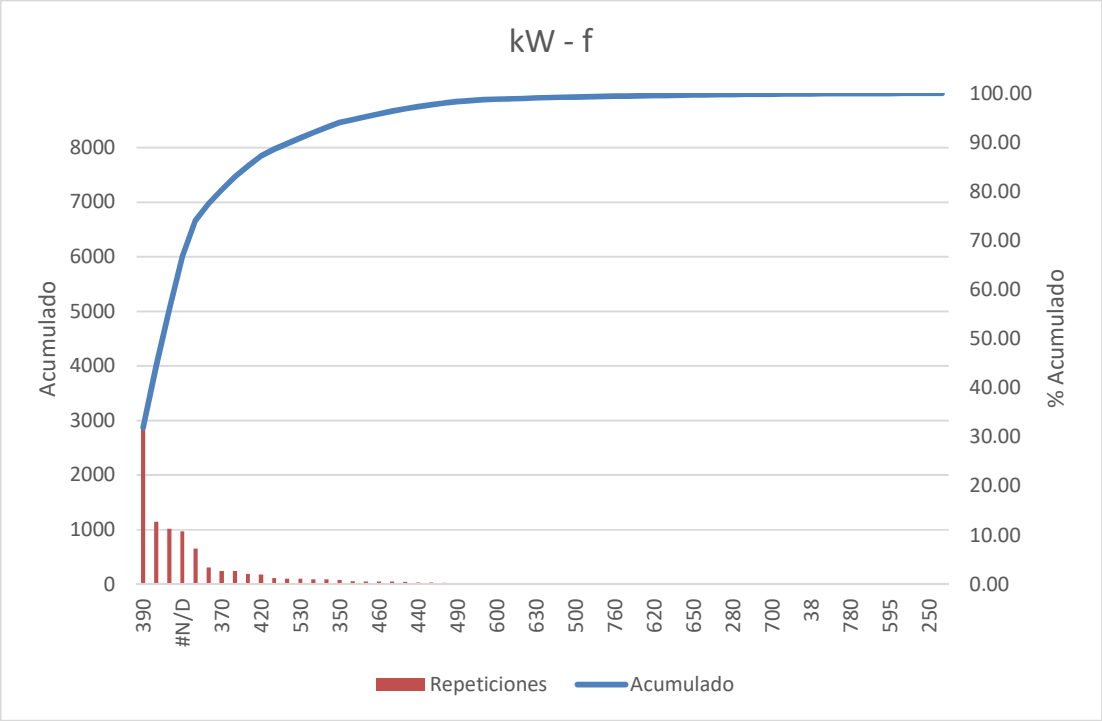
Figura 2.5 Formato de datos de operación y mantenimiento para el monitoreo de las bombas
(Fuente: Petroamazonas E.P., 2018)

2.4. Diagrama de Pareto

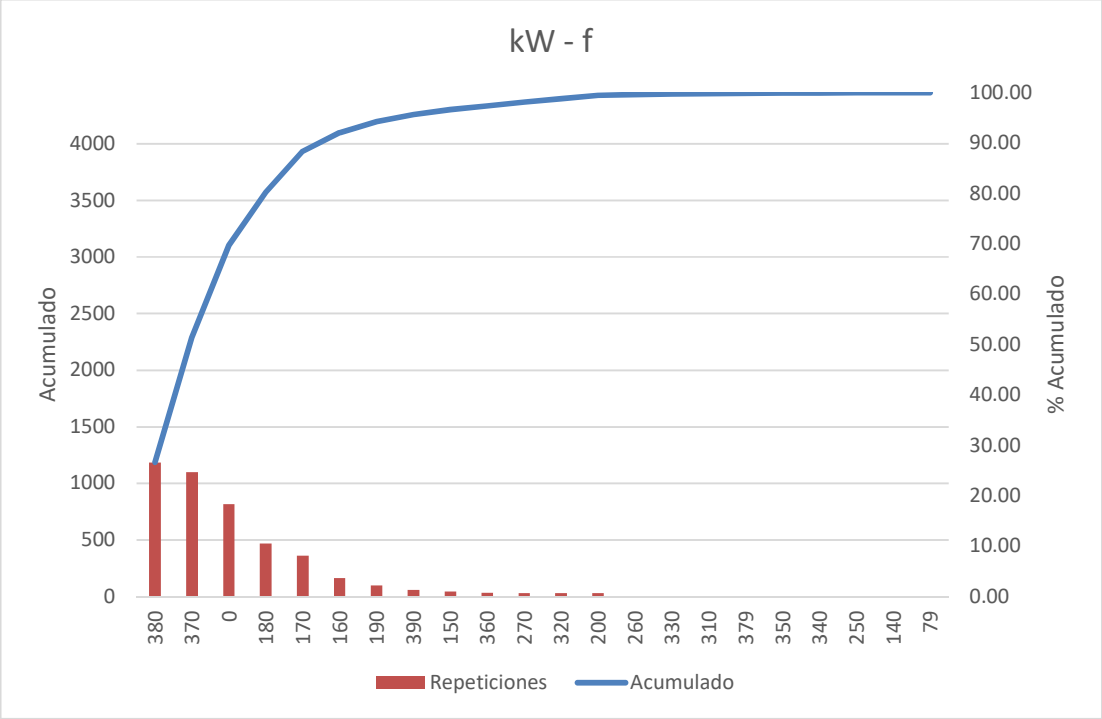
Como el análisis está enfocado en la gestión y mejora de administración del recurso energético-económico, se inicia con el análisis de la potencia, ya que ésta es directamente proporcional con el consumo de energía y obviamente con el costo diario que consumen las bombas en su operación. Para ello se realiza un diagrama de Pareto por cada año de operación para determinar el 20% de la potencia que se ha utilizado en el 80% del tiempo; se obtiene los diagramas a), b) y c) de la Grafica 2.1.



a) potencia vs. frecuencia 2015



b) potencia vs. frecuencia 2016



c) potencia vs. frecuencia 2017

Grafica 2.1 Diagramas de Pareto
(Fuente: Bonilla, 2019)

En el primer diagrama de la Grafica 2.1 a) potencia vs. frecuencia 2015, se observa que el 20% de las potencias que la bomba consume están por alrededor de 500 kW; representa una alta demanda de potencia y, por ende, el consumo energético y económico es elevado.

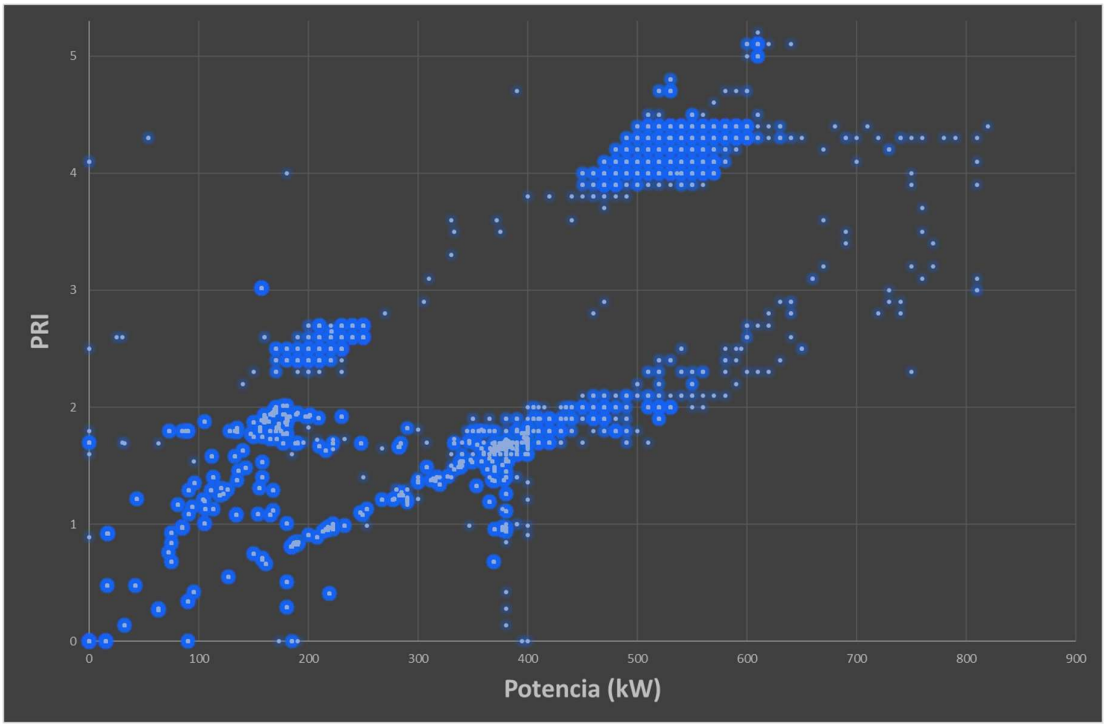
Por otro lado, el diagrama de la Grafica 2.1 b) potencia vs. frecuencia 2016, indica que el 20% de consumo de las bombas es de alrededor 440 kW; no tiene variación significativa respecto al año 2015.

Finalmente, en el diagrama de la Grafica 2.1 c) potencia vs. frecuencia 2017, el 20% de consumo de las bombas está por 250 kW; este consumo es en términos económicos más adecuado, y representaría un ahorro considerable en el recurso económico.

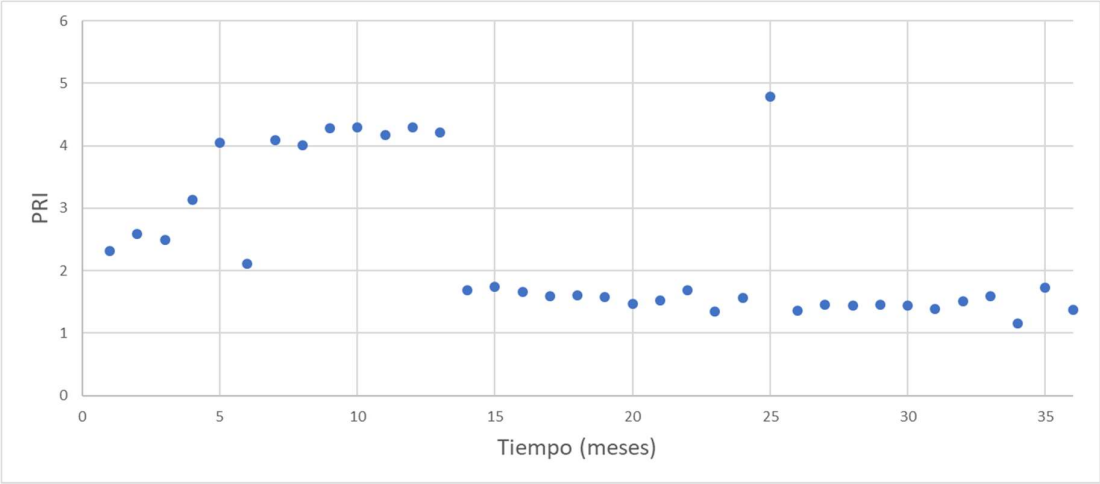
2.5. Análisis de Potencia

Se ingresan en un solo archivo los datos de potencia y la relación de presión de la bomba PRI; generando el Grafico 2.2.

Los gráficos permiten observar la variación de la relación de presión con la potencia, así como el PRI por mes del periodo seleccionado.



a) PRI vs Potencia



b) PRI vs Tiempo

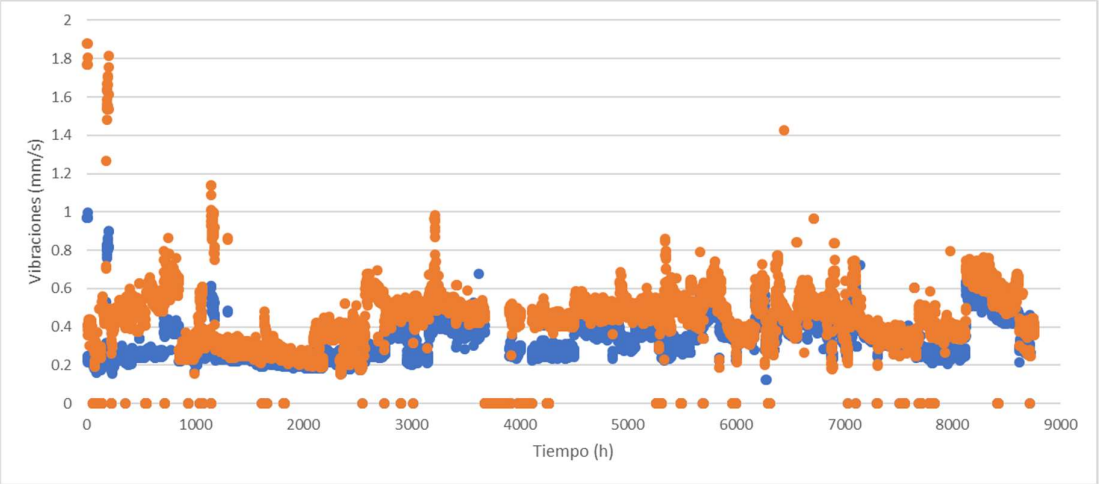
Grafica 2.2 Gráficos de tasa de Presión PRI

(Fuente: Bonilla, 2019)

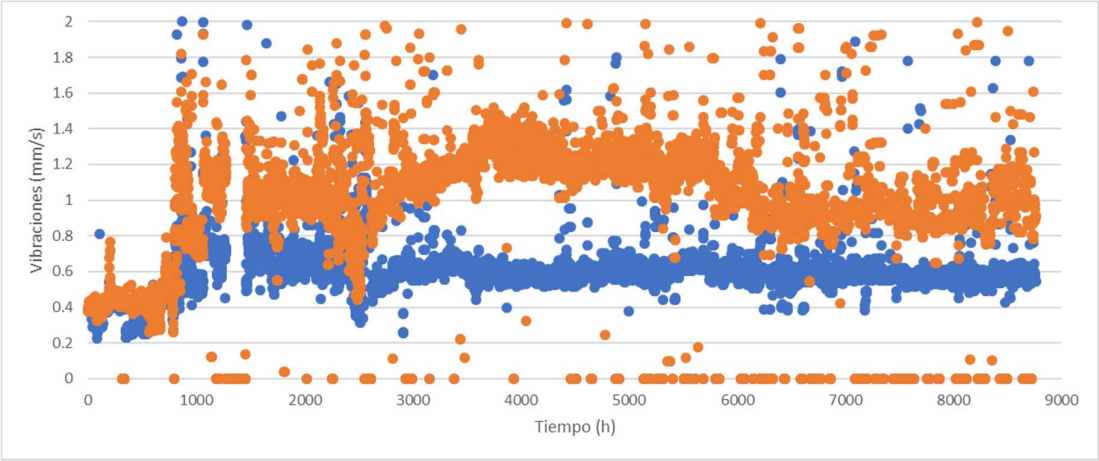
Contrastando con los diagramas de Pareto, se determinan las áreas de interés y la relación de presión más adecuado que implica un consumo de energía óptimo para una mejor administración del recurso energético y económico del Bloque 31.

2.6. Análisis de vibraciones y temperatura

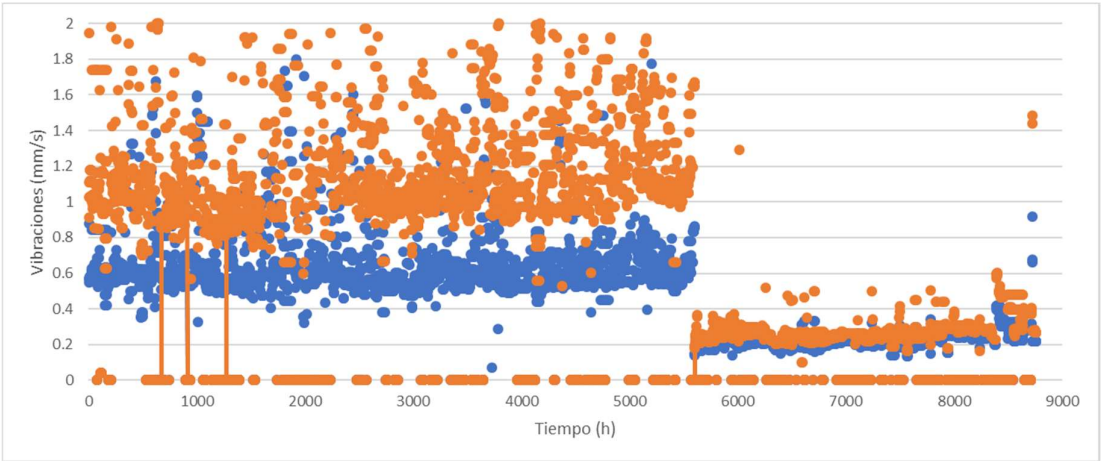
Al unificar los datos y graficar por cada año las vibraciones y temperaturas, se tiene: Grafica 2.3 vibraciones de la bomba; Grafica 2.4 temperatura de los rodamientos de la bomba; y, Grafica 2.5 temperatura de los rodamientos del motor, se puede observar su variación.



a) Vibraciones vs número de horas 2015



b) Vibraciones vs número de horas 2016



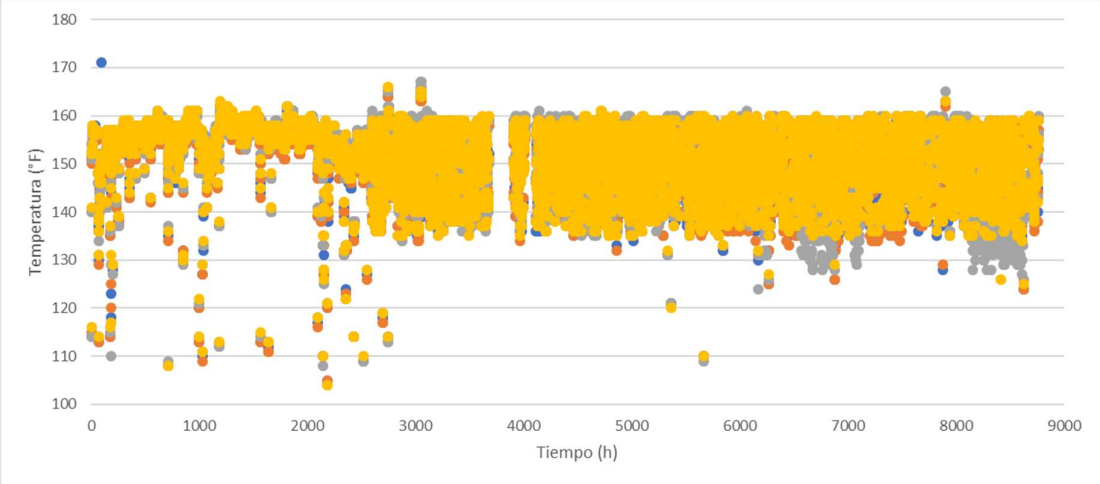
c) Vibraciones vs número de horas 2017

Grafica 2.3 Gráficos de vibraciones de la bomba
(Fuente: Bonilla, 2019)

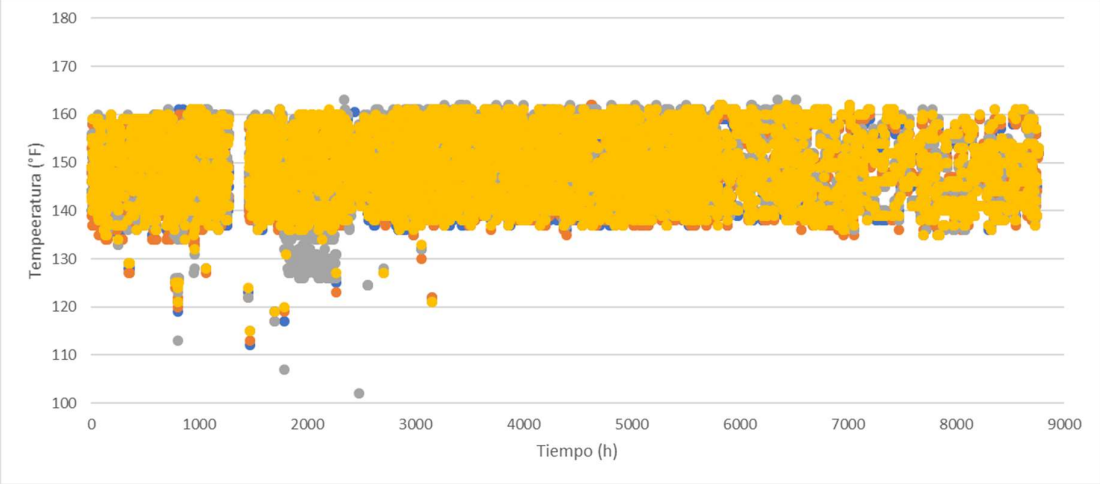
La variación más drástica se observa en la Grafica 2.3 Gráficos de vibraciones c) Vibraciones 2017, ya que ésta concuerda con la operación y el consumo energético de los diagramas anteriores como el de Pareto y el de relación de presión PRI.

Las vibraciones altas indican una condición desfavorable en la operación, así como en el mantenimiento ya que son fugas de energía, y que representan un consumo mayor de potencia, relacionados directamente con el recurso económico que afectan la gestión.

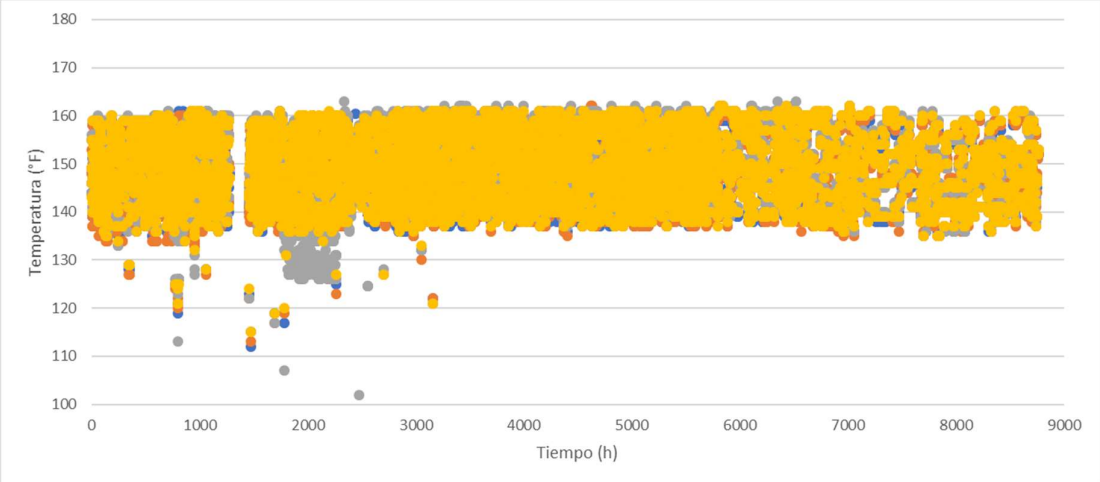
Los gráficos de temperatura de los rodamientos de la bomba plasmados en la Grafica 2.4 no muestran variación ya que no se vieron afectados mayormente por las condiciones de operación anteriormente indicados.



a) Temperaturas vs número de horas 2015

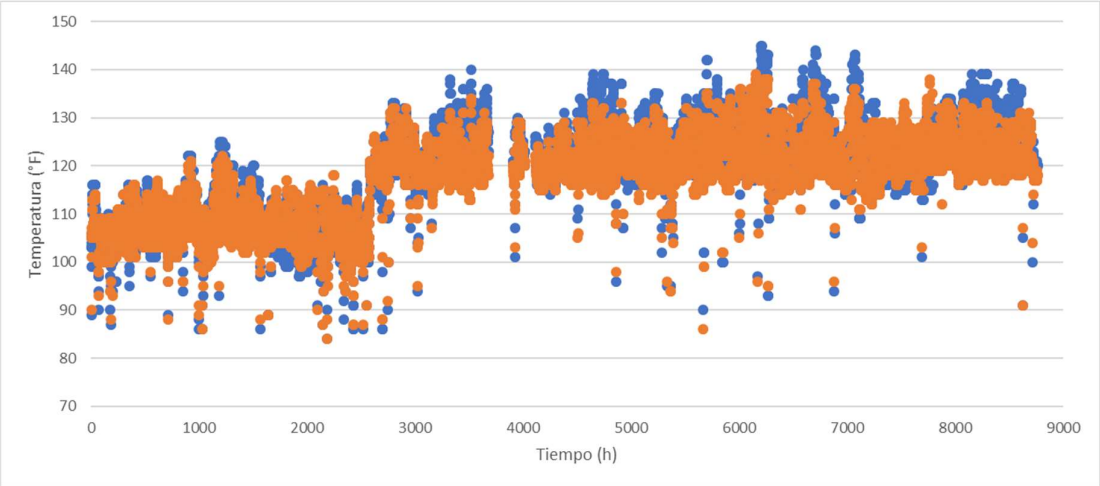


b) Temperaturas vs número de horas 2016

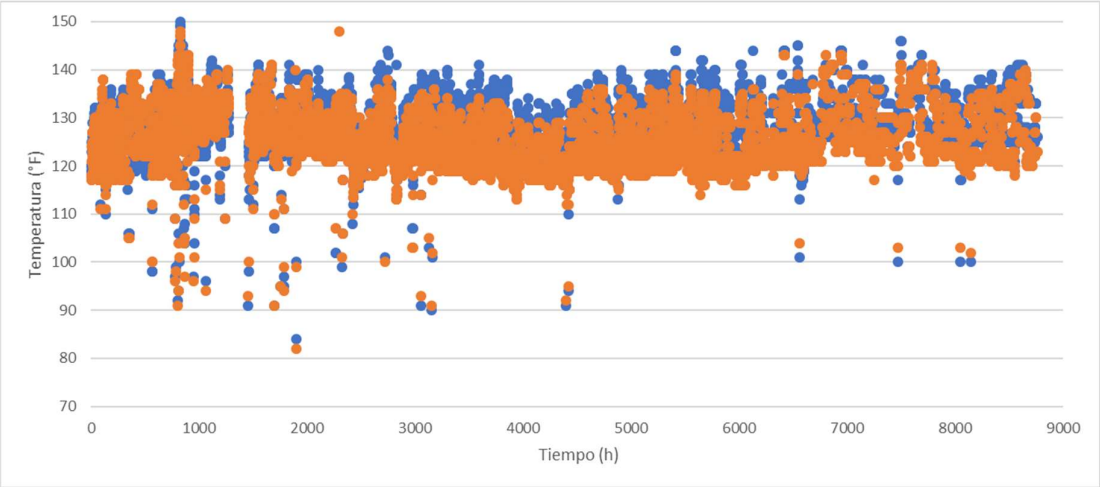


c) Temperaturas vs número de horas 2017

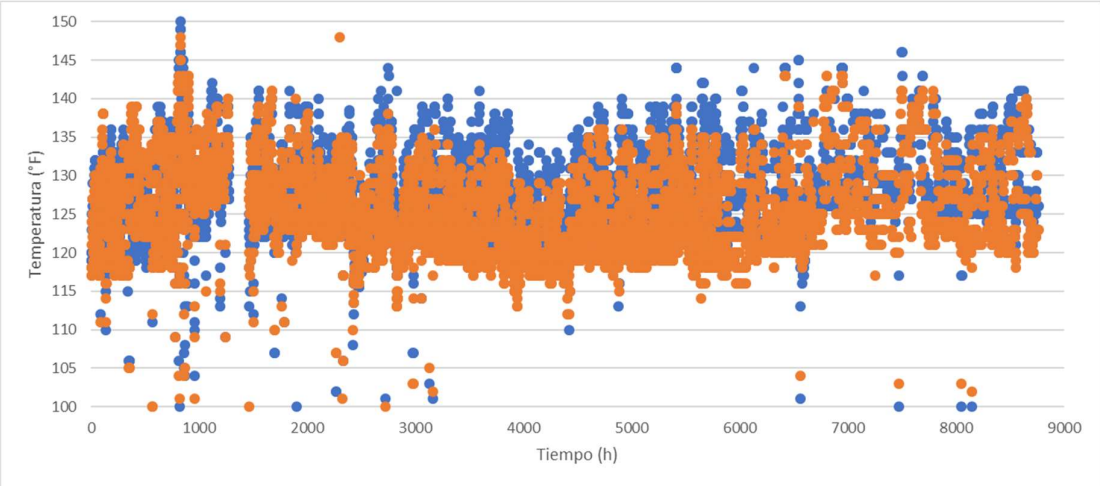
Grafica 2.4 Gráficos de temperatura de los rodamientos de la bomba 2015, 2016 y 2017
(Fuente: Bonilla, 2019)



a) Temperaturas vs número de horas 2015



b) Temperaturas vs número de horas 2016



c) Temperaturas vs número de horas 2017

Grafica 2.5 Gráficos de temperatura de los rodamientos del motor 2015, 2016 y 2017
(Fuente: Bonilla, 2019)

La Grafica 2.5 donde se muestra las temperaturas de los rodamientos del motor, así mismo indica que en el último año bajaron, concordando con las condiciones anteriormente revisadas. Este indicador, al igual que el anterior de vibraciones, indica una fuga y consumo mayor de potencia y energía el cual afecta a la administración del recurso energético del campo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Verificación del PRI y Potencia Sugerida

Al observar el Grafico 2.2 del PRI vs Potencia, se identifica un área de interés, la cual está en la parte superior derecha que tiene alta relación de presión PRI entre 4.3 a 4.5 a un requerimiento de potencia de entre 450 a 600 kW. Contrastando con el grafico del PRI vs Mes se observa que este PRI se obtuvo en el 2015, ocasionando que la bomba tenga mayor vibración ya que su gráfico en dicho periodo de tiempo va en incremento por el alto PRI; incluso deterioro prematuramente los tornillos ya que los bordes presentan un desgaste por erosión, así mismo la camisa que aloja los tornillos presenta similar desgaste, esto se puede observar en la Figura 3.1.

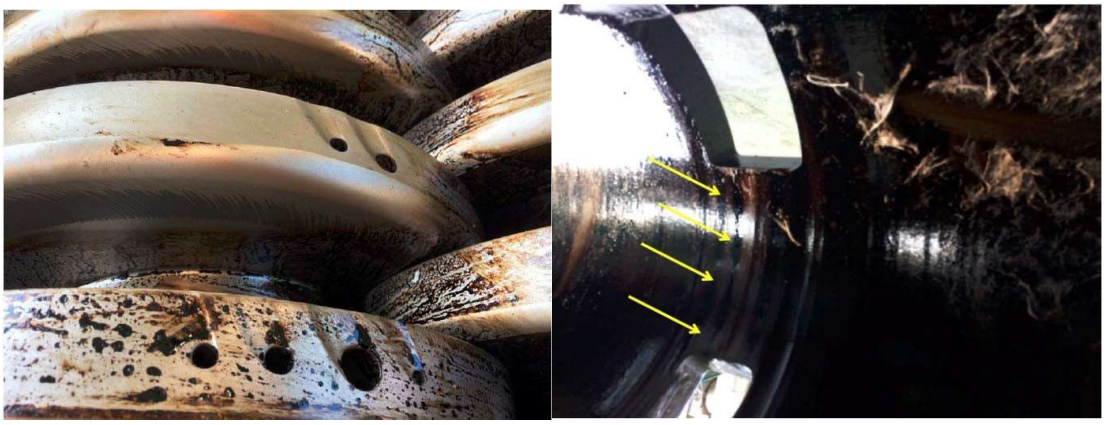


Figura 3.1 Fotografías de desgaste por erosión.
(Fuente: Petroamazonas E.P., 2017)

La siguiente área de interés es la que se encuentra en la parte izquierda con un PRI desde 1.8 hasta 2.6 con un requerimiento de potencia de 180 a 230 kW, esta potencia requerida transfiere de mejor manera la energía al fluido ya que su relación de presión es la más alta a un requerimiento mínimo de energía. Este rango de relación de presión a las potencias indicadas significaría el 20% del PRI en tiempo de trabajo en los tres años de análisis, ya que contabilizando su frecuencia se observa que su valor es de 2600 repeticiones como se muestra en la Tabla 3.1.

Por otro lado, esto también es avalado con las condiciones temperatura y principalmente de vibración analizados en los Gráficos 2.4 y 2.5 del Capítulo 2.6.

Para mejorar la gestión del recurso energético-económico del campo Apaika, la relación de presión de 1.8 hasta 2.6 con un requerimiento de potencia de 180 a 230 kW es la más adecuada.

Tabla 3.1 PRI vs Repeticiones de los 3 años de análisis.

PRI	Repeticiones
1.60	2631
4.30	2087
4.10	1864
1.70	1649
4.40	1293
0.00	1277
2.50	1056
1.80	1021
2.60	911
1.69	768
4.00	731
1.66	624
1.67	600
1.63	535
1.65	456
1.64	384
2.40	364
1.68	336
1.90	324
4.20	301
2.00	294
1.62	240

3.2. Prospección y Proyección

Luego de seleccionar los años de estudio y de obtener los resultados evaluando los parámetros principales de funcionamiento, se realiza el estudio prospectivo en aras de sugerir una operación que ayude a la administración del recurso del Bloque 31. Se analiza así la potencia de cada hora multiplicando por el costo de producción de cada kW – h, obteniendo como resultado el consumo en dólares americanos por cada hora y su

sumatoria proporciona el consumo por año en términos económicos; este valor representa el costo de operación del análisis.

De la misma manera, una vez que se determina que la potencia mayormente utilizada en los años de estudio es de 390 kW, se realiza una sustitución por cada hora de operación; la sumatoria multiplicado por el costo de producción de cada kW - h en el campo determina o establece el costo de operación proyectado.

Finalmente, al saber que la mejor potencia requerida es de 250 kW, se proyecta para cada hora de trabajo y su sumatoria se lo multiplica de igual manera por el costo de producción de cada kW – h; que es el costo de operación proyectado con mejora para el campo Apaika.

3.3. Gestión de Recursos

Se realizó un análisis global y resumido de la gestión con todos los costos de adquisición-instalación, el estudio prospectivo de la operación, mantenimiento y costos de bombeo.

En lo que se refiere al costo de adquisición- instalación, Petroamazonas E.P. informó de los costos involucrados en la adquisición de las bombas, así como todos los costos que se incurrieron en la instalación.

Los costos proyectados en la operación se los suma, así como los costos por mantenimiento; éste último también proporcionado por Petroamazonas E.P.

Finalmente, los costos de bombeo son de acuerdo a la Tabla 3.2, que son la cantidad de crudo que se bombeo en el campo Apaika.

Tabla 3.2 Caudal de Bombeo del Bloque 31

YEAR	OIL	WATER
2014	5158	13226
2015	6834	14761
2016	16674	62181
2017	10619	98358
2018	8460	90129
2019	7212	84224

Se unifica todos los costos para realizar un análisis económico; obteniendo resultados de la Tabla 3.3.

Los únicos valores que cambian en los resultados de análisis económicos son los de Operación de Bombas y Mantenimiento de Bombas.

Condiciones de Análisis, son los resultados de valores que han estado operando las bombas; extendiendo su promedio para los siguientes 3 años se tiene el flujo en la operación, en el costo de mantenimiento es el real invertido. Sus indicadores como VAN, TIR e IVAN son los que han regido la operación del campo.

Proyección con igual Condiciones, es el valor con la potencia mayormente utilizada por las bombas en los 3 años de análisis, de la misma forma su proyección se realiza para los siguientes 3 años, el costo de mantenimiento sería el mismo ya que sigue con las mismas condiciones. Los indicadores del VAN, TIR e IVAN presentan una ligera mejora.

Proyección con Mejora, es el valor con mejor punto de operación de la bomba que se ubica en cada año de operación proyectándolo al igual para los siguientes 3 años, el valor de mantenimiento es menor debido a que no tiene desgaste en los tornillos por lo que no requiere cambio. Los indicadores del IVAN y TIR presentan una operación mucho más rentable ya que tiene 3 millones y 4% respectivamente de diferencia comparado con las condiciones de análisis. El IVAN presenta dos décimas de mejora a las condiciones de análisis, lo que incide en un incremento de la relación del VAN por la inversión.

Tabla 3.3 Análisis Económico de bombas multifásicas

		Inversión	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	FF	VAN	TIR	IVAN
Condiciones de Analisis	Adquisición e Instalación	$ -15,000,000.00	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -				
	Operación de Bombas	$ -	$ -1,102,077.24	$ -654,053.76	$ -594,707.76	$ -2,057,470.20	$ -1,102,077.24	$ -1,102,077.24	$ -1,102,077.24				
	Mantenimiento de Bombas	$ -	$ -	$ -	$ -1,800,000.00	$ -	$ -300,000.00	$ -1,300,000.00	$ -		$ 645,692,562.22	354%	43.05
	Bombeo de Apaika	$ -	$ 45,004,177.73	$ 52,863,684.41	$ 193,036,729.52	$ 266,775,679.06	$ 241,346,004.48	$ 223,835,219.77	$ 243,985,634.44				
	Total	$ -15,000,000.00	$ 43,902,100.49	$ 52,209,630.65	$ 190,642,021.76	$ 264,718,208.86	$ 239,943,927.24	$ 221,433,142.53	$ 242,883,557.20	$ 1,240,732,588.73			
Proyección con igual condiciones	Adquisición e Instalación	$ -15,000,000.00	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -				
	Operación de Bombas	$ -	$ -614,952.00	$ -614,952.00	$ -614,952.00	$ -614,952.00	$ -614,952.00	$ -614,952.00	$ -614,952.00				
	Mantenimiento de Bombas	$ -	$ -	$ -	$ -1,800,000.00	$ -	$ -300,000.00	$ -1,300,000.00	$ -		$ 647,593,082.92	356%	43.17
	Bombeo de Apaika	$ -	$ 45,004,177.73	$ 52,863,684.41	$ 193,036,729.52	$ 266,775,679.06	$ 241,346,004.48	$ 223,835,219.77	$ 243,985,634.44				
	Total	$ -15,000,000.00	$ 44,389,225.73	$ 52,248,732.41	$ 190,621,777.52	$ 266,160,727.06	$ 240,431,052.48	$ 221,920,267.77	$ 243,370,682.44	$ 1,244,142,465.41			
Proyección con Mejora	Adquisición e Instalación	$ -15,000,000.00	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -				
	Operación de Bombas	$ -	$ -394,200.00	$ -394,200.00	$ -394,200.00	$ -394,200.00	$ -394,200.00	$ -394,200.00	$ -394,200.00				
	Mantenimiento de Bombas	$ -	$ -	$ -	$ -1,300,000.00	$ -	$ -300,000.00	$ -1,300,000.00	$ -		$ 648,840,262.02	358%	43.26
	Bombeo de Apaika	$ -	$ 45,004,177.73	$ 52,863,684.41	$ 193,036,729.52	$ 266,775,679.06	$ 241,346,004.48	$ 223,835,219.77	$ 243,985,634.44				
	Total	$ -15,000,000.00	$ 44,609,977.73	$ 52,469,484.41	$ 191,342,529.52	$ 266,381,479.06	$ 240,651,804.48	$ 222,141,019.77	$ 243,591,434.44	$ 1,246,187,729.41			

4. CONCLUSIONES

Para el año 2015 el Pareto de potencia es de 530 kW; a esa potencia el PRI más frecuente es de 4.3. Por ser alta esta relación de presión y por la existencia de solidos hubo desgaste por erosión en los bordes de los tornillos y en la camisa.

En los años 2016 y 2017, el Pareto de potencia es de 390 kW y 380 kW, respectivamente; a esa potencia el PRI más frecuente es de 1.6. Se evidencia altas vibraciones por el antecedente presentado en el primer año de análisis, sin embargo, a finales del 2017 se presenta una disminución de las vibraciones por el cambio de las condiciones de operación y el reemplazo de los tornillos desgastados. Al unificar los 3 años el Pareto de potencia es de 390kW, a una tasa de presión PRI de 1.6.

Realizando un análisis de la relación de presión PRI en función de los meses en los 3 periodos de tiempo, se observa que un grupo de operación estuvo entre 1.6 a 2.6 del PRI a un requerimiento de potencia de 180 a 230 kW. Las condiciones de vibración y temperatura soportan que esta operación en términos energéticos y económicos fue la más adecuada y es la sugerida, por lo tanto, con este consumo se proyecta una óptima operación y gestión de recursos.

En el análisis global de gestión de recursos a través del flujo de costos, contemplamos desde la adquisición, instalación, operación, mantenimiento y caudal de bombeo de las bombas multifásicas. Observamos que el escenario más adecuado para la operación preferiblemente cuando las condiciones lo permitan debe estar dentro de la ventana de operación con una tasa de presión PRI desde 1.6 a 2.6 con un requerimiento de potencia de 180 a 230 kW. Estas condiciones son avaladas mediante los indicadores VAN, TIR e IVAN.

El análisis de gestión de recursos en la operación y condiciones de mantenimiento de las bombas multifásicas es muy importante ya que muestran su afectación en el consumo energético y por ende en el costo de vida útil del sistema de bombeo, esto sin lugar a duda tiene un valor agregado a la administración del campo donde la gerencia puede tomar la decisión de mejor operación de las bombas soportado en los indicadores financieros.

4.1. Trabajos Futuros

A medida que la explotación del Bloque 31 va en incremento su flujo va cambiando, con lo cual si se requiere de mayor tasa de presión PRI se podría realizar un análisis en un nuevo punto adecuado para ésta operación, el cual esté antes de que exista gran presencia de sólidos que aceleren el desgaste de los componentes internos y como consecuencia afecten las condiciones de mantenimiento de las bombas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bornemann Pumps. (2017). Agilizando el Proceso. *BORNEMANN BOMBEO MULTIFÁSICO*, 1-23.

Dal Porto, D., & Larson, L. (1997). Multiphase-pump field trials demonstrate practical applications for the technology. . *SPE Production & Facilities*, 159-164.

Dolan, P., Goodridge, R., & Leggate, J. (1988). Development of a twin-screw pump for multiphase duties. *SPE production engineering*, 629-632.

How to Calculate Life Cycle Costs and payback times: An example. (2017). *Xylem* , 1-5.

Introducción al Bombeo Multifásico. (2016). *ITT Bornemann*, 1-51.

Linck, R. (2010). Multiphase Pump Data Sheet. *Bornemann Pumps*, 1-4.

Neumann, W. (1991). Efficient multiphase pump station for onshore application and prospects for offshore application. *In Proceedings of the 8th International Pump Users Symposium, Turbomachinery Laboratories, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University*, 43-48.

Reyes, G. (2017). Bombeo - Multifasico en Operaciones de Producción. *Bornemann Pumps*, 1-35.

Vetter, G., Wirth, W., Korner, H., & Pregler, S. (2000). Multiphase Pumping With Twin-Screw Pumps - Understand And Model Hydrodynamics And Hydroabrasive Wear. *Proceedings of the 17th International Pump Users Symposium*, 153-170. Obtenido de http://hdl.handle.net/1969.1/164074

ANEXOS

Anexo I - Resumen Ejecutivo Bloque 31.

PETROAMAZONAS EP

Resumen ejecutivo de los Bloques que tiene a cargo Petroamazonas EP

Bloque número:	31
Nombre del Bloque:	BLOQUE 31: APAIKA-NENKE

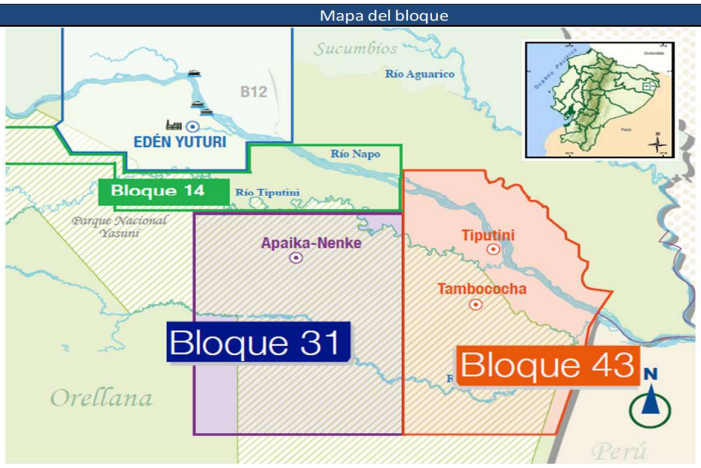
Ubicación: (provincia, extesión en Km2)

Ubicación: Provincia de Orellana, Cantón Aguarico.
Los límites del Bloque 31 son los siguientes:

- Norte: Bloque 14.
- Sur: Zona Intangible del Parque Nacional Yasuni
- Este: Bloque 43
- Oeste: Bloque 16

Extensión del Bloque 31: 50.000 ha (500 Km2)
Area utilizada para la construcción: 85.8 ha (0.858 Km2)
Area permitida para construcción: 105.3 ha (1.053 Km2, 39 ha dentro del PNY, 66.3 ha fuera del PNY)

Mapa del bloque



Campos que integran el Bloque

APAIKA: 14 pozos
NENKE: 8 pozos

Estaciones que posee el Bloque

APAIKA: Estación de bombeo Multifásico de Apaika,
ECB: Estación Central de Bombeo para B31 y B43

Información general

Bloque 31 fue encargada a PAM EP el 3 de Octubre del 2013, a raíz de la Declaratoria de Interés Nacional por parte de la Asamblea Nacional
Sus áreas tienen intersecciones con el Parque Nacional Yasuní.
Opera con licencia ambiental del año 2007 otorgada a la anterior operadora Petrobras, actualizada al 2011.
En el campo actualmente laboran 60 personas de PAM, 450 contratistas en promedio para la etapa constructiva y de base permanente.
Opera en territorio Huaorani y Kichua

En Octubre del 2013 inicia la producción con el pozo APAIKA 03M1 y facilidades pre-tempranas
Su producción es transportada por un ducto de 18" ANSI 600 que nace en Apaika y llega a ECB (23.78 Km) con una presión operativa de 440 psi
luego en un ducto de 24" ANSI 600 desde ECB a EPF (32.5 Km) con presión operativa de 390 psi.
La producción de Nenke ingresa a la línea de 18" con 2 Hot-Taps de 6" y de 10" ANSI 600, desde

En la estación de APAIKA, se dispone de 3 bombas Multifásicas de 90000 BFPD equivalentes de capacidad. Actualmente se encuentran operativas 2 bomba, una de las cuales tiene afectada su eficiencia de flujo de manera importante por desgaste de los tornillos por presencia de sólidos. La tercera bomba está fuera de servicio por repuestos.

El ducto de 18" tiene una capacidad de transporte de 220.000 BFPD
El ducto de 24" tiene una capacidad de transporte de 340.000 BFPD

Produción en BLS por campo Actual

	GROSS (BFPD)	OIL (BOPD)	WATER (BWPD)
APAIKA	27,324.00	3,970.00	23,354.00
NENKE	58,221.00	3,616.00	54,605.00
LF: 0.92048	96,199.85	6,982.75	89,217.10

Produciones 2014-2019

La producción promedio anual de petróleo en 2014: 5158 BOPD.
La producción promedio anual de agua en 2014: 13226 BWPD

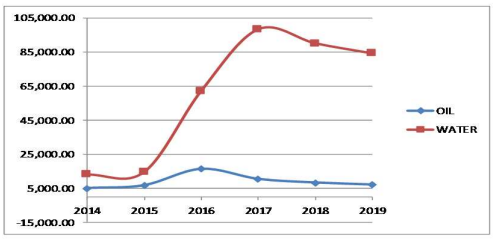
La producción promedio anual de petróleo en 2015: 6834BOPD.
La producción promedio anual de agua en 2015: 14761 BWPD

La producción promedio anual de petróleo en 2016: 16673 BOPD.
La producción promedio anual de agua en 2016: 62181 BWPD

La producción promedio anual de petróleo en 2017: 10618 BOPD.
La producción promedio anual de agua en 2017: 98358 BWPD

La producción promedio anual de petróleo en 2018: 8460 BOPD.
La producción promedio anual de agua en 2018: 90128 BWPD

La producción promedio anual de petróleo en 2019: 7212 BOPD.
La producción promedio anual de agua en 2019: 84224 BWPD



Situación (Posibles alertas)

Sociales	* Posibles paralizaciones de comunidades de influencia directa por pagos pendientes de contratista ARB, CVA, etc. * Alta rotación de personal contratista debido al acceso restringido a servicios públicos. * Tiempo de respuestas extenso en caso de emergencias de trabajadores: 8 hrs hasta hospitales públicos
Ambientales	* Insistente intención de ingreso de grupos ambientalistas contrarios al interés de Petroamazonas EP. * Alta exigencia de cumplimientos ambientales por parte de los entes de control debido a que nuestra operación está dentro del Parque Nacional Yasuní. * Pasivos ambientales dejados por la contratista ARB, sin solución legal de su desalojo de las áreas constructivas.
Producción	* Capacidad de producción de NENKE a través del Hot Tap de 6" actualmente instalado (20000 BFPD), requiere la construcción de línea entre NENKE - APAIKA * Tubería sin recubrimiento interno que requiere de un plan de mantenimiento continuo especial (protección catodica, raspadores, etc) * El sistema de logística y suministros se ve afectado por el comportamiento de los ríos Napo y Tiputini, requiriendo un mantenimiento permanente de muelles. * Lo remoto del campo, transporte fluvial hacia y dentro del bloque y las distancias entre plataformas requieren de mayor planificación y demoran tiempos de respuesta ante cambios inesperados en planes de la operación

RESERVORIO PRODUCTOR

ARENISCA HOLLIN
Características:
Permeabilidad: 1000- 1700 md
Porosidad: 23%

CONSUMO ENERGÉTICO

ZECH: 0,8 MW
ECB: 1,3 MW
NENKE: 2.2 MW
APAIKA: 1,2 MW
TOTAL B-31: 5,5 MW