

**OPTIMIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS QUE
CONFORMAN LOS POZOS PRODUCTORES DE PETRÓLEO DE LA
GERENCIA DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN PIEDEMONTA DE LA
EMPRESA COLOMBIANA PETRÓLEOS S.A.**

**JOVANNY CASTELLANOS CASTILLO
RAFAEL LEONARDO SANABRIA GUTIERREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
YOPAL
2016**

**OPTIMIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS QUE
CONFORMAN LOS POZOS PRODUCTORES DE PETROLEO DE LA
GERENCIA DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN PIEDEMONTA DE LA
EMPRESA COLOMBIANA PETROLEOS S.A.**

**JOVANNY CASTELLANOS CASTILLO
RAFAEL LEONARDO SANABRIA**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar el título de
Especialista en Gerencia de mantenimiento**

**Director:
JUAN GUILLERMO MARTÍNEZ ECHEVERRY
Ingeniero electricista**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
YOPAL
2016**

RESUMEN

TÍTULO:

OPTIMIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS QUE CONFORMAN LOS POZOS PRODUCTORES DE PETRÓLEO DE LA GERENCIA DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN PIEDEMONTE DE LA EMPRESA COLOMBIANA PETRÓLEOS S.A.

AUTOR:

JOVANNY CASTELLANOS CASTILLO**
RAFAEL LEONARDO SANABRIA GUTIÉRREZ**

PALABRAS CLAVE:

CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD, MODO DE FALLA, ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ.

CONTENIDO:

Esta monografía muestra el desarrollo de la evaluación y optimización del plan de mantenimiento de los equipos que conforman el sistema de pozos productores de petróleo de la gerencia de desarrollo y producción piedemonte de la Empresa Colombiana Petróleos S.A.

La optimización del plan de mantenimiento se realiza como respuesta a la necesidad de minimizar los impactos en la producción, la sobreutilización de horas hombre y en el alto costo de repuestos, causados por la indisponibilidad de los pozos. El objetivo primordial es realizar un plan de mantenimiento óptimo a costo razonable, el cual garantice la disponibilidad y confiabilidad de los activos.

El desarrollo de la metodología está soportado por la información técnica de los sistemas, equipos, y la experiencia del personal que opera y mantiene los pozos del campo Cupiagua. Estos son fundamentales en cada una de las etapas de la aplicación de la metodología, principalmente durante la identificación de los modos de falla. Una vez desarrollada, la metodología logra optimizar las actividades de mantenimiento, eliminando del plan las tareas que no generan valor.

El resultado de la optimización se implementará en el sistema CMMS SAP®, pero debe ser un plan de mantenimiento dinámico en busca de la mejora continua, que permita incrementar la efectividad del mismo. Debe estar soportado por la gerencia del campo y por el compromiso constante por parte del personal de mantenimiento.

* Monografía de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.

Director: Juan Guillermo Martínez Echeverry

ABSTRACT

TITLE:

OPTIMIZATION OF THE MANTINANCE PLAN FOR THE EQUIPMENT THAT MAKE UP THE SYSTEM PRODUCING OIL WELLS OF THE DEVELOPMENT AND PRODUCTION MANAGEMENT OF PIEDEMONTE OF THE COLOMBIAN PETROLEUM COMPANY S.A .

AUTHOR:

JOVANNY CASTELLANOS CASTILLO**
RAFAEL LEONARDO SANABRIA GUTIÉRREZ**

KEYWORDS:

RELIABILITY, AVAILABILITY, FAILURE MODE, ROOT CAUSE ANALYSIS, FAILURE MODES.

CONTENTS:

This paper shows the development of the evaluation and optimization of the maintenance plan of equipment that make up the system producing oil wells of the development and production management of Piedemonte of the Colombian Petroleum Company S.A.

The optimization of the maintenance plan is in response to the need to minimize impacts on production, the overuse of man hours and the high cost of spare parts caused by the unavailability of the wells. The main objective is to make an optimal maintenance plan at reasonable cost, which will ensure the assets availability and reliability.

The development of the methodology is supported by technical information systems, equipment, and experience of the staff that operates and maintain Cupiagua wells field. These are essential at each stage of the application of the methodology, primarily for identifying failure modes. Once developed, the methodology optimizes maintenance activities, eliminating the plan tasks that do not create value.

The result of the optimization is implemented in the CMMS SAP® system; but should be a dynamic maintenance plan looking for continuous improvement that will increase the effectiveness. It must be supported by management of the field and the constant commitment by the maintenance staff.

* Monografía de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.

Director: Juan Guillermo Martínez Echeverry

CONTENIDO

1. MARCO CONTEXTUAL	14
1.1 EMPRESA COLOMBIA DE PETRÓLEOS S.A.....	14
1.1.1 Reseña histórica.....	14
1.1.2 Marco estratégico.....	16
1.1.3 Estructura organizacional.....	17
1.2 GERENCIA DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN PIEDEMONTE	19
1.2.1 Instalaciones Centrales de Procesamiento Cupiagua	19
1.3 PROCESO DE TRATAMIENTO DEL PETRÓLEO	21
1.3.1 Pozos productores de petróleo	25
1.3.2 Sistemas del panel de control de cabeza de pozo	26
1.3.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	36
1.4 OBJETIVOS.....	37
1.4.1 Objetivo general	37
1.4.2 Objetivos específicos	37
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	38
2. MARCO TEÓRICO	39
2.1 EVOLUCION DEL MANTENIMIENTO.....	39
2.1.1 La Primera Generación	39
2.1.2 La Segunda Generación	39
2.1.3 La Tercera Generación	40
2.2 MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD RCM	42
2.2.1 Las siete preguntas básicas del RCM.....	43
2.3 OPTIMIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO.....	47

2.4	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD	54
2.4.1	Definición de Falla.....	54
2.4.2	Análisis de Modos de Falla	55
2.4.3	Métodos de análisis de los modos de falla.....	55
2.4.4	Indicadores de Confiabilidad.....	58
3.	RECOPIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	60
3.1	PLAN DE MANTENIMIENTO ACTUAL	60
3.1.1	Mantenimiento preventivo y Correctivo	65
3.2	ANÁLISIS DE LOS INDICADORES DE CONFIABILIDAD	67
3.2.1	Tiempo Medio entre Fallas (MTBF).....	67
3.2.2	Confiabilidad	68
3.2.3	Disponibilidad.....	68
3.2.4	Análisis de malos actores de mantenimiento	69
3.2.5	Análisis de Pareto e identificación de modos de falla.....	70
3.2.6	Revisión análisis de causa raíz	72
4.	METODOLOGÍA PROPUESTA.....	77
4.1	OPTIMIZACIÓN DEL PLAN MANTENIMIENTO.....	77
4.1.1	Análisis de Modos de Falla	77
4.1.2	Identificación de Causas raíz y Planes Acción.....	78
4.1.3	Definición Plan de Mantenimiento	80
5.	ESTRATEGIAS DE LA IMPLEMENTACION	87
5.1	ANÁLISIS DE COSTOS DE MANTENIMIENTO.....	88
	CONCLUSIONES	90
	BIBLIOGRAFÍA.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Refinería de Barrancabermeja	15
Figura 2 Estrategia empresarial	16
Figura 3 Organigrama	18
Figura 4 Instalaciones Centrales de Procesamiento (CPF) Cupiagua.	19
Figura 5 Localización geográfica de Campos Cupiagua y Cupiagua Sur	20
Figura 6 Esquema de Llegada del Petróleo al CPF-Cupiagua.....	21
Figura 7 Llegada crudo CPF-Cupiagua	22
Figura 8 Separación CPF-Cupiagua	22
Figura 9 Separación CPF-Cupiagua	23
Figura 10 Tanque Almacenamiento CPF-Cupiagua	23
Figura 11 Esquema del proceso del petróleo en el CPF-Cupiagua	24
Figura 12 Pozo productor de petróleo Cupiagua	25
Figura 13 WHCP de un Pozo productor de petróleo Cupiagua	26
Figura 14 WHCP de un Pozo productor de petróleo Cupiagua	27
Figura 15 Paneles solares del WHCP.....	28
Figura 16 Tarjeta reguladora de carga.....	29
Figura 17 Baterías del sistema de energía solar.....	29
Figura 18 Baterías del sistema de energía solar.....	30
Figura 19 PLC WHCP pozo Cupiagua.....	34
Figura 20 Módulos Expansión PLC.....	34
Figura 21 Sistema MDS en el WHCP	35
Figura 22 Ciclo Vicioso de Mantenimiento Reactivo	47
Figura 23 Fuente del Mantenimiento Preventivo (PM).....	49
Figura 24 Diagrama de Pareto.....	58
Figura 25 Integración Modulo SAP-PM.....	61
Figura 26 Estrategia Mantenimiento WHCP en CMMS Ellipse®.	62
Figura 27 Descripción de tareas de Mantenimiento WHCP en CMMS Ellipse®....	62
Figura 28 Plan de Mantenimiento WHCP Pozo Productor Cupiagua	64
Figura 29 Gráfica del porcentaje de mantenimiento 2014	65

Figura 30 Gráfica distribución de trabajos correctivos 2014	65
Figura 31 Gráfica del porcentaje de mantenimiento 2015	66
Figura 32 Gráfica distribución de trabajos correctivos 2015	66
Figura 33 Gráfica MTBF Sistema de Generación	67
Figura 34 Gráfica MTBF Sistema de Pozos.....	67
Figura 35 Gráfica de Confiabilidad Sistemas del CPF-Cupiagua	68
Figura 36 Gráfica de disponibilidad Sistemas del CPF-Cupiagua.....	69
Figura 37 Análisis de Malos Actores Sistemas del CPF-Cupiagua.....	70
Figura 38 Gráfica de Pareto por Modo Falla Sistema Pozos	71
Figura 39 Gráfica de Pareto por Pozos.....	71
Figura 40 Consecutivos de Análisis de Causa Raíz Sistema Pozos.....	73
Figura 41 Matriz RAM Ecopetrol.	74
Figura 42 Configuración del sistema de Carga WHCP	75
Figura 43 Árbol Lógico de Falla	76
Figura 44 Cuadro de causa raíz y Acciones.	76
Figura 45 Plan de Mantenimiento WHCP Pozo Productor Cupiagua	83
Figura 46 Listado Repuestos por sistema WHCP Pozo Productor Cupiagua.....	84
Figura 47 Listado Repuestos por sistema WHCP Pozo Productor Cupiagua.....	85
Figura 48 Listado Repuestos por sistema WHCP Pozo Productor Cupiagua.....	86
Figura 49 Plan de Mantenimiento WHCP Pozo Productor Cupiagua SAP®.....	87
Figura 50 Texto Explicativo. Tareas mantenimiento SAP®	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de los Pozos de los Campos Cupiagua y Cupiagua Sur.....	25
Tabla 2 Características de la primera generación del mantenimiento	39
Tabla 3 Características de la segunda generación del mantenimiento.....	40
Tabla 4 Características de la tercera generación del mantenimiento	41
Tabla 5 Ejemplo de análisis de modos de falla (FMA)	50
Tabla 6 Ejemplo de la Racionalización y revisión del FMA.....	50
Tabla 7 Ejemplo del Análisis Funcional	51
Tabla 8 Ejemplo Evaluación de Consecuencias	51
Tabla 9 Definición de la Política de Mantenimiento	52
Tabla 10 Estrategia Mantenimiento WHCP Pozos Productores Cupiagua	63
Tabla 11 Modos de Falla WHCP.....	77
Tabla 12 Modos de Falla y sistemas WHCP.....	78
Tabla 13 Modos de Falla y Plan de acción.	79
Tabla 14 Definición de nuevas tareas de mantenimiento	81
Tabla 15 Plan de Mantenimiento WHCP Pozo Productor Cupiagua.....	82
Tabla 16 Análisis de costos de mantenimiento.....	88

INTRODUCCIÓN

La Gerencia de Desarrollo y Producción Piedemonte Ecopetrol, tiene una producción diaria de crudo de 13.000 Barriles de Crudo, razón por la cual la disponibilidad y confiabilidad del sistema de pozos son vitales a la hora del cumplimiento de las metas económicas de la empresa. El sistema de pozos es el encargado de extraer el petróleo del yacimiento, el cual es enviado a las instalaciones Centrales de Procesamiento (CPF) Cupiagua para su tratamiento. Ante la problemática mundial con los precios del petróleo, las empresas tiene la misión de optimizar sus procesos para la supervivencia del negocio. Teniendo lo anterior como premisa, es conveniente evaluar los planes de mantenimiento en busca de optimizar a un costo razonable.

Esta monografía muestra el desarrollo de la metodología de optimización del plan de mantenimiento para los sistemas del panel de control de cabeza de pozo WHCP (Well Head Control Panel) de los campos Cupiagua. Dicha optimización parte de la necesidad de minimizar los impactos en la producción, la sobre utilización de horas hombre y en el alto costo de repuestos, causados por la indisponibilidad de los pozos. Aproximadamente el 20% de las actividades del sistema de pozos son correctivas debido a la gran cantidad de falla en los equipos que conforman el panel de control de cabeza de pozo.

Para el desarrollo de la optimización del plan de mantenimiento se evaluaron los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y tiempo promedio entre fallas, los cuales son claves en el análisis de Pareto para la identificación de malos actores y los modos de falla, a los cuales se va a realizar análisis de causa raíz. Una vez analizada la información se procede a evaluar y definir las tareas de mantenimiento, los recursos y repuestos necesarios para un mantenimiento óptimo.

1. MARCO CONTEXTUAL

1.1 EMPRESA COLOMBIA DE PETRÓLEOS S.A

Ecopetrol S.A. es una Sociedad de Economía Mixta, de carácter comercial, organizada bajo la forma de sociedad anónima. La Empresa Colombiana de Petróleos S.A. es la primera compañía de petróleo de Colombia. Se encuentra en el puesto 114 entre las empresas más grandes del mundo, y es la segunda empresa petrolera más grande de Latinoamérica por detrás de Petrobrás. La empresa Platts¹ ubicó a Ecopetrol como una de las 14 mejores empresas petroleras del mundo, cuarta en el continente americano y primera en Latinoamérica.

1.1.1 Reseña histórica

La reversión al Estado Colombiano de la Concesión De Mares, el 25 de agosto de 1951, dio origen a la Empresa Colombiana de Petróleos. La naciente empresa asumió los activos revertidos de la Tropical Oil Company que en 1921 inició la actividad petrolera en Colombia con la puesta en producción del Campo La Cira Infantas en el Valle Medio del Río Magdalena, localizado a unos 300 kilómetros al nororiente de Bogotá.²

En 1961 asumió el manejo directo de la refinería de Barrancabermeja. Trece años después compró la Refinería de Cartagena, construida por Intercol en 1956.

¹<http://www.platts.com/>

²http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/?urile=wcm%3apath%3a/Ecopetrol_ES/Ecopetrol/nuestra-empresa/Quienes-Somos/acerca-de-nosotros/Nuestra+Historia

Figura 1 Refinería de Barrancabermeja



Fuente: <http://barrancabermejajalida.blogspot.com.co>

En 1970 adoptó su primer estatuto orgánico que ratificó su naturaleza de empresa industrial y comercial del Estado, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, cuya vigilancia fiscal es ejercida por la Contraloría General de la República.

En los años noventa Colombia prolongó su autosuficiencia petrolera, con el descubrimiento de los gigantes Cusiana y Cupiagua, en el Piedemonte Llanero, en asocio con la British Petroleum Company.

Con la expedición del Decreto 1760 del 26 de Junio de 2003 modificó la estructura orgánica de la Empresa Colombiana de Petróleos y la convirtió en Ecopetrol S.A., una sociedad pública por acciones, ciento por ciento estatal.

A partir de 2003, Ecopetrol S.A. inició una era en la que, con mayor autonomía, ha acelerado sus actividades de exploración, su capacidad de obtener resultados con visión empresarial y comercial y el interés por mejorar su competitividad en el mercado petrolero mundial.

Actualmente, Ecopetrol S.A. es la empresa más grande del país con una utilidad neta de \$15,4 billones registrada en 2011 y la principal compañía petrolera en Colombia. Por su tamaño, pertenece al grupo de las 40 petroleras más grandes del mundo y es una de las cuatro principales de Latinoamérica.

1.1.2 Marco estratégico

El crecimiento de Ecopetrol durante los últimos ocho años ha permitido posicionar la empresa como la primera del país, creando mayor relevancia y visibilidad en el ámbito internacional, generando confianza para sus accionistas.

Figura 2 Estrategia empresarial



Fuente: <http://www.ecopetrol.com.co>

El crecimiento de Ecopetrol durante los últimos ocho años ha permitido posicionar la empresa como la primera del país, creando mayor relevancia y visibilidad en el ámbito internacional, generando confianza para sus accionistas.

Ecopetrol ha duplicado el crecimiento en producción en los últimos años al pasar de producir 399 kbped (miles de barriles equivalentes por día) en 2007 a 755,4 kbped en 2014, lo que equivale a un crecimiento de 1,8% en ocho años. Esto se

logró a través de una ruta de inversión y expansión que permitió una importante generación de valor.

Este crecimiento estuvo acompañado de altas rentabilidades entre los años 2007 y 2013, y fueron posibles en momentos en los que las capacidades de la organización lo facilitaron, los precios y el entorno local y global era favorable, lo que permitió que Ecopetrol creciera, lograra mayor relevancia y visibilidad en el ámbito internacional y respondiera a sus accionistas.

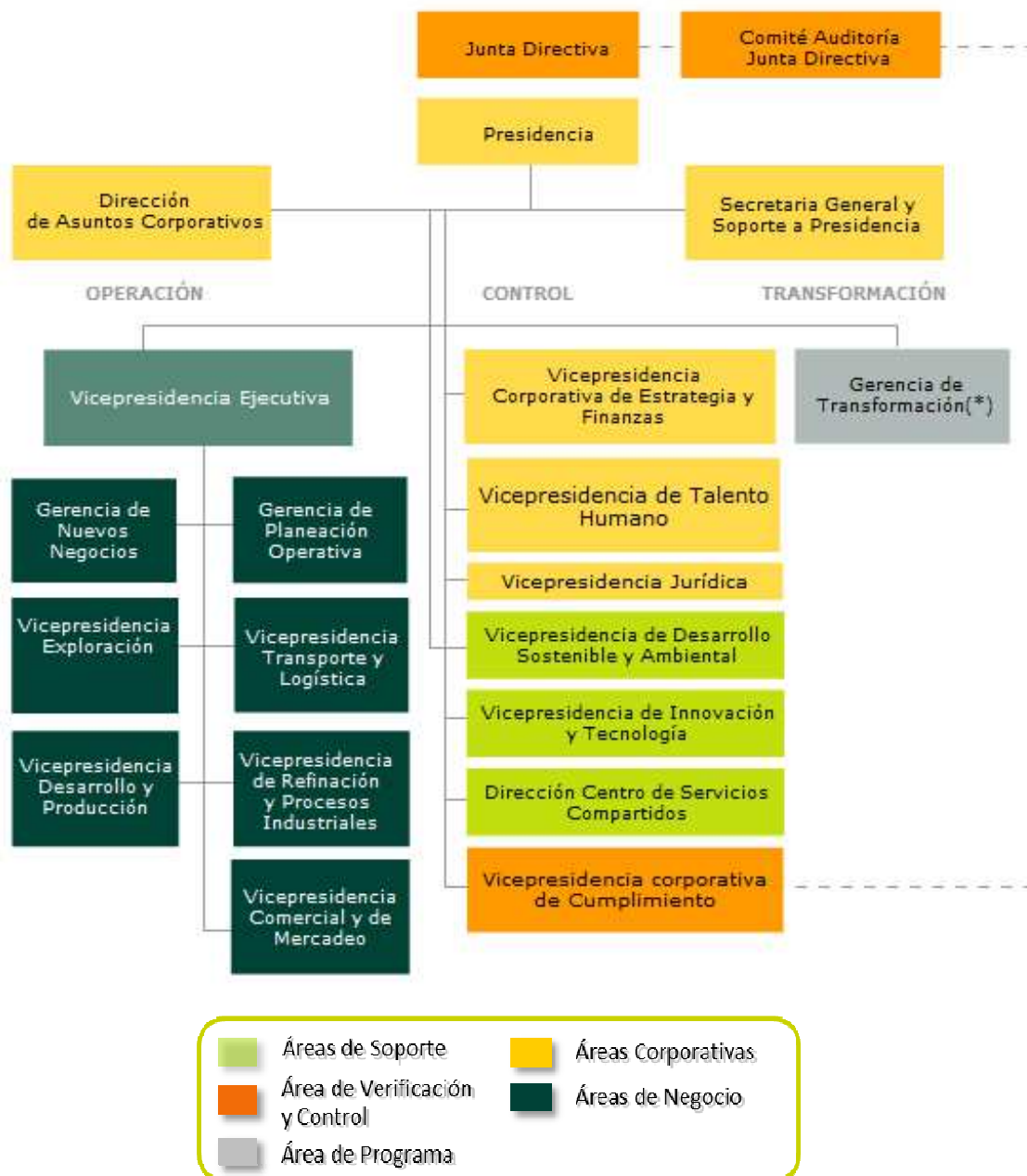
La dinámica del entorno de negocios nos obligan a reinventarnos para enfocarnos en lo que nos permitirá perdurar en forma competitiva en el mundo. Esto lleva a que las prioridades, los objetivos y la carta de navegación de Ecopetrol en Colombia e internacionalmente se transforme.

La revisión estratégica desarrollada entre el año 2014 y 2015 llevó a formular, revisar y evaluar nuevos escenarios estratégicos teniendo como fundamentos los criterios de creación de valor, sostenibilidad, viabilidad financiera y nivel de riesgo. Con base en lo anterior se redefine la estrategia y se crea un nuevo Marco Estratégico, así como los lineamientos que orientarán el rumbo del Grupo Ecopetrol.

1.1.3 Estructura organizacional

Ecopetrol S.A. esta dirigida por una junta directiva de está conformada por: el presidente; Carlos Cure, Ministro de Hacienda y Crédito Público; Mauricio Cárdenas Santamaría, Director Nacional de Planeación; Simón Gaviria Muñoz, entre otros. Presidente del comité directivo; Juan Carlos Echeverry.

Figura 3 Organigrama



Fuente: <http://www.ecopetrol.com.co>

1.2 GERENCIA DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN PIEDEMONTE

La Gerencia de Desarrollo y Producción Piedemonte (GDP), hace parte de las áreas de negocio y pertenece a la Vicepresidencia de Desarrollo y Producción de Ecopetrol. El Equipo de la GDP, está encargado de las operaciones de producción de los campos Cupiagua, Cupiagua Sur; garantizando la Extracción, Recolección, Tratamiento, Almacenamiento, Fiscalización y Entrega de Hidrocarburos establecidos dentro de los planes volumétricos.

1.2.1 Instalaciones Centrales de Procesamiento Cupiagua

Ubicación geográfica

Las instalaciones Centrales de Procesamiento (CPF) Cupiagua operadas por Ecopetrol S.A. se encuentran localizadas en el pie de la Cordillera Oriental de Colombia a 250 Km al Nor-Oriente de Bogotá, en la meseta de Unete, en la vereda Cupiagua, a 12 kilómetros de la población de Aguazul Casanare, y a una altitud de 300 M.S.N.M con una temperatura promedio anual de 30°C.

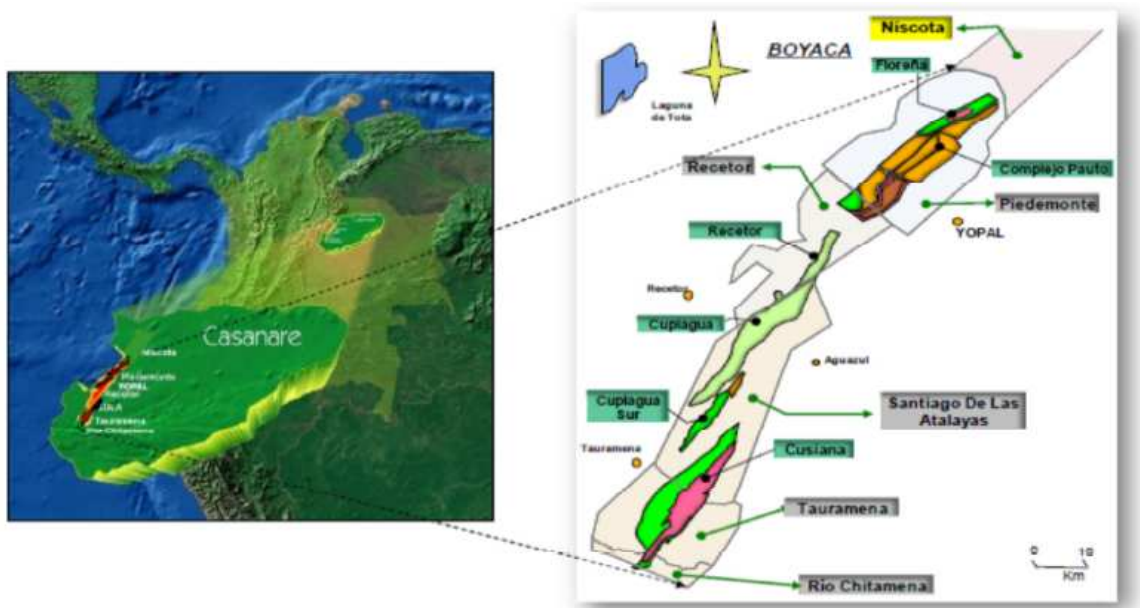
Figura 4 Instalaciones Centrales de Procesamiento (CPF) Cupiagua.



Fuente: Plan de Desarrollo Campos Cupiagua Y Cupiagua Sur.

Los Campos Cupiagua y Cupiagua Sur Se ubican en el flanco oriental de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, sobre el piedemonte de los Llanos Orientales Colombianos.

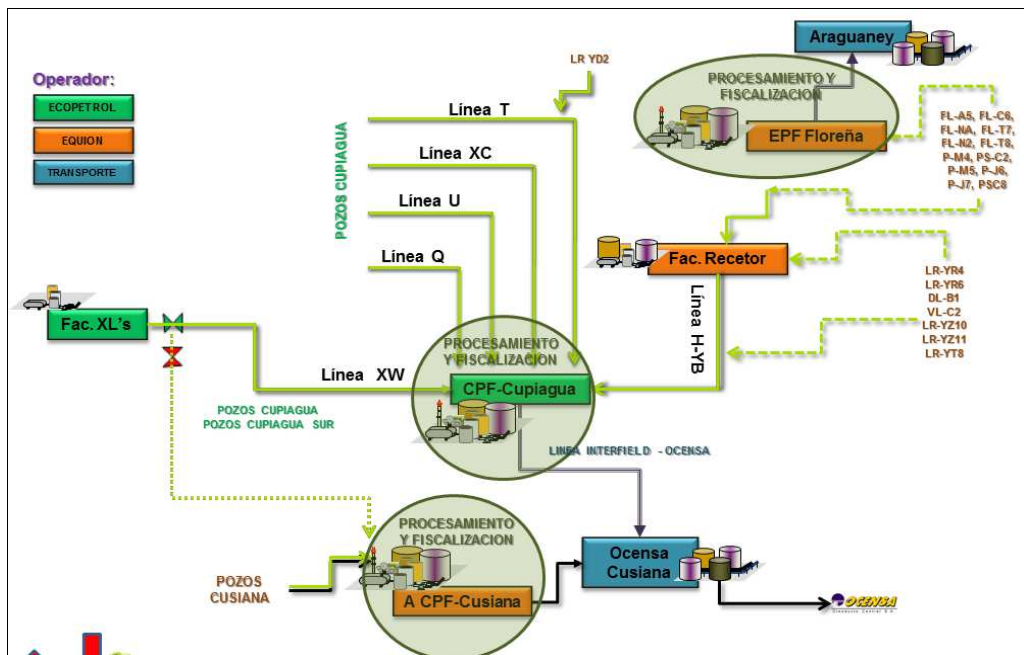
Figura 5 Localización geográfica de Campos Cupiagua y Cupiagua Sur



Fuente: Plan de Desarrollo Campos Cupiagua Y Cupiagua Sur.

Por medio de las líneas o troncales que provienen de los pozos productores de Cupiagua y Cupiagua Sur, llegan los fluidos en mezcla de agua, crudo y gas a las instalaciones centrales de procesamiento Cupiagua, además llegan líneas con fluidos de las facilidades de Floreña y Recetor. Una vez los fluidos entran al CPF Cupiagua se realiza un proceso de tratamiento, donde es separado el gas, el crudo y el agua; para luego ser enviado a los tanques de almacenamiento de la empresa Ocesa.

Figura 6 Esquema de Llegada del Petróleo al CPF-Cupiagua



Fuente: Autores

1.3 PROCESO DE TRATAMIENTO DEL PETRÓLEO

El objetivo del tratamiento del petróleo en las instalaciones centrales de procesamiento, es retirarle el agua y el gas con el fin de reunir las especificaciones de entrega al oleoducto para la exportación. El mecanismo principal de producción en estos yacimientos es por expansión de fluido – roca y pese a tener acuífero este no es activo. En ambos Campos se implementó la inyección de gas (proveniente del mismo yacimiento) desde el inicio para mantener la presión parcial del yacimiento, aprovechar el proceso de re-vaporización de carbonos, retardar las entradas de agua y aumentar el recobro de líquido.

Llegada de crudo: debido a la topografía del terreno el flujo desde los pozos productores hasta el CPF presenta variaciones significativas por lo tanto antes de entrar al proceso es necesario normalizar los caudales de flujo.

Figura 7 Llegada crudo CPF-Cupiagua



Fuente: Fotografía CPF Cupiagua Ecopetrol.

Separación: Los líquidos que llegan a las instalaciones son una mezcla de gas, agua y crudo, que debe someterse a un proceso de separación en vasijas donde se cada uno de estos elementos es evacuado para continuar el proceso para cada uno de ellos por separado. En la compresión de gas es necesario hacerlo por etapas que permitan controlar el incremento de temperatura, se logra controlar a través de aerofriadores interetapicos, se denomina recuperación de vapores (VRU); se denomina primera etapa; en la Segunda etapa llamada compresión de media la presión se incrementa.

Figura 8 Separación CPF-Cupiagua



Fuente: Fotografía CPF Cupiagua Ecopetrol

Reinyección de gas: después de normalizar el flujo del hidrocarburo, el gas que se separa se reúne con el gas del proceso a la misma presión; de esta forma se inicia el proceso de compresión de media y alta presión; luego de ser comprimido a media presión una parte del gas es enviado a la planta de gas ventas y el gas comprimido a alta presión es inyectado a los pozos.

Figura 9 Separación CPF-Cupiagua



Fuente: Fotografía CPF Cupiagua Ecopetrol

Almacenamiento del crudo: el crudo que cumple las especificaciones del oleoducto y sin exceso de agua es bombeado a los tanques de almacenamiento que pertenecen a la empresa Ocesa.

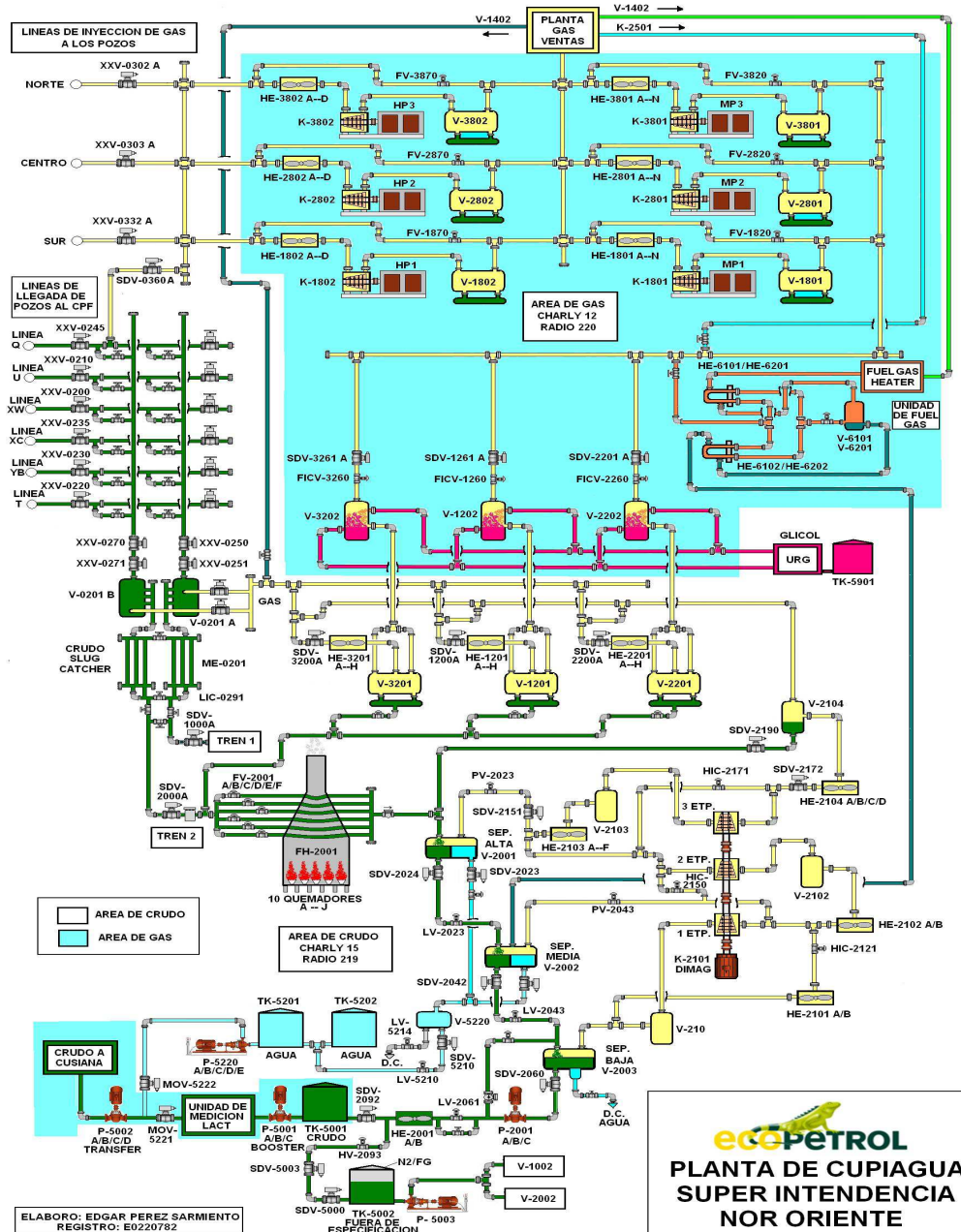
Figura 10 Tanque Almacenamiento CPF-Cupiagua



Fuente: Fotografía CPF Cupiagua Ecopetrol

Utilitarios: este sistema está conformado por los compresores de aire, nitrógeno y toda la red de distribución. Esta red es responsable de la mayoría de señales automáticas de protección de los equipos.

Figura 11 Esquema del proceso del petróleo en el CPF-Cupiagua



Fuente: PEREZ SARMIENTO, Edgar. Registro E0220782

1.3.1 Pozos productores de petróleo

Los campos Cupiagua y Cupiagua Sur cuentan con 27 pozos productores de petróleo, 14 pozos configurados como inyectoros de gas y 9 pozos inactivos.

Tabla 1 Clasificación de los Pozos de los Campos Cupiagua y Cupiagua Sur

CAMPO	POZOS	POZOS INACTIVOS	PRODUCTORES	INYECTORES
	TERMINADOS	INACTIVOS	PETROLEO	GAS
CUPIAGUA	44	9	23	12
CUPIAGUA SUR	6	0	4	2
TOTAL	50	9	27	14

Fuente: Autores.

Los pozos de los campos Cupiagua y Cupiagua Sur se agrupan dentro de locaciones llamadas Wellpads. La producción de todos los pozos se dirige a una línea de flujo más grande y entra al CPF, Como las redes se acercan al CPF, esta se combina dentro de una línea de flujo más grande, recolectando la producción de varios pozos.

Figura 12 Pozo productor de petróleo Cupiagua



Fuente: Fotografía pozo Cupiagua Ecopetrol.

Hay dos clases principales de pozos: pozos productores e inyectores. Cada uno de ellos posee características distintas en la lógica y en los instrumentos asociados al el panel de control de cabeza de pozo o WHCP (Well Head Control Panel). Los instrumentos asociados al panel de control varían, pues el inyector de gas posee transmisor indicador de flujo, tiene transmisor indicador de temperatura de línea, switch de alta presión de casing y puede tener transmisor indicador de presión en casing.

El pozo productor de crudo por su parte tiene transmisor indicador de presión en Cabeza, transmisor indicador de temperatura de cabeza y switch de alta presión en línea. Los pozos productores poseen sistema de inyección de químico anticorrosión, que tiene asociado a él dos switch de presión PSL y PSH y un panel de control para el arranque o la parada del sistema.

1.3.2 Sistemas del panel de control de cabeza de pozo

El panel de control de cabeza de pozo o WHCP (Well Head Control Panel) es el encargado de controlar las válvulas de la cabeza de pozo para cerrarlas o abrirlas según las órdenes dadas por el PLC (Programmable Logic Controller).

Figura 13 WHCP de un Pozo productor de petróleo Cupiagua



Fuente: Fotografía WHCP pozo Cupiagua Ecopetrol.

Figura 14 WHCP de un Pozo productor de petróleo Cupiagua



Fuente: Fotografía WHCP pozo Cupiagua Ecopetrol.

El WHCP (Well Head Control Panel) está conformado por varios sistemas:

1.3.2.1 Sistema de energía Solar

El sistema de energía solar en el WHCP se encarga de proveer energía eléctrica a los elementos internos del panel y la instrumentación asociada a este. El funcionamiento del sistema es muy básico ya que se basa en la alimentación de los dispositivos por medio de celdas solares con un sistema de acumuladores (baterías) cuya carga es controlada por una tarjeta de regulación.

Las partes que conforman el sistema de energía solar son:

Paneles solares: Las celdas solares convierten la radiación solar en energía eléctrica, la cantidad de energía varía de acuerdo a la posición del sol, la época del año y las condiciones atmosféricas. Las celdas utilizadas en los pozos se agrupan en arreglos de parejas en serie para lograr 24 VDC y los requerimientos de corriente. La corriente y el voltaje que entrega un panel de energía solar también pueden variar dependiendo del consumo de corriente que se le esté solicitando y la temperatura que tenga en ese momento.

Figura 15 Paneles solares del WHCP

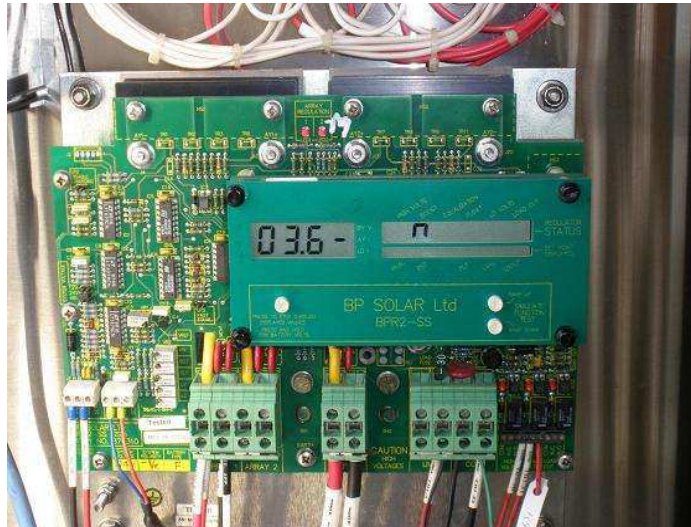


Fuente: Fotografía WHCP pozo Cupiagua Ecopetrol.

Controlador de carga: La tarjeta controladora de carga es la responsable de cargar adecuadamente las baterías, protegerlas de descargas y generar alarmas en caso de que estén descargadas. También es la que brinda la energía a la carga según el consumo que esta solicite. En los pozos de las operaciones de Casanare se utilizan dos tipos de tarjeta controladora en el WHCP, Steca Power Tarom y BP solar BPR2.

Las tarjetas reguladoras tienen parámetros configurables, entre los que se encuentran el valor de alarma por baja carga, el valor de suspensión de la carga (cuando las baterías están alcanzando descarga profunda), el voltaje de flotación, de carga rápida, etc. Así mismo las dos tarjetas cuentan con salidas de indicación de alarmas las cuales van cableadas al PLC y al control de encendido de los motores.

Figura 16 Tarjeta reguladora de carga



Fuente: Fotografía WHCP pozo Cupiagua Ecopetrol.

Baterías: Las baterías almacenan energía para poder ser aprovechada en la operación nocturna o durante días nublados donde los paneles solares no producen la suficiente energía para suplir los requerimientos de consumo del WHCP.

Figura 17 Baterías del sistema de energía solar



Fuente: Fotografía WHCP pozo Cupiagua Ecopetrol.

Protección contra descargas eléctricas: Al igual que las señales de instrumentación la línea de alimentación proveniente de los arreglos solares tiene protección contra descargas eléctricas. Estos módulos de protección están fabricados especialmente para sistemas de energía solar.

Figura 18 Baterías del sistema de energía solar



Fuente: Fotografía WHCP pozo Cupiagua Ecopetrol.

1.3.2.2 Sistema Neumático

El sistema neumático del WHCP se encarga de suministrar aire comprimido a las válvulas de tres vías (actuadores) de salida hacia los actuadores hidráulicos de las válvulas del pozo. Este sistema puede dividirse en varias etapas según su función:

Etapas compresora: Esta etapa se encarga de comprimir el aire a una presión de trabajo de 100 psi aprox. Está conformada por un compresor de 24 VDC que es controlado por un switch de presión ajustado a 100 psi con banda muerta de 30 psi (arranca en 70 psi y para en 100 psi). El compresor se conecta a un tanque de almacenamiento de 3 galones por medio de una válvula anti-retorno. Una válvula

PSV fijada a 125 psi protege el tanque de sobre-presiones. También existe un filtro de drenaje automático conectado en la parte inferior del tanque para realizar el drenaje de los condensados que puedan presentarse en el tanque.

Etapa de filtrado: Esta etapa se encarga de garantizar que el aire del sistema se encuentre libre de fluidos y partículas que puedan afectar el estado del sistema en general. La conforman dos filtros de aire aguas abajo del tanque de almacenamiento conectado en paralelo para facilitar el mantenimiento y garantizar la operación constante del sistema.

Etapa reguladora: Esta etapa se encarga de disminuir la presión del sistema a los niveles de operación de las válvulas solenoides (80 psi), manteniendo además un nivel constante de presión a pesar de las variaciones que se puedan generar (siempre que la presión sea mayor del ajuste de regulación) en la etapa compresora y de filtrado. La función de regulación la realiza una válvula reguladora de presión.

Etapa de control: Esta etapa se encarga de suministrar o suspender el aire de control de las válvulas de tres vías del sistema hidráulico, está conformada por tres válvulas solenoides (Una por cada válvula con actuador hidráulico WV, MV, DHSV). Éstas le suministran aire a los actuadores neumáticos de las válvulas de tres vías mientras se encuentren energizadas. Cuando se les suspende la alimentación eléctrica ventean el aire de los actuadores neumáticos hacia la atmósfera.

1.3.2.3 Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico del WHCP suministra fluido hidráulico (a una presión constante determinada) a los actuadores hidráulicos de las válvulas del pozo.

Este sistema puede dividirse en varias secciones según su función:

Almacenamiento: Contiene todo el fluido hidráulico necesario para la operación del WHCP y por ende para el accionamiento de los actuadores de las válvulas asociadas a este. Tiene un tanque de 25 galones de capacidad provisto de un visor de vidrio y un switch de bajo nivel que se acciona cuando el tanque tenga menos de 4.8 galones Aprox. Asociados a la salida del tanque hay dos filtros hidráulicos que se encargan de remover las partículas grandes del fluido. Si los filtros llegan a taponarse, se cuenta con un switch de presión diferencial calibrado a 5 psi.

Presurización del fluido: Esta sección se encarga de presurizar el fluido hidráulico hasta 8800 psi, dependiendo del tipo de panel. La función de presurización la realiza una bomba de tres pistones manejada por un motor de 24 VDC. El fluido hidráulico es llevado hacia las secciones de media y alta presión por medio de una o dos válvulas cheques dependiendo del modelo del panel de control.

Sección de media presión: Se encarga de suministrar fluido hidráulico a las válvulas de superficie. Inicialmente el sistema mantiene la presión proveniente de la bomba en 4500 psi por medio de una válvula reguladora; en caso de fallar esta válvula, una PSV fijada a 5000 psi protege la sección de sobre-presiones. El sistema cuenta con dos o más acumuladores precargados con 1500 psi de nitrógeno, protegidos por fusibles de presión instalados en fábrica (disparo en 8500 psi). El control de las válvulas de superficie se realiza por medio de válvulas tres vías con actuador neumático que suministra o drena el fluido hidráulico en las líneas que van hacia la cabeza del pozo.

Sección de alta presión: Se encarga de suministrar fluido hidráulico de alta presión a la válvula de subsuelo DHSV. La sección tiene un acumulador hidráulico (precargado con 1500 psi de nitrógeno) para aumentar la capacidad del sistema y se encuentra protegida de sobre-presiones por una válvula relief ajustada a 9600

psi. Aguas abajo del acumulador se encuentran el switch de control de la bomba hidráulica y la válvula de tres vías de suministro de fluido hacia los actuadores de las válvulas del pozo. La válvula de tres vías se encarga de suministrar o drenar el fluido hidráulico dependiendo de la presión de aire que le sea suministrada al actuador.

Sección de control del choke: Para el control del choque remoto se requiere del suministro de fluido hidráulico a una presión constante. El accionamiento de la válvula se hace por fuera del WHCP en los solenoides del actuador. El sistema toma hidráulico de la sección de media presión en la etapa de 4500 psi (acumuladores). Los 4500 psi son llevados a la presión de operación del actuador por una válvula reguladora; aguas arriba de esta reguladora se encuentra una válvula de corte para aislar el sistema cuando no esté habilitado o cuando se realice mantenimiento.

1.3.2.4 Sistema de Control

El sistema de control del WHCP es el encargado de cerrar o abrir las válvulas del pozo según el estado de las señales de entrada o de los comandos que son dados por un operador en sitio o en cuarto de control. El sistema de control es ejecutado simultáneamente por un PLC y un arreglo de relevos o lógica cableada.

La lógica cableada es un arreglo de relevos que ejecuta la lógica de disparo del panel de control. Su función es actuar en caso de que el PLC no genere el cierre ante las señales de entrada según el causa efecto.

PLC (Programmable Logic Controller): El PLC realiza la recepción y el envío de señal es tanto análogo como digital desde y hacia cuarto de control. Se encarga de leer las medidas entregadas por los instrumentos del pozo y mostrarlas en la interface hombre-máquina. Controla las válvulas del pozo, ejecutando la lógica de disparo del WHCP y coordinando el accionamiento del actuador del choque

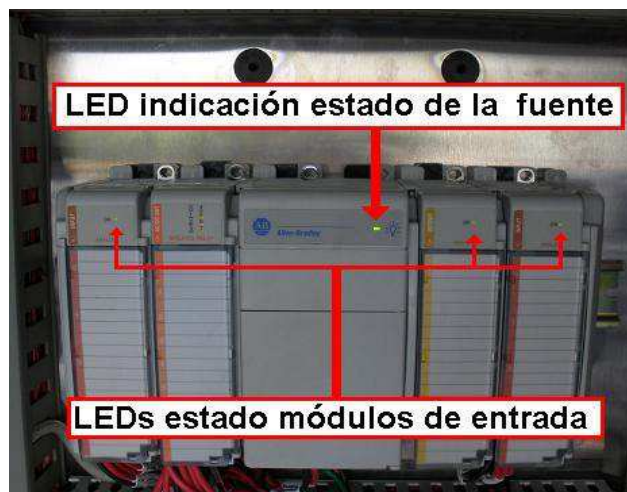
remoto. Utiliza módulos de expansión de entradas y salidas para manejar las señales provenientes de campo. La mayoría de estos módulos tiene un LED de indicación de encendido y LED del estado de las señales que pueden ser fácilmente verificados.

Figura 19 PLC WHCP pozo Cupiagua



Fuente: Fotografía WHCP pozo Cupiagua Ecopetrol.

Figura 20 Módulos Expansión PLC

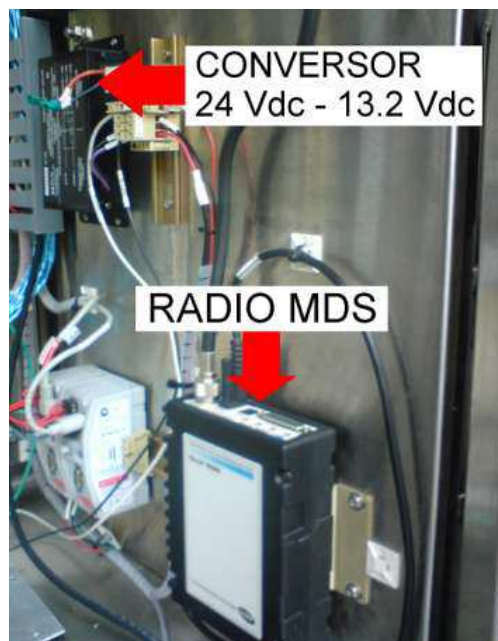


Fuente: Fotografía WHCP pozo Cupiagua Ecopetrol.

1.3.2.5 Sistema de Comunicaciones

El sistema de comunicaciones es el encargado de establecer un vínculo entre el WHCP y la sala de control para el envío y recepción de señales de telemetría y de control remoto de las válvulas del pozo. Existen básicamente dos sistemas de comunicaciones en pozos, uno establece el enlace por medio de radios y el otro lo establece por medio de un sistema de banda ancha. El sistema de comunicaciones Canopy tiene módulos instalados en el interior del panel de control, estos módulos se encargan de tomar la señal TCP/IP del canal de banda ancha y transformarla en una señal RS232 para conectarla al puerto de comunicaciones del PLC. La comunicación por medio de radios se realiza con MDS para transmisión serial de datos. La conexión con el PLC se realiza directamente por medio de un cable serial DB9 / DB25.

Figura 21 Sistema MDS en el WHCP



Fuente: Fotografía WHCP pozo Cupiagua Ecopetrol.

1.3.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Gerencia de Desarrollo y Producción Piedemonte Ecopetrol (GDP), cuenta con 27 pozos productores de petróleo, los cuales mantienen la producción del campo en 13627 Barriles de petróleo por día. Mantener la disponibilidad y confiabilidad de los pozos es fundamental para el cumplimiento de los objetivos de la GDP y para esto cuenta con los servicios de la empresa Stork Technical Services, quien es la encargada del mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos mecánicos, eléctricos y de la instrumentación que componen cada uno de los pozos de la GDP.

En la actualidad la empresa Stork Technical Services cuenta con una estrategia de mantenimiento heredada de la empresa BP Exploration, quien entregó las instalaciones de Cupiagua a la empresa Ecopetrol en el año 2010, dicha estrategia de mantenimiento tenía como objetivo mantener la disponibilidad de los pozos reparando y cambiando todos los repuestos rápidamente, sin tener en cuenta los costos que esto genera. Reparar rápidamente, sin identificar la causa raíz de la falla, promueve un mantenimiento reactivo, o reparaciones temporales. Las reparaciones temporales requieren horas hombre adicional para su corrección definitiva, y casi siempre fallan nuevamente antes de ser corregidas.

Entre los años 2014 a 2016, se ha presentado incremento en los costos de operación y mantenimiento por: repuestos, diferidas de producción y horas-hombre (HH) invertidas en el mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos de los pozos de la GDP. Adicionalmente se identificaron equipos que a pesar de recibir mantenimiento preventivo, demandan horas-hombre significativas de correctivo, indicando la ineffectividad de las tareas preventivas asociadas a la estrategia de mantenimiento.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Evaluar y optimizar el plan de mantenimiento de los equipos que conforman los pozos productores de petróleo de la gerencia de desarrollo y producción piedemonte Ecopetrol.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar las tareas, frecuencia, horas hombre, recursos y costos por repuestos y diferidas de producción asociados al mantenimiento preventivo y correctivo de la estrategia de mantenimiento actual de los equipos asociados a los pozos de la gerencia de desarrollo y producción piedemonte Ecopetrol.
- Realizar análisis de Pareto para identificar y clasificar los modos de falla de los equipos mecánicos, eléctricos e instrumentación asociada a los pozos productores de la gerencia de desarrollo y producción piedemonte Ecopetrol.
- Redefinir las tareas, la frecuencia, número de horas hombre y el recurso necesario para el plan de mantenimiento los equipos mecánicos, eléctricos e instrumentación asociada a los pozos productores de la gerencia de desarrollo y producción piedemonte Ecopetrol.
- Identificar los repuestos para los equipos mecánicos, eléctricos e instrumentación asociada a los pozos productores de la gerencia de desarrollo y producción piedemonte Ecopetrol la GDP.

- Revisar, aprobar e implementar en el CMMS (SAP) el plan de mantenimiento optimizado de los equipos que conforman los pozos productores de petróleo de la gerencia de desarrollo y producción piedemonte Ecopetrol.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Dentro del modelo de sostenibilidad de un negocio el tema de la optimización de los procesos y los costos se hace muy relevante, en la actualidad mucho más debido a la caída de los precios internacionales del barril de petróleo. Partiendo de la Planeación Estratégica, en la cual se define el marco de actuación para desarrollar el objeto del negocio y las metas que retan el desempeño de una organización para lograr su éxito, las Vicepresidencias de Producción en Ecopetrol definen cada año, durante la fase de estimación de sus costos los niveles operativos/volumétricos correspondientes al componente de negocio bajo su responsabilidad. En este sentido se fijan los volúmenes planeados que deben ser producidos, refinados y transportados durante el año.

Las diferidas de producción (aprox. 2750 Barriles de crudo), el impacto económico (aprox. \$ 460.000.000), la imagen de la empresa Ecopetrol (incumplimiento de las metas) y la utilización de horas hombre y costos de repuestos en trabajos correctivos (\$ 330.000.000), son los factores primordiales para realizar un plan de mantenimiento óptimo a costo razonable, el cual garantice la disponibilidad y confiabilidad de los activos de la gerencia de desarrollo y producción piedemonte Ecopetrol.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 EVOLUCION DEL MANTENIMIENTO

Según Moubray³ Cómo todo proceso en evolución, el dominio del mantenimiento ha seguido una serie de etapas cronológicas que se han caracterizado por una metodología específica.

2.1.1 La Primera Generación

La primera generación cubre el período hasta la II guerra Mundial. En esos días la industria no estaba muy mecanizada, por lo que los períodos de paradas no importaban mucho. La maquinaria era sencilla y en la mayoría de los casos diseñada para un propósito determinado. Esto hacía que fuera confiable y fácil de reparar. Como resultado, no se necesitaban sistemas de mantenimiento complicados, y la necesidad de personal calificado era menor que ahora.

Tabla 2 Características de la primera generación del mantenimiento

Expectativas	Técnicas	Personal
Reparar cuando se rompe	Mantenimiento correctivo	Pocas habilidades

Fuente: MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004. p.2-3.

2.1.2 La Segunda Generación

Durante la segunda guerra Mundial las cosas cambiaron drásticamente. Los tiempos de la guerra aumentaron la necesidad de productos de toda clase mientras que la mano de obra industrial bajó de forma considerable. Esto llevó a la necesidad de un aumento de mecanización. Hacia el año 1950 se habían

³ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad RCM2. traducido y adaptado por Carlos Mario Pérez J. Aladon, 2004. p.2-3

construido equipos de todo tipo y cada vez más complejos. Las empresas habían comenzado a depender de ellas. Al aumentar esta dependencia, el tiempo improductivo de una máquina se hizo más evidente. Esto llevó a la idea de que las fallas se podían y debían de prevenir, lo que dio como resultado el nacimiento del concepto del mantenimiento programado. En los años 60 esto se basaba primordialmente en la revisión completa del material a intervalos fijos. El costo del mantenimiento comenzó también a elevarse mucho en relación con los otros costos de funcionamiento. Como resultado se comenzaron a implantar sistemas de control y planeación del mantenimiento. Estos han ayudado a poner el mantenimiento bajo control, y se han establecido ahora como parte de la práctica del mismo.

Tabla 3 Características de la segunda generación del mantenimiento

Expectativas	Técnicas	Personal
Mayor disponibilidad de la planta. Mayor vida útil de los equipos. Menor costo	Reparaciones programadas. Sistemas de planeamiento y control del trabajo. Computadoras grandes y lentas	Planeador

Fuente: MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004. p.2-3.

2.1.3 La Tercera Generación

Desde mediados de los años setenta, el proceso de cambio en las empresas ha tomado incluso velocidades más altas. Los cambios pueden clasificarse así:

Nuevas expectativas: El crecimiento continuo de la mecanización significa que los períodos improductivos tienen un efecto más importante en la producción, costo total y servicio al cliente. Esto se hace más claro con el movimiento mundial hacia los sistemas de producción justo a tiempo, en el que los reducidos niveles de inventario en curso hacen que pequeñas averías puedan causar el paro de toda una planta. Esta consideración está creando fuertes demandas en la función

del mantenimiento. Una automatización más extensa significa que hay una relación más estrecha entre la condición de la maquinaria y la calidad del producto. Al mismo tiempo, se están elevando continuamente los estándares de calidad. Esto crea mayores demandas en la función del mantenimiento. Otra característica en el aumento de la mecanización es que cada vez son más serias las consecuencias de las fallas de una instalación para la seguridad y/o el medio ambiente.

Nueva Investigación: Mucho más allá de las mejores expectativas, la nueva investigación está cambiando las creencias más básicas acerca del mantenimiento. En particular, se hace aparente ahora que hay una menor conexión entre el tiempo que lleva un equipo funcionando y sus posibilidades de falla.

Tabla 4 Características de la tercera generación del mantenimiento

Expectativas	Técnicas	Personal
Mayor disponibilidad y confiabilidad de la planta. Mayor seguridad. Mejor calidad del producto. Ningún daño al medio ambiente. Mayor vida de los equipos. Mayor costo-eficacia	Monitoreo de condición. Diseño direccionado a la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento. Estudio de riesgos. Computadoras pequeñas y rápidas. Análisis de modos de falla y sus efectos. Sistemas expertos. Trabajo multifacético y en grupos	Especializado.

Fuente: MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004. p.2-3.

2.2 MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD RCM

La industria de la aviación fue la primera en darse cuenta que se debe dedicar tanto esfuerzo en asegurarse que se están realizando las tareas correctamente, como en asegurarse que se están haciendo las tareas correctas. Esto dio lugar al desarrollo de mecanismos de toma de decisiones que se conocieron en el gremio como MSNG3 y fuera de este como RCM o Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

En casi todos los sectores RCM se está convirtiendo en el mecanismo de custodia de los activos físicos, debido a que no existe otra técnica que determine de manera segura las cantidades mínimas de tareas necesarias para que el activo preserve su función. La definición de RCM sería entonces: “Proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que los usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual”⁴.

Según el autor Moubrey⁵, en RCM los estados de falla son conocidos como fallas funcionales porque ocurren cuando el activo no puede cumplir una función de acuerdo al parámetro de funcionamiento que el usuario considera aceptable. Por lo cual las fallas funcionales solo pueden ser identificadas luego de haber definido las funciones y parámetros de funcionamiento del activo. Debido a que el RCM, basa su filosofía en la búsqueda de todas las fallas funcionales con el objetivo de que no se presente ninguna, esto lo convierte en el método indicado para la elaboración de un plan de mantenimiento inicial.

⁴ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004

⁵ Ibid, p. 7 – 18

Fallas funcionales: Los objetivos de mantenimiento son definidos por las funciones y las expectativas de funcionamiento asociadas al activo en cuestión. El único hecho que pueda hacer que un activo no pueda desempeñarse conforme a los parámetros requeridos por sus usuarios es alguna clase de falla. Esto sugiere que el mantenimiento cumple sus objetivos al adoptar una política apropiada para el manejo de una falla. Sin embargo, antes de poder aplicar una combinación adecuada de herramientas para el manejo de una falla, se necesita identificar que fallas pueden ocurrir.

Modos de falla: Una vez que se ha identificado cada falla funcional, el próximo paso es tratar de identificar todos los hechos de manera razonablemente posible pueden haber causado cada estado de falla. Estos hechos se denominan modos de falla. Los modo de falla razonablemente posible, incluyen aquellos que han ocurrido en equipos iguales o similares operando en el mismo contexto, fallas que actualmente están siendo prevenidas por regímenes de mantenimiento existente, así como fallas que no han ocurrido pero son consideradas altamente posibles en el contexto en cuestión.

2.2.1 Las siete preguntas básicas del RCM

La metodología RCM formula siete preguntas básicas acerca del activo a revisar.

¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?

Básicamente las funciones son aquello que los usuarios desean que haga un activo físico, por eso el primer paso es definir las funciones en su contexto operacional, junto con los parámetros de funcionamiento deseados. Las funciones están divididas en dos categorías:

- Funciones primarias: Resumen el por qué de la adquisición del activo.

- Funciones secundarias: Las que el usuario espera que el activo debería hacer además de cumplir con las funciones primarias. Generalmente el usuario tiene expectativas de seguridad, confort, economía, eficiencia etc.

¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?

En el mundo del RCM, las fallas son denominadas fallas funcionales debido a que cuando ocurre el activo no puede cumplir una función de acuerdo al parámetro de funcionamiento que el usuario considera aceptable. RCM identifica qué fallas pueden ocurrir en el activo, identificando las circunstancias que llevaron a la falla y luego preguntándose qué eventos pueden causar que el activo falle.

¿Cuál es la causa de cada falla funcional?

Los que de manera razonable pudieron haber causado la falla, se denominan en RCM modos de falla. Para identificar los modos de falla se incluyen aquellos hechos posibles que han ocurrido en los equipos similares o en similares contextos operacionales, fallas que están siendo prevenidas por el sistema de mantenimiento y fallas que aunque no hayan ocurrido se consideran altamente posibles para el contexto operacional del caso de estudio.

¿Qué sucede cuando ocurre una falla?

RCM lista los efectos de las fallas, describiendo lo que ocurre cuando se presenta un modo de falla. En la descripción de los efectos de falla debería incluirse:

- Qué evidencia existe (si la hay) que la falla ha ocurrido.
- De qué modo representa una amenaza para la seguridad o el medio ambiente (si la representa).
- De qué manera afecta la producción o las operaciones (si las afecta).
- Qué daños físicos (si los hay) han sido causados por la falla.
- Qué debe hacerse para reparar la falla.

¿En qué sentido es importante cada falla?

Los efectos de las fallas son diversos, pueden afectar las operaciones, la calidad del producto, la seguridad o el medio ambiente etc. RCM reconoce que todos los tipos de falla no pueden ser reparados pues costaría mucho tiempo y dinero, por lo tanto, la consecuencia de las fallas influencia el intento por prevenirlas. En otras palabras, si la consecuencia de la falla es alta, se hará un intento grande por prevenirla, pero si posee leve consecuencias, quizá se decida no hacer mantenimiento.

Un punto fuerte de RCM es que reconoce que las consecuencias de las fallas son más importantes que las diferentes características del activo, y clasifica estas consecuencias en cuatro tipos:

- Consecuencias de fallas ocultas. Fallas que no tienen un impacto directo, pero expone a la organización a fallas con consecuencias serias. Por ejemplo: La consecuencia de una falla en un sistema contraincendios.
- Consecuencias ambientales y para la seguridad. Una falla tiene consecuencias para la seguridad si es posible que cause lesiones o la muerte a una persona, y tiene consecuencias para el medio ambiente si infringe alguna normativa ambiental, ya sea nacional o internacional.
- Consecuencias operacionales. Una falla tiene consecuencias operacionales si afecta la producción en cualquier aspecto.
- Consecuencias no-operacionales. No afectan la producción ni la seguridad y sólo implican un costo asociado a la reparación. Por ejemplo, la falla en un equipo de back-up.

¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?

Como se había mencionado anteriormente, en la tercera generación del mantenimiento se hicieron descubrimientos en cuanto la probabilidad condicional de falla, que rompieron los paradigmas tradicionales que relacionaban la edad del

activo con el aumento de la probabilidad de falla del mismo. Se pensaba también que entre más rápido se reparara o cambiara un componente era mejor. Hoy se ha demostrado que esto es cierto en muy pocos casos, sólo el 2% de los componentes de aeronaves comerciales siguen un patrón de falla tipo A o curva de la bañera.

La conciencia de estos hechos ha llevado a muchas empresas a abandonar por completo las tareas de mantenimiento proactivo, algo válido si las consecuencias de las fallas fueran menores. RCM divide en tres grupos las tareas para prevenir, predecir y disminuir las consecuencias de las fallas.

- Tareas de reacondicionamiento cíclico. Refabricar o reparar un componente antes que llegue a su límite de edad sin importar su condición en ese momento.
- Tareas de sustitución cíclica. Sustituir un componente antes que llegue a su límite de edad sin importar su condición en ese momento.
- Tareas a condición. Se basan en el hecho que la mayoría de las fallas dan algún indicio o advertencia de que están por ocurrir. Se llaman tareas a condición porque el equipo se deja operativo a condición de que continúen alcanzando los parámetros de funcionamiento adecuados.

Las tareas a condición incluyen tareas de mantenimiento predictivo, mantenimiento basado en condición y monitoreo de condición.

¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Cuando se identifica que no existe una tarea proactiva efectiva, RCM propone realizar búsqueda de fallas, rediseño y mantenimiento a rotura. Estas tareas se llaman tareas a falta de.

2.3 OPTIMIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO

Valderrama Pilar⁶ en el artículo de planned maintenance optimisation de la OMCS2000 International Latinamerica, explica que las estadísticas comparadas de encuesta sobre eficacia del mantenimiento en procesos industriales, han demostrado que existen problemas con la mayoría de los programas de mantenimiento preventivo a pesar de que los responsables de su administración cumplen estrictamente los calendarios y sus ejecuciones, tanto en plantas, procesos y flotas de equipos.

Las conclusiones de varios estudios de optimización de los planes de mantenimiento son:

- Existen tareas duplicadas.
- Algunas tareas se hacen muy frecuentemente y otras muy distantes.
- Algunas tareas no generan beneficios más bien acumulan gastos.
- Algunas tareas son intrusivas o basadas en overhauls, cuando deberían ser basadas en condición.
- Se presentan muchas fallas que son costosas y fácilmente han podido ser prevenibles.

Figura 22 Ciclo Vicioso de Mantenimiento Reactivo



Fuente: OMCS2000 International Latinamerica

⁶ VALDERRAMA, Pilar. Planned Maintenance Optimisation.OMCS2000 International Latinamerica

Basándose en las conclusiones expuestas anteriormente, las organizaciones entran en el Ciclo Vicioso de Mantenimiento Reactivo (ver Figura 22), esto genera un dilema para el mejoramiento de la productividad, ya que por más que la planeación y la programación sean perfectas, no ayudarán a mejorar un programa de mantenimiento que por sí mismo es ineficiente.

Los estudios indican que se debe implementar un proceso que:

- Pueda definir la mezcla apropiada entre mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.
- Pueda generar un programa de mantenimiento en donde las tareas y sus frecuencias sean sólidas y aporten valor agregado.
- Ofrezca diferentes opciones para la minimización o eliminación de fallas.

La recomendación, para implementar todas las estrategias es asegurar que las decisiones se toman basadas en un análisis de RCM, realizado en la fase de diseño de una planta nueva y para la planta en funcionamiento, PMO es el medio para racionalizar todo el Mantenimiento Preventivo (PM) y así asegurar que existe valor agregado y es costo efectivo para la organización.

Turner⁷, director de OMCS International, describe en su artículo el “Análisis de Mantenimiento del Futuro” los 9 pasos del PMO:

Paso 1. Recopilación de Tareas: PMO inicia recopilando o documentando el programa de mantenimiento existente (formal o informal) y subiéndolo a una base de datos. Es importante entender que el mantenimiento lo realiza un grupo amplio de personas, incluyendo los operadores. También es muy importante entender que en la mayoría de organizaciones el PM se hace por iniciativa propia de los

⁷ TURNER, Steve. Análisis Mantenimiento de futuro PMOptimisation PMO2000. Australia, Northwestern University - Kellogg School of Management Universidad Chapman. P.12-15

técnicos o de los operadores y no existe documentación formal; cuando esta situación se presenta simplemente se debe documentar lo que el personal ya ha estado haciendo. Es muy común que las organizaciones de mantenimiento tengan algún tipo de PM, ya sea formal o informal; es raro encontrar organizaciones que no tengan ningún tipo de PM. La Figura 23, ilustra las fuentes de PM.

Figura 23 Fuente del Mantenimiento Preventivo (PM)



Fuente: TURNER, Steve. Análisis Mantenimiento de futuro PMOptimisation PMO2000. Australia, Northwestern University - Kellogg School of Management Universidad Chapman. P.12.

Paso 2. Análisis de Modos de Falla (FMA): se debe involucrar a todo el personal de la planta, se trabajará en equipos multidisciplinarios quienes se encargarán de identificar para qué modos de falla están enfocadas las tareas de mantenimiento. La Tabla 5 ilustra un ejemplo del resultado del Paso 2.

Tabla 5 Ejemplo de análisis de modos de falla (FMA)

Tarea	Frecuencia	Responsable	Falla
Tarea 1	Diario	Operador	Falla A
Tarea 2	Diario	Operador	Falla B
Tarea 3	6 meses	Instalador	Falla C
Tarea 4	6 meses	Instalador	Falla A
Tarea 5	Anual	Electricista	Falla B
Tarea 6	Semanal	Operador	Falla C

Paso 3. Racionalización y revisión del FMA: Ordenando la información por Modos de Falla hace más fácil la identificación de duplicación de tareas. La duplicación de tareas se presenta cuando al mismo Modo de Falla se le aplican varias rutinas de PM por parte de las diferentes especialidades, por parte de los operadores y por parte de los especialistas de monitoreo. En este paso el equipo de trabajo revisa los modos de falla resultado del FMA y agrega aquellos modos de falla faltantes. La lista de los modos se elabora con base en el historial de fallas. La Tabla 6 ilustra el resultado del paso 3. Nótese la adición de la Falla "D", la cual fue identificada durante el desarrollo de este Paso. La adición de la Falla D puede haber sido resultado de la revisión del historial de fallas y/o de la documentación técnica.

Tabla 6 Ejemplo de la Racionalización y revisión del FMA

Tarea	Responsable	Falla
Tarea 1	Operador	Falla A
Tarea 4	Instalador	Falla A
Tarea 7	Mecánico	Falla A
Tarea 2	Operador	Falla B
Tarea 5	Electricista	Falla B
Tarea 3	Instalador	Falla C
Tarea 6	Operador	Falla C
		Falla D

Paso 4. Análisis Funcional: La función que se pierde con cada falla se puede determinar en este paso. Este paso es opcional y se justifica en caso de que se

deban realizar análisis a equipos bastante críticos o muy complejos, en donde es esencial el entendimiento detallado de todas las funciones del equipo para el aseguramiento de un programa de mantenimiento sólido. Para aquellos equipos poco críticos o sistemas simples, la identificación de las funciones agrega tiempo y costo, más no beneficios tangibles. La Tabla 7 ilustra el Paso 4.

Tabla 7 Ejemplo del Análisis Funcional

Tarea	Responsable	Falla	Función
Tarea 1	Operador	Falla A	Función 1
Tarea 4	Instalador	Falla A	
Tarea 7	Mecánico	Falla A	
Tarea 2	Operador	Falla B	Función 1
Tarea 5	Electricista	Falla B	
Tarea 3	Instalador	Falla C	Función 2
Tarea 6	Operador	Falla C	
		Falla D	Función 1

Paso 5. Evaluación de Consecuencias: En este Paso cada modo de falla es analizado para determinar si las fallas son ocultas o evidentes. Para aquellas fallas evidentes se realiza un análisis de riesgos y consecuencias operacionales. La Tabla 8 ilustra el Paso 5.

Tabla 8 Ejemplo Evaluación de Consecuencias

Tarea	Responsable	Falla	Función	Consecuencia
Tarea 1	Operador	Falla A	Función 1	Operacional
Tarea 4	Instalador	Falla A		
Tarea 7	Mecánico	Falla A		
Tarea 2	Operador	Falla B	Función 1	Operacional
Tarea 5	Electricista	Falla B		
Tarea 3	Instalador	Falla C	Función 2	Oculto
Tarea 6	Operador	Falla C		
		Falla D	Función 1	Operacional

Paso 6. Definición de la Política de Mantenimiento: La filosofía moderna de mantenimiento se basa en la premisa que los programas de mantenimiento exitosos se enfocan más en las consecuencias de las fallas que en los activos en sí. En este paso, cada modo de falla es analizado bajo los principios del

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y se establecen las políticas nuevas o revisadas de mantenimiento haciendo evidente lo siguiente:

- Los elementos del programa actual de mantenimiento que son costo efectivos y los que no lo son, estos últimos deben eliminarse.
- Qué tareas serían más efectivas y menos costosas si fueran basadas en condición, en lugar de llevarlas a falla y viceversa.
- Qué tareas no aportan beneficios y deben ser eliminadas del programa.
- Qué tareas serían más efectivas si se realizaran bajo diferentes rutinas.
- Qué fallas se manejarían mejor por medio del uso de tecnología avanzada o simple.
- Qué tipo de información se debe recolectar para predecir mejor el comportamiento del equipo durante su ciclo de vida.
- Qué fallas se deben eliminar con la ayuda de un Análisis de Causa Raíz (RCA). La Tabla 9 ilustra el paso 6.

Tabla 9 Definición de la Política de Mantenimiento

Falla	Función	Consecuencia	Política	Rutina
Falla A	Función 1	Operacional	Inspección	Diaria
Falla A				
Falla A				
Falla B	Función 1	Operacional	No PM	
Falla B				
Falla C	Función 2	Ocultas	Pruebas	Anual
Falla C				
Falla D	Función 1	Operacional	Inspección	Semanal

Paso 7. Agrupación y Revisión: Una vez el análisis de las tareas haya finalizado, el equipo de trabajo establece el método más eficiente y efectivo para administrar el mantenimiento de los activos teniendo en cuenta limitantes de producción y otros. En este paso es posible que haya transferencia de responsabilidades en la ejecución de las tareas de PM entre los especialistas de mantenimiento y los operadores para lograr eficiencia y ganancias en producción.

Paso 8. Aprobación e Implementación: En este Paso, el resultado del análisis se presenta a la alta dirección para su revisión y comentarios. El equipo de trabajo realiza la presentación muestra de forma detallada los cambios a implementar y su justificación. Una vez se ha aprobado el programa, inicia la etapa más importante su implementación. La implementación es la etapa que consume más tiempo y en que se pueden presentar más dificultades. Es importante ejercer liderazgo y estar atento a los detalles para hacer de la implementación un éxito. Las dificultades en la implementación se incrementan considerablemente en organizaciones que cuentan con muchos turnos y en aquellas organizaciones conservadoras.

Paso 9. Programa Dinámico: Durante el desarrollo de los Pasos 1 al 9, el proceso de ha establecido una estructura racional y costo efectiva de PM. En el “Programa Dinámico”, el plan de PM se consolida y se toma control de la planta, cuando se reemplaza el mantenimiento reactivo por uno planeado. De este punto en adelante el mejoramiento puede acelerarse fácilmente y los recursos que se liberan pueden enfocarse a corregir defectos de diseño o limitaciones inherentes a la operación. Durante este paso, varios de los procesos vitales de la Gestión de los activos pueden afinarse mientras la rata de mejoramiento se acelera. Estos procesos son:

- Estrategia de Producción y Mantenimiento.
- Medición de Desempeño
- Reportes y Eliminación de Fallas.
- Planeación y Programación.
- Gestión de Inventarios.
- Workshops y Prácticas de Mantenimiento.

La intención final de PMO es la de crear una organización que busca continuamente su mejoramiento, para ello hay que crear conciencia que es importante evaluar las todas las tareas que se ejecutan y todas las fallas que se presenten. Para lograr las metas es importante contar con personal capacitado en

técnicas de análisis e igualmente contar con la motivación al personal por parte de la dirección para crear en el trabajador un sentido de pertenecía, de compromiso y de creatividad para mejorar su trabajo y optimizar costos de producción.

La única debilidad válida de PMO comparado con RCM, para una planta que ya está en operación es que PMO no lista absolutamente todos los modos de falla. Esto puede ser muy importante desde la perspectiva del manejo de inventarios, sin embargo sí el objetivo y la motivación de la realización de un análisis de mantenimiento es el de generar un plan de mantenimiento efectivo y con enfoque claro, esta debilidad es irrelevante.

2.4 TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

2.4.1 Definición de Falla

Como lo describe Borrás⁸ en su libro *Mantenimiento Preventivo*, aunque existen numerosas definiciones de falla en el contexto operacional y de mantenimiento podemos definir la falla; como la incapacidad de cualquier equipo o instalación (activo) a realizar la función que el usuario definió que hiciera.

Fallas funcionales y estándares de funcionamiento: Anteriormente se ha determinado que cuando un activo no realiza las funciones que el usuario quiere que realice este ha fallado y que cada activo tiene más de una función (cualquier cosa que deba realizar), lo que conlleva a que cada activo puede ser afectado por diversas fallas de donde se debe determinar si la falla afecta una o más funciones. El estándar de funcionamiento está dado por el límite entre el funcionamiento satisfactorio y la falla, dado que el estándar de funcionamiento es aplicado a

⁸ BORRÁS PINILLA, Carlos. *Mantenimiento Preventivo*. Bucaramanga: Escuela de Ingeniería Mecánica- Universidad Industrial de Santander, 2013. P.8, 11.

funciones individuales se determina la falla funcional como la misma definición de falla.

2.4.2 Análisis de Modos de Falla

Luego de definir lo que significa una falla y los parámetros de funcionamiento, ahora es necesario aclarar los modos de falla causantes de las llamadas fallas funcionales y determinar los efectos de falla asociados a cada falla funcional, esto se realiza a través de un análisis de modos de falla y efectos (AMFE) para cada falla funcional. Para iniciar es necesario definir modo de falla donde se refiere a cualquier evento que pueda causar la falla de un equipo, instalación o activo, para tener claridad sobre la relación del evento que cause la falla funcional se sugiere establecer un formato en donde se describa la función, la falla funcional (perdida de función) y el modo de falla (causa de la falla), esta descripción debe ser la suficientemente clara y detallada para determinar la estrategia de manejo de falla apropiada, pero a su vez clara y concisa en pro de ahorro de tiempo en el análisis.

2.4.3 Métodos de análisis de los modos de falla

Métodos explicados por el Ing. Borrás⁹, se debe realizar un profundo análisis para llegar exitosamente a la implementación de la metodología adecuada según el caso de aplicación o de estudio de fallo.

2.4.3.1 Método de Análisis de los Modos de Falla, Efecto y su Criticidad (FMECA)

⁹ BORRÁS PINILLA, Carlos. Mantenimiento Preventivo. Bucaramanga: Escuela de Ingeniería Mecánica- Universidad Industrial de Santander, 2013. P.21,24.

Se aplica siempre y cuando se conozcan las fallas funcionales, todos los modos de falla que pueda tener un equipo y las causas que las producen. En este proceso se analiza los modos de Falla y sus Efectos, pero no se investiga la falla en sí; además determina la criticidad de un componente basándose en la criticidad de los modos de falla que pueda presentar éste.

2.4.3.2 Análisis de Causa Raíz (RCA)

La causa raíz es el origen del cual procede el efecto de falla visible. Un sistema o equipo puede tener diversos modos de falla pero cada modo de falla tiene una única causa raíz. RCA es una metodología científica, compleja, lógica y sistemática para hallar la causa raíz de una falla mediante la verificación de las causas probables de falla y su corrección y/o mitigación. Esta metodología le otorga gran importancia a la implementación de la solución más óptima, proporcionando las herramientas para su evaluación y selección.

2.4.3.3 Análisis y Diagramas de Pareto

Es comúnmente llamado búsqueda de significancia o análisis ABC, es una herramienta avanzada genérica de mantenimiento para identificar y jerarquizar datos, con el fin de mostrar que elementos componen el tema que se está analizando. Éste permite, mediante una representación gráfica o tabular, conocida como diagrama de Pareto, identificar en una forma decreciente los aspectos que se presentan con mayor frecuencia o que tienen una ponderación o incidencia mayor.

Aplicando el análisis de Pareto se pueden detectar los problemas que tienen más relevancia, mediante la aplicación del principio de Pareto (pocos vitales, muchos triviales), conocido también como la regla 80/20 que dice que hay muchos problemas sin importancia frente a sólo unos graves, es decir, que el resultado de un proceso dependerá esencialmente de un número pequeño de los factores que

intervienen en el mismo. Si se logra determinar cuáles son estos factores vitales se puede concentrar recursos en el estudio de los mismos con lo que se resuelve la mayoría del problema, de donde se deriva la famosa frase de Pareto aplicando la atención a los pocos asuntos vitales, se consigue la máxima eficacia y rendimiento de los recursos dedicados. Por lo tanto, el Análisis de Pareto es una técnica que separa los pocos vitales de los "muchos triviales".

En el diagrama se organizan las diversas clasificaciones de datos, que representan los elementos o factores constituyentes de un problema o tema analizado, por orden descendente de izquierda a derecha por medio de barras sencillas o por una línea continua que une los puntos después de haber reunido los datos para calificar las categorías. De modo que se pueda asignar un orden de prioridades. El diagrama permite identificar visualmente en una sola revisión las minorías de características vitales a las que es importante prestar mayor atención y de esta manera priorizar recursos para llevar a cabo una acción correctiva sin malgastar esfuerzos y tiempo. Con frecuencia, un aspecto puede representar el 80. Es importante profundizar en lo que significa el Análisis ABC, este consiste en identificar las tres zonas que se pueden presentar en un análisis de búsqueda de significancia. La zona A del Pareto, representa la zona de mayor impacto, el 20.

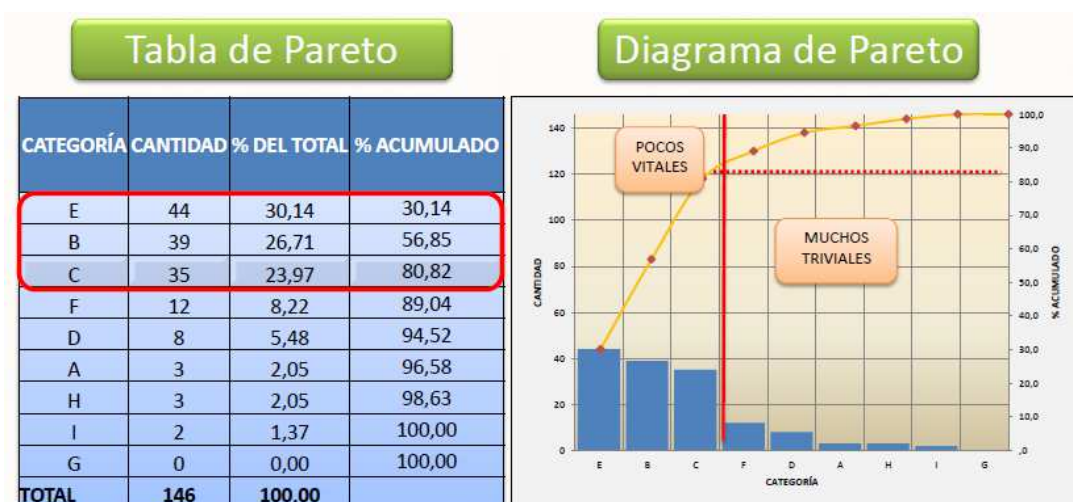
Objetivos del análisis de Pareto: En general el análisis de Pareto es una de las herramientas estadísticas de mantenimiento más útiles y sus aplicaciones en el área de mantenimiento sólo están limitadas por el ingenio del analista.

Realizar el análisis de Pareto tiene como objetivos:

- Identificar oportunidades para llevar a cabo mejoras.
- Identificar un producto o servicio que requiera un análisis más exhaustivo.
- Identificar los sistemas, equipos o elementos que están causando la mayoría de problemas a mantenimiento y/o producción.

- Documentar de manera científica y sistemática los llamados de atención a un área o sector problemático.
- Analizar las diferentes agrupaciones de datos.
- Buscar las causas principales de los problemas y establecer la prioridad de las soluciones.
- Evaluar los resultados de los cambios efectuados a un proceso (antes y después).
- Expresar los costos que significan cada tipo de falla y los ahorros logrados mediante el efecto correctivo llevado a cabo a través de determinadas acciones.

Figura 24 Diagrama de Pareto



Fuente: BORRÁS PINILLA, Carlos. Conceptualización para el Mantenimiento Preventivo, 2013. P.55

2.4.4 Indicadores de Confiabilidad.

Indicador: La definición más usual de un indicador es: un hecho cuantificado que mide la eficacia y/o la eficiencia de todo o parte de un proceso o de un sistema (real o simulado), con referencia a una norma, un plan o a un objetivo,

determinado o aceptado en un cuadro estratégico de la empresa. Los Indicadores Clave de Desempeño (KPI) son mediciones cuantificables, acordadas de antemano, que reflejan los factores críticos de éxito de una organización.

Confiabilidad: Es la probabilidad de un elemento para realizar una función requerida bajo condiciones dadas para un intervalo de tiempo dado¹⁰.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{Ecuación 1.}$$

R(t) = Confiabilidad

t = Intervalo de tiempo para la evaluación.

λ = Tasa de falla (Número de fallas por unidad de tiempo).

$$\lambda = 1/\text{MTBF} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Disponibilidad: Es la capacidad de un activo o componente para estar en un estado (arriba) para realizar una función requerida bajo condiciones dadas en un instante dado de tiempo o durante un determinado intervalo de tiempo, asumiendo que los recursos externos necesarios se han proporcionado.

La modelación de la disponibilidad se puede realizar mediante diversas técnicas, desde unas muy simples que se basan en indicadores puntuales e instantáneos que se calculan independiente de la estimación de probabilidades y de sus leyes que modelan el CMD, hasta otras más complejas donde si se tienen en cuenta las distribuciones que simulan el comportamiento de la confiabilidad y de la mantenibilidad, hasta llegar al uso de simulaciones tipo Montecarlo". Las más empleadas son: Disponibilidad Genérica, Disponibilidad Inherente, Disponibilidad Alcanzada, Disponibilidad Operacional y Disponibilidad Operacional Generalizada. Para este caso en particular, se debe emplear la Disponibilidad Operacional. "Si se tiene en cuenta los tiempos logísticos y administrativos de demoras, en la gestión

¹⁰ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Petroleum, petrochemical and natural gas industries: Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment Second edition, 2006. p. 7. (ISO 14224)

del mantenimiento y en la operación de equipos, antes o después de una intervención correctiva o planeada, se debe considerar la disponibilidad operacional. La disponibilidad está definida por la siguiente fórmula:

$$\text{Disponibilidad} = (TT - MT) / TT \quad \text{Ecuación 3.}$$

Dónde: TT = Tiempo Total: Es la suma de todo el tiempo requerido por los departamentos operacionales para el uso de la maquinaria o equipo.

MT= Tiempo de Mantenimiento: Es todo el tiempo que un equipo no está disponible por razones asociadas con la función del mantenimiento. Este tiempo incluye mantenimiento programado, mantenimiento no programado y paros por fallas.

Mean Time Between Failure – MTBF: Es el promedio de tiempo entre ocurrencia de fallas. Equivale a la suma del tiempo operativo de la máquina dividido entre el número total de fallas.

$$\text{MTBF} = \frac{t'}{\# \text{ Fallas}} \quad \text{Ecuación 4.}$$

t' = Tiempo de servicio del activo

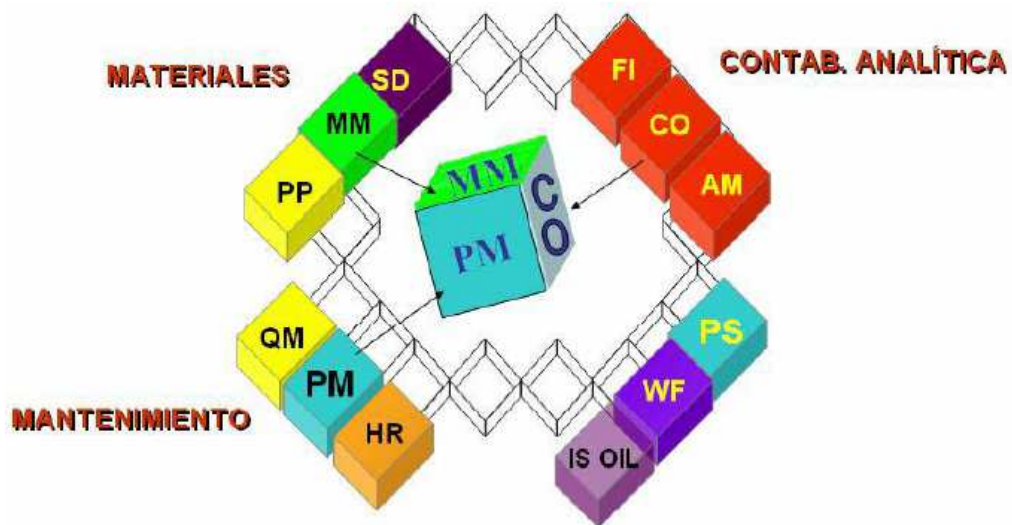
Mean Time To Repair – MTTR: Es el tiempo promedio para restaurar un equipo a una condición específica. Equivale al tiempo total gastado desarrollando todas las reparaciones de mantenimiento correctivo, dividido por el número total de esas reparaciones.

3. RECOPIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 PLAN DE MANTENIMIENTO ACTUAL

La definición de la estrategia de mantenimiento para los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP) fue implementada desde el inicio de operación del CPF de Cupiagua por la compañía “British Petroleum”. Para tal fin, se apoyaron en la metodología de análisis de modos y efecto de fallos. El resultado de este ejercicio se implementó en el sistema para la gestión de mantenimiento asistido por computadora (CMMS) llamado Engarde®, el cual, a su vez, migrará a Maximo®. En el año 2010, cuando la empresa Ecopetrol entró a operar y mantener el campo Cupiagua, se realizó la migración al software Ellipse®. En el año 2016 se realizó migración e implementación de software de mantenimiento SAP®, el cual integra en su totalidad con los módulos mantenimiento, materiales y contabilidad. (Ver figura 25).

Figura 25 Integración Modulo SAP-PM



Fuente: Equipo CMMS Ecopetrol GDP

En la Gerencia de Desarrollo y Producción Piedemonte hay 27 pozos productores activos, los pozos son estándar, quiere decir que todos cuentan con los mismos sistemas, las diferencias radican en la ubicación geográfica con respecto al CPF-

Cupiagua y la ubicación de los paneles solares del WHCP (en el techo del WHCP o en postes).

A continuación se evidencia en el CMMS software Ellipse®, el plan de mantenimiento para los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP) de la gerencia de desarrollo y producción Piedemonte.

Figura 26 Estrategia Mantenimiento WHCP en CMMS Ellipse®.

	District Code	Std Job	Desc	Maint Type	Comp Code	Orig Id
▶	1 GNO	MWP089	MTTO A WHCP E INST. CUP XD - 24 (TRIM.)	PV		C7475313
	2 GNO	MWP090	MTTO A WHCP E INST. CUP XD - 24 (ANUAL)	PV		C7475313
▶	1 GNO	MWP091	MTTO CUP XD [SIST. SOLAR WHCP Y WPGC]	PV		C7475313
	2 GNO	MWP092	MTTO CUP XD [JB'S SIST. TIERRAS-VALV]	PV		C7475313

Fuente: CMMS Ellipse®. Ecopetrol.

Figura 27 Descripción de tareas de Mantenimiento WHCP en CMMS Ellipse®.

District Code:

Standard Job No:

General	Planning	Scheduling	Equipment	Tasks	Costs	Cost Allocation	Job Codes	Extended Description	Risk	Reference Codes
Task	Task Description	Job Description Code	Job Description Code	Job Description Code	Work Group	Work Group Description				
▶ 1 001	WCP-CE-401 MTTO PANEL CTRL CABEZA POZO	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
2 002	C-RTU-E-41-401 MTTO RTU Y TELEM. WHCP	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
3 003	E-41-HS-0131A MTTO HAND SWITCH ESD LOCAL	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
4 004	E-41-HS-0130 MTTO H. SWITCH ESD PORTERIA	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
5 005	CE-HS-0113 MTTO A HAND SWITCH NORMAL	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
6 006	E-41-HS-0133 MTTO A HAND SWITCH DE RESET	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
7 007	E-41-HS-0135 MTTO HAND SWITCH DE COMMS	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
8 008	E-41-HS-0134 MTTO H. SWITCH BYPASS PRESS	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
9 009	E-41-PIT-0132 MTTO PIT LINEA (PIT L)	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
10 010	E-41-PIT-0130 MTTO PIT CABEZA (PIT C)	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
11 011	E-41-PIT-0134 MTTO PIT ANULAR (PIT A)	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
12 012	E-41-TIT-0130 MTTO A TIT	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
13 013	E-41-ZS-0131 MTTO LIMIT SWITCH POS WV	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
14 014	E-41-ZS-0130 MTTO LIMIT SWITCH POS MV	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
15 015	E-41-PS-0130 MTTO SWITCH PRESS. POS DHSV	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
16 016	E-41-PSHH-0133 MTTO PSH LINEA	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
17 017	E-41-PSL-0131 MTTO PSL LINEA	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
18 018	WKM-CE-401 MTTO SIST. NEUMATICO WHCP	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
19 019	WPM-CE-401 MTTO SIST. HIDRAULICO WHCP	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
20 020	CWCPQ-E-401 MTTO PANEL CTRL INY QUIMICO	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
21 021	PQC-CE-401 MTTO BOMBA INY. QUIMICOS	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
22 022	E-41-PSHQ-131 MTTO PSH LINEA QUIMICO	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
23 023	E-41-PSLQ-131 MTTO PSL LINEA QUIMICO	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
24 024	E-41-PSHDQ-131 MTTO PSH DIAFRAGMA	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
25 025	E-41-LSLQ-131 MTTO LSL VASUA DECANAC.	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					
26 026	E-41-FQIT-0131 MTTO A FIT DE QUIMICO	IN	INSPECCION	EC-POZ	ECOPETROL CUIAGUA MTTO P...					

Fuente: CMMS Ellipse®. Ecopetrol.

El plan de mantenimiento de los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP) de la gerencia de desarrollo y producción Piedemonte, se componen de

los siguientes estándares de trabajo, horas hombre y frecuencia de ejecución. (Ver Tabla 10).

Tabla 10 Estrategia Mantenimiento WHCP Pozos Productores Cupiagua

Descripción PM	HH FMEA	Frecuencia	Cantidad Pozos/Locación	Repeticiones por Año	Total HH
MTTO POZO WHCP-WPQC-INST. CUP-PROD TRIM	34.3	90	27	3	2775.9
MTTO PANELES SOLARES CUP WHCP ANUAL	6.0	360	21	1	126.0
MTTO A IJB, TIERRA, PARARRAYOS ANUAL	16.5	360	21	1	346.5
MTTO POZO WHCP-WPQC-INST. CUP-PROD ANUAL	38.5	360	27	1	1038.7
					4287.1

Fuente: Autores

Para la ejecución del plan de mantenimiento se requiere de recurso técnico de las áreas de mecánica, electricidad e instrumentación. Los estándares de trabajo contienen las tareas de mantenimiento, las frecuencias de ejecución del plan son: trimestral y anual. Se requieren 4287.1 horas hombre anual para ejecutar la estrategia de mantenimiento de los 27 pozos de los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP).

Figura 28 Plan de Mantenimiento WHCP Pozo Productor Cupiagua

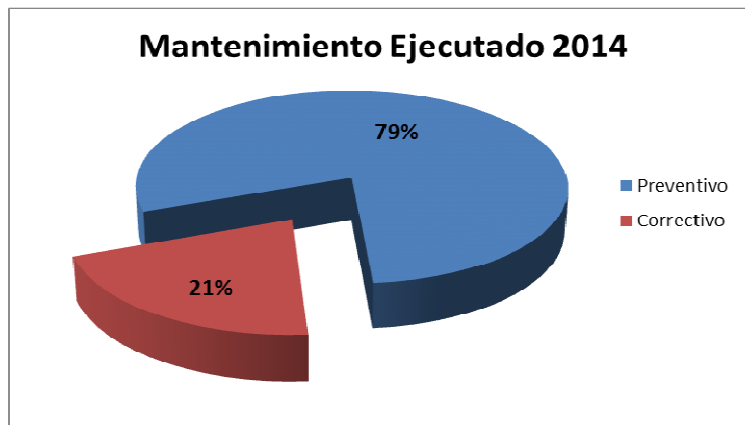
Grupo	Frecue	Std.JobNo.	Descripcion Std.Job	Num	Descripcion Tarea	YPEL	YPIN	YPME
UPWPXD	360	MWP091	MTTO CUP XD [SIST. SOLAR WHCP Y WPQC]	001		1.5		1.5
				002	CXD-WQPS-101 MTTO A PANELES SOLARES WPQC	1.5		1.5
				001	MTTO CUP XD [JOB's SIST. TIERRAS-VALV]	3.0	2	
				002	CUPWPXD MTTO A SISTEMAS DE TIERRAS	2.0		2
				003	CUPWPXD MTTO A PARARRAYOS	1.0	1	
UPCWPWP	90	MWP183	MTTO A WHCP E INST. CUP XD - 44 (TRIM.)	004	CUPCWPWPXD-1 MTTO VAL. M/FOLD DE PRUEBA		2	3.5
				001		1.0	0.83	0.5
				002	C-RTU-XN-101 MTTO RTU Y TELEM. WHCP			0.5
				003	CXN-PDF-0101 MTTO A PANEL CTRL FUEGO	1.0	1	
				004	CXN-HS-0111 MTTO HAND SWITCH ESD LOCAL	0.5	0.5	
				005	CXN-HS-0110 MTTO H. SWITCH ESD PORTERIA	0.5	0.5	
				006	CXN-HS-0112 MTTO A HAND SWITCH NORMAL	0.5	0.5	
				007	CXN-HS-0113 MTTO A HAND SWITCH DE RESET	0.5	0.5	
				008	CXN-HS-0115 MTTO HAND SWITCH DE COMMS	0.5	0.5	
				009	CXN-HS-0114 MTTO H. SWITCH BYPASS PRESS	0.5	0.5	
				010	CXN-PIT-0111 MTTO PIT LINEA (PIT L)			0.5
				011	CXN-PIT-0112 MTTO PIT LINEA (PIT L)			0.5
				012	CXN-PIT-0113 MTTO PIT LINEA (PIT L)			0.5
				013	CXN-PIT-0110 MTTO PIT CABEZA (PIT C)			0.5
				014	CXN-PIT-0312 MTTO PIT ANULAR (PIT A)			0.5
				015	CXN-TIT-0110 MTTO A TIT			0.5
				016	CXN-ZS-0111 MTTO LIMIT SWITCH POS WV		0.5	0.33
				017	CXN-ZS-0110 MTTO LIMIT SWITCH POS MV		0.5	0.33
				018	CXN-PS-0110 MTTO SWITCH PRESS. POS DHSV		0.5	
				019	CXN-PSLL-101 MTTO PSL LINEA	0.3	0.5	
				020	WKM-CXN-101 MTTO SIST. NEUMATICO WHCP	0.2	0.66	
				021	WPM-CXN-101 MTTO SIST. HIDRAULICO WHCP	0.5		0.5
				022	CXN-TC-0134 MTTO TRANSMISOR CORROSION		0.33	
				023	CXN-TC-0135 MTTO TRANSMISOR CORROSION		0.33	
				024	WCPCQ-XN-101 MTTO PANEL CTRL INY QUIMICO	2.0	2	
				025	CPQ-XN-101 MTTO BOMBA INY. QUIMICOS		3.5	3.5
				026	CXN-PSHQ-101 MTTO PSH LINEA QUIMICO		0.33	0.33
				027	CXN-PSLQ-101 MTTO PSL LINEA QUIMICO		0.33	0.33
				028	CXN-PSHDQ-101 MTTO PSH DIAFRAGMA		0.33	0.33
				029	CXN-LSLQ-101 MTTO LSL VASUA DECANTAC.		0.33	0.33
				030	CXN-FQIT-0111 MTTO A FIT DE QUIMICO		0.33	0.33
				031	CXN-LQIT-101 MTTO A LIT DE QUIMICO		0.33	0.33
				UPCWPWP	360	MWP184	MTTO A WHCP E INST. CUP XD - 44 (ANUAL)	001
002	C-RTU-XN-101 MTTO RTU Y TELEM. WHCP							0.33
003	CXN-HS-0111 MTTO HAND SWITCH ESD LOCAL	0.3	0.33					
004	CXN-HS-0110 MTTO H. SWITCH ESD PORTERIA	0.7	0.66					
005	CXN-HS-0112 MTTO A HAND SWITCH NORMAL	0.3	0.33					
006	CXN-HS-0113 MTTO A HAND SWITCH DE RESET	0.3	0.33					
007	CXN-HS-0115 MTTO HAND SWITCH DE COMMS	0.3	0.33					
008	CXN-HS-0114 MTTO H. SWITCH BYPASS PRESS	0.3	0.33					
009	CXN-PIT-0111 MTTO PIT DE LINEA		0.66					0.33
010	CXN-PIT-0112 MTTO PIT DE LINEA		0.66					0.33
011	CXN-PIT-0113 MTTO PIT DE LINEA		0.66					0.33
012	CXN-PIT-0110 MTTO A PIT CABEZA		0.66					0.33
013	CXN-PIT-0312 MTTO A PIT ANULAR		0.66					0.33
014	CXN-TIT-0110 MTTO A TRANS. TEMPERATURA		0.66					0.33
015	CXN-ZS-0111 MTTO LIMIT SWITCH POS WV		0.66					0.33
016	CXN-ZS-0110 MTTO LIMIT SWITCH POS MV		0.66					0.33
017	CXN-PS-0110 MTTO SWITCH PRESS. POS DHSV		0.66					
018	CXN-PSLL-101 MTTO PSL LINEA	0.3	0.83					
019	WKM-CXN-101 MTTO SIST. HIDRAULICO WHCP		1					1
020	WPM-CXN-101 MTTO SIST. NEUMATICO WHCP		0.7					0.66
021	CXN-TC-0134 MTTO TRANSMISOR CORROSION		0.3					0.66
022	CXN-TC-0135 MTTO TRANSMISOR CORROSION		0.3					0.66
023	CWPCQ-XN-101 MTTO PANEL CTRL INY QUIMICO	2.0	2					
024	CPQ-XN-101 MTTO BOMBA INY. QUIMICOS		4					4
025	CXN-PSHQ-101 MTTO PSH LINEA QUIMICO		0.5					0.33
026	CXN-PSLQ-101 MTTO PSL LINEA QUIMICO		0.5					0.33
027	CXN-PSHDQ-101 MTTO PSH DIAFRAGMA		0.5					0.33
028	CXN-LSLQ-101 MTTO LSL VASUA DECANTAC.		0.5					0.33
029	CXN-FQIT-0111 MTTO A FIT DE QUIMICO		0.5					0.33
030	CXN-LQIT-101 MTTO A LIT DE QUIMICO		0.5					0.33

Fuente: Autores

3.1.1 Mantenimiento preventivo y Correctivo

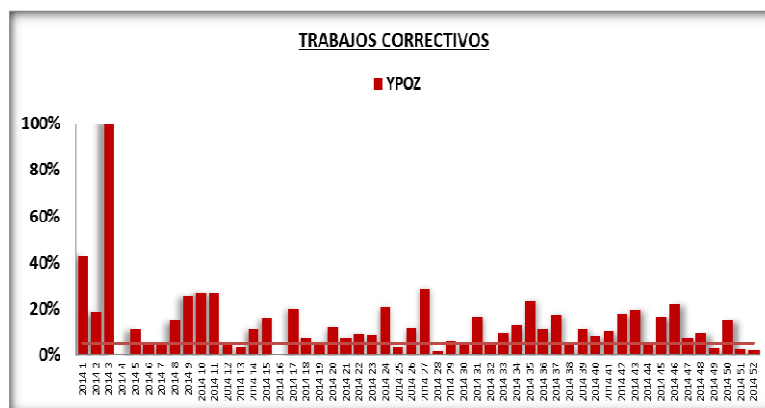
Durante el año 2014, la empresa Stork, ejecutó la estrategia de mantenimiento a los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP). El 79% de las horas hombre fue dedicado al mantenimiento preventivo y el 21% corresponde a las horas hombre en ejecución de trabajos correctivos, motivo por el cual se requirió recurso adicional para el cumplimiento anual del plan de mantenimiento (91% de cumplimiento anual). (Ver Figura 29).

Figura 29 Gráfica del porcentaje de mantenimiento 2014



Fuente: Autores.

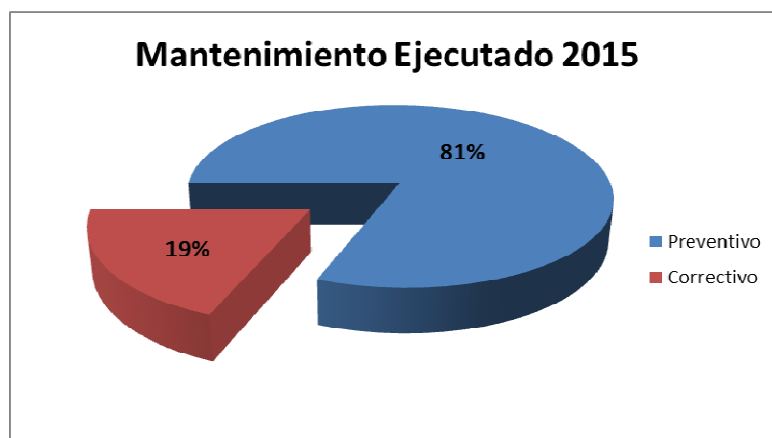
Figura 30 Gráfica distribución de trabajos correctivos 2014



Fuente: Autores.

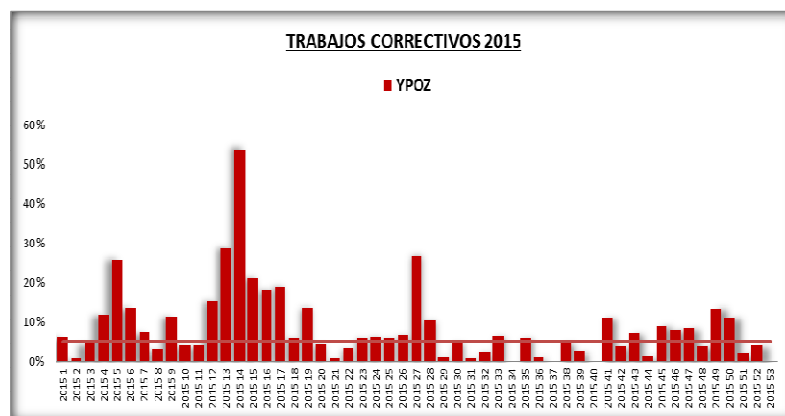
Durante el año 2015, la empresa Stork, ejecutó la estrategia de mantenimiento a los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP). El 81% de las horas hombre fue dedicado al mantenimiento preventivo y el 19% corresponde a las horas hombre en ejecución de trabajos correctivos, motivo por el cual se requirió recurso adicional para el cumplimiento anual del plan de mantenimiento (93% de cumplimiento anual). (Ver Figura 31).

Figura 31 Gráfica del porcentaje de mantenimiento 2015



Fuente: Autores

Figura 32 Gráfica distribución de trabajos correctivos 2015



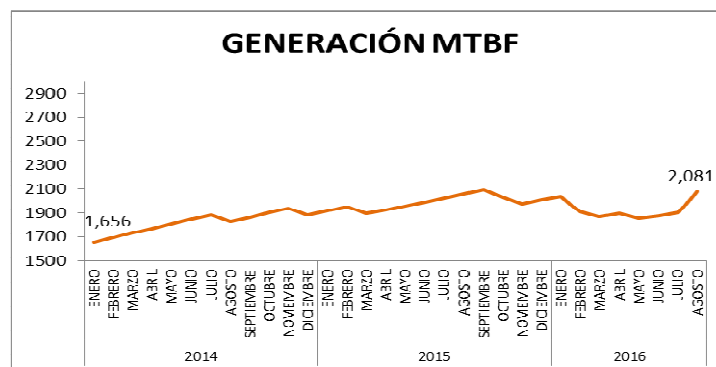
Fuente: Autores

3.2 ANÁLISIS DE LOS INDICADORES DE CONFIABILIDAD

3.2.1 Tiempo Medio entre Fallas (MTBF)

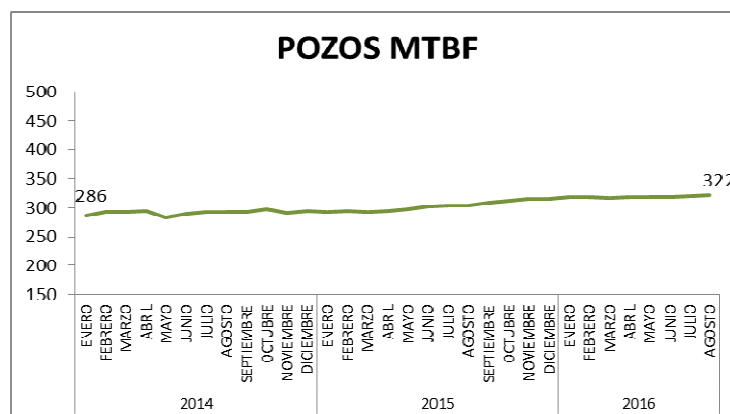
A continuación se muestran los tiempos medios entre fallas (MTBF) de los sistemas operativos de CPF-Cupiagua, los MTBF se encuentran acumulados desde julio-2010. La menor recurrencia de fallas la tiene el sistema de generación con una falla promedio cada tres meses (2081 horas), (ver Figura 33). El sistema con la mayor recurrencia de fallas es el sistema de pozos, donde cada 13 días en promedio ocurre una falla (322 horas), (ver Figura 34).

Figura 33 Gráfica MTBF Sistema de Generación



Fuente: Autores

Figura 34 Gráfica MTBF Sistema de Pozos

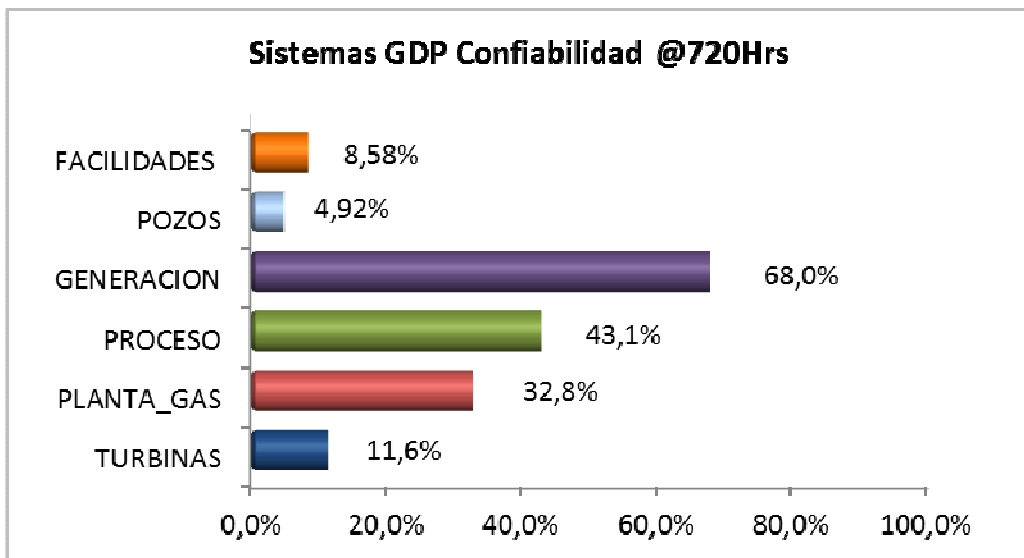


Fuente: Autores

3.2.2 Confiabilidad

En la figura 35 se observa la confiabilidad acumulada desde julio-2010 de los sistemas del CPF-Cupiagua; el sistema de pozos tiene la confiabilidad más baja (4.92%) y el sistema con mayor confiabilidad es generación. Se debe trabajar en el aumento del MTBF en cada uno de los sistemas principales de la GDP para mejorar la Confiabilidad de los mismos.

Figura 35 Gráfica de Confiabilidad Sistemas del CPF-Cupiagua

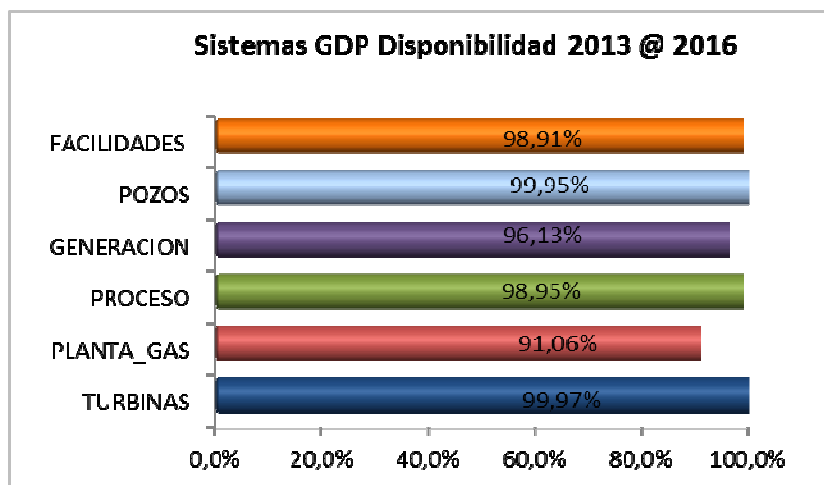


Fuente: Autores.

3.2.3 Disponibilidad

En la figura 36 se visualiza la disponibilidad operativa acumulada desde julio-2010 de los sistemas del CPF-Cupiagua; la disponibilidad de pozos es de 99.95%. Para el cálculo de la disponibilidad se tiene en cuenta los eventos no planeados y los planeados de cada uno de los equipos que componen los sistemas de la Gerencia de Desarrollo y Producción Piedemonte.

Figura 36 Gráfica de disponibilidad Sistemas del CPF-Cupiagua



Fuente: Autores.

3.2.4 Análisis de malos actores de mantenimiento

Como se puede observar en los indicadores anteriores los sistemas operativos del CPF-Cupiagua tienen un alto nivel de fallas, algunos recurrentes otros aleatorios pero igual impacta negativamente en las metas de la organización. Un programa de malos actores ayuda a reducir el número de fallas durante la implementación de soluciones en un proceso de análisis de causa raíz. Los malos actores son sistemas y equipos con una gran cantidad de paradas, emergencias y reparaciones que supuestamente no tienen razón de ser y que concentran la mayor cantidad de horas hombre, altos costos de materiales y pérdidas de producción. A continuación se citan los malos actores del sistema de pozos.

Se determinan e identifican las listas de los “malos actores” usando los reportes desde el CMMS, la información de reporte de fallas, llamados de emergencias, las pérdidas de producción y los costos de mantenimiento entre otros. Se determina la confiabilidad para cada sistema y equipo, usando el Mean Time Between Failure (MTBF), los costos, el número de fallas y las pérdidas de producción en un

período predeterminado, con esta información se realiza el análisis de cuáles son los equipos malos actores y se determinan las acciones para el mejoramiento.

Figura 37 Análisis de Malos Actores Sistemas del CPF-Cupiagua

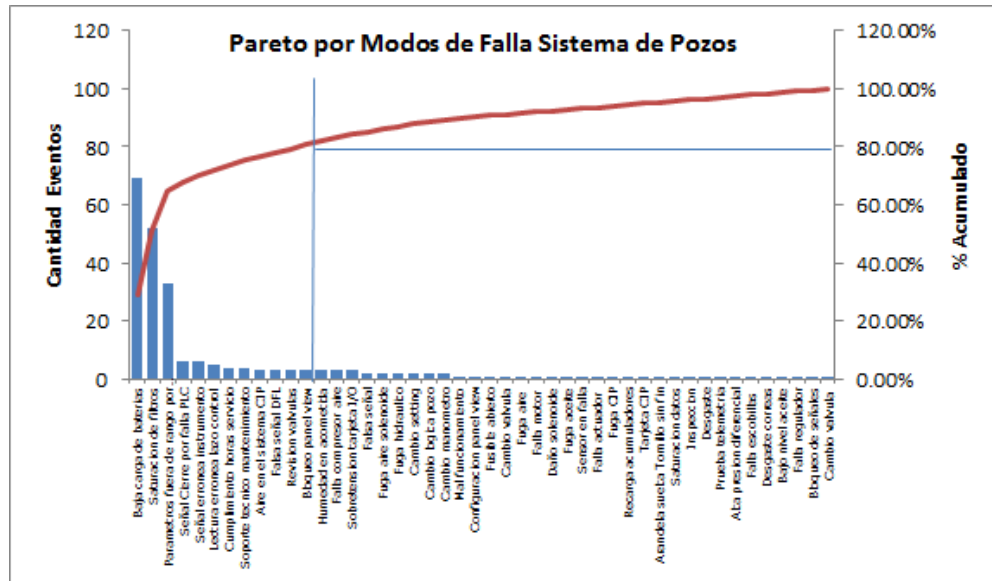
7	Mes	Orden Trabajo	Descripción Actividad	Equipo	Modo Falla	Discipli	Priorid	Hora Homb	Costo Hora/ Hombre	Difer s/B	Costo Diferid	Costo Material	Costo Total	RANKING
8	jun-15	CP011346	INSP. & CAMBIO BEARINGS, HS - GB DEMAG	MP-KM-2101	Acumulacion barrit	EC-MEC	1	132.3	\$ 9,254,385	2792	\$ 453,700,000	\$ 441,113	\$ 463,395,498	22.78%
9	jun-15	CP011548	K - 2101 FUGA ACEITE GEAR BOX	MP-KM-2101	Fuga aceite	EC-MEC	1	35.23	\$ 2,464,339	677	\$ 110,012,500	\$ -	\$ 112,476,839	5.52%
10	abr-15	CP011032	HP3: Fuga válvula SDV-3851A ubi succión	CC-KTB-3802	Desgaste internos	EC-INS	1	7.75	\$ 542,500	586	\$ 87,900,000	\$ -	\$ 88,442,500	4.33%
11	mar-15	CP010318	MP-K-2101 fuga de gas de sellos y brida	MP-KM-2101	Excesiva vibración	EC-MEC	0	3.46	\$ 242,200	695	\$ 77,087,037	\$ -	\$ 77,329,237	3.85%
12	nov-15	CP006214	Cambio V/V Z' drenaje de aceite HP-2	CB-KTB-2802	Cambio valvula	EC-MEC	2	81.37	\$ 5,614,530			\$ 78,409,057	\$ 84,023,587	2.24%
13	may-15	CP011777	CORREGIR FUGA GASES CALIENTES JB-4	CA-KTB-1801	Fuga aire	EC-INS	1	13.0	\$ 1,329,050	302	\$ 44,545,000	\$ -	\$ 45,874,050	2.24%
14	may-15	CP011351	correccion fuga FCV-0101	XL4-V-0105		EC-INS	1	5.4	\$ 379,829	293	\$ 43,950,000	\$ -	\$ 44,329,829	2.20%
15	oct-15	CP012239	MP1: Adicionar aceite lubricación	CA-KTB-1801	Reposicion aceite	EC-MEC	1	25.88	\$ 1,785,720			\$ 65,981,832	\$ 67,767,552	1.84%
16	jul-15	CP011472	MP1: Recuperar nivel aceite lubricación	CA-KTB-1801	Reposicion aceite	EC-MEC	1	23.79	\$ 1,641,510			\$ 65,981,832	\$ 67,623,342	1.84%
17	may-15	CP011326	HP3: BDV-3881 Se encuentra abierta a tea	CC-KTB-3802	Desgaste internos	EC-INS	1	7.0	\$ 490,350	215	\$ 32,250,000	\$ -	\$ 32,740,350	1.62%
18	jun-15	CP011260	MP3: Cambio filtros de aire succión com	CC-KTB-3801	Saturacion de filtros	EC-MEC	2	135.99	\$ 9,512,501			\$ 53,509,136	\$ 63,021,636	1.61%
19	abr-15	CP01181	HP1C Cambiar filtros Casa de Filtros	CA-KTB-1802	Saturacion de filtros	EC-MEC	1	103.8	\$ 7,262,909			\$ 53,509,136	\$ 60,772,044	1.57%
20	abr-15	CP010993	CUP NW: mantenimiento flama arrestor.	NW-V-0105	Saturacion	EC-MEC	1	47.55	\$ 3,328,500	192	\$ 28,800,000	\$ -	\$ 32,128,500	1.48%
21	sep-15	CP005362	HP2: Cambio válvula drenaje casing compr	CB-K-2802	Cambio valvula	EC-VAL	3	8.99	\$ 620,310			\$ 51,827,045	\$ 52,447,355	1.44%
22	dic-15	CP012400	PRESENTA FUGA POR TAPA DESCARGA, PLUNGE	PU-P-2301B	Fuga glycol	EC-MEC	2	19.38	\$ 1,337,220			\$ 50,308,092	\$ 51,645,312	1.40%
23	oct-15	CP011588	MANTENIMIENTO CORRECTIVO A BOMBA	NW-P-0103	Mantenimiento bomba	EC-MEC	2	74.52	\$ 5,141,880			\$ 45,193,885	\$ 50,335,565	1.32%
24	jun-15	CP007893	HP3 Fuga sello acople CC-PM-3825B	CC-KTB-3802	Fuga aceite	EC-MEC	3	32.5	\$ 2,273,375			\$ 46,420,295	\$ 48,693,670	1.31%
25	jul-15	CP011088	CAMBIO DE COOLER	US-K-6501	Falla radiador	EC-MEC	2	17.5	\$ 1,207,500			\$ 44,929,780	\$ 46,137,280	1.25%
26	ene-15	CP010311	Ruido extraño en motor. Car. 3516	XL-EG-0101	Gas subestandar	EC-MEC	1	57.99	\$ 4,059,300	181	\$ 22,816,570	\$ -	\$ 26,875,870	1.19%
27	jun-15	CP006501	CAMBIO POLEA Y CORREAS HE-3801N	CC-HE-3801N	Desgaste polea	EC-MEC	2	11	\$ 783,450			\$ 38,187,616	\$ 38,971,066	1.06%
28	ene-15	CP010407	MOTOR UNIDAD COMPRESORANO ENCIENDE	XL-EG-0101	Gas subestandar	EC-MEC	1	50.66	\$ 3,546,200	176	\$ 19,866,774	\$ 877,175	\$ 24,280,149	1.06%
29	sep-15	CP005364	Cambiar válvula DEB overhead tank	CB-K-2802	Cambio valvula	EC-VAL	2	13.25	\$ 914,250			\$ 33,837,701	\$ 34,751,951	0.94%
30	oct-15	CP009377	CAMBIO VALVULA DIS DE LA XV - 2411A	GP-ME-2402B	Cambio valvula	EC-VAL	2	57.83	\$ 3,990,270			\$ 31,500,000	\$ 35,490,270	0.92%
31	feb-15	CP010537	Falla en lubricacion forzada lado izq.	XL-K-0101	Taponamiento bloque	EC-MEC	1	36	\$ 2,520,000	93	\$ 13,950,000	\$ -	\$ 16,470,000	0.73%
32	dic-15	CP012499	PRESENTA FUGA POR PLUNGER	PU-P-1301B	Fuga glycol	EC-MEC	2	31.13	\$ 2,147,970			\$ 24,922,032	\$ 27,070,002	0.72%
33	jun-15	CP011555	CAMBIO DE VALVULAS COMPRESORAS	XL-K-0101	Gas subestandar	EC-MEC	1	10	\$ 699,500	58	\$ 9,425,000	\$ 7,680,000	\$ 17,804,500	0.69%
34	ene-15	CP010515	MP2: Recuperar aceite de lubricación	CB-KTB-2801	Cumplimiento horas servicio	EC-MEC	1	38	\$ 2,680,000			\$ 23,564,940	\$ 26,244,940	0.69%

Fuente: Autores.

3.2.5 Análisis de Pareto e identificación de modos de falla

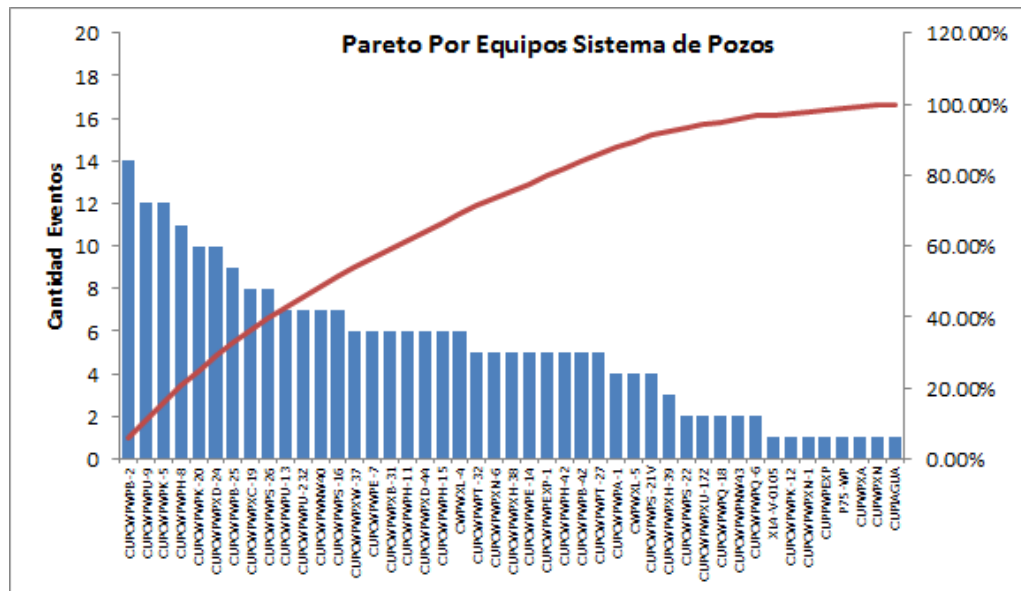
Una vez identificado los malos actores de mantenimiento del sistema de pozos, se realiza el Pareto por modos de falla y cantidad de eventos no deseados (Ver Figura 38). Se realiza el Pareto por pozo; para identificar cuál de los pozos es donde más se generan fallas. (Ver Figura 39). El análisis de Pareto se realiza teniendo en cuenta la documentación del mantenimiento consignada en las órdenes de trabajo correctivas generadas en el sistema CMMS.

Figura 38 Gráfica de Pareto por Modo Falla Sistema Pozos



Fuente: Autores.

Figura 39 Gráfica de Pareto por Pozos



Fuente: Autores.

3.2.6 Revisión análisis de causa raíz

El área de Confiabilidad enfoca su gestión en diferentes procesos como son los indicadores de Confiabilidad, Análisis y Reporte de Fallas; para la identificación de malos actores con el fin de generar oportunidades de mejora que impacten de forma positiva a las diferidas de producción, la reducción del riesgo y costos óptimos de mantenimiento.

El Análisis de Causa Raíz aplica a todos los eventos de falla que hayan generado un impacto a las personas, el ambiente, económico, a los clientes y a la imagen de la empresa. Así mismo, para los equipos y componentes de la GDP.

En el proceso de Análisis de Causa Raíz se contemplan principalmente las siguientes etapas:

- Registro de parada (Reporte Preliminar 24 Horas). Este informe se entrega máximo 24 horas después de ocurrido el evento de falla.
- Valoración del impacto de la falla (Matriz RAM)
- Ejecución del instructivo de Análisis de Causa Raíz
- Seguimiento al cumplimiento de acciones correctivas y recomendaciones,
- Divulgación del ejercicio de análisis de falla
- Seguimiento a la efectividad de las acciones correctivas y recomendaciones de cada análisis, especialmente de los eventos esporádicos de cualquier impacto que sean analizados.

La selección del equipo del equipo de análisis de causa raíz está a cargo del facilitador y/o Ingeniero de Técnicas de Confiabilidad, y debe estar compuesto por las personas involucradas en el evento, especialistas del área(s), operadores, técnicos de diferentes disciplinas y todo aquel que dentro del análisis puede aportar valiosamente en la búsqueda de la causa raíz. Adicionalmente, tiene a cargo la labor de informar al Coordinador de Mantenimiento para aprobación del personal requerido.

En la Figura 40 se relacionan los reportes preliminares, reportes de falla y análisis de causa raíz realizados al sistema de pozos, cada reporte cuenta con un consecutivo.

Figura 40 Consecutivos de Análisis de Causa Raíz Sistema Pozos.

Codigo	Nombre	Tipo	Fecha
PRE-GDP-POZ-16-264	CIERRE DE POZO T-27 POR FALLA EN TARJETA PLC	PRE	31/01/2016
PRE-GDP-POZ-15-261	CIERRE DE POZO S-21 POR FALLA EN PLC	PRE	12/12/2015
PRE-GDP-POZ-15-260	CIERRE DE POZO B-25 POR FALLA EN PLC	PRE	12/12/2015
PRE-GDP-POZ-15-259	CIERRE DE POZO H-42 POR FALLA EN PLC	PRE	05/12/2015
PRE-GDP-POZ-15-255	CIERRE DE POZO XL-5 POR FALLA EN PLC	PRE	11/11/2015
PRE-GDP-POZ-15-254	CIERRE DE POZO XD-44 POR ALARMA LOCAL DE PARADA	PRE	20/10/2015
RCA-GDP-POZ-15-021	CIERRE DE POZOS POR FALLA EN MÓDULOS DE EXPANSIÓN EN PLC	RCA	30/08/2016
PRE-GDP-POZ-15-252	Cierre del pozo productor XL-4 por enclavamiento de señal	PRE	22/09/2015
PRE-GDP-POZ-15-238	Cierre del pozo productor H-8 por falla de PLC tarjetas análogas	PRE	09/07/2015
PRE-GDP-POZ-15-225	Cierre de pozo reporte XL-4	PRE	13/05/2015
PRE-GDP-POZ-15-224	Cierre del pozo inyector E-7 por falla de PLC tarjetas análogas	PRE	07/05/2015
PRE-SON-POZ-15-221	Falla PLC Pozo XA-3	PRE	23/04/2015
PRE-SON-POZ-15-220	Falla PLC Pozo S-26	PRE	08/04/2015
PRE-SON-POZ-15-204	Fuga de aire por actuador válvula subsuelo Q6	PRE	05/02/2015
PRE-SON-POZ-14-190	Cierre del Pozo T-27 por fuga de aire de control	PRE	13/12/2014
PRE-SON-POZ-14-185	Cierre del pozo CUPXL4 por falla del PLC	PRE	16/11/2014
PRE-SON-POZ-14-184	Cierre del pozo CUP U9 12 11 2014 24 hrs	PRE	12/11/2014
PRE-SON-POZ-14-181	Cierre del pozo CUP XH39	PRE	09/10/2014
PRE-SON-POZ-14-172	Cierre de pozo NW43 por señal de baja presión de línea	PRE	17/09/2014
PRE-SON-POZ-14-169	Cierre del pozo productor XD44 por accionamiento de señal de fuego	PRE	27/08/2014
PRE-SON-POZ-14-162	Cierre de pozo U9 por señal de baja presión de línea	PRE	08/07/2014
PRE-SON-POZ-14-161	Cierre de pozo XP1 por descarga atmosférica	PRE	02/07/2014
PRE-SON-POZ-14-149	Cierre de pozo S26 por Fuga de aceite hidráulico	PRE	21/05/2014
PRE-SON-POZ-14-147	Cierre del pozo Inyector U23 por falla en el PLC durante tormenta.	PRE	08/05/2014
PRE-SON-POZ-14-146	Cierre del pozo Productor A1 por falla en el PLC durante tormenta	PRE	08/05/2014
PRE-SON-POZ-14-145	Cierre del pozo inyector XH39 por daño en barreras de protección	PRE	08/05/2014
PRE-SON-POZ-14-144	Cierre de pozo T32 por descargas atmosféricas	PRE	08/05/2014
PRE-SON-POZ-14-142	Cierre del pozo XL5 por baja carga de Baterías	PRE	19/04/2014
PRE-SON-POZ-14-140	Cierre del Pozo H8 por señal de baja presión de línea	PRE	23/04/2014
PRE-SON-POZ-14-133	descarga profunda del banco de baterías instaladas en el WHCP.	PRE	06/02/2014
PRE-SON-POZ-14-132	baja presión de succión 1era etapa febrero	PRE	14/02/2014
RCA-SON-POZ-13-006	Daño en PLC Entrada de agua	RCA	26/01/2014
RCA-SON-POZ-14-013	Baja carga de baterías	RCA	01/07/2014

Fuente: Autores.

A continuación se relaciona los aspectos importantes del análisis de causa raíz realizado al modo de falla “Baja carga de baterías” por ser el más recurrente del sistema de pozos.

➤ **Análisis De Causa Raíz, RCA-SON-POZ-14-013, eventos de baja carga de baterías en los pozos de Cupiagua.**

Descripción del evento de falla: Pérdidas de producción en el último trimestre y alta demanda de mantenimiento correctivo de Pozos en CUPIAGUA, generado por eventos de baja carga en las baterías.

Valoración de la falla: Según la matriz RAM de Ecopetrol, la valoración Consecuencia: C (Costos de pérdidas); 2, Probabilidad: E (Sucede varias veces por año en Superintendencia); Riesgo: M (Medio), el cual amerita realizar un análisis de causa raíz según el procedimiento de Ecopetrol.

Figura 41 Matriz RAM Ecopetrol.

CONSECUENCIA			PROBABILIDAD					
P	A	C		A	B	C	D	E
Personas	Ambiental Area Derrame	Costos de Pérdidas USD		No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en Ecopetrol	Sucede varias veces por año en Ecopetrol	Sucede varias veces por año en Superintende
Una o más fatalidades	Masivo >40m ²	Catastrofico >\$10M	5	M	M	H	H	VH
Incapacidad permanente	20m ² < May < 40m ²	\$1M < Grave < \$10M	4	L	M	M	H	H
Incapacidad temporal >1 día	10m ² < Loc < 20m ²	\$100K < Severo < \$1M	3	N	L	M	M	H
Lesión Menor sin incapacidad	1m ² < Menor < 10m ²	\$10k < Importante < \$100K	2	N	N	L	L	M
Lesión leve (1ros auxilios)	Leve < 1m ²	\$5K < Marginal < \$10K	1	N	N	N	L	L
Ninguna Lesión	Ningún Efecto	Ninguna	0	N	N	N	N	N

RAM: C2E = M

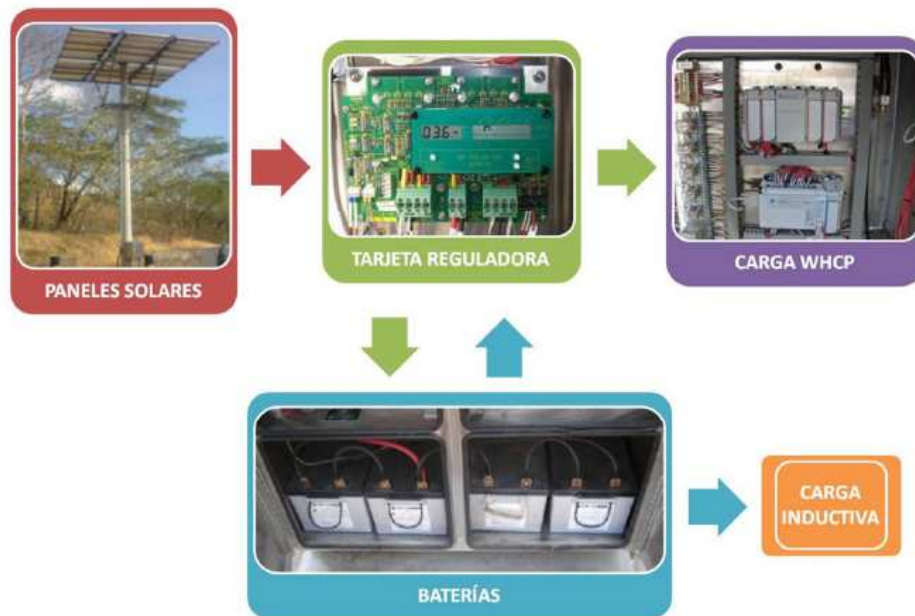
Fuente: Procedimiento de Analisis de Causa Raiz Ecopetrol.

Antecedentes a la falla: Condiciones especiales en pozos con baja carga recurrente: Durante los picos de baja actividad solar (alta nubosidad y lluvia constante) se presentan señales de baja carga.

continuamente. En el campo se encuentran bancos de baterías que fueron puestas en servicio desde el año 2005 y 2006. Durante el 2009 se llevó a cabo un reemplazo de algunas de las baterías de ese año por cumplimiento en la vida útil y por deficiencias en su funcionamiento. Se han presentado cierres esporádicos de pozos por fugas en el sistema neumático por fallas asociadas a los elementos del sistema como solenoides y switches.

Figura 42 Configuración del sistema de Carga WHCP

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CARGA

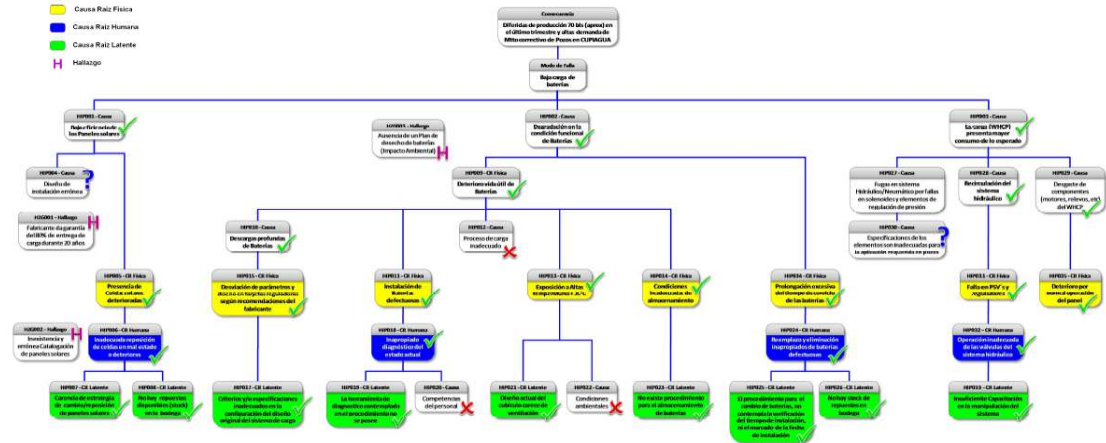


Fuente: Autores.

Vida útil de las baterías: La vida útil de una batería se puede estimar en años o en ciclos de carga-descarga. La cantidad de ciclos en los cuales la batería debería mantener su capacidad de carga, depende también de la profundidad de descarga de los ciclos a los cuales sea sometida la batería, por lo que a mayor profundidad de descarga menor será la vida útil.

Después de haber revisar los antecedentes se realiza el árbol lógico de falla, donde se evalúan los sistemas asociados y se generan hipótesis las cuales deben ser validadas o descartadas.

Figura 43 Árbol Lógico de Falla



Fuente: Autores.

Una vez validada o descartadas las hipótesis se identifica la causa raíz del problema, se generan acciones para evitar la recurrencia del evento.

Figura 44 Cuadro de causa raíz y Acciones.

Causa Raíz	Soluciones
<p>HIP007 – CR LATENTE: Carenza de estrategia de cambio de paneles solares.</p>	<p>Definir procedimiento para diagnosticar la condición de los paneles solares en pozos.</p> <p>Entregable: Procedimiento Rutina de evaluación de la condición de Paneles solares.</p> <p>Cambio de 130 paneles solares de acuerdo a los resultados de la inspección trimestral realizada por mantenimientos preventivos y a la priorización de pozos según recomendaciones de fabricante.</p> <p>Definir criterios para asegurar el cambio de Paneles a futuro (Recurso, materiales y repuestos). Asegurar el cambio de paneles solares por condición de los pozos restantes.</p> <p>Entregable1: Reporte de cambio de paneles solares en Pozos Entregable2: Plan de cambio de paneles.</p>
<p>HIP008 – CR LATENTE: No hay repuestos disponibles de paneles solares (stock) en la bodega de Cupiagua</p>	<p>Gestionar proceso de compra de paneles solares para reposición en los pozos donde se encuentran 130 paneles deteriorados, incompletos o con deficiencias en su funcionamiento.</p> <p>Entregable 1: Orden de compra (7-OCT-10) Entregable 2: Repuestos localizados en bodega (15-DIC-10).</p>
<p>HIP017 – CR LATENTE: Criterios y/o especificaciones inadecuados en la configuración del diseño original del sistema de carga</p>	<p>Realizar análisis general de la configuración y el diseño actual del sistema de carga, y del diseño actual del sistema solar por parte de especialistas o ingeniería. Establecer rediseño del sistema, en caso de ser requerido.</p> <p>Entregable: Nuevos parámetros de configuración (valor de carga máxima, setting de baja carga) y recomendaciones resultado del estudio.</p>
<p>HIP019 – CR LATENTE: La herramienta de diagnóstico contemplada en el procedimiento no se posee</p>	<p>Comprar probador de baterías con rating adecuado que permita realizar el diagnóstico de carga de las baterías.</p> <p>Comprar cargador de baterías para ampliar los bancos de carga, ubicados en el taller de pozos.</p> <p>Entregable: Herramienta suministrada al grupo de Mto Pozos.</p>

Fuente: Autores.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

4.1 OPTIMIZACIÓN DEL PLAN MANTENIMIENTO

Los fundamentos de la optimización del plan de mantenimiento del sistema de pozos, está basado en la aplicación de las técnicas de confiabilidad vistas en el capítulo anterior. Después de haber identificado los malos actores de mantenimiento, se aplicó la metodología de Pareto para visualizar los pozos con mayor cantidad de eventos y los modos de falla asociados.

4.1.1 Análisis de Modos de Falla

En la tabla 11, se listan los modos de falla identificados en el análisis de malos actores y Pareto (80% Pocos Vitales) para los sistemas del panel de control de cabeza de pozo (WHCP).

Tabla 11 Modos de Falla WHCP

Ítem	Modos de Falla	Cantidad Eventos	% Acumulado
1	Baja carga de baterías	69	29.11%
2	Saturación de filtros	52	51.05%
3	Parámetros fuera de rango por Descalibración	33	64.98%
4	Señal Cierre por falla PLC	6	67.51%
5	Señal errónea instrumento	6	70.04%
6	Lectura errónea lazo control	5	72.15%
7	Cumplimiento horas servicio	4	73.84%
8	SopORTE técnico mantenimiento	4	75.53%
9	Aire en el sistema CIP	3	76.79%
10	Falsa señal DFL	3	78.06%
11	Revisión válvulas	3	79.32%
12	Bloqueo panel view	3	80.59%

Fuente: Autores.

El 29% de los eventos corresponde al modo de falla “baja carga de baterías” el cual hace parte del sistema de energía solar del WHCP. En la Tabla 12 se describen los modos de falla y el sistema al cual pertenece. Los sistemas asociados a los modos de falla con mayor cantidad de eventos son: sistema energía solar, sistema inyección de químico, instrumentación y el sistema de control.

Tabla 12 Modos de Falla y sistemas WHCP

Ítem	Modos de Falla	Sistema
1	Baja carga de baterías	Sistema energía solar
2	Saturación de filtros CIP	Sistema Inyector de químico
3	Parámetros fuera de rango por Descalibración	Instrumentación
4	Señal Cierre por falla PLC	Sistema Control
5	Señal errónea instrumento	Instrumentación
6	Lectura errónea lazo control	Instrumentación
7	Cumplimiento horas servicio	Sistema energía solar
8	Soporte técnico mantenimiento	WHCP
9	Aire en el sistema CIP	Sistema Inyector de químico
10	Falsa señal DFL	Instrumentación
11	Revisión válvulas	Sistema Válvulas
12	Bloqueo panel view	Sistema Control

Fuente: Autores.

4.1.2 Identificación de Causas raíz y Planes Acción

Para cada uno de los modos de falla identificados se realiza un análisis de causa raíz, donde se plantean hipótesis, las cuales son verificadas o descartadas para llegar finalmente a la identificación de las causas y propuesta de planes de acción que eviten la recurrencia de dichos modos de falla, Ver Tabla 13.

Tabla 13 Modos de Falla y Plan de acción.

Sistema	Modo de Falla / Causa	Plan Acción	Avances
POZOS WHCP	Baja Carga Baterías WHCP y CIP por cumplimiento de horas de servicio.	RCA-SON-POZ-10-001. Plan de cambio de Módulos solares y baterías del WHCP.	Avance 100% del plan cambio módulos solares. 40% de disminución de las prioridades por baja Carga Batería en los WHCP. Cero barriles de diferidas durante el año 2016 por cierre de pozos asociados a baja carga de baterías.
		Presupuesto 2016 para cambio de módulos solares y baterías del sistema CIP.	
	Saturación de filtros por incompatibilidad de químico del Sistema inyección químico CIP Pozos	Cambio del químico (LA3518C) por parte NALCO,	Avance 100% MCC, migración del químico LA3518C al sistema de inyección de químico de pozos.
	Aire en el sistema CIP por Sobredimensionamiento de bombas.	MCC. Recirculación en Bombas de inyección de inhibidor de corrosión, Pozo E-14.	MCC, ingeniería emitió el manejo de cambio temporal como aprobado. En revisión del listado de materiales para realizar la implementación.
	Señal Cierre por falla PLC debido a la desactualización tecnológica.	Evaluación de alternativas para el cambio de PLC, debido a obsolescencia	Órdenes de compra para tarjetas I/O, Cambio de repuestos reutilizados.

Fuente: Autores.

4.1.3 Definición Plan de Mantenimiento

Para definir el plan de mantenimiento de los sistemas del panel de control de cabeza de pozo (WHCP), nos basamos en el análisis de modos y efectos de falla existente, se revisaron las tareas de mantenimiento para cada sistema y en general realizaron los siguientes ajustes:

- Tareas de inspección duplicadas en los sistemas del WHCP.
 - Existían tareas de inspección visual por cada elemento de los sistemas.
 - Existían tareas de verificación de fugas por cada elemento del sistema.

- Se identificaron actividades que pueden ser realizadas por una sola persona, estaban definidas dos.

- Se identificaron nuevas actividades en el análisis de modos y efectos de falla, los cuales se estaban realizando como correctivos.
 - Calibración de algunos instrumentos.

- Se identificaron variaciones en la duración de las actividades, en la mayoría de las actividades los tiempos no eran acorde a la actividad (tiempos duplicados).

- Se definieron tareas predictivas, se debe recolectar la información para predecir mejor el comportamiento del equipo durante su ciclo de vida.

Tabla 14 Definición de nuevas tareas de mantenimiento

Sistema	Modos de Falla	Tareas Mantenimiento	Justificación	Frecuencia
Sistema energía solar	Baja carga de baterías por perdida de eficiencia de los módulos solares.	Realizar medición de eficiencia en conversión energética con piranómetro.	La medición de la eficiencia se ingresa en una base de datos histórica para poder inferir la curva de funcionamiento de los equipos.	Anual
Sistema energía solar	Baja carga de baterías por tensión fuera de rangos.	Realizar medición de tensión con equipo ebite	La medición de impedancia determina el estado de las baterías, llevar registro y análisis de tendencia.	Anual
Instrumentación	Parámetros fuera de rango por Descalibración Señal errónea instrumento Lectura errónea lazo control	Realizar simulación de presión hasta verificar punto de calibración	Se determina frecuencia semestral de calibración por tratarse de equipos de seguridad.	Semestral

Fuente: Autores.

El análisis de modos y efectos de falla (FMEA) de los sistemas del WHCP, cuenta con 65 tareas de mantenimiento, distribuidas en frecuencias trimestral, semestral y anual. Para la ejecución del plan de mantenimiento se requiere de recurso técnico de las áreas de mecánica, electricidad e instrumentación y se requiere de 2890.7 horas hombre anual para ejecutar la estrategia de mantenimiento de los 27 pozos de los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP) (Ver Tabla 15 Plan de Mantenimiento WHCP Pozo Productor Cupiagua).

Tabla 15 Plan de Mantenimiento WHCP Pozo Productor Cupiagua

Descripción PM (PMO)	HH FMEA	Frecuencia	Cantidad Pozos/Locación	Repeticiones por Año	Total HH
MTTO POZO WHCP-WPQC-INST. CUP-PROD TRIM	16.7	90	27	2	900.2
MTTO POZO WHCP-WPQC-INST. CUP-PROD SEM	18.7	180	27	1	504.1
MTTO PANELES SOLARES CUP WHCP ANUAL	18.0	360	21	1	378.0
MTTO A IJB, TIERRA, PARARRAYOS ANUAL	12.5	360	21	1	262.5
MTTO POZO WHCP-WPQC-INST. CUP-PROD ANUAL	31.3	360	27	1	845.9
					2890.7

Fuente: Autores.

Figura 45 Plan de Mantenimiento WHCP Pozo Productor Cupiagua

Sistema	Tipo de equipo	# Tarea Mantt	Tarea de Mtto / acción verificación	Frecuencia	HH Pozo Prod
WHCP	Compresor de aire	1	Probar arranque y parada del compresor.	Trimestral	0.5
WHCP	Tanque	2	Verificar fugas en el área de compresión de aire	Trimestral	0.33333333
WHCP	Filtro	4	Realizar prueba de fugas en los filtros de aire.	Trimestral	0.33333333
WHCP	Válvula reguladora de presión	5	inspección general de fugas	Trimestral	0.5
WHCP	Válvula solenoide	6	realizar prueba de lógica causa efecto	Trimestral	0.5
WHCP	Motor eléctrico	7	Hacer medición de parametros electricos motor.	Trimestral	0.5
WHCP	Bomba hidráulica	8	Probar arranque y parada de la bomba hidráulica.	Trimestral	0.16666667
WHCP	Válvula de alivio	10	inspección de fugas	Trimestral	0.5
WHCP	Acumulador de presión	11	Prueba de carga de acumuladores.	Trimestral	0.33333333
WHCP	Válvula reguladora de presión	13	inspección de la presión del sistema.	Trimestral	0.16666667
WHCP	PLC	15	Revisión funcional del PLC del WHCP.	Trimestral	0.66666667
WHCP	Push Button	16	Realizar prueba de función de seguridad	Trimestral	0.16666667
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Push Button	17	Realizar prueba de función de seguridad	Trimestral	0.33333333
WHCP	Push Button	18	Realizar prueba física del equipo.	Trimestral	0.33333333
WHCP	Push Button	19	Realizar prueba física del equipo.	Trimestral	0.16666667
WHCP	Push Button	20	Realizar prueba de función de seguridad	Trimestral	0.16666667
WHCP	Push Button	21	Realizar prueba de función de seguridad	Trimestral	0.16666667
WHCP	Push Button	22	Realizar pruebas de telemetría.	Trimestral	0.16666667
WHCP	Push Button	23	Realizar prueba de función.	Trimestral	0.16666667
WHCP	Push Button	24	Realizar verificación de entrega de pozo	Trimestral	0.33333333
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Transmisor de posición	25	Realizar prueba de recorrido restringido.	Trimestral	0.5
WHCP	Relevo	26	Inspección visual y observación de funcionamiento	Trimestral	0.16666667
WHCP	Relevo	27	Realizar prueba de disparo por fuego	Trimestral	0.5
WHCP	Relevo	28	Probar función de watchdog	Trimestral	0.33333333
WHCP	Relevo	29	Verificar efectividad de permisivo	Trimestral	0.16666667
WHCP	Relevo	30	Probar parada de bomba	Trimestral	0.16666667
WHCP	Barrera	31	realizar medición de cada una de las barreras de protección atm	Trimestral	0.5
WHCP	Barrera	32	verificar funcionalidad de barreras	Trimestral	0.5
WHCP	HMI	33	realizar inspección y prueba de funcionalidad.	Trimestral	0.33333333
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Transmisor de presión	38	Toma de datos de indicación en pozo	Trimestral	0.5
WHCP	Sello en puertas	42	realizar inspección de los sellos en puertas y techo de los pane	Trimestral	0.5
WHCP	Equipo comunicaciones	43	realizar pruebas de telemetría con cuarto de control, verificar es	Trimestral	0.66666667
SISTEMA SOLAR WHCP	Tarjeta reguladora de carga	46	Realizar inspección de configuración.	Trimestral	0.66666667
SISTEMA SOLAR WHCP	Tarjeta reguladora de carga	47	Simular condición de baja carga y corte de carga	Trimestral	0.33333333
SISTEMA SOLAR CIP	Tarjeta reguladora de carga	48	Realizar inspección de configuración.	Trimestral	0.33333333
SISTEMA SOLAR CIP	Tarjeta reguladora de carga	49	Simular condición de baja carga y corte de carga	Trimestral	0.33333333
SISTEMA SOLAR WHCP	Baterías	52	realizar inspección del estado de las baterías	Trimestral	0.66666667
SISTEMA DE INYECCIÓN DE QUÍMICO	Bomba dosificadora de químico	53	Probar arranque y parada de la bomba.	Trimestral	0.5
SISTEMA DE INYECCIÓN DE QUÍMICO	Bomba dosificadora de químico	54	verificar rata de inyección y calibrar.	Trimestral	0.5
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Limit Switch	58	Realizar simulación de apertura y cierre de la válvula.	Trimestral	0.66666667
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Limit Switch	59	Realizar simulación de apertura y cierre de la válvula.	Trimestral	0.66666667
SISTEMA SOLAR CIP	Baterías	62	realizar inspección del estado de las baterías	Trimestral	0.66666667
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Switch de presión	34	Revisión de punto de disparo.	Semestral	1
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Switch de presión	35	Revisión de punto de disparo.	Semestral	1
WHCP	Válvula de alivio	3	forzar arranque de compresor hasta lograr el disparo de la PSV.	Anual	0.66666667
WHCP	Válvula de alivio	9	realizar verificación del setpoint frente a patrón,	Anual	0.66666667
WHCP	Switch de presión	12	realizar calibración del equipo con bomba.	Anual	0.33333333
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Switch de incremento térmico	14	Cambio de equipos sensantes por equipos probaos en laborato	Anual	0.66666667
WHCP	Switch de presión diferencial	36	Verificar accionamiento y ajuste, revisar internamente los filtros	Anual	0.66666667
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Transmisor de presión	37	Verificación de calibración.	Anual	1
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Transmisor de temperatura	39	Revisión de calibración de elemento sensor.	Anual	1
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Cableado	41	realizar medición de aislamiento entre los cables, y con tierra o	Anual	2
WHCP	Cableado de puesta a tierra	44	realizar inspección de ajuste de cada punto a tierra.	Anual	0.5
SISTEMA DE INYECCIÓN DE QUÍMICO	Bomba dosificadora de químico	55	realizar limpieza de filtros y líneas	Anual	2
WHCP	Filtro	56	limpieza de filtros.	Anual	0.5
WHCP	Motor eléctrico	57	Realizar medición de desgaste de escobillas.	Anual	0.66666667
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Transmisor de presión	60	Verificación de calibración.	Anual	1
INSTRUMENTACIÓN EXTERNA	Transmisor de flujo	63	Verificación de calibración.	Anual	1
WHCP	Switch de nivel	64	realizar prueba de indicación de bajo nivel	Anual	0

Fuente: Autores.

Identificación de Repuestos para WHCP Pozos Campo Cupiagua

A continuación se relacionan los repuestos asociados a los equipos de los sistemas del WHCP de los pozos del campo Cupiagua.

Figura 46 Listado Repuestos por sistema WHCP Pozo Productor Cupiagua

PLC & HMI						
STOCK CODE	DESCRIPCION	ROP	ROQ	REFERENCIA	NEMONICO	NOMBRE FABRICANTE
3575057	Módulo de 4 entradas analógicas, Allen Bradley, 4 a 20mA, Ref 1769-IF4.	0	0	1769-IF4	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4640132	Módulo de 8 salidas de relés, Allen Bradley, Ref 1769-OW8I,SER-B	0	0	1769-OW8I	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4685384	Módulo de terminación derecho, Allen Bradley, Ref 1769-ECR,SER-A	0	1	1769-ECR	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
3584034	Módulo de 16 entradas digitales, Allen Bradley, Ref 1769-IQ16.	1	1	1769-IQ16	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4903696	Módulo de salidas analógicas, Allen Bradley, Ref 1769-OF2	0	0	1769-OF2	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4645800	Módulo de memoria y reloj de tiempo real, Allen Bradley, Ref 1764-MM2RTC,SER-A	0	0	1764-MM2RTC	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4685368	Fuente de alimentación para expansión, Allen Bradley, Ref 1769-PB2,SER-A	0	1	1769-PB2	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
3579604	Base para procesador MICROLOGIX 1500,Allen Bradley, Ref 1764-28BXB,SER-A	1	1	1764-28BXB	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4685392	Procesador MICROLOGIX 1500,Allen Bradley, Ref 1764-LRP,SER-C	1	1	1764-LRP	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4649620	Panel View 300 Micro con protocolo DF1, Allen Bradley, Ref 2711-M3A18L1	0	1	2711-M3A18L1	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4649612	Panel View 300 Micro con protocolo PIC, Allen Bradley, Ref 2711-M3A19L1	0	1	2711-M3A19L1	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
3577624	Cable para conexión Micrologix-PC, Allen Bradley, Ref 1761-CBLPM02	0	1	1761-CBLPM02	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4659165	Cable para conexión Micrologix-PanelView 2 mts, Allen Bradley, Ref 1761-CBL-HM02	0	0	1761-CBL-HM02	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4685764	Cable de expansión, Allen Bradley, Ref 1769-CRL3,SER-A	0	1	1769-CRL3	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
6581052	Pico controller, 24 Vdc, 4 out relay, 8 digital input, 2 analog input, Allen Bradley, Ref 1760-L12BWB-ND			1760-L12BWB-ND	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY

SISTEMA HIDRAULICO						
STOCK CODE	DESCRIPCION	ROP	ROQ	REFERENCIA	NEMONICO	NOMBRE FABRICANTE
4681672	Regulador de presión / válvula de alivio serie 26-1700, Azul, 50-6000 psi, 1/4" NPT, Tescom, Ref 26-1722-24 / 26-1762-24	0	1	26-1722-24 / 26-17	TESCOM	TESCOM CORP
4681664	Regulador reductor de presión serie 54-2000, Gris, 50-6000 psi, 1/4" NPT, Sello Buna-N, Tescom, Ref 54-2022D24	1	1	54-2022D24	TESCOM	TESCOM CORP
4685954	Regulador reductor de presión serie 54-2000, Gris, 200-10000 psi, 1/4" NPT, Sello Buna-N, Tescom, Ref 54-2021D24	1	1	54-2021D24	TESCOM	TESCOM CORP
4903704	Kit de reparación para regulador 54-2022D24, kit de sellos, Tescom, Ref 38-2000-54			38-2000-54	TESCOM	TESCOM CORP
4653440	Kit de reparación para regulador 26-1722-24, kit de sellos, Tescom, Ref 389-1266	0	0	389-1266	TESCOM	TESCOM CORP
4650529	Bomba hidráulica de pistones radiales, cilindrada cte, serie 17, tamaño nominal 0,4 cm3, extremo de eje cilíndrico, juntas NBR, Rexroth, Ref PR4-17/0.40-700W/A01M01	1	1	PR4-17/0.40-700W	REXROTH	REXROTH BOSCH
4664827	Manómetro 0-10000 para montaje en panel (flange lower back connection), Relleno de glicerina, McDaniel, Ref K9PP-GF	0	1	K9PP-GF	MCDAN-CO	MCDANIEL
4643466	Manómetro 0-10000 conexión trasera (lower back connection), Relleno de glicerina, McDaniel, Ref K9PL-GF	1	2	K9PL-GF	MCDAN-CO	MCDANIEL
5069661	Manómetro 0-10000 conexión abajo (bottom) montaje vertical, Relleno de glicerina, McDaniel, Ref K9P-GF	1	2	K9P-GF	MCDAN-CO	MCDANIEL
4983995	Manómetro 0-6000 para montaje en panel (flange lower back connection), Relleno de glicerina, McDaniel, Ref K96KP-GF	1	2	K96KP-GF	MCDAN-CO	MCDANIEL
4664868	Manómetro 0-6000 conexión trasera (lower back connection), Relleno de glicerina, McDaniel, Ref K96KL-GF	1	2	K96KL-GF	MCDAN-CO	MCDANIEL
4848149	Manómetro 0-6000 conexión abajo (bottom) montaje vertical, Relleno de glicerina, McDaniel, Ref K96K-GF	1	2	K96K-GF	MCDAN-CO	MCDANIEL
4685467	Valvula de alivio de presión ajustable de 1000-10000 psi, 1/4 NPT, Haskel inc. Ref 27741-4	0	1	27741-4	HASKEL	HASKEL INC
4685780	Switch de nivel hidráulico para reservorio panel de control, Gems, Ref LS-52100	0	1	LS-52100	GEMS	GEMS SENSORS

Fuente: Autor

Figura 47 Listado Repuestos por sistema WHCP Pozo Productor Cupiagua

SISTEMA NEUMATICO						
STOCK CODE	DESCRIPCION	ROP	ROQ	REFERENCIA	NEMONICO	NOMBRE FABRICANTE
4983961	Manómetro 0-300 para montaje en panel (flange lower back conection), Relleno de glicerina, McDaniel, Ref K9GP-GF	1	2	K9GP-GF	MCDAN-CO	MCDANIEL
4681060	Manómetro 0-300 conexion trasera (lower back conection), Relleno de glicerina, McDaniel, Ref K9GL-GF	0	0	K9GL-GF	MCDAN-CO	MCDANIEL
4664843	Manómetro 0-300 conexión abajo (bottom) montaje vertical, Relleno de glicerina, McDaniel, Ref K9G-GF	1	2	K9G-GF	MCDAN-CO	MCDANIEL
4656815	Válvula Solenoide 24VDC, max press trabajo 140 psi, conexión 1/8" NPT, Asco, Ref SC8356A14V, 24DC	1	4	SC8356A14V	ASCO	ASCO
4685400	Regulador de presión aire seria 44-2200, 0-250psi, 1/4" NPT, presion entrada 400 psi, Tescom, Ref 44-2263-242V	0	1	44-2263-242V	TESCOM	TESCOM
6581235	Kit de reparación para regulador 44-2263-242V, kit de sellos, Tescom, Ref 389-2195			389-2195	TESCOM	TESCOM
4685475	Compresor de piston articulado libre de aceite, max presion 100 psi, 24 Vdc, 1/3 Hp, 18.5 Amp, 440 Watts, Thomas / Gerdner Denver, TA-4101DC 24 V / 270047	0	1	270047	GARDNER	GARDNER DENVER
4685426	Presostato de control del compresor, 3/8" F NPT, serie 69H (0-250 psi), Furnas, Ref 69HA1Z145175	1	1	69HA1Z145175	FURNAS	FURNAS
4894374	Filtro de aire compacto, 250 psi, 1/4" NPT, Metal Bowl, Twist drain, Parker, Ref 06F13AC			06F13AC	PARKER	PARKER
6214993	Kit de reparación elementos de filtro 5 Micrones para filtros 06F, Parker, Ref PS702			PS702	PARKER	PARKER
6581185	Kit de servicio Menor, incluye los kits C85485-P (kit de montaje de válvulas) y C87860-P (kit de arreglo de anillo), Thomas / Gerdner Denver, Ref C85493-P			C85493-P	GARDNER	GARDNER DENVER
4668745	Kit de servicio de piston y biela, Thomas /Gardner Denver, Ref C87048-P	0	1	C87048-P	GARDNER	GARDNER DENVER
6581193	Kit de escobillas, viene por unidad,Thomas / Gerdner Denver, Ref C85517-P			C85517-P	GARDNER	GARDNER DENVER
4641932	Elemento filtrante de aire, para compresor de aire, Thomas / Gerdner Denver, Ref C87713	0	1	C87713	GARDNER	GARDNER DENVER
3722816	Válvula cheque de presión regulable rango 50-150 Psig, Usada como alivio, máxima presión 3000 psi, 1/4" NPT x 1/4" tube fitting, Swagelok, Ref SS-4CA1-50	0	1	SS-4CA1-50	SWAGELOK	SWAGELOK
4983789	Tanque de 3 galones para aire, tipo "hotdog", presion de trabajo 125 psi, medidas Heihot 8-3/4 in, Length 25-1/4 in, width 8-1/4 in, diam 6 in, Speedaire, Ref 2TWC1	0	1	2TWC1	GRAINGER	GRAINGER - SPEEDAIRE
6581433	Filtro de aire de drenaje automático de líquidos, Puerto de 3/8 in, 145 psi max press, Norgren, Ref F73G-3GN-AT3			F73G-3GN-AT3	NORGREN	NORGREN

EQUIPOS ELÉCTRICOS						
STOCK CODE	DESCRIPCION	ROP	ROQ	REFERENCIA	NEMONICO	NOMBRE FABRICANTE
4662052	Fusible Miniatura, 5mm x 20mm, 250mA, Bussman, Ref GMA-250-R	100	100	GMA-250-R	BUSSMAN	BUSSMAN
4662060	Fusible Miniatura, 5mm x 20mm, 500mA, Bussman, Ref GMA-500-R	100	100	GMA-500R	BUSSMAN	BUSSMAN
4662086	Fusible Miniatura, 5mm x 20mm, 1A, Bussman, Ref GMA-1-R	100	100	GMA-1-R	BUSSMAN	BUSSMAN
1033794	Fusible Miniatura, 5mm x 20mm, 1.5A, Bussman, Ref GMA-1.5	0	30	GMA-1.5	BUSSMAN	BUSSMAN
4980298	Fusible Miniatura, 5mm x 20mm, 3A, Bussman, Ref GMA-3-R	1	2	GMA-3-R	BUSSMAN	BUSSMAN
4662102	Fusible Miniatura, 5mm x 20mm, 5A, Bussman, Ref S-500-5-R	100	100	S-500-5-R	BUSSMAN	BUSSMAN
5901350	Contactador de 3 polos operado con Corriente directa con diodo integrado, Max corriente 43 A, bobina de 24 Vdc, Allen Bradley,			100-C43DJ00	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
6581177	Fusible de 80A, tipo RK-1, tipo cartucho, serie A2D, Ferraz, Ref A2D80R			A2D80R	FERRAZ-S	FERRAZ-SHAWMUT
259895	Fusible de 10A, tipo One Time, 1/2 X 2", tipo cartucho / casquillo, Ferraz, Ref OT-10			OT-10	FERRAZ-S	FERRAZ-SHAWMUT
4894366	Fusible de actuación rápida, 70 A, Bussman, Ref JKS70	1	2	JKS70	BUSSMAN	BUSSMAN
4685459	Motor eléctrico DC, 3/4 HP, 24 Vdc, Arm, 1800 rpm, frame VS56C, Leeson, Ref C4D17FK8B	0	1	C4D17FK8B	LEESON	LEESON
4685590	Escobillas para motor eléctrico Leeson, Leeson, Ref	1	3	9000015-08 672	LEESON	LEESON
5037296	Base para barreras BXT blitzductor, Modelo: BXT BAS, Dehn, Ref 920300	2	2	920300	DEHN	DEHN
4657698	Barrera de protección contra descargas atmosféricas blitzductor modelo: BXTML2 BE S24, Dehn, Ref 920224	5	15	920224	DEHN	DEHN
6581540	Breaker de 1 polo, con push button, 2A 65Vdc, montaje en riel serie CB4200, Weidmuller, 9101503500			9101503500	WEIDMULL	WEIDMÜLLER
4658969	Breaker de 1 polo, con push button, 5A 65Vdc, montaje en riel serie CB4200, Weidmuller, 9101803500	1	2	9101803500	WEIDMULL	WEIDMÜLLER
4658944	Breaker de 1 polo, con push button, 10A 65Vdc, montaje en riel serie CB4200, Weidmuller, 9101903500	1	3	9101903500	WEIDMULL	WEIDMÜLLER

Fuente: Autor

Figura 48 Listado Repuestos por sistema WHCP Pozo Productor Cupiagua

EQUIPOS DE CONTROL Y SD						
STOCK CODE	DESCRIPCION	ROP	ROQ	REFERENCIA	NEMONICO	NOMBRE FABRICANTE
5191361	Relevo electrónico temporizado, 2 contactos DPDT, modo de operación Off-delay, 24Vdc, Allen Br			700-FSB4UU23	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4685624	Barrera amplificadora de señal de 2 entradas, 24 Vdc, certificada sil 2, Pepperl Fuchs	2	2	KFD2-SR2-EX2.W	PEPPERL+	PEPPERL FUCHS
4685772	Push button, Flush Head(Red), Momentary Contact, 30,5 mm, serie 800T, Allen Bradle	0	1	800T-A6D2	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
6581672	Protector de cabeza para push button, Allen Bradley, Ref 800T-N129			800T-N129	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
6595243	Push button, mushroom Head(Red), Momentary Contact, 30,5 mm, serie 800T, Allen Bradley, Ref 8			800T-D6D2	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
758177	Interruptor de selección de dos posiciones, NEMA 4, 30,5 mm, 2-N/O & 2-N/C, Black S	0	0	800T-H2B	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
6581078	Interruptor de selección de dos posiciones, 30,5 mm, sin contactos, selector con llave sin resorte,			800T-H33	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
6528137	Bloque de contactos serie 800T, 2 contactos normalmente abiertos, Allen Bradley, Ref 800T-XA2			800T-XA2	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
6581086	Interruptor de selección de dos posiciones, 30,5 mm, 1 NC, selector con llave con resorte, Allen Br			800T-H48D1	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
1634138	Emisor inhibidor de corrosión, Cortek, Ref VCI-110			VCI-110	CORTEC	CORTEC CORPORATION
4983813	Llave para switch de bypass de comunicaciones, Allen Bradley, Ref X-144218	0	0	X-144218	ALLEN-BR	ALLEN BRADLEY
4894358	Relevo temporizado de 8 pines, Potter&Brumfield, Ref CNS3592			CNS3592	POTTER	POTTER & BRUMFIELD
4650735	Relevo temporizado de 11 pines, Potter&Brumfield, Ref CNS3592	1	1	CNS3596	POTTER	POTTER & BRUMFIELD
4650743	Relevo de 3 polos 11 pines, 24Vdc, Thermal current 10 A, coil res 440 Ohm, General	0	10	H6CE31	GE	GENERAL ELECTRIC

BOMBA DE QUIMICO						
STOCK CODE	DESCRIPCION	ROP	ROQ	REFERENCIA	NEMONICO	NOMBRE FABRICANTE
4685640	Switch presión, 316 SS, BUNA-N, adj rango 700 psig dec. to 3100 psig inc., explosion proof, 1/2"NPT Female Port, ITT Neodyn, Ref 232P43C6G	0	1	232P43C6G	ITT-CORP	ITT (NEO DYN)
4685509	Switch presión, 316 SS, BUNA-N, adj rango 2300 psig dec. to 6000 psig inc., explosion proof, 1/2"NPT Female Port, ITT Neodyn, Ref 232P44C6G	1	1	232P44C6G	ITT-CORP	ITT (NEO DYN)
4983870	Cilindro de aforo, capacidad: 180 ML, escala en GPD, Kenco, Ref. PSG0180-S-V-GPD	1	1	PSG0180-S-V-GPD	KENCO-EN	KENCO
4983938	Cilindro de aforo, altura: 52 in, escala a la altura especificada, Kenco, Ref. 5700-52-A-V-RH-GS-ATM-122-NS	1	1	5700-52-A-V-RH-GS-ATM-122-NS	KENCO-EN	KENCO
4946620	Cilindro de aforo, rate 16GPD, Base scale 0.5 GPD, inlet port 1/4 NPT, 316 ss, flourocarbon, Kenco, Ref. 30016-S6-V-GPD-S	1	1	30016-S6-V-GPD-S	KENCO-EN	KENCO
4685483	Válvula de alivio 1/4" Male NPT / Female NPT, resorte G 4000 to 5000 psi Swagelok, Ref SS-4R3A5-G	0	1	SS-4R3A5-G	SWAGELOK	SWAGELOK
4685657	Escobillas para motor pacific scientific, 22X22X7.5 mm (0.875X0.875X0.201 in) Pacific Scientific, Ref. YP00357	1	1	YP00357	PACIF-SC	PACIFIC SCIENTIFIC
5247432	Motor 24 Vdc Frame 56C, Enclosure TENV, current 13.4 Amp, 12 lb-in torque, length 10.38in, weight 24lbs, Pacific Scientific, Ref. EP3624-2757-7-56BC-CU	1	1	EP3624-2757-7-56BC-CU	PACIF-SC	PACIFIC SCIENTIFIC

INSTRUMENTACIÓN						
STOCK CODE	DESCRIPCION	ROP	ROQ	REFERENCIA	NEMONICO	NOMBRE FABRICANTE
4685673	Indicador de flujo Display 0-200 4-20 mA input, Ronan, Ref X54-201L/SR-L-0-200E-B-EXP2	0	1	X54-201L/SR-SQR-0-300E-B-EXP2	RONAN	RONAN
4641155	Sensores de fuego, tipo bimetalicos térmicos, serie detect-a-fire, Fenwall, Ref 27120-22-225F	1	2	27120-22-225F	FENWAL	FENWAL
4685533	Switch presión, Max press 3000 psi, adj. Rang, 330-1000 on incr 250-920 on decr, dead band 80, DPDT contacts, CCS Dual span, Ref 646GZEM5-7011	0	1	646GZEM5-7011	DUAL-SNA	CCS DUAL SNAP
1480680	Switch presión, Max press 3000 psi, adj. Rang, 950-2300 on incr 750-2100 on decr, dead band 200, DPDT contacts, CCS Dual span, Ref 646GZEM7-7011	0	0	646GZEM7-7011	CCS	CCS DUAL SNAP
4685665	Switch presión, Max press 7500 psi, adj. Rang, 3200-5000 on incr 2720-4520 on decr, dead band 480, DPDT contacts, CCS Dual span, Ref 646GZEM10-7011	1	1	646GZEM10-7011	DUAL-SNA	CCS DUAL SNAP
4685491	Switch presión, adj rang. 200-1000 psi, dead band 9.2 psi, overrange 2500 psi, proof 6000 psi, Housing LC, DPDT contacts, 1/2" FNPT, Sor, Ref 9LC-LL5-N6-C2A-TT-LL-NC	1	1	9LC-LL5-N6-C2A-TT-LL-NC	SOR	SOR
4685699	Switch presión, adj rang. 200-1750 psi, dead band 15 psi, overrange 2500 psi, proof 6000 psi, Housing LC, DPDT contacts, 1/2" FNPT, Sor, Ref 9LC-LL45-M4-C2A-TTL	1	1	9LC-LL45-M4-C2A-TTL	SOR	SOR
4685723	Switch presión, adj rang. 2000-10000 psi, dead band 180 psi, overrange 12000 psi, Housing LC, SPDT contacts, 1/4" FNPT, Sor, Ref 401LC-K100-U6-C1A-TT-X3	1	2	401LC-K100-U6-C1A-TT-X3	SOR	SOR
4685632	Transmisor de presión Gauge, Upper Range limit: 10000 psi, 4-20 mA HART, 1/2-14 FNPT, conduit 1/2-14 NPT, LCD display, Rosemount, Ref 3144PD1A1E5B4M5Q4	0	1	3051TG5A2B21AB4M5Q4	ROSE-INC	ROSEMOUNT
4671186	Transmisor de temperatura, entrada de sensor sencilla, 4-20 mA HART, Conduit 1/2-14 NPT, LCD display, Rosemount, Ref 3144PD1A1E5B4M5Q4	0	1	3144PD1A1E5B4M5Q4	ROSE-INC	ROSEMOUNT
4685574	Transmisor indicador de flujo, 400 in H2O, 8000 psi static working pressure, ss, jb MA136, Gulton Statham, Ref HP3000-400-C8-21-21-10-42	0	0	HP3000-400-C8-21-21-10-42	AMETEK	AMETEK (GULTON STATHAM)
4685582	Transmisor de presión diferencial, tipo L, 1/4 18 NPT, conduit 1/2 14 NPT, static pressure 0-6091 psi, span limits min 20 inh2o - 2007 inh2o, FKC FCX-All fuji	0	1	FKCT-46V5-5VFYW-AW	FUJI-ELE	FUJI ELECTRIC CO
4685558	Transmisor de posición para choque remoto, Proximity, Ref 06147-001	0	1	06147-001	PROXIMIT	

Fuente: Autor

5. ESTRATEGIAS DE LA IMPLEMENTACION

Después de realizado el ejercicio de revisión y optimización del plan de mantenimiento para los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP) de la Gerencia de Desarrollo y Producción Piedemonte, se procede a realizar los formatos del manejo del cambio correspondiente para la aprobación de la gerencia del campo. Una vez firmados los formatos se procede a cargar en el sistema CMMS SAP® el plan de mantenimiento (Ver Figura 43).

Figura 49 Plan de Mantenimiento WHCP Pozo Productor Cupiagua SAP®

Hoja de ruta Tratar Pasar a Operación Detalles Entorno Sistema Ayuda

Vis.instrucción: Res.paquetes mantenimiento

Paquete mantenimiento preventivo Propia Externo Cab. Plan

GHRRuta CPD_GSPT HR Mtto Poz JB, Tierras, Pararrayos E ContGropHR 26

Resumen oper.paquetes mant.prev.

Op.	SOp	Descripción operación	1Q	2Q	3Q	4Q	6Q	8Q	5M	6M	9M	12	18	24	36
0010		Mtto Ele Poz JB, Tierras, Pararrayos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Resumen oper.paquetes mant.prev.

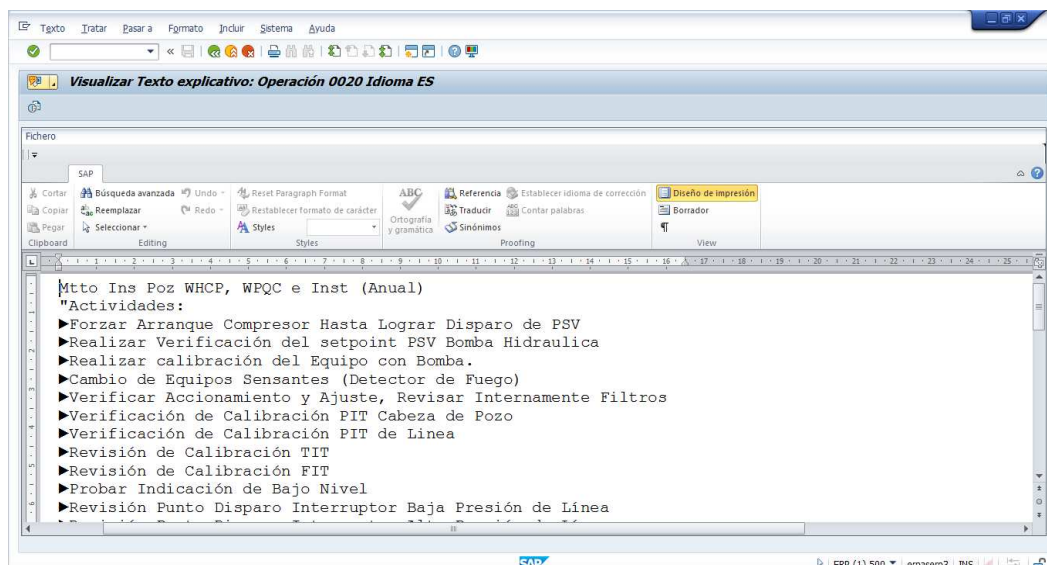
Op.	SOp	Descripción operación	1Q	2Q	3Q	4Q	6Q	8Q	5M	6M	9M	12	18	24	36
0010		Mtto Ele Poz Panel Solar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0020		Mtto Mec Poz Panel Solar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Resumen oper.paquetes mant.prev.

Op.	SOp	Descripción operación	1Q	2Q	3Q	4Q	6Q	8Q	5M	6M	9M	12	18	24	36	48	60
0010		Mtto Ele Poz WHCP, WPQC e Inst (Anual)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0020		Mtto Ins Poz WHCP, WPQC e Inst (Anual)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0030		Mtto Mec Poz WHCP, WPQC e Inst (Anual)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0040		Mtto Ele Poz WHCP, WPQC e Inst (5em)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0050		Mtto Ins Poz WHCP, WPQC e Inst (5em)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0060		Mtto Mec Poz WHCP, WPQC e Inst (5em)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0070		Mtto Ele Poz WHCP, WPQC e Inst (Trim)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0080		Mtto Ins Poz WHCP, WPQC e Inst (Trim)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0090		Mtto Mec Poz WHCP, WPQC e Inst (Trim)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fuente: Sistema CMMS SAP®

Figura 50 Texto Explicativo. Tareas mantenimiento SAP®



Fuente: Sistema CMMS SAP®

5.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE MANTENIMIENTO

Tabla 16 Análisis de costos de mantenimiento.

Costos de Mantenimiento Sistema Pozos GDP	Antiguo* Ellipse®	Optimizado** SAP®	% Optimización
Costo anual HH ejecución plan de mantenimiento	\$ 295,809,900	\$ 199,458,300	32.6%
Costo anual por diferidas de producción	\$ 184,000,000	\$ 18,400,000	90.0%
Costo anual Trabajos Correctivos (HH y repuestos)	\$ 132,000,000	\$ 13,200,000	90.0%
Total Costo Mantenimiento Anual	\$ 611,809,900	\$ 231,058,300	62%

Fuente: Autores

Plan de Mantenimiento en sistema Ellipse® (Antiguo)

Las diferidas de producción (aprox 2750 Barriles de crudo), el impacto económico (aprox \$ 460.000.000), la imagen de la empresa Ecopetrol (incumplimiento de las metas) y la utilización de horas hombre y costos de repuestos en trabajos correctivos (\$ 330.000.000), son los factores primordiales que nos llevaron a realizar un plan de mantenimiento óptimo a costo razonable.

Plan de Mantenimiento en sistema SAP® (Optimizado)

Realizado el ejercicio de revisión y optimización del plan de mantenimiento se reduce 32% de horas hombre en la ejecución del plan de mantenimiento. Lo anterior tiene una representación económica, considerando que se identificaron de las causas de falla y su posterior solución para evitar la recurrencia de eventos que impacte negativamente la empresa.

CONCLUSIONES

Se evaluó y optimizó en un 32,6% (\$ 96.351.600) el plan de mantenimiento para los equipos que conforman los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP) de la Gerencia de Desarrollo y Producción Piedemonte.

Se estima optimizar en un 62% (\$ 380.751.600) el costo total de mantenimiento (costos por horas hombre en la ejecución del plan de mantenimiento y por trabajos correctivos, reducción de las diferidas de producción y repuestos por fallas en equipos) asociado al sistema de pozos.

Por medio del análisis de los tiempos medios entre fallas (MTBF) de los sistemas operativos de CPF-Cupiagua, se determinó que el sistema con la mayor recurrencia de fallas es el sistema de pozos, donde cada 13 días en promedio existe la probabilidad de que ocurre una falla (322 horas), en cualquiera de los 27 pozos Productores de la GDP.

Aplicando la metodología de análisis de confiabilidad, malos actores de mantenimiento y Pareto; se logró identificar los equipos y los modos de falla con mayor cantidad de eventos. Baja carga de baterías por pérdida de eficiencia de los módulos solares, baja carga de baterías por tensión fuera de rangos, instrumentos con parámetros fuera de rango por descalibración y señal errónea instrumento.

En la evaluación del plan de mantenimiento se evidenciaron: tareas de inspección duplicadas, se identificaron actividades que pueden ser realizadas por una sola persona, variaciones en la duración de las actividades (tiempos duplicados). Una se evaluaron los hallazgos se redefinieron tareas y el recurso necesario para el cumplimiento del plan de mantenimiento.

Se identificaron los repuestos, el code stock, el fabricante, el nemónico, la referencia y los puntos de reordenamiento para cada uno de los equipos de los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP).

Con la migración del sistema de CMMS Ellipse® al sistema SAP®, se aprobó la implementación del plan de mantenimiento optimizado de los equipos de los sistemas del panel de control de cabeza de pozo, (WHCP).

BIBLIOGRAFÍA

BORRÁS PINILLA, Carlos. Mantenimiento Preventivo. Bucaramanga: Escuela de Ingeniería Mecánica- Universidad Industrial de Santander, 2013. p.8, 11.

BORRÁS PINILLA, Carlos. Mantenimiento Preventivo. Bucaramanga: Escuela de Ingeniería Mecánica- Universidad Industrial de Santander, 2013. p.21, 24 .

ECOPETROL, <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/?urile=wcm%3apath%3a/Ecopetrol_ES/Ecopetrol/nuestra-empresa/Quienes-Somos/acerca-de-nosotros/Nuestra+Historia.> [En línea]. (Consultado el 26-Sep-2016.)

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Petroleum, petrochemical and natural gas industries: Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment Second edition, 2006. p. 7. (ISO 14224).

MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad RCM2. traducido y adaptado por Carlos Mario Pérez J. Aladon, 2004. p.2-3

MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004 p. 7 – 18

PLATTS, <<http://www.platts.com/>> [En línea]. (Consultado el 26-Sep-2016).

TURNER, Steve. Análisis Mantenimiento de futuro PMOptimisation PMO2000. Australia, Northwestern University - Kellogg School of Management Universidad Chapman. P.12-15

VALDERRAMA, Pilar. Planned Maintenance Optimisation.OMCS2000 International Latinamerica.