

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

### **GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET EN UNA EMPRESA PETROLERA USANDO EL CICLO PDCA**

**OPCIÓN: PROYECTO DE DESARROLLO**

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

**ING. HUGO MAURICIO UNAPANTA ARIAS**

munapanta@gmail.com

**DIRECTOR:**

**ING. RAÚL ARMANDO VALENCIA TAPIA. MSc**

raul.valencia@epn.edu.ec

**Quito, noviembre 2020**

## **AVAL DEL DIRECTOR**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el **ING. HUGO MAURICIO UNAPANTA ARIAS**, bajo mi supervisión.

---

Ing. Raúl A. Valencia. T., MSc

**DIRECTOR DEL TRABAJO**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, **Ing. Hugo Mauricio Unapanta Arias**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Ing. Hugo Mauricio Unapanta Arias

AUTOR

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto de desarrollo lo dedico principalmente a Dios, por haberme dado la fortaleza que me ha permitido cumplir una meta más.

A mi esposa Lisenya y a mis hijos Mateo y Nicolas, por su amor y apoyo incondicional en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos.

A mis padres y hermanos por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi familia, por haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial a mi director de tesis Ing. Raúl Valencia, por haberme guiado en la elaboración de este proyecto de desarrollo.

De igual manera, al Decano de la Facultad de Petróleos PhD. Johnny Zambrano por haberme dado la oportunidad de continuar con mi formación en esta noble institución como es la EPN.

Al Ing. Bernardo Coronel funcionario de ENAP SIPEC por su apoyo y conocimientos que permitieron culminar con éxito este proyecto de desarrollo.

## RESUMEN

Se realizó una mejora de la gestión de mantenimiento preventivo del sistema de levantamiento hidráulico tipo jet, de los pozos petroleros del campo PBHI, basado en protocolos de mantenimiento de equipos con mejora continua mediante el ciclo PDCA. En primer lugar se hizo una revisión de la gestión actual de mantenimiento para tomar sus fortalezas e incorporarlas al nuevo esquema de gestión, esto como plan inicial o fase P. Se usó como planta piloto la bomba tipo jet instalada en el pozo PSO-1, se creó el protocolo de mantenimiento y se aplicó a la bomba después de sustituirla por mantenimiento preventivo, luego se incorporó al pozo donde estuvo operativa en el siguiente periodo de operación extendido hasta presentar una falla, como fase D. Se determinó el tiempo hasta que falla (MTTF) y se comparó con la media de periodos anteriores y se observó una pequeña mejora de la fiabilidad operativa. Se determinó el tiempo de reparación MTTR y se comparó con la media de reparaciones anteriores y se observó una pequeña mejora, fase C. Por otro lado se hizo un análisis de la aplicación del protocolo de y el resultado obtenido para efectuar cambios al protocolo que mejore la gestión de mantenimiento preventivo de la bomba hidráulica tipo Jet, fase A del ciclo. Con las pequeñas mejoras de forma continua, de los protocolos de mantenimiento de equipo y las actividades involucradas en el mantenimiento, por cada ciclo PDCA, se busca optimizar la gestión de mantenimiento en el tiempo.

**Palabras clave:** Gestión de mantenimiento, mejora continua, protocolos de mantenimiento, ciclo PDCA.

## **ABSTRACT**

An improvement was made in the management of preventive maintenance of the Jet type hydraulic lift system, for the PBHI field's oil wells, based on the equipments maintenance protocols with continued improvement through the PDCA cycle. In first place, a review of the current maintenance management was made in order to take its strengths and include them into the new management scheme; this was made as an initial plan or phase P. The Jet type pump installed in the PSO-1 well was used as a pilot plant; the maintenance protocol was created and applied to the jet pump after replacing it as preventive maintenance then, it was incorporated into the well where it was operational for the next operation period until it failed, this was phase D. The mean time to failure (MTTF) was determined and compared with the average during previous periods and a small improvement of the operational reliability was observed. The mean time to repair (MTTR) was determined and compared to the mean time of previous repairs where a small improvement was observed, phase C. On the other hand, an analysis of the maintenance protocol application and the result obtained was made to make changes to the protocol that improves the management of preventive maintenance for the Jet type hydraulic pump, phase A of the cycle. With the small improvements in a regular-continued basis of the equipment maintenance protocols and the activities involved on maintenance, this was for each PDCA, it is sought to optimize the maintenance management.

**Keywords:** Maintenance management, continuous improvement, maintenance protocols, PDCA cycle.

## ÍNDICE GENERAL

AVAL DEL DIRECTOR .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORIA .....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT .....	vii
ÍNDICE GENERAL .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE CUADROS .....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos del trabajo general .....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
1.4 MARCO TEÓRICO .....	2
1.4.1 Bombeo Hidráulico .....	2
1.4.2 Funcionamiento del bombeo hidráulico .....	3
1.4.3 Ventajas y desventajas del bombeo hidráulico.....	4
1.4.3.1 Ventajas del bombeo hidráulico .....	4
1.4.3.2 Desventajas del bombeo hidráulico.....	4
1.4.4 Bombeo Hidráulico tipo Jet.....	5
1.4.4.1 Ventajas del bombeo hidráulico tipo Jet.....	5
1.4.4.2 Desventajas del bombeo hidráulico tipo Jet .....	6
1.4.4.3 Problemas y soluciones en los sistemas bombeo tipo Jet.....	6
1.4.6 Gestión de mantenimiento .....	8
1.4.6.1 Objetivos de la gestión de mantenimiento.....	10
1.4.6.2 Protocolos de mantenimiento .....	10



1.4.7	Analogía del ciclo PDCA y sistemas de control de procesos industriales .....	12
1.4.8	Gestión de mantenimiento basada en protocolos e el ciclo PDCA .....	13
1.4.9	Medición de la gestión de mantenimiento .....	13
1.4.10	Contexto ENAP SIPETROL S.A. ....	16
2.	ASPECTOS METODOLÓGICOS .....	17
2.1	Aplicación de la gestión de mantenimiento a una bomba de pozo tipo jet .....	21
2.1.1	Plan de trabajo Fase P del ciclo PDCA .....	21
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
3.1	RESULTADOS .....	24
3.1.1	Situación de la gestión de mantenimiento actual .....	24
3.1.2	Implementación de protocolos de mantenimiento por equipo .....	26
3.1.3	Ejecución de protocolos de mantenimiento por equipo Fase D del ciclo PDCA .....	28
3.2	DISCUSIÓN .....	29
3.2.1	Evaluación de los resultados Fase C del ciclo PDCA .....	29
3.2.2	Análisis de los resultados Fase A del ciclo PDCA.....	29
3.3	Simulación de la gestión de mantenimiento .....	30
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	33
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35
7.	ANEXO 1 .....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Instalación Bombeo hidráulico .....	4
Figura 2	Bomba hidráulica tipo jet .....	5
Figura 3	Partes de la bomba hidráulica tipo jet .....	6
Figura 4	Diagrama de analogía del ciclo PDCA y un sistema de control .....	13
Figura 5	Diagrama de la gestión de mantenimiento y analogía de un lazo de control... ..	13
Figura 6	Gráfico de Pareto de las causas de cambio de bomba tipo Jet. ....	23
Figura 7	Planilla protocolo de mantenimiento bomba hidráulica tipo jet .....	26

Figura 8 Flujograma de la simulación de la gestión de mantenimiento basado en protocolos de mantenimiento de equipos y el ciclo PDC.....	31
--	----

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Problemas y soluciones en un sistema hidráulico tipo Jet.....	8
Cuadro 2. Etapas, actividades y posibles herramientas en un ciclo PDCA.....	18
Cuadro 3. Datos en la bitácora de eventos por mantenimiento. ....	19
Cuadro 4. Resumen de los Problemas y Causas Raíces. ....	21
Cuadro 5. Causas del cambio de las bombas hidráulicas .....	22
Cuadro 6. Datos históricos operativos de bombas hidráulicas. ....	24
Cuadro 7. Características de las bombas hidráulicas en el pozo .....	25
Cuadro 8. Características de las bombas hidráulicas en el pozo .....	25
Cuadro 9. Plan de acción de equipos de superficie realizado con 5W-1H.....	27

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. Planteamiento del problema**

El levantamiento artificial hidráulico tipo Jet, como Sistema de Levantamiento Artificial instalados en el Campo PBHI operado por la empresa ENAP SIPEC, es de un 33% del total de los pozos perforados o productores de petróleo. En la Estación Paraíso se dispone de un sistema que proporciona fluido motriz centralizado a ocho pozos y dos Unidades MTU en locación que los alimentan de fluido motriz.

El sistema de levantamiento artificial por bombeo hidráulico tipo Jet es reconocido por ser aplicable en pozos de bajo Índice de Productividad (IP) y para campos maduros (Shuaib, 2017), como es el caso de los campos Paraíso-Biguno-Huachito-Inchi (PBHI).

La gestión de mantenimiento del sistema de bombeo hidráulico tipo JET es de gran importancia por los riesgos operativos y ambientales que genera las tuberías de fluido motriz presurizadas con petróleo o agua a presiones entre 3500 y 4000 psi. En la empresa ENAP SIPEC, el 21 de marzo de 2010, se registró (<https://www.enap.cl/download/forzada/>) un derrame de crudo en la plataforma del pozo Biguno, en la válvula VRF de la línea de fluido motriz.

La gestión de mantenimiento consiste en la planificación y programación de un conjunto de tareas siguiendo criterios que depende del tipo de producción y de las políticas o normas de la empresa, para un conjunto de equipos de la planta.

La empresa ENAP SIPEC no dispone de un protocolo de gestión de mantenimiento preventivo que se anticipe a las posibles fallas por el desgaste natural de los equipos y al riesgo de las altas presiones de operación del fluido motriz del Sistemas de Levantamiento Artificial por Bombeo Hidráulico tipo Jet. En este trabajo se desarrolló un protocolo para la mejora continua de la gestión de mantenimiento de los sistemas de bombeo hidráulico tipo Jet usando el ciclo PDCA, además de la implementación de planes de mantenimiento utilizando las herramientas antes mencionadas, que no ocasionen pérdidas de producción y asegure las operaciones, el bienestar de las personas y preserve el ambiente.

En base a lo antes mencionado se formuló la siguiente pregunta de investigación

¿Es posible implementar un sistema de gestión de mantenimiento usando el ciclo PDCA en los sistemas de bombeo hidráulico tipo Jet?

## **1.2. Objetivos del trabajo**

### **1.2.1. Objetivo general**

Desarrollar un protocolo para la gestión de mantenimiento de los sistemas de bombeo hidráulico tipo Jet en la empresa petrolera ENAP SIPEC usando el ciclo PDCA”

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Realizar un diagnóstico de la situación actual de los equipos que conforman el sistema de superficie de bombeo hidráulico tipo Jet y su vulnerabilidad a fallas que afecten su operatividad.
- Desarrollar un protocolo para la mejora continua de la gestión de mantenimiento de los equipos del Sistema de Bombeo Hidráulico tipo Jet basado en el ciclo PDCA.
- Simular la aplicación del protocolo de la gestión de mantenimiento a un área piloto.
- Validar el protocolo de mejoras de la gestión de mantenimiento basado en los resultados de la simulación.

## **1.3 Alcance del trabajo**

El protocolo para la gestión de mantenimiento desarrollado en el presente trabajo de titulación podría ser aplicado a cualquier proceso que requiera mejoras de la gestión de mantenimiento siguiendo los pasos y ajustándolos a cada caso particular. Sin embargo, no incluirá la gestión de mantenimiento de otros tipos de bombeo hidráulico. En este trabajo solo se evaluará los resultados mediante simulaciones de la aplicación del protocolo propuesto a un sistema de bombeo tipo Jet del campo PBHI operado por la empresa petrolera ENAP SIPEC.

## **1.4. MARCO TEÓRICO**

### **1.4.1 Bombeo Hidráulico**

En un campo petrolero, el pozo está en condiciones de producir luego de terminar la perforación y, dependiendo del yacimiento, la presión, permeabilidad, entre otros aspectos, es puesto en producción por extracción natural. Sin embargo, cuando las condiciones de presión no están dadas, la explotación y producción de esos pozos, que tienen profundidades mayores de 8.000 pies y hasta 18.000 pies, se debe considerar un método de levantamiento

artificial como el método de bombeo hidráulico. El principio básico de este tipo de bombeo fue utilizado en el año 1875, por Faucett, pero fue en el año 1932 cuando realmente se llevó a cabo, por primera vez, una instalación hidráulica, (Dresser, 2003).

El bombeo hidráulico, es un sistema de levantamiento artificial basado en la transmisión de energía externa al hidrocarburo que proviene del yacimiento, a través de la inyección de un fluido a alta presión con una bomba hidráulica. Es importante recalcar, que con el bombeo hidráulico se realiza un proceso de filtrado, con el fin que los sólidos que se transportan no afecten al equipo, en su principio de funcionamiento (Dresser, 2003).

#### **1.4.2 Funcionamiento del bombeo hidráulico**

Según lo establece Dresser (2003) y Brown (1984) en un sistema de bombeo o levantamiento hidráulico, el petróleo crudo o agua, es el fluido usado para la operación de la bomba, y se llama fluido de potencia o fluido motriz. El proceso comienza cuando el fluido de potencia alimenta a la bomba hidráulica, con el incremento de presión por la bomba (triplex o multiplex), el fluido pasa a través de unas válvulas en el cabezal del pozo y es dirigido a la bomba libre. De esta forma, el fluido motriz retorna a la superficie con el crudo y posteriormente es trasladado por tubería al separador donde se extrae el agua y el producto es enviado al tanque de almacenamiento. Entre los componentes del sistema de bombeo hidráulico, se tienen equipos de superficie y equipos de subsuelo. Los equipos de superficie son: tanques de almacenamiento, de lavado, separadores y/o tratadores; bombas de superficie, válvulas de control, múltiples de control y lubricador. Los equipos de subsuelo están conformados por: el sistema de fluido motriz o de potencia, el sistema de fluido bien sea abierto o cerrado y las bombas hidráulicas (tipo Pistón o tipo Jet). (Ver figura 1).

Se pueden considerar otros aspectos de funcionamiento de este tipo de sistemas, tales como:

- a) En el caso de crudos pesados, se puede reducir la viscosidad del hidrocarburo, utilizando crudos ligeros como fluido de potencia, b) Se puede instalar un sistema central para varios pozos, lo cual es útil especialmente cuando se deben instalar en espacios reducidos y c) Pueden ser usados en pozos desviados, ya que las varillas no son usadas en este tipo de sistemas.

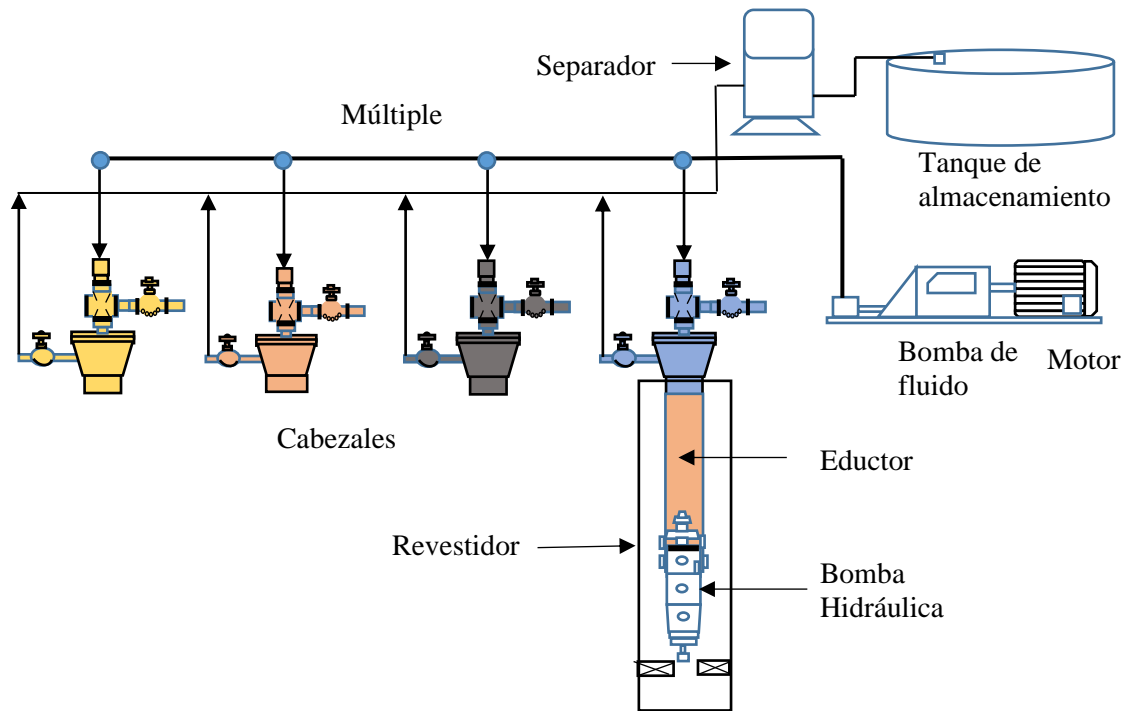


Figura 1. Instalación de bombeo Hidráulica  
Fuente: Guevara, 2017

### 1.4.3. Ventajas y desventajas del bombeo hidráulico.

#### 1.4.3.1 Ventajas del bombeo hidráulico.

- Con una instalación central se pueden controlar y operar varios pozos.
- Para remover el equipo del subsuelo, no se requiere taladro.
- Pueden ser usados en pozos hasta de 18.000 pies.
- Es posible usarlos en pozos desviados y espacios reducidos.
- No se daña la formación, ya que el fluido motriz es limpio.
- Es mínimo el riesgo de incendios.
- Señala la cantidad de gas.
- Determina la cantidad de fluido.
- Control de parada, por alta o baja presión, a través del panel de control.
- Puede operar con bajas concentraciones de arena.

#### 1.4.3.2 Desventajas del bombeo hidráulico.

- La inversión inicial es alta.
- Presenta problemas de corrosión.

- El diseño debe ser muy bien estructurado, ya que son complejos.
- En caso de daño de algún componente del sistema, los costos de reparación son altos.
- Por el uso de altas presiones, hay mayor riesgo en las instalaciones de la superficie.

#### 1.4.4 Bombeo hidráulico tipo Jet.

Este bombeo, según Brown (1980), es el método más sencillo de los sistemas de levantamiento artificial. La bomba tipo Jet no tiene partes móviles y su funcionamiento es a través de un intercambio de energía entre las dos corrientes de fluidos (fluido de potencia inyectado y el petróleo a producir).

Tal como se muestra en la figura 2 el sistema tiene una bomba tipo Venturi, que incluye una tobera, una garganta y un difusor.

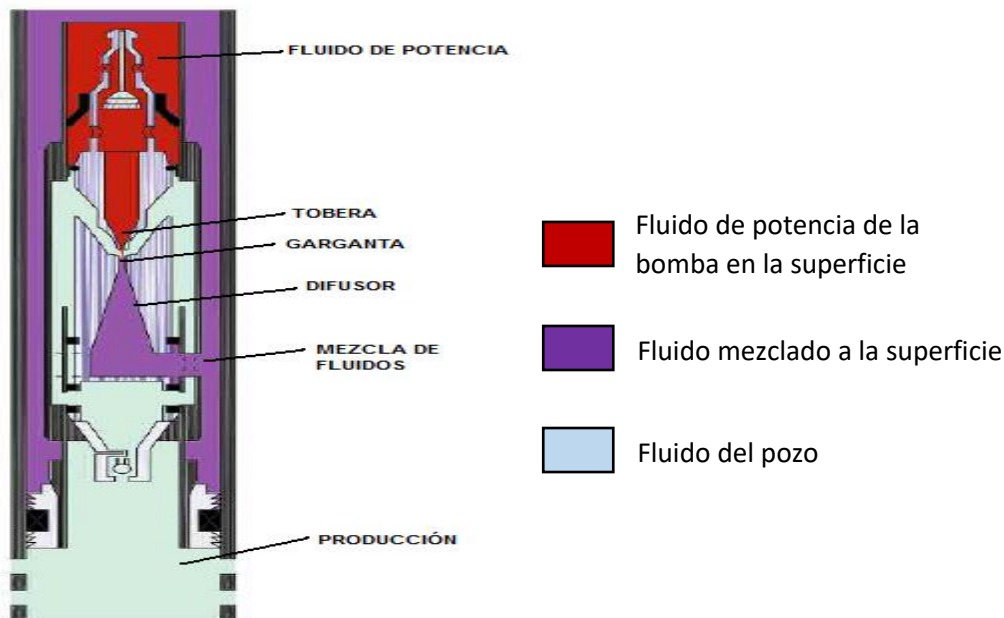


Figura 2. Bomba hidráulica tipo jet.  
Fuente: Guevara, 2017

##### 1.4.4.1 Ventajas de bombeo hidráulico tipo Jet

- Sin problemas en pozos desviados.
- El fluido motriz puede ser calentado.
- Ausencia de partes móviles.
- El material de fabricación de la tobera y la garganta, permiten una vida útil mayor.
- Se evitan los problemas en la entrada de la bomba por motivo de volúmenes de gas.
- Se pueden utilizar químicos en el pozo.
- Evita la abrasión, con motivo de la arena, ya que no posee partes móviles.

#### 1.4.4.2 Desventajas de bombeo hidráulico tipo Jet.

- Eficiencia volumétrica baja (30 a 35%).
- Es necesario el sistema de contingencia para las facilidades de la superficie.
- Existe cavitación, cuando en la entrada de la bomba hay bajas presiones.

#### 1.4.4.3 Partes de la bomba hidráulica tipo jet

La Bomba Jet es una clase especial de bomba hidráulica cuyo principio de levantamiento se basa en la transferencia de energía entre el fluido de inyección y el fluido producido, cuando el fluido inyectado atraviesa la boquilla en el fondo del pozo, se produce la transformación de energía potencial en energía cinética (Principio de Bernoulli), lo que finalmente causa la producción de fluidos desde el reservorio. Está ubicada en el fondo del pozo y es introducida con la presión hidrostática del flujo motriz. La bomba está compuesta por trece piezas fácil de ensamblar. Ver figura 3.



Figura 3. Partes de la bomba hidráulica tipo jet.

Fuente: Guevara, 2017.

#### 1.4.4.3 Problemas y soluciones en los sistemas de bombeo tipo Jet.

En el cuadro 1 se presentan los problemas más comunes en un sistema de bombeo hidráulico tipo Jet, y para cada problema, se expone la posible causa y la solución.



Cuadro 1. Problemas y soluciones en un sistema hidráulico tipo Jet.

<b>Problema</b>	<b>Causa</b>	<b>Solución</b>
1. Incremento repentino en la presión de operación, entra fluido de potencia en la bomba.	a. Formación de parafinas u obstrucciones en la línea de fluido de potencia.	Correr un tapón soluble o aceite caliente, o remover la obstrucción. Desanclar y anclar la bomba.
	b. Obstrucción parcial en la tobera.	Sacar la bomba y limpiar la tobera.
2. Incremento lento de la presión de operación, gasto de fluido de potencia constante o disminución lenta del gasto de fluido de potencia, presión constante.	a. Formación lenta de parafinas en línea de aceite de potencia, tuberías y/o válvulas.	Correr un tapón soluble o aceite caliente.
	b. Desgaste de la garganta o difusor.	b. Sacar la bomba y sustituir piezas con desgaste, mantenimiento general de la bomba.
3. Incremento repentino de presión de operación, la bomba deja de admitir fluido de potencia.	a. Tobera totalmente taponeada.	Sacar la bomba y limpiar la tobera.
4. Decremento repentino de presión de operación, gasto constante de fluido de potencia o incremento repentino del gasto de fluido de potencia, presión constante.	a. Falla en tuberías.	Sacar la bomba y limpiar la tobera.
	b. Problemas en los sellos de la bomba o ruptura de la tobera.	Sacar la bomba y repararla.
5. Caída en la producción condiciones de superficie normales	a. Desgaste en la garganta o el difusor.	Incrementar la presión de operación. Reemplazar la garganta o el difusor.
	b. Obstrucción en la válvula de pie o en la bomba.	Sacar la bomba y revisarla. Retirar la válvula de pie.
	c. Goteo u obstrucción en la línea de venteo de gas.	Revisar el sistema de venteo de gas.
	d. Cambios en las condiciones del pozo	Correr un registrador de presión y redimensionar la bomba.
6. Incremento lento de la presión de operación, sin observar incremento en la producción.	a. Cavitación de la bomba o alta producción de gas.	Bajar la presión de operación o instalar una garganta más grande.
	b. Obstrucción en la válvula de pie o de la bomba.	Sacar la bomba y revisarla. Retirar la válvula de pie.
7. Incremento repentino de presión de operación, la bomba deja de admitir fluido de potencia.	a. Daño por cavitación.	Revisar obstrucciones en la válvula de pie y en la bomba. Instalar una garganta más grande. Reducir la presión de operación.

Cuadro 1. Continuación

<b>Problema</b>	<b>Causa</b>	<b>Solución</b>
8. Desgaste en la garganta de forma cilíndrica o en forma de barril.	a. Desgaste por erosión.	Reemplazar la garganta. Instalar una garganta de material Premium. Instalar una garganta y tobera más grande para reducir la velocidad.
9. La producción de una instalación nueva no concuerda con la predicción.	a. Datos de pozo incorrectos.	Correr un registrador de presión y redimensionar la bomba.
	b. Obstrucción en la válvula de pie o en la bomba.	Revisar la bomba y la válvula de pie.
	c. Goteo en tuberías	Revisar tuberías y reemplazar.

Fuente: Pérez 2013

#### **1.4.6 Gestión mantenimiento.**

Según Tavares (2000), la gestión de mantenimiento son todas las actividades, operaciones o cualquier acción que se realicen con el fin de preservar los equipos de un sistema controlando la disponibilidad y la factibilidad al menor costo posible, por otro lado según De La Paz Martínez (2014), mantenimiento es la totalidad de las acciones técnicas, organizativas y económicas encaminadas a conservar o restablecer el buen estado de los activos fijos, a partir de la observancia y reducción de su desgaste y con el fin de alargar su vida útil económica, con una mayor disponibilidad y confiabilidad para cumplir con calidad y eficiencia sus funciones, conservando el ambiente y la seguridad del personal. En general, por estas dos definiciones en adelante en este trabajo de titulación cuando se habla de mantenimiento nos referimos a la gestión de mantenimiento.

En mantenimiento se debe incluir actividades tales como: revisión de inventarios de repuestos, planificación del mantenimiento, elaboración de planes de mantenimiento, ejecución de los planes, evaluación de los resultados, informes del análisis de los resultados del mantenimiento, entre otras. Tavares (2000) establece que una actividad que permite mejorar el mantenimiento mediante el ciclo PDCA, es la renovación de los planes de mantenimiento en base a los resultados obtenidos.

Un plan de mantenimiento, en general, está constituido por tres tipos de actividades: las rutinarias que se realizan a diario, las programadas que se realizan a lo largo del año y las

paradas programadas que se realizan en periodos donde se para la producción de los equipos involucrados en el plan. Para las tareas de mantenimiento en términos generales debe determinarse datos de las siguientes cinco variables: frecuencia, especialidad, duración, necesidad de permiso de trabajo especial y necesidad de parar la máquina para efectuar el mantenimiento (García, 2012).

En cuanto a la frecuencia de una tarea, existen dos formas para fijarla: siguiendo periodicidades fijas y determinándola a partir de las horas de funcionamiento. Usar cualquiera de las dos es válido; e incluso es posible que para algunas tareas sea conveniente usar ambas formas, Tavares (2000).

Ambas formas de fijar la frecuencia de mantenimiento tienen ventajas y desventajas. Si algunas tareas se realizan periódicamente se podría hacer mantenimiento a equipos que no han funcionado, por lo que no se han desgastado en un período determinado. Por otro lado si se realiza el mantenimiento con frecuencias de horas de funcionamiento tiene el inconveniente de que la programación de las actividades se hace mucho más complicada.

Otra variable que se debe considerar es la especialidad de las tareas del plan de mantenimiento. Para generar las órdenes de trabajo es necesario diferenciar las tareas que debe realizar según la especialidad y así escoger los profesionales y/o técnicos que van a ejecutar estas tareas. Como ejemplo, especialistas mecánicos, electricistas, instrumentista entre otras.

La estimación de la duración de las tareas es una información complementaria del plan de mantenimiento. Siempre se realiza de forma aproximada, y se asume que esta estimación lleva implícito un error por exceso o por defecto.

Es muy importante para la ejecución de determinadas tareas que tengan permiso especial para llevarlas a cabo. Por ejemplo, las tareas de corte y soldadura, las que requieren la entrada en espacios confinados, las que suponen un riesgo eléctrico, entre otras requieren normalmente de un permiso de trabajo especial. Resulta útil que en el plan de mantenimiento esté contenida esta información, de manera que estén diferenciados aquellos trabajos que requieren de un permiso, de aquellos que se realizan simplemente con una orden de trabajo. Para llevar a cabo una tarea a maquinas o dispositivos que se encuentran en operación es conveniente que el equipo, el sistema al que pertenece o incluso toda la planta estén paradas

o en marcha. Es útil que estas condiciones de operación de los equipos se indiquen en el plan de mantenimiento para facilitar su programación.

#### **1.4.6.1 Objetivos de la gestión de mantenimiento.**

Los objetivos de la gestión de mantenimiento, según Boero (2006), pueden considerarse según los siguientes principios:

- **Máxima producción.** Involucra mantener la capacidad de las instalaciones, asegurar su disponibilidad (al máximo) y reparar las averías al mínimo costo e invirtiendo la mínima cantidad de tiempo.
- **Mínimo costo.** Incluye elementos tales como: el personal de mantenimiento debe ser productivo, prolongar la vida útil de los equipos e instalaciones, reducir el stock de repuestos, minimizar al máximo las averías.
- **Calidad.** Implica el mantenimiento de las instalaciones y equipos para asegurar la calidad requerida, lograr una producción constante (sin paros), eliminar los desperfectos que puedan afectar la calidad del producto.
- **Preservar la energía.** Está asociada al control del rendimiento energético de las instalaciones y equipos y a la minimización de las puestas en marcha.
- **Conservación del medio ambiente.** Hace énfasis en la eliminación de fugas de productos contaminantes al medio ambiente y a minimizar las averías en las instalaciones correctoras de poluciones.
- **Higiene y seguridad.** Relativa al adiestramiento de personal en cuanto al riesgo de accidentes, mantener las protecciones de los equipos y asegurar que funcionen adecuadamente.
- **Participación del personal.** El personal debe ser adiestrado en la cultura e implementación del mantenimiento y la calidad.

#### **1.4.6.2 Protocolos de mantenimiento**

Un protocolo de mantenimiento es una lista de tareas a realizar en un tipo concreto de equipo. La metodología basada en la determinación de las tareas que componen el plan de mantenimiento a partir de las recomendaciones de los fabricantes tiene algunas ventajas, como la sencillez a la hora de determinarlas, pero también graves inconvenientes. Existe una

segunda metodología para realizar el plan de mantenimiento basada en el empleo de protocolos generales de mantenimiento por tipo de equipo (García, 2012).

El primer paso para elaborar un protocolo de mantenimiento de un equipo tipo es determinar el conjunto de tareas a llevar a cabo en él. Según García (2012) los tipos de tareas que pueden llevarse a cabo en un equipo son las siguientes:

- Inspecciones sensoriales son inspecciones que se realizan con los sentidos, sin necesidad de instrumentos de medida o medios técnicos adicionales.
- Lecturas y anotación de parámetros de funcionamiento, con instrumentos que están instalados en los equipos.
- Tareas de lubricación.
- Verificaciones mecánicas, como medición de holguras, de alineación, de espesor, de apriete de pernos, de instrumentos de medida, de funcionamiento de lazos de control, entre otras. Pueden requerir de una intervención para que determinados parámetros se ajusten a unos valores preestablecidos.
- Verificaciones eléctricas, como medición de intensidad de corriente, verificación de puestas a tierra, verificación del funcionamiento de paradas de emergencia, verificación de conexiones, entre otras.
- Análisis y mediciones de variables con instrumentos externos, como analizadores de vibraciones, termografías, análisis de aceites, entre otros.
- Limpiezas, que pueden ser sencillas o de cierta complejidad técnica.
- Configuración, en equipos programables o que admitan diferentes modos de funcionamiento.
- Verificación del correcto funcionamiento de equipos de medición.
- Calibración de instrumentos de medición.
- Chequeo de lazos de control.
- Sustitución o reacondicionamiento condicional de piezas sujetas o propensas al desgaste.
- Sustitución o reacondicionamiento sistemático de piezas sujetas o propensas al desgaste.

Al realizar la elaboración de la lista completa de tareas que serán aplicadas en un equipo y que conformarán el protocolo de mantenimiento de ese tipo de equipo es conveniente

comprobar cuáles tareas son aplicables en ese equipo. De esta manera se asegura que la lista de tareas para cada equipo es completa, sin olvidar nada importante (García, 2012).

#### **1.4.7 Analogía del ciclo PCDA y sistemas de control de procesos industriales**

Como lo expresan Tavares (2000) y Nakajima (1991), el Dr. Edwards Deming fue bastante acertado al desarrollar el método de Gestión de la Calidad Total por medio de la aplicación del ciclo del PDCA en toda actividad.

En el caso de la gestión de mantenimiento, esta metodología tiene como propósito la búsqueda de la mejora continua del mantenimiento preventivo y correctivo y generalmente para alcanzar este propósito solo es posible después de la aplicación consecutiva y persistente del PDCA.

Tavares (2000) establece una analogía entre el ciclo PDCA y la teoría básica del control de procesos industriales con realimentación o "Sistema de control de lazo cerrado", que se describe a continuación según las fases del ciclo PDCA.

1. Establecer la referencia de entrada al sistema de lazo cerrado (correspondiente a un resultado deseado) análogo al "PLAN". En nuestro caso serían valores deseados de indicadores de calidad en la gestión de mantenimiento, tales como la disponibilidad, la fiabilidad, el tiempo medio entre fallas, entre otros.

2. Ejecutar una acción de control proactivo (o proceder de acuerdo con un planeamiento, buscando alcanzar el resultado deseado) análogo a "DO". En la gestión de mantenimiento (aplicación de los protocolos de mantenimiento) la entrada del proceso es la desviación de los indicadores de calidad deseada con respecto a los valores de los indicadores obtenidos de la gestión de mantenimiento realizada.

3. Medir el resultado alcanzado y compararlo con la referencia (evaluar el resultado real con relación a la expectativa o estándar) análogo a "CHECK". Comparar la referencia con el resultado de la gestión de mantenimiento.

4. Determinar la acción correctiva necesaria, para la eliminación del desvío constatado, de manera que se lleve el resultado a un valor deseado (reajustar el proceso correctivamente) análogo a “ACT”. Corresponde a la retroalimentación de la desviación de la calidad deseada en la gestión de mantenimiento. Para este caso la acción de control es análoga a los cambios necesarios en los protocolos de mantenimiento que reduzcan al mínimo la desviación. La gestión de la calidad por el método PDCA puede, entonces, ser considerada como un Sistema de Control de lazo cerrado del Proceso de la Calidad, Tavares (2000). En la figura 4 se muestra un diagrama de esta analogía.

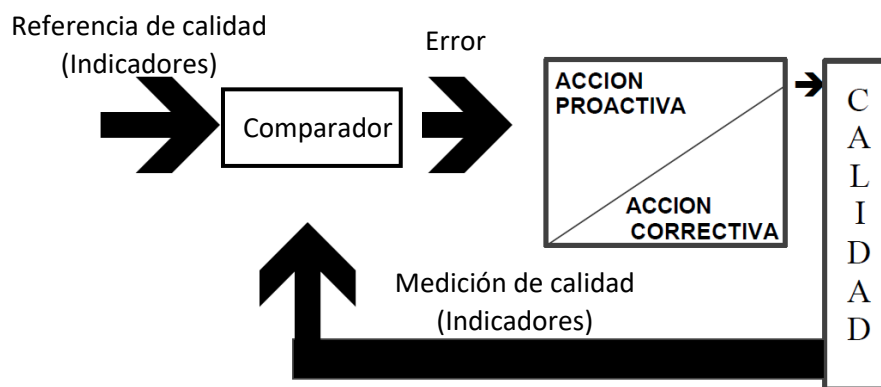


Figura 4. Diagrama de analogía del ciclo PDCA y sistema de control.  
Fuente: Tavares, 2000.

#### 1.4.8. Gestión de mantenimiento basada en protocolos y el ciclo PDCA

La herramienta para mejorar de la gestión de mantenimiento se fundamentó en la analogía entre un sistema de control de lazo cerrado y la aplicación del ciclo PDCA. Esta metodología consiste en la mejora continua de los protocolos de mantenimiento de equipos aplicando el ciclo PDCA. En la figura 5 se muestra la analogía aplicada a la gestión de mantenimiento donde se observa la equivalencia de las cuatro fases del ciclo PDCA y el lazo de control y se describen a continuación:

Fase 1. **Establecer la referencia**, es equivalente al plan “P”. En esta fase se seleccionan los equipos a los que se le aplicará el protocolo de mantenimiento según la programación del mantenimiento preventivo y/o correctivo programado y se establece el resultado deseado mediante indicadores de disponibilidad y la fiabilidad durante un tiempo establecido dado por la frecuencia de mantenimiento del equipo.

Fase 2. **Ejecución del protocolo de mantenimiento**, es equivalente a hacer “D”. El término básico de sistemas de control es el “proceso o planta” para efectos de la gestión de mantenimiento es la aplicación del protocolo actual al equipo, que fue seleccionado en el plan, y modificado por la acción de control

Fase 3. **Comparación** que es equivalente a “C”. Esta fase consiste en determinar la desviación comparando la referencia dada por los indicadores de disponibilidad y fiabilidad con el resultado de la aplicación del protocolo dado por el cálculo de los indicadores durante el siguiente periodo de uso del equipo.

Fase 4. **Acción de control** es equivalente a la acción “A”. Determinar la acción correctiva necesaria, para la eliminación del desvío de los resultados obtenidos de la aplicación de los protocolos de la referencia del resultado esperado.

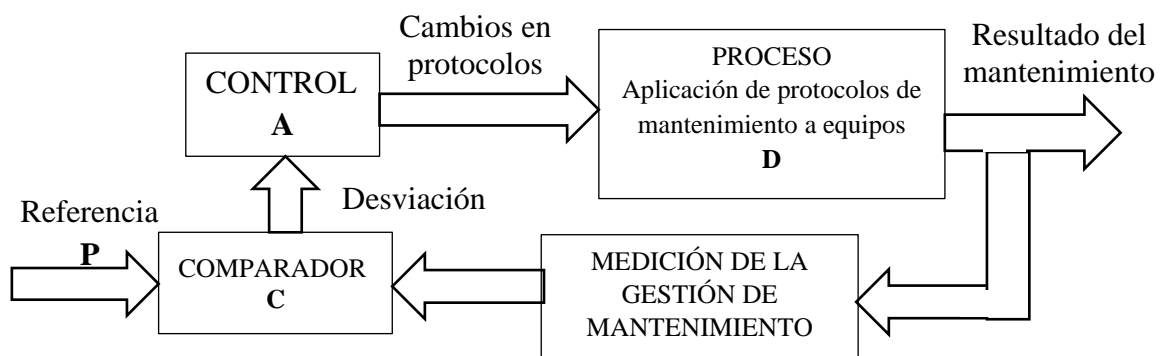


Figura 5. Diagrama de la gestión de mantenimiento y analogía de un lazo de control.

Fuente: Unapanta, 2019.

#### 1.4.9. Medición de la gestión de mantenimiento

Para medir la gestión de mantenimiento se utilizan indicadores de disponibilidad para que los equipos estén operativos cuando se necesitan y la confiabilidad que un equipo no falle mientras se está usando. Según García (2019). La disponibilidad en forma general se define como el cociente de dividir el número de horas que un equipo ha estado disponible para producir y el número de horas totales en un período, como se expresa en la ecuación 1.

$$Disponibilidad = \frac{Horas\ Totales - Horas\ paradas\ por\ mantenimiento}{Horas\ Totales} \quad \text{Ecu. 1}$$

En procesos en las que la parada de un equipo provoca la paralización de toda la producción, es importante calcular la disponibilidad de cada uno de los equipos, esto es porque los protocolos de mantenimiento son por equipo y la acción de corrección (modificación de los



protocolos) se hace en función de la medición de la gestión de ese equipo. . En el caso de aquellos equipos que no detienen la producción se debe seleccionar aquellos que tengan alguna entidad o importancia dentro del sistema productivo (García, 2012).

Una vez que se tiene la disponibilidad de cada uno de los equipos, se puede calcular la media aritmética para obtener la disponibilidad total del proceso, mediante la ecuación 2.

$$Disponibilidad\ total = \frac{\sum Disponibilidad\ de\ equipos\ significativos}{N^\circ\ de\ equipos\ significativos} \quad Ec. 2$$

La disponibilidad por falla son las intervenciones no programadas que se generan por causas imprevistas se muestra en la ecuación 3

$$Disponibilidad\ por\ falla = \frac{Horas\ totales - Horas\ de\ paradas\ por\ fallas}{Horas\ totales} \quad Ec. 3$$

En la disponibilidad por falla no se consideran las paradas programadas de los equipos. Igual que en el caso anterior, es conveniente calcular la media aritmética de la disponibilidad por avería, para tener un dato único, definido como “tiempo medio entre fallas” *MTBF* (*Mid Time Between Failure*) que permite conocer la frecuencia entre fallas y se muestra en la ecuación 4

$$MTBF = \frac{N^\circ\ de\ Horas\ totales\ del\ periodo\ analizado}{N^\circ\ de\ fallas} \quad Ec. 4$$

Otro indicador importante que refleja la importancia de las fallas que se producen en un equipo considerando el tiempo medio hasta su reparación es el “tiempo medio de reparación” *MTTR* (*Mid Time To Repair*), ver ecuación 5.

$$MTTR = \frac{N^\circ\ de\ horas\ de\ paro\ por\ falla}{N^\circ\ de\ fallas} \quad Ec. 5$$

Por simple manejo matemático de las ecuaciones anteriores se deduce que la disponibilidad por falla se puede escribir como se muestra en la ecuación 6.

$$Disponibilidad\ por\ falla = \frac{MTBF - MTTR}{MTBF} \quad Ec. 6$$

#### **1.4.10 Contexto Enap Sipetrol S.A.**

La Empresa Nacional del Petróleo (ENAP, 2017) es una empresa pública chilena, cuyo objeto es la exploración, producción y comercialización de hidrocarburos y sus derivados; y la producción, transporte y comercialización de energía y potencia eléctrica.

ENAP tiene actividades tanto en Chile como en el extranjero, a través de las filiales internacionales de Argentina, Ecuador y Egipto.

Enap Sipetrol S.A. es una filial de la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), creada el 24 de mayo de 1990, bajo el nombre de Sociedad Internacional Petrolera S.A. (Sipetrol S.A.). Depende funcionalmente de la Línea de Negocios de Exploración y Producción de ENAP, que es el área encargada de desarrollar las actividades relacionadas con la exploración y explotación de yacimientos de hidrocarburos. En Junta Extraordinaria de Accionistas, de fecha 2 de marzo de 2005, se aprobó cambiar el nombre de la sociedad por el de Enap Sipetrol S.A.

Las filiales y sucursales de la sociedad vigentes con participación en activos son: Enap Sipetrol S.A., Ecuador Sucursal registrada en Ecuador el 28 de octubre de 1992. Es titular de Contratos de Servicios Específicos para el Desarrollo y Producción de Petróleo Crudo en los campos Mauro Dávalos Cordero (MDC) y Paraíso Biguno Huachito Intracampos (PBHI), en la región amazónica ecuatoriana. Con fecha 15 de septiembre de 2008, se constituyó la compañía denominada Golfo de Guayaquil Petroenap, compañía de economía mixta, en Quito, Ecuador. Enap Sipetrol S.A., a través de la sucursal en Ecuador, suscribió 40 acciones Tipo “B”, que representan el 40% del capital social. **Para efectos del trabajo de titulación, el enfoque será en el campo Paraíso Biguno Huachito Intracampos.**

Enap SIPEC, inició los trabajos en los bloques Paraíso Biguno Huachito (PBH) y Mauro Dávalos Cordero (MDC) en el año 2003. La empresa ha crecido en forma segura, ordenada y con respeto por sus vecinos y el medio ambiente. Las operaciones se iniciaron con un grupo de sólo 20 trabajadores, y en la actualidad la dotación supera las 130 personas (113 hombres y 18 mujeres, para el año 2017).

## 2. APECTOS METODOLÓGICOS

El enfoque para el desarrollo del trabajo fue cualitativo, y se fundamentó en una investigación de campo de tipo descriptivo-explicativo, con un diseño no experimental.

Se realizó visitas de campo al bloque PBHI donde se recopiló información de la situación de la gestión de mantenimiento de los equipos de superficie y de fondo del sistema de levantamiento artificial para bombeo hidráulico. A partir del diagnóstico se inició el ciclo PDCA con el fin de mejorar de manera continua la gestión de mantenimiento.

Las etapas que se desarrollaron en el ciclo de mejora continua basado en el ciclo PDCA que se presenta en el cuadro 2. Cada una de las etapas consisten en:

**Planear:** En primer lugar, se realiza la selección del problema; es decir la selección de los equipos objeto de mantenimiento preventivo y/o correctivo, se buscan sus protocolos correspondientes y si uno de los protocolos no existe se generan sobre la base de los procedimientos suministrados por el fabricante y/o por expertos del área, se establecen prioridades y al personal responsable de su ejecución. En segundo lugar, se observan las características de los protocolos para gestionar los recursos de materiales y personal requerido. En tercer lugar, se analizan las causas del mantenimiento; para mantenimiento preventivo, se revisa la frecuencia y los resultados de las ejecuciones anteriores, además de analizar las causas de la falla y cuáles son los posibles procedimientos a ejecutar. En cuarto lugar, se establecen las estrategias y se desarrolla el plan a seguir. Esta etapa está asociada al primer objetivo específico, es decir al diagnóstico de la situación actual de los equipos que integran el sistema de superficie de bombeo hidráulico tipo Jet, ver cuadro 2.

**Hacer:** El equipo asignado se enfoca en la ejecución del proyecto, que consiste en la implementación de los protocolos de mantenimiento programados en la fase de planeación. Es importante dejar registro de los hallazgos encontrados durante la ejecución de cada paso del protocolo, considerando la aparición de nuevos problemas y la búsqueda de alternativas para la solución, ver cuadro 2.

**Chequear:** Se evalúan los resultados de la aplicación de los protocolos de mantenimiento mediante comparaciones de los registros elaborados en la fase anterior. Se realizan listas de los problemas obtenidos que permitirán desarrollar las correcciones de los protocolos modificando el paso donde se detectó el problema y/o agregando nuevos pasos que mejoren el protocolo.

Cuadro 2. Etapas, actividades y posibles herramientas en un ciclo PDCA.

CICLO	ETAPA		ACTIVIDADES	POSIBLES HERRAMIENTAS
P	1	Seleccionar el problema	Buscar información del problema	Gráficos, fotografías, archivos
			Mostrar pérdidas actuales y posibles ganancias	
			Priorizar temas	Diagrama de Pareto
			Nombrar responsables	
	2	Observar las características del problema	Describir las características del problema a través de la recolección de datos.	Estratificación, hoja de verificación, gráfico de Pareto, priorización, entre otros.
			Describir las características del problema a través de la observación del entorno.	Entrevistas, fotos, videos, observación.
			Hacer cronogramas, presupuestos y establecer metas	
	3	Analizar el proceso	Definir las causas influyentes	Involucración de personas
			Seleccionar las causas más probables	
			Analizar las causas más probables	Estratificación, hoja de verificación, gráfico de Pareto, priorización, entre otros.
			Probar la consistencia de la causa fundamental	
	4	Plantear soluciones	Diseñar la estrategia de acción	
Elaborar el plan de acción			Técnica 5W-1H ó 5W-2H	
D	5	Implementar las acciones correctivas	Entrenar a todos los involucrados en la acción de bloqueo	Cursos sobre protocolos y análisis de mantenimiento
			Ejecutar el plan de acción	Protocolos de mantenimiento de equipos.
C	6	Evaluar los resultados	Comparar los resultados	
			Listar los efectos secundarios (buenos y malos)	Históricos, hojas de cálculo, bases de datos
			Verificar la permanencia del problema	Análisis de la gestión de mantenimiento
A	7	Estandarización	Elaborar o alterar el procedimiento operacional estándar	Protocolos de mantenimiento de equipos
			Comunicar la existencia del nuevo procedimiento o la alteración del existente.	Informar al personal involucrado en mantenimiento
			Educación y entrenar	Cursos al personal sobre ciclo PDCA y protocolos de mantenimiento de equipos.
			Hacer el seguimiento a la utilización del procedimiento operacional estándar	Históricos
	8	Conclusión	Hacer relación de los problemas pendientes	Tormenta de ideas, diagramas causa efecto, Grafica de Pareto
			Planear la solución de los problemas pendientes	Análisis de resultados de proyectos.
			Reflexionar sobre las actividades ejecutadas	

Fuente: Falconi, 1994.

Con la lista de problemas y sus causas se hacen diagramas de Pareto con el fin de priorizar los cambios que se deben aplicar con el propósito de mejorar la gestión de mantenimiento. También se verifica si las mejoras hechas en los protocolos ejecutados en mantenimientos anteriores han dado los resultados esperados, ver cuadro 2.

**Actuar:** Si se han hecho modificaciones de los protocolos de mantenimiento se estandarizan y se informa a los responsables de su ejecución los cambios. Se entrena al personal sobre los nuevos procedimientos. Se planifican y desarrollan cursos al personal de mantenimiento sobre cómo hacer los cambios en los protocolos cuando sea necesario. Una vez estandarizados los protocolos de mantenimiento se hace seguimiento a la efectividad para determinar posibles mejoras en futuras aplicaciones. Finalmente se hacen reflexiones sobre la gestión de mantenimiento ejecutado y por ejecutar para la aplicación de nuevos protocolos a otros equipos y generar nuevos ciclos de mejoras. Es de notar que este proceso es cíclico, lo que produce una mejora continua de la gestión de mantenimiento, ver cuadro 2.

Una actividad de la gestión de mantenimiento que realiza ENAP SIPEC es el registro en una hoja de cálculo de Excel de la bitácora de impactos en los pozos por mantenimiento de los equipos. La información que se registra en esta bitácora es: la ubicación del equipo en la planta, el sistema al que pertenece, el nombre del equipo, Tag que identifica el equipo en campo, actividad que realiza el equipo, el evento que ocasionó el registro, la causa de mantenimiento, el tipo de mantenimiento (preventivo o correctivo), responsable de la ejecución, fecha y hora del evento, fecha y hora de inicio, fecha y hora de terminación, indicadores de gestión (MTTF y MTTR) y la disponibilidad) y las pérdidas por el evento. Como ejemplo, en el cuadro 3 se colocaron solo cuatro eventos que se tomaron de la bitácora del mes de agosto del 2018.

Cuadro 3. Datos en la bitácora de eventos por mantenimiento

UBICACIÓN	SISTEMA	NOMBRE DEL EQUIPO	TAG	ACTIVIDAD	TOP EVENT
MDC	MDC BES	MDC 13	MDC 13 BES	Levantamiento artificial	Apagado manual VSD
PBHI	PSO BES	PSO 11/19/20/23	PSO 11/19/20/23 BES	Generación eléctrica	Shutdown general PSO
PBHI	PSO BES	PSO 11	PSO BES	Levantamiento artificial	Apagado manual VSD
PBHI	HUA PO	HUA 1	HUA 1 PO	Generación eléctrica	Apagado manual MTU

Cuadro 3. Continuación, otros datos de la bitácora.

CAUSA	PLAN DE ACCIÓN	RESPONSABLE	START UP TIME (Hora)	END UP TIME (Hora)	END DOWN TIME (Hora)
Mantenimiento preventivo VSD	Preventivo	Técnico SLB	6-21-18 11:00 AM	8-2-18 10:00 AM	8-2-18 11:00 AM
Apertura LTE. Apertura secc. celda aérea PSO 11	Correctivo	Eléctrico PSO	7-29-18 10:00 AM	8-3-18 2:00 PM	8-3-18 7:00 PM
Mantenimiento preventivo VSD	Preventivo	Técnico SLB	8-3-18 7:00 PM	8-7-18 1:00 PM	8-7-18 2:00 PM
Mantenimiento Bomba Quintuplex P.O.	Preventivo	Eléctrico PSO	7-28-18 10:30 AM	8-7-18 9:00 AM	8-8-18 1:00 AM

Cuadro 3. Continuación, otros datos de la bitácora,

MTTF [Hora]	MTTR [Hora]	MTBF [Hora]	FR ( $\lambda$ ) (Hr-1)	DISPONIBILIDAD	CONSECUENCIA PÉRDIDA (BLS)
1,007	1	1,008	0.0010	99.90%	18
124	5	129	0.0078	96.12%	245
90	1	91	0.0110	98.90%	22
239	16	255	0.0039	93.71%	72

Elaborado por: Unapanta, 2019.

Fuente: ENAP SIPEC, 2018.

**MTTF** (Mean Time To Failure) tiempo medio entre fallas es una medida básica de fiabilidad de los sistemas no reparables. Es el tiempo medio esperado hasta la primera falla o mal funcionamiento de una pieza de un equipo. Es un valor estadístico y la media durante un período largo de tiempo y un gran número de unidades.

$$MTTF = \text{End Up Time} - \text{Start Up Time} \quad \text{Ec. 7}$$

**MTTR** (Mean Time To Repair) o tiempo medio por reparación. Es el tiempo necesario para reparar o sustituir un equipo reparable o no reparable que ha fallado.

$$MTTR = \text{End Down Time} - \text{Start Down Time} \quad \text{Ec. 8}$$

La metodología para el desarrollo de la gestión de mantenimiento se realiza basado en la analogía del ciclo de mejora continuo PDCA y un sistema de control de lazo cerrado establecida por Tavares (2000), y se describe en la sección 1.4.7.

## 2.1 Aplicación de la gestión de mantenimiento a la bomba de pozo tipo jet.

### 2.1.1 Plan de trabajo Fase P del ciclo PDCA

Siguiendo la metodología se procedió a la fase de planear. En primer lugar, de ENAP SPEC. (2018) se escogió la bomba jet del pozo PSO-3 como problema porque está en su límite de frecuencia para mantenimiento preventivo. Se buscó en el histórico de bombas hidráulicas del pozo PSO-3 y se determinó que fue instalada la bomba jet PARKERCO D6 el 15/12/2017 y se reinstaló el 17/12/2017 bomba jet PARKERCO D6 y se sustituyó la válvula st-valve con elementos de presión, por rediseño para la nueva geometría. El 30/05/2018 fue sustituida por la bomba jet PARKERCO D7 por bajo rendimiento. Se estableció como responsable el supervisor de producción.

Se revisó y analizó la información obtenida, el manual de mantenimiento de la bomba jet PARKERCO D6 y el personal especialista en este trabajo, se busca el protocolo de mantenimiento. Para determinar las causas raíz del problema en este caso (efecto, problemas en las bombas hidráulica tipo jet). Inicialmente se realizan reuniones con expertos y personal involucrado en el mantenimiento del equipo haciendo una tormenta de ideas con lo que se obtiene una lista de las causas luego se realiza un diagrama Causa-Efecto (Espina de pescado) para organizar y establecer causas primarias, secundarias y/o de orden mayor. En la ANEXO 1 está un diagrama causa-efecto para los problemas que afectan el funcionamiento de la bomba hidráulica tipo jet.

En el cuadro 4 se da un resumen de los problemas y causas raíces obtenidos del diagrama causa-efecto que se encuentra en el anexo 1.

Cuadro 4. Resumen de los Problemas y Causas Raíces.

	<b>PROBLEMAS</b>	<b>CAUSAS RAÍCES</b>
<b>MAQUINARIA</b>	Incremento lento en la presión de operación	Falta de reemplazo de garganta
	Caída en la producción	Falta de reemplazo de la garganta o difusor
	Incremento repentino de la presión	Falta de limpieza de tobera
	Desgaste en la garganta	Falta de reemplazo de la garganta
<b>MÉTODOS</b>	Falta de inspección	Ausencia de tareas estandarizadas
<b>MANO DE OBRA</b>	Trabajo basado en la experiencia	Falta de capacitación

**Fuente:** Unapanta, 2019.

De acuerdo con la información recolectada en campo, y como parte del diagnóstico se seleccionó como equipo principal la bomba hidráulica tipo jet y describiendo las razones por las cuales las bombas se deben cambiar en el Campo PBHI, en el cuadro 5 se presenta la descripción de los daños que causan un cambio de la bomba hidráulica tipo jet y el porcentaje de ocurrencia de cada una de las causas.

Cuadro 5. Causas del cambio de las bombas hidráulicas

ID	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO	PORCENTAJE
1	Rotura de nozzle	4%
2	Cavitación en gargantas	27%
3	Presencia de escala en nozzle	3%
4	Standing valve defectuoso (no realiza sello adecuado)	1%
5	Ahorro de fluido motriz	8%
6	Perdida de eficiencia en motor y bomba	3%
7	Corte de fluido en bushing, sellos, etc.	5%
8	Bajo potencial del pozo	26%
9	Presiones igualadas	3%
10	Build up	12%
11	Cambio de zona	6%

Fuente: ENAP SIPEC (2019).

Con los datos de las causas de cambio del cuadro 5 se construye el gráfico de Pareto, ver figura 6, donde se visualizan el porcentaje de cada una de las causas por la que se cambió la bomba hidráulica tipo jet se puede observar que las principales causas del cambio de las bombas hidráulicas es la cavitación en gargantas y el bajo potencial del pozo.

Con la información del gráfico de Pareto se puede priorizar las causas del cambio de la bomba y basado en esto se pueden tomar decisiones de la frecuencia con que se deben reemplazar y/o hacer mantenimiento a las partes de la bomba siendo esto el insumo para las modificaciones del protocolo de mantenimiento de la bomba hidráulica tipo jet que permitan mejorar la disponibilidad de este equipo. En el gráfico de Pareto la escala del lado izquierdo es el porcentaje de ocurrencia de una causa representada en barras y la escala del lado derecho es el porcentaje acumulado de las causas de forma lineal.



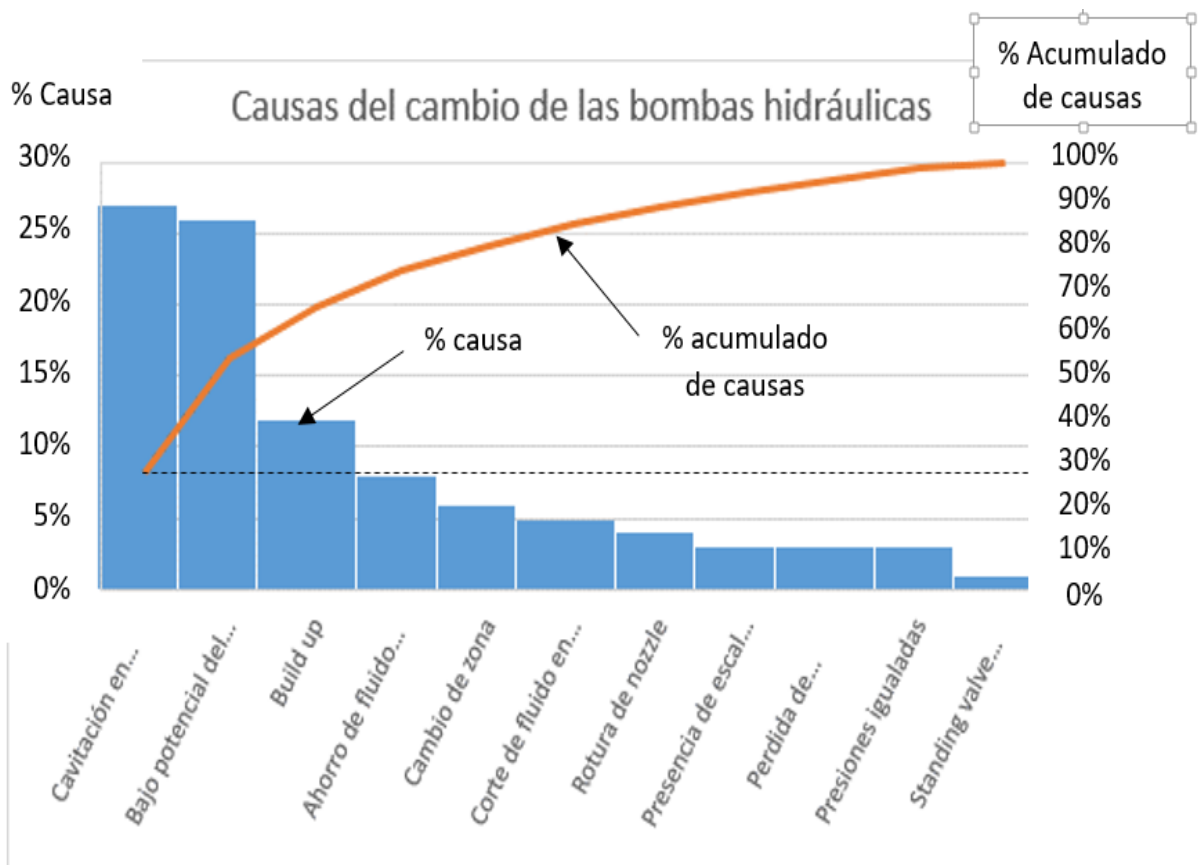


Figura 6. Gráfico de Pareto de las causas de cambio de bomba tipo Jet.  
Fuente: Autor, 2019.

El gráfico de Pareto da información de cuáles son las causas de mayor incidencia y que obligan a un cambio de equipo, como ya se mencionó la cavitación en garganta y el bajo potencial en el pozo tienen más probabilidad de ocurrencia que la suma de todas las demás, sin embargo cada una de las causas pueden producir una parada por lo que no deben ser descuidadas, una mejora es agregar a los protocolos de inspección los síntomas que se observan cuando existe o va ocurrir una de estas fallas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 RESULTADOS

##### 3.1.1 Situación de la gestión de mantenimiento actual

La gestión de mantenimiento es indispensable en cualquier sistema de producción con el fin de asegurar disponibilidad y operatividad de los equipos. En el campo PBHI operado por la empresa ENAP SIPEC, el 33% de los pozos petroleros son por levantamiento artificial hidráulico tipo Jet. Es evidente que existe una gestión de mantenimiento para estos equipos por la importancia en la producción del campo. El objetivo de este trabajo de titulación es incorporar a la gestión de mantenimiento existente, una metodología sustentada en protocolos de mantenimiento a equipos y, que de manera permanente se revise los resultados obtenidos; y, de requerirse, se actualicen los protocolos para una mejora continua la gestión del mantenimiento. La idea no es sustituir todas las actividades de la gestión actual, al contrario, las actividades de las tareas de operaciones relevantes en la gestión se mantendrán, pero pueden ser susceptibles de modificación en el ciclo PDCA para su optimización.

Una de las actividades de la gestión de mantenimiento actual, realizada por la empresa ENAP SIPEC, es generar un histórico de bombas hidráulicas de los pozos del campo PBHI, en el software Excel; cada pozo tiene una página con sus datos operacionales. Es de notar que la generación de estos históricos se mantendrá como una actividad por su valiosa contribución a la gestión de mantenimiento. En los cuadros 6, 7 y 8 se presenta doce registros de los datos tomados de la página de la bomba PSO-,1 de instalación y remplazos de bombas y sus características. En el cuadro 6 se muestra la información de: fecha de instalación, identificación del pozo, tiempo de trabajo en días (RUN LIFE), tipo de bomba que sale, compañía fabricante de la bomba y tipo de bomba que ingresa; al pozo PSO-1.

Cuadro 6. Datos históricos operativos de bombas hidráulicas del pozo PSO-1.

Fecha de instalación	POZO	RUN LIFE (Días)	BOMBA	Compañía	Tipo de bomba que ingresa
24-jun-15	PSO – 1	1426	JET 8A	SOLIPET	JET 8A
24-feb-15	PSO – 1	1546	JET 8A	SOLIPET	JET 8A
05-jun-14	PSO – 1	1810	JET 8A	SOLIPET	JET 8A
30-abr-14	PSO – 1	1846	JET 8A	SOLIPET	JET 8A
17-abr-14	PSO – 1	1859	JET 8A	SOLIPET	JET 8A
13-ene-14	PSO – 1	94	JET 7 B	TEAM	JET 7 B
05-dic-13	PSO – 1	39	JET C 5	SOLIPET	JET C 5

Cuadro 6. Continuación

22-oct-13	PSO – 1	44	JET 7B	SOLIPET	JET 7B
11-ago-13	PSO – 1	72	JET 7B	SOLIPET	JET 7B
27-mar-13	PSO – 1	137	JET 7B	SOLIPET	JET 7B
22-nov-12	PSO – 1	125	JET 7B	SOLIPET	JET 7B
12-ago-12	PSO – 1	102	JET 7B	SOLIPET	JET 7B

Elaborado por: Unapanta, 2019.

Fuente: ENAP SIPEC, 2018.

En el cuadro 7 se presenta datos históricos de las características de las bombas remplazadas del pozo PSO-1 con información de: fecha del remplazo, identificación del pozo, BIPD, producción en BFPD y contenido de agua y sedimentos BSW, presión de la planta, presión de operación y presión CSG.

Cuadro 7. Características de las bombas remplazadas en el pozo.

Fecha de remplazo	POZO	BIPD	PRODUCCIÓN		PRESIÓN DE PLANTA	PRESIÓN DE OPERACIÓN	PRESIÓN DE CSG
			BFPD	BSW			
24-jun-15	PSO - 1	1385	210	10	4100	4000	40
24-feb-15	PSO - 1	1400	268	11	4100	4000	35
05-jun-14	PSO - 1	1340		11	4100	4000	36
30-abr-14	PSO - 1	1430	382	11	4000	3900	35
17-abr-14	PSO - 1	1115		13	4000	3800	37
13-ene-14	PSO - 1	1284		13	4000	3800	37
20-jul-12	PSO - 1	1050	300	12	4000	3900	34
06-mar-12	PSO - 1	1120	358	12	4000	3900	34
08-sept-11	PSO - 1	1120	358	12	4000	3900	34
14-jun-11	PSO - 1	1370	230	12	4000	3980	34
02-may-11	PSO - 1	1130	251	14	4000	3950	35
28-ene-11	PSO - 1	1107	417	14	4000	3950	35

Elaborado por: Unapanta, 2019.

Fuente: ENAP SIPEC, 2018.

En el cuadro 8 se presenta las características de las bombas hidráulicas ubicadas en el pozo después del remplazo por mantenimiento preventivo o correctivo. La información es: fecha de instalación, identificación del pozo, BIPD, producción en BFPD y en BSW, la presión de la planta, presión de operación, presión CSG..

Cuadro 8. Características de las bombas hidráulicas en el pozo que entran

Fecha de instalación	POZO	BIPD	PRODUCCIÓN		PRESIÓN DE PLANTA	PRESIÓN DE OPERACIÓN	PRESIÓN DE CSG
			BFPD	BSW			
24-jun-15	PSO - 1	1412	216	10	4100	4000	36
24-feb-15	PSO - 1	1412	216	10	4100	4000	36
05-jun-14	PSO - 1	1421	210	11	4100	4000	36
30-abr-14	PSO - 1	1421	382	11	4000	3900	36
17-abr-14	PSO - 1	1415	305	11	4000	3900	35
13-ene-14	PSO - 1	1720	120	3	4050	2800	40

Cuadro 8. Continuación

20-jul-12	PSO - 1	1166	276	12	4050	3900	40
06-mar-12	PSO - 1	1420	283	12	4050	3900	40
08-sept-11	PSO - 1	1420	283	12	4050	3900	40
14-jun-11	PSO - 1	1420	283	12	4050	3900	40
02-may-11	PSO - 1	1196	230	12	4050	3900	32
28-ene-11	PSO - 1	1290	220	14	4000	3920	32

Elaborado por: Unapanta, 2019.

Fuente: ENAP SIPEC, 2018.

### 3.1.2. Implementación de protocolos de mantenimiento por equipo

Una actividad en la nueva de gestión de mantenimiento propuesta es la elaboración y aplicación de los protocolos de mantenimiento de los equipos. Una vez examinada la situación actual de la gestión de mantenimiento preventivo se implementó el protocolo de mantenimiento de la bomba hidráulica tipo jet del campo PBHI, ver figura 7.

ENAC SIPEC CAMPO PBHI	PROTOCOLOS DE MANTENIMIENTO	
Equipo: BOMBA HIDRAULICA TIPO JET		
Especialidad de ejecutores:		
Permiso de trabajo:	Frecuencia: cada 6 meses / anual	
Equipo en: O Marcha O Parado	Tipo de mantenimiento: O Inspección O Mantenimiento Programado O Mantenimiento Correctivo	
Descripción		
1	Inspeccionar sellos en busca de fugas	
2	Revisión de la tobera	
3	Limpieza de tobera	
4	Revisión de garganta o difusor	
5	Inspección de los sellos	
6	Inspección válvula de pie	
7	Verificar filtro de aspiración	
8	Verificar válvula de seguridad	
9	Verificación de la instalación eléctrica	
10	Cambios de aceite y filtros	
11	Revisión de empacaduras	
12	Revisión y justes de pernos de anclaje	
13	Verificar estado de las bases	
14	Limpieza general de la bomba	

Figura 7. Planilla protocolo de mantenimiento bomba hidráulica tipo jet

Fuente: El autor, (2019)

En la planilla del protocolo se observa una frecuencia de seis meses a un año determinado por recomendaciones del fabricante, esta frecuencia podría ajustarse en un rango más preciso evaluando los resultados obtenidos del funcionamiento y disponibilidad de la bomba. El tipo de mantenimiento podría ser una inspección donde solo se harán observaciones de la condiciones funcionales y físicas del equipo, también puede ser un mantenimiento programado preventivo o correctivo en el caso de que se ha detectado fallas en la operación de la bomba.

Seguidamente se presenta el plan de acción, con la técnica 5W1H, para los equipos que conforman el sistema de superficie de bombeo hidráulico tipo jet del Campo PBHI como cierre del primer objetivo específico y de la etapa P del ciclo PDCA. En este se realizan las cinco preguntas ¿Qué?, ¿Por qué?, ¿Cómo?, ¿Quién?, ¿Cuándo?, y una última pregunta relativa al ¿Dónde? para determinar cuáles son las acciones a seguir, partiendo del diagnóstico inicial, ver cuadro 9.

Cuadro 9. Plan de acción de equipos de superficie realizado con 5W-1H

ENAC SIPEC CAMPO PBHI		PLAN DE ACCIÓN			
¿QUÉ?	¿POR QUÉ?	¿CÓMO?	¿QUIÉN?	¿CUÁNDO?	¿DÓNDE?
Reemplazo de garganta	Para mejorar la eficiencia de las bombas	1. Haciendo un protocolo de reemplazo. Formatos. 2. Ejecutando el reemplazo	Ing. Hugo Mauricio Unapanta y personal de mantenimiento	Febrero 2019	CAMPO PBHI
Generar protocolo de limpieza de la tobera	Para estandarizar los procesos	1. Haciendo un protocolo de limpieza. 2. Ejecutando la limpieza	Ing. Hugo Mauricio Unapanta y personal de mantenimiento	Febrero 2019	CAMPO PBHI
Proponer responsable de ejecutar los protocolos	Porque la empresa debe contar con un responsable	En reunión del Dpto. de Mantenimiento, designar responsables	Jefe de mantenimiento	Febrero 2019	Dpto. de mantenimiento
Revisión de protocolos	Para mantener actualizados los protocolos	1. Ubicar los protocolos 2. Hacer revisión técnica de los protocolos 3. Realizar correcciones necesarias	Ing. Hugo Mauricio Unapanta	Febrero 2019	CAMPO PBHI

Fuente: Unapanta, 2019.

El líder para la ejecución de protocolos de mantenimiento debe tener habilidades para:

- ✓ Transmitir órdenes e instrucciones de forma clara y precisa, tanto verbalmente como de forma escrita.
- ✓ Realizar inspecciones en las instalaciones, infraestructuras y equipos.
- ✓ Diseñar y hacer los registros y controles para actualizar los protocolos.
- ✓ Evaluar y actualizar periódicamente los protocolos diseñados.
- ✓ Estimar cantidad de personal, tiempos de ejecución, materiales a emplear y costos de mantenimiento.
- ✓ Supervisar el personal a su cargo.
- ✓ Tener trato empático con su entorno, tanto con superiores, contratistas y personal.

### **3.1.3 Ejecución de protocolos de mantenimiento por equipo Fase D del ciclo PDCA**

En esta fase D (Hacer) se ejecutan los protocolos de mantenimiento del equipo. Este caso corresponde a la bomba hidráulica tipo jet ubicada en el pozo PSO-3. Tomando la información de ENAP SPEC. (2018), la bomba jet PARKERCO D6 fue instalada el 15/12/2017 por baja producción y se reinstalada el 17/12/2017 además se sustituye la válvula st-valve por elementos de presión, por rediseño de la nueva geometría. El 30/05/2018 fue sustituida por bomba jet PARKERCO D7 por baja producción. Se inicia el mantenimiento de la bomba el 31/05/2017 y finaliza el 05/06/2018 y que lista para reinstalar en un pozo.

Durante la ejecución del protocolo se deben registrar los eventos que se presentan durante el proceso. Por ejemplo, en el paso 1 se inspeccionan los sellos para determinar si hay fugas, se debe registrar la fecha y cuales sellos están dañados, además describir el daño del sello para en un análisis posterior determinar las causas. Los sellos deben ser remplazarlos en caso de fugas. Lo mismo para la revisión de la tobera, si tiene daños se debe remplazar de la misma forma en el paso con todos los pasos de inspección de revisión un cambio del protocolo puede ser agregar al paso correspondiente “sustituir si es necesario” y o agregar un nuevo paso, esto parece obvio pero la sugerencia puede ser importante para evitar confusiones. Con el tiempo, de estos registros, puede sugerir un cambio obligatorio para algunos o todos los casos después de un periodo de tiempo establecido.

## 3.2 DISCUSIÓN

### 3.2.1 Evaluación de los resultados Fase C del ciclo PDCA

En esta fase se determina que tan cerca están los resultados de la referencia que se establece como lo esperado o deseado de la ejecución de los protocolos de mantenimiento del equipo, tal como la disponibilidad, el MTTF, e MTTR, entre otros. En esta fase se compara el resultado obtenido con las metas establecidas. Si el resultado de la comparación es grande quiere decir que el problema persiste y que se debe realizar un análisis más exhaustivo que tenga como resultado cambios que reduzcan al mínimo esta diferencia.

Una posible meta es aumentar la disponibilidad del equipo, definida en la ecuación uno que repetimos aquí por facilidad para el lector

### 3.2.2 Análisis de los resultados Fase A del ciclo PDCA

En esta fase se realiza un análisis con dos propósitos uno es estandarizar los resultados para generalizar la solución del problema y el otro propósito es realizar conclusiones que conlleven a la solución de nuevos problemas y que sirvan de insumo a los nuevos planes de los planes en la fase P.

$$Disponibilidad = \frac{Horas\ Totales - Horas\ paradas\ por\ mantenimiento}{Horas\ Totales} \quad Ecu. 1$$

En el histórico de bombas hidráulicas de ENAP SIPEC las bombas hidráulicas tipo jet registran disponibilidades altas debido a que se cuenta con bombas de repuesto y las horas de parada sería solo por los remplazos de la bomba. En estos casos los indicadores MTTF que sería el tiempo entre fallas nos da una idea de la fiabilidad de la bomba y MTTR indica el tiempo en que se realiza el mantenimiento del equipo.

Esto sugiere que los equipos deben tener un protocolo para el mantenimiento cuando están fuera de servicio y otro para el remplazo del equipo. Como es el caso de la bomba jet D6 sustituida por baja producción por la bomba D7 el día 30 de mayo de 2018 según el histórico de bombas hidráulicas. La bomba fue retirada el día 29/7/2018 a las 8 am (Start up time) y comenzó el mantenimiento el día 8/8/2018 a las 5 pm (End up time) finalizó el mantenimiento el 8/8/2018 a las 8 pm (End down time) realizando los cálculos

$$\text{MTTF} = \text{End up time} - \text{Start up time} = 249$$

$$\text{MTTR} = \text{End down time} - \text{End up time} = 3$$

$$\text{MTBF} = \text{End down time} - \text{Start up time} = 252$$

La disponibilidad de la bomba hidráulica jet es:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{252 - 249}{252} \times 100 = 98.81\%$$

Para el modelo de gestión de mantenimiento si se reduce el tiempo de realizar el mantenimiento la disponibilidad aumenta por la ecuación 1. Si se realizan cambios al protocolo que agilice el mantenimiento del equipo tendríamos un aumento de la disponibilidad y por lo tanto una mejora de la gestión de mantenimiento.

### **3.3 Simulación de la gestión de mantenimiento**

La simulación de la aplicación del protocolo de la gestión de mantenimiento en el sistema de superficie de bombeo hidráulico tipo Jet del Campo PBHI como área piloto y en función del ciclo PDCA para mejorar la gestión, se plantea a través del flujograma que se muestra en la figura 8.

#### **Paso 1. PLANIFICAR (PLAN).**

Primero se debe analizar y estudiar los protocolos de mantenimiento para decidir qué cambios pueden mejorarlo y en qué forma se llevará a cabo. Para lograrlo es conveniente seleccionar el equipo para aplicar el protocolo de mantenimiento, hacer las inspecciones y mediciones respectivas, planificar las acciones de mantenimiento a ejecutar, establecer la referencia de disponibilidad deseada de los equipos con la con la gestión de mantenimiento.

#### **Paso 2. HACER (DO)**

En este paso, se debe ejecutar el protocolo de mantenimiento a los equipos que les corresponde hacer mantenimiento del sistema de superficie de bombeo hidráulico tipo Jet, según el plan realizado en la etapa anterior. Es necesario registrar los inconvenientes que se presentan en cada uno de los pasos del protocolo para los ajustes de los protocolos y así mejoren los resultados de la gestión de futuros mantenimiento.



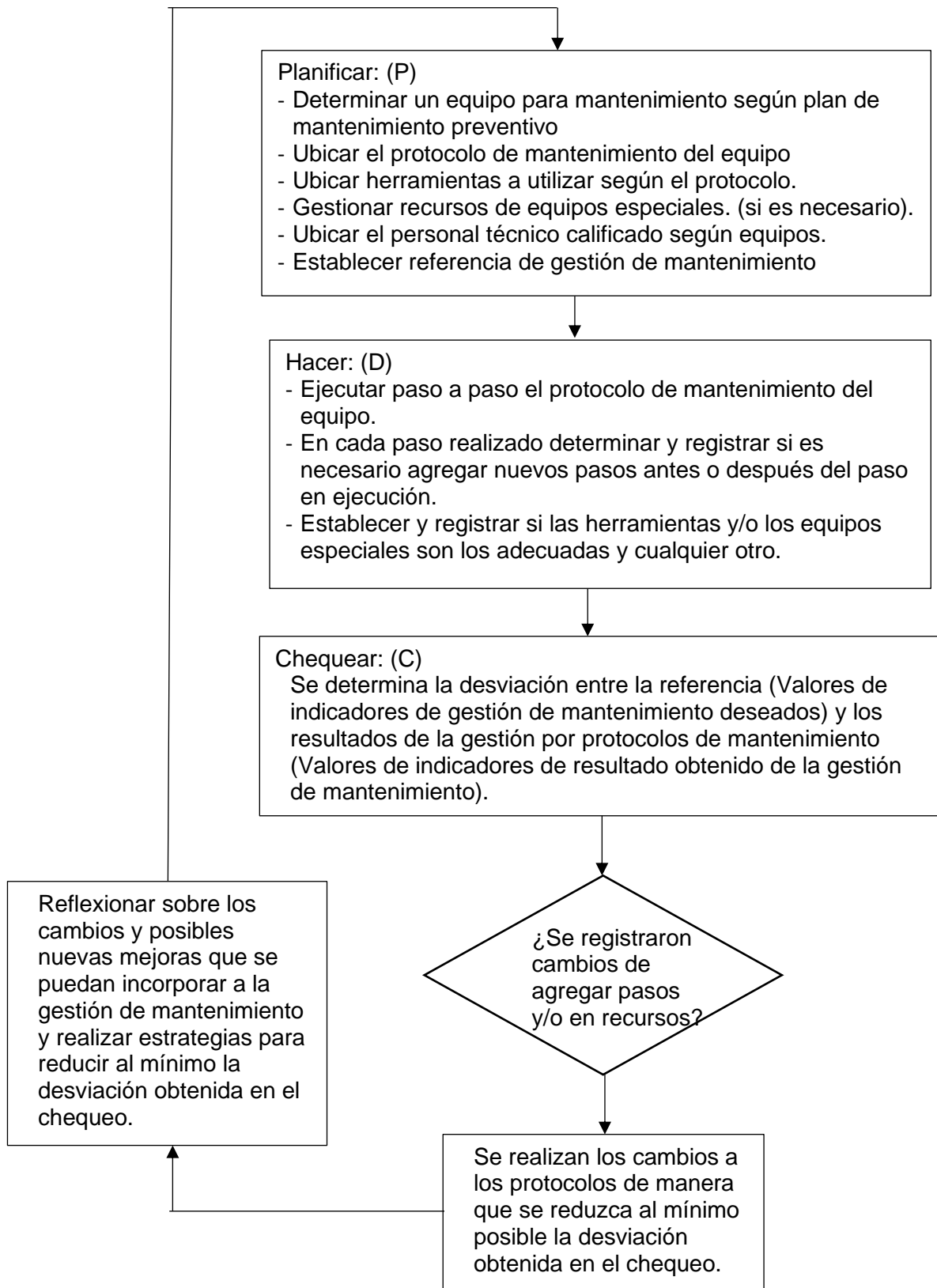


Figura 8. Flujograma de la simulación de la gestión de mantenimiento basado en protocolos de mantenimiento de equipos y el ciclo PDCA.

Fuente: Autor, 2019.

### **Paso 3. CHEQUEAR (CHECK)**

Luego de haber realizado la ejecución del protocolo de mantenimiento se debe evaluar los resultados mediante indicadores de disponibilidad de los equipos en el siguiente periodo de producción y compararlo con la referencia de disponibilidad deseada establecida en la fase del plan, el resultado de esta comparación es la desviación que se usaran para realizar las correcciones en la fase de acción. Los periodos de producción en los que se evalúa la disponibilidad de algunos equipos pueden ser de varios meses.

### **Paso 4. ACTUAR (ACTION)**

En fase del ciclo se deben estandarizar los protocolos y posteriormente, extender el ciclo a otros equipos de la planta PBHI. Se puede observar en que otras áreas de la planta PBHI se puede extender la metodología planteada.

Los largos periodos necesarios para medir los resultados de la disponibilidad de los equipos implican que la acción de control también se realice después de esos periodos, por esto la simulación que se realiza en este trabajo está basada en ejemplos teóricos.

Adicionalmente se considera de gran relevancia la asignación de la responsabilidad de la aplicación de los protocolos a un líder que sea el responsable de su ejecución.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. CONCLUSIONES**

Como resultado de la revisión de la situación actual de la gestión de mantenimiento preventivo, que realiza la empresa petrolera ENAP SIPEC, se determinó que las actividades de mantenimiento que existen pueden incorporarse al ciclo de mejoras continuo de la gestión de mantenimiento propuesta, por su gran aporte de información de los resultados al aplicar los protocolos de mantenimiento y son susceptibles a mejoras en busca de la optimización de la gestión de mantenimiento.

Con la aplicación del protocolo de mantenimiento a la bomba hidráulica tipo jet se obtuvo una pequeña mejora en la ejecución del tiempo de reparación MTTR con respecto a la media de reparaciones anteriores y del tiempo operación hasta que falla MTTF con respecto a la media de periodos de operación anteriores, se infiere que con la aplicación del ciclo PDCA se puede optimizar la gestión de mantenimiento aplicándolo de manera continua y permanente.

Con la simulación de la gestión de mantenimiento basado en protocolos de mantenimiento de equipos y el ciclo PDCA a la bomba hidráulica tipo jet del pozo PSO-1, se evidencia que la mejora de los protocolos por su actualización continua basado en los resultados de disponibilidad y de las observaciones del personal responsable de su ejecución conlleva a la optimización de la gestión de mantenimiento y podría ser aplicado a cualquier equipo de procesos productivos.

### **4.2 RECOMENDACIONES**

Elaborar los protocolos de mantenimiento de cada uno de los equipos de los sistemas de Levantamiento Artificial instalados en el Campo PBHI de forma gradual y aplicar el ciclo PDCA en los procesos de mantenimiento con el fin de realizar la mejora continua de los protocolos.

Es importante realizar la capacitación del personal de mantenimiento de cómo realizar los procedimientos de aplicación de los protocolos y el levantamiento de la información que permitirá determinar si se deben realizar cambios al protocolo y cuáles son los cambios de manera de mejorar su aplicación del protocolo en futuras aplicaciones.

Incluir en el sistema de mantenimiento un software SCADA (Sistema de Control y Adquisición de Datos) que permita monitorear y almacenar las variables del proceso con el fin de tener históricos que mediante un análisis y basado en las especificaciones de los fabricantes se puedan predecir posibles fallas de equipos que afecten la producción. Mediante estos históricos y con un software especializado se facilitaría la modificación de los protocolos de mantenimientos, así como la planificación de mantenimiento predictivo.

Para la elaboración inicial de los protocolos se debe consultar a los expertos de mantenimiento del equipo específico y los manuales de mantenimiento de los fabricantes de los equipos.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Boero, C. (2006).** Mantenimiento Industrial. Córdoba: Jorge Sarmiento, Pág. 14.
- Brown, K. (1980).** The technology of Artificial Lift Methods. Volumen 2b. Jet Pumping. The University of Tulsa.
- Brown, K. (1984).** The technology of Artificial Lift Methods. Production Optimization of oil and gas well by Nodal Systems Analysis, University of Tulsa.
- Cárcel, F. (2015).** Ingeniería del mantenimiento industrial y gestión del conocimiento. Mejora en la eficiencia de las empresas. Artículo de revista Elementos Número 5. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- De La Paz Martínez., E. (2014).** Una nueva visión en la gestión del mantenimiento. COPIMAN, Cuba
- Dresser. (2003).** Introducción a los Sistemas de Bombeo Hidráulico. Texas: Dresser, págs. 1-1,5-1,5-5,5-11,5-25.
- ENAP SIPETROL S.A. (2013).** Memoria Anual.
- ENEP SIPEC. (2015).** Manual de operaciones. Estación de producción Paraíso PBHI Campus: Paraíso, Biguno, Huachito y Inchi. Ecuador.
- ENAP SIPETROL S.A. (2017).** Memoria Anual.
- ENAP SPEC. (2018).** Históricos operativo de bombas hidráulicas en pozo. Bitácora de julio y agosto de 2018.
- Falconi, V. (1994).** Gerenciamiento de la Rutina. Editorial Belo Horizonte.
- García, S. (2012).** Ingeniería de Mantenimiento. Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento. Módulo 4. RENOVETEC. Disponible en:  
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/inspecciones/lec4.pdf>
- Guevara, R. (2017).** Bombeo sumergible, Bombeo Hidráulico tipo Jet y Bombeo Piston. UTE, Ecuador. Disponible en:

<https://www.slideshare.net/RodrigoGuevaraGuevar/bombeo-electro-sumergible-bombeo-hidraulico-tipo-jettipo-y-piston-rodrigo-guevara>

**INTEGRAMARKETS (2018).** Gestión y Planificación del Mantenimiento Industrial. Producido, desarrollado, editado y publicado por INTEGRAMARKETS Escuela de Gestión Empresarial 2da Edición ISBN 9781370710768. *Grupo América Factorial S.A.C.*

**Pérez, J. (2013).** Alternativas en el bombeo hidráulico tipo jet para optimizar la producción de hidrocarburos. Tesis de Ingeniería de petróleo. Universidad Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. México.

**Nakajima, S. (1991).** Implementación del mantenimiento productivo total. Programa de desarrollo del TMP. Tecnología de Gerencia y Producción S.A.

**Tavares, L. (2000).** Administración moderna de mantenimiento. Publicado por Novo Polo. Brasil.

**Sánchez, J. (2011).** Estudio del sistema de bombeo hidráulico tipo jet en el pozo libertador 123 del campo libertador para la producción de petróleo en el período 2010. Tesis de grado de Tecnólogo en petróleos Universidad Tecnológica Equinoccial, facultad de ciencias de la Ingeniería. Quito, Ecuador.

**Shuaib, A. (2017).** Optimun Selection and Application of Hydraulic Jet Pump for Well-1A. SPE-188631-MS.

**Yunapanta, J. (2011).** Modelación y simulación de un sistema centralizado de bombeo tipo Jet de un campo petrolero. Tesis de Magister de Ingeniería de petróleo. Quito, Ecuador.

ANEXO 1

Diagrama Causa – Efecto (Espina de pescado).

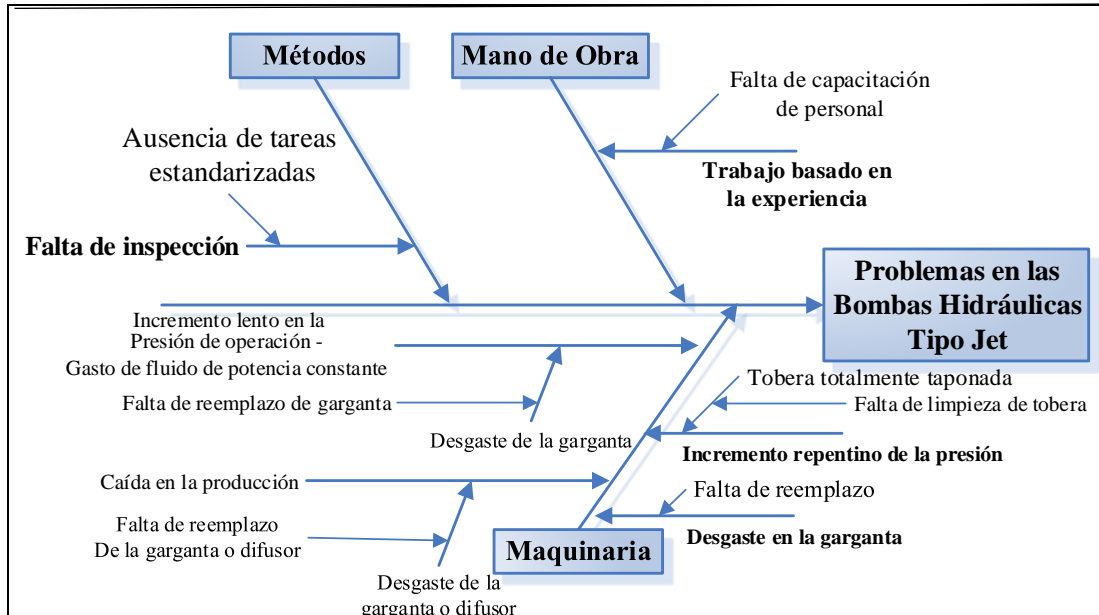


Diagrama Causa – Efecto (Espina de pescado).

Fuente: Unapanta, 2019.