

**ANÁLISIS DE FALLA DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE UNA
PLANTA DE EXTRACCIÓN, DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE CRUDO**

LINA PAOLA SALAMANCA TORRES

DIEGO FABIAN RONCANCIO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2017

**ANÁLISIS DE FALLA DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE UNA
PLANTA DE EXTRACCIÓN, DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE CRUDO**

LINA PAOLA SALAMANCA TORRES

DIEGO FABIAN RONCANCIO

TRABAJO DE MONOGRAFÍA COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE ESPECIALISTA EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO

DIRECTOR: ING. MECÁNICO HELVER MAURICIO MUÑOZ BARAJAS
ESPECIALISTA EN AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2017

Dedicatoria

A todas las personas que con su empeño y dedicación
nos colaboraron durante el desarrollo de este trabajo.
Pero sobre todo a Dios por ser quien nos permitió esta oportunidad.

AGRADECIMIENTOS

Queremos de corazón agradecer a Dios y Nuestra Señora por permitirnos la culminación de otra etapa de nuestras vidas, por otorgarnos las herramientas necesarias para continuar día con día nuestras labores y por su infinita misericordia.

A la empresa quien amablemente permitió implementar esta monografía en algunos de sus equipos.

A nuestros padres y nuestras familias que con su empeño y dedicación lograron convertirnos en las personas que hoy día somos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVOS GENERALES:	17
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:	17
3. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO	18
4. MARCO TEÓRICO	18
4.1 INYECCION DE AGUA	18
4.1.1 Inyección por espacio anular	19
4.1.2 Inyección en pozo poco profundo	19
4.1.3 Inyección en pozo profundo	19
4.2 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL	19
4.2.1 Tipos de tratamientos requeridos antes de la disposición del fluido	19
4.2.2 Deshidratadores mecánicos y separadores de tres fases	20
4.2.3 Tratadores	20
4.2.4 Remoción del gas disuelto	20
4.2.5 Remoción de sólidos por suspensión	20
4.2.6 Uso de bacterias	20
4.3 ANALISIS DE CAUSA RAIZ (RCA)	20
4.3.1 Los 5 ¿Porque?	21
4.3.2 Metodología 5 M's	21
4.3.3 Metodología Ishikawa	22
4.4 DISTRIBUCIÓN PARETO	23
4.5 DISTRIBUCION DE WEIBULL	25
4.5.1 Indicadores claves de desempeño	28
5. RESEÑA DE LA COMPAÑÍA	29
6. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS	34
6.1 PATIN	34
6.2 BOMBA HORIZONTAL	35
6.3 MOTOR ELECTRICO	36
6.4 CAMARA DE EMPUJE HORIZONTAL	36

6.5 CONJUNTO DE ADMISION	37
6.6 INSTRUMENTACION ASOCIADA	37
7. CONDICIONES OPERACIONALES	38
8. IMPLEMENTACIÓN ANÁLISIS DE FALLA	39
8.1 ANALISIS POR DISTRIBUCION DE PARETO	39
8.2 ANALISIS DE FALLA DIAGRAMA DE ISHIKAWA	45
8.3 IMPLEMENTACION ANALISIS DE WEIBULL	47
8.3.2 Análisis del skid 1P-542	49
8.3.3 Análisis del skid 1P-545	51
8.3.4 Análisis del skid 1P-546	53
8.3.5 Análisis del skid 1P-547	56
8.3.6 Resumen	59
8.3.7 Indicadores	59
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	60
BIBLIOGRAFÍA	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama espina de pescado	23
Figura 2 Distribución Pareto flota de camiones	26
Figura 3 Diagrama de la bañera de Weibull	27
Figura 4 Diagrama influenciado por el parámetro escala Weibull	28
Figura 5 Proceso del fluido extraído	31
Figura 6 Machine de extracción de crudo	32
Figura 7 Salidas y entradas tanque Fwkos	33
Figura 8 Tanque de producción	34
Figura 9 Celdas de flotación	35
Figura 10 Sistema de inyección	35
Figura 11 Ensamble bomba horizontal BAKER HUGHES	36
Figura 12 Patín	37
Figura 13 Bomba horizontal de carcaza o difusores atornillados	38
Figura 14 Motor eléctrico	39
Figura 15 Cámara de empuje	39
Figura 16 Conjunto de admisión	40
Figura 17 Manómetro y flujometro	40
Figura 18 Grafico de correctivos realizados por bomba	43
Figura 19 Resultado análisis de Pareto N° Intervenciones correctivas	44
Figura 20 Resultado análisis de Pareto HH	45
Figura 21 Grafico de HH realizados por bomba asociados a Correctivos	45
Figura 22 Número de Ordenes de Trabajo e intervenciones correctivas por año	46
Figura 23 Horas Hombre de intervenciones correctivas por año	46
Figura 24 Número de correctivos por año	47
Figura 25 Total Horas Hombre de correctivos por año	47
Figura 26 Confiabilidad vs tiempo Probabilidad de falla vs tiempo Skid 1P-541	49
Figura 27 Confiabilidad vs tiempo Probabilidad de falla vs tiempo Bomba1P-541	51
Figura 28 Confiabilidad vs tiempo Probabilidad de falla vs tiempo skid 1P-542	52
Figura 29 Confiabilidad vs tiempo Probabilidad de falla vs tiempo skid 1P-545	53
Figura 30 Confiabilidad vs tiempo Probabilidad de falla vs tiempo Bomba1P-545	54
Figura 31 Confiabilidad vs tiempo Probabilidad de falla vs tiempo skid 1P-546	56
Figura 32 Confiabilidad vs tiempo Probabilidad de falla vs tiempo Bomba1P-546	57
Figura 33 Confiabilidad vs tiempo Probabilidad de falla vs tiempo skid 1P-547	59
Figura 34 Confiabilidad vs tiempo Probabilidad de falla vs tiempo Bomba1P-547	60
Figura 35 Diagrama de Ishikawa para SKIDS	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Frecuencias de fallas de una flota de camiones	27
Tabla 2 Frecuencias de intervenciones correctivas por SKID	44
Tabla 3 Tabla Pareto por número de Horas invertidas en Correctivos	46
Tabla 4 Tipos y descripción de fallas SKID 1P-541	51
Tabla 5 Resumen de resultados análisis de Weibull SKID 1P-541	51
Tabla 6 Tipos y descripción de fallas Bomba SKID 1P-541	52
Tabla 7 Resumen de resultados análisis de Weibull Bomba SKID 1P-541	52
Tabla 8 Tipos y descripción de fallas SKID 1P-542	53
Tabla 9 Resumen de resultados análisis de Weibull SKID 1P-542	54
Tabla 10 Tipos y descripción de fallas SKID 1P-545	55
Tabla 11 Resumen de resultados análisis de Weibull SKID 1P-545	55
Tabla 12 Tipos y descripción de fallas Bomba SKID 1P-545	56
Tabla 13 Resumen de resultados análisis de Weibull Bomba SKID 1P-545	56
Tabla 14 Tipos y descripción de fallas SKID 1P-546	57
Tabla 15 Resumen de resultados análisis de Weibull SKID 1P-546	58
Tabla 16 Tipos y descripción de fallas Bomba SKID 1P-546	58
Tabla 17 Resumen de resultados análisis de Weibull Bomba SKID 1P-546	59
Tabla 18 Tipos y descripción de fallas SKID 1P-547	60
Tabla 19 Resumen de resultados análisis de Weibull SKID 1P-547	61
Tabla 20 Tipos y descripción de fallas Bomba SKID 1P-547	61
Tabla 21 Resumen de resultados análisis de Weibull Bomba SKID 1P-547	62
Tabla 22 Resumen general resultados de los SKIDS	63
Tabla 23 Indicadores generales de cada SKID	63

GLOSARIO

- ✓ **AVAILABILITY (DISPONIBILIDAD):** Es el tiempo que un activo está disponible para su uso se debe tener precaución al no confundir la disponibilidad con Uptime (utilización de activos) [15]
- ✓ **CE:** Cámara de empuje
- ✓ **EFFECTO DE FALLA:** Consecuencia de la falla.
- ✓ **FALLA:** Cuando un activo deja de cumplir su función para la cual fue diseñado.
- ✓ **FMEA Failure Modes and Effects Analysis (Análisis de Modos de Falla y Efectos)** Análisis para determinar componentes que fallan, por qué fallan y el efecto que tiene esta falla sobre el sistema o proceso. [15]
- ✓ **HH:** Horas hombre
- ✓ **ISHIKAWA:** Es un método gráfico de análisis de causa y efecto.
- ✓ **MTBF:** Tiempo medio entre Fallas.
- ✓ **MTTF:** Tiempo Medio para Fallas.
- ✓ **MTTR:** Tiempo Medio entre Reparaciones.
- ✓ **MANTENIMIENTO PREDICTIVO:** Actividad realizada para predecir una falla.
- ✓ **MANTENIMIENTO PROACTIVO:** Actividad que se realiza para identificar, monitorear y controlar las posibles fallas.
- ✓ **MANTENIMIENTO PREVENTIVO:** Actividad realizada para prevenir fallas basadas en tiempo o Horometros.
- ✓ **RELIABILITY (CONFIABILIDAD):** La probabilidad de que un elemento, componente cumpla su función prevista en un intervalo definido en las condiciones establecidas. [15]
- ✓ **PARETO:** Se conoce como la regla 80:20, La tendencia reflejada en muchas situaciones que para un pequeño número de factores se tiene una gran proporción de eventos. [15]
- ✓ **WEIBULL:** Una representación estadística de la probabilidad de falla de un componente. [15]

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE FALLA DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN, DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE CRUDO.

AUTORES:

LINA PAOLA SALAMANCA

DIEGO FABIAN RONCANCIO

PALABRAS CLAVES:

ANÁLISIS DE FALLA, CRITICIDAD, PARETO, 5M, WEIBULL, MTBR, MTTBF, ISHIKAWA.

DESCRIPCIÓN: el objetivo principal de esta monografía es aplicar los conocimientos adquiridos durante la especialización de gerencia de mantenimiento en la universidad industrial de Santander ciudad de Bogotá (ASEDUIS), contribuyendo a la solución de una problemática presentada en una compañía del sector petrolero, puntualmente en el sistema de inyección de una facilidad de tratamiento.

La importancia de este trabajo radica en otorgar las herramientas necesarias al área de mantenimiento de esta empresa para tomar acciones correctivas sobre los eventos que actualmente se están presentando con el sistema de inyección de agua; justificando de forma concisa las posibles causas de falla de los equipos.

El alcance planteado durante el trabajo de grado fue la búsqueda y análisis de los posibles causantes de fallas en el sistema de inyección de agua, con el fin que el área de mantenimiento pueda plantear posibles soluciones a futuro y elimine por completo estos inconvenientes.

El primer paso fue identificar por medio de un análisis de Pareto los Skids con mayor número de mantenimientos correctivos (80/20) identificando las unidades críticas de este sistema, posterior a este se realizó un análisis de falla RCA por medio de la metodología de las 5Ms y el diagrama de espina de pescado (Ishikawa), finalmente se calcularon algunos indicadores como MTBF, MTTF, Confiabilidad entre otros.

SUMMARY

TITLE: FAILURE ANALYSIS A WATER INJECTION SYSTEM OF AN EXTRACTION, DISPOSAL AND TREATMENT OIL FACILITY.

AUTHORS:

LINA PAOLA SALAMANCA

DIEGO FABIAN RONCANCIO

KEYWORDS:

FAILURE ANALYSIS, CRITICALITY, PARETO, 5M, WEIBULL, MTBR, MTTBF, ISHIKAWA.

DESCRIPTION: Main objective of this monograph is to apply the knowledge acquired during the specialization of maintenance management at UIS Industrial de Santander University in Bogota (ASEDUIS), contributing to the solution of a problem presented in an oil company, specifically in the injection system of a treatment facility.

The importance of this work is to provide the necessary maintenance area or team of this company to take corrective action on the events currently presented with a water injection system; to justify in a concise way the possible causes of failure of this type of assets. The scope raised during the work of degree was the search and analysis of the possible causes of failures in the system of water injection, in order that the maintenance area can will pose possible solutions in the future and completely eliminate these problems and failures.

The first step was to identify by means of a Pareto analysis the Skids with the largest number of corrective maintenance (80/20) identifying the critical units of this system, after this an analysis of RCA failure was made by means of the methodology of the 5Ms and the fishbone diagram (Ishikawa), finally some indicators were calculated like MTBF, MTTF, Reliability among others.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la industria mundial ha desarrollado metodologías con las que busca eliminar eslabones débiles en sus procesos internos, para así convertirse en empresas más competitivas frente a un mercado globalizado y en crecimiento constante; actividades relacionadas con mejora continua o análisis de falla son cada vez más comunes, por su fácil adaptación a cualquier área de las compañías y que simplemente pretenden eliminar pérdidas a un bajo costo pero con un gran impacto. Dando lugar a un objetivo general estas metodologías pretenden la detección y posterior eliminación del origen de un evento que está ocasionando problemas y no la reparación o manejo de los síntomas como ocurre en muchas oportunidades. La retribución obtenida al desarrollar estas actividades con personal y directivos comprometidos es tan buena que en ocasiones puede llegar a salvar compañías al borde de la quiebra y mejor aún aumentar las ganancias anuales con el uso de los mismos suministros “Talento humano, materias primas, maquinaria y equipo” con el que se ha venido trabajando normalmente.

Sin ser la excepción en la actualidad una compañía petrolera desarrolla un proceso que tiene como fin el manejo de las aguas resultantes de la extracción de petróleo; este consiste en el previo tratamiento de estas aguas a condiciones admisibles mediante un proceso físico-químico para luego ser reinyectadas al subsuelo por medio de un arreglo de bombas. El conjunto de bombas o skids están presentando fallas en la actualidad y por una cláusula acordada son reparados exclusivamente por el fabricante, generando algunos inconvenientes entre las partes. Debido a esto el área de mantenimiento tomó la decisión de elaborar un estudio de análisis de falla con distintas metodologías que le conceda las herramientas para corroborar la veracidad de los reportes de falla del fabricante, conocer la raíz de estos eventos y posteriormente llegar a mitigar los daños ocasionados a la operación por la salida de estas unidades.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una compañía en el sector de hidrocarburos cuenta con una planta de inyección de agua que comenzó a operar desde el 2010, la cual es esencial para la operación y tiene como objetivo tratar y disponer el fluido extraído del subsuelo. El fluido proveniente de los pozos está compuesto aproximadamente por 90% agua y 10% crudo y la licencia ambiental del campo no permite verter el agua a fuentes hídricas cercanas por ende el fluido tratado es nuevamente reinyectado al subsuelo, convirtiendo a este proceso en un sistema crítico para la operación de la compañía. Se cuentan con 11 Skids que inyectan aproximadamente 200.000 Barriles diarios de agua al subsuelo y estos están compuestos por un motor eléctrico, bombas horizontales multietapas, una cámara de empuje, instrumentación asociada y un variador de velocidad.

Actualmente se vienen presentando fallas repentinas en algunos de los once skid existentes después de un upgrade realizado por el fabricante para aumentar la capacidad de inyección, ocasionando impactos en la producción y en el presupuesto; estas bombas son intervenidas y reparadas por el fabricante y aunque el área de mantenimiento se encarga de realizar las labores de LILA (Limpieza, Lubricación y Ajuste) no cuenta con los reportes de falla ni indicadores de confiabilidad como por ejemplo MTBF, MTBR los cuales soporten y argumenten con datos reales a los directivos sobre los daños que se vienen presentando y los impactos desde esta actualización, debido a esto es necesario proporcionar esta información para analizarla y concluir cuáles son los impactos (internos o externos) que están ocasionando estos incidentes.

El presupuesto invertido anualmente a estos equipos es de 400.000 USD, de los cuales el 90% aproximadamente son pagados a la empresa fabricante por las reparaciones, esto ha generado una señal de alerta dentro del área ya que la garantía de las bombas era de 12 meses y según lo analizado previamente los daños ocurrieron después del vencimiento de esta.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GENERALES:

Implementar metodologías que ayuden en el análisis de falla de un sistema de inyección de agua de una planta de extracción, disposición y tratamiento de crudo para buscar malos actores y determinar el impacto en la operación de la compañía.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Determinar los skids críticos que generan mayor impacto en el sistema de inyección de agua por medio de la metodología de Pareto.
- Efectuar un análisis de falla (RCA) para determinar la causa raíz de los eventos presentados en las bombas más significativas.
- Calcular la confiabilidad y probabilidad de falla de cada una de los Skids críticos que componen al sistema de inyección de agua por medio del modelo probabilístico de Weibull con el fin de obtener pronósticos de falla.
- Efectuar el cálculo de diferentes indicadores como el MTBF, MTBR, Disponibilidad del sistema de inyección para compararlo antes del upgrade

3. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO

El proceso de inyección de agua al subsuelo es de gran importancia para la operación de la facilidad seleccionada, debido a que la compañía no cuenta con un licenciamiento para verter las agua a fuentes hídricas. Esta facilidad cuenta con 11 patines de inyección y cada uno de los skid constan por un motor eléctrico, cámara de empuje, bombas horizontales multietapas, instrumentación asociada y variador de velocidad.

Al fallar una unidad de inyección se debe realizar el apagado de algunos pozos debido a que la capacidad de inyección disminuye con una repercusión de 500 Barriles de producción diarios, ocasionado afectación a los indicadores del departamento de mantenimiento y sobrecostos al presupuesto. Es importante resaltar que no se cuentan con unidades de respaldo (stand by).

Se han presentado fallas repentinas en las unidades de inyección, el costo de cada una de las reparaciones está alrededor de USD 100.000 afectando los presupuestos anuales y el indicador de costos de mantenimiento por barril. En repetidas ocasiones el fallo de estos equipos ha generado re-trabajos en horarios nocturnos al personal, solo con el fin de habilitar los equipos por su alto grado de importancia en el proceso de producción.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 INYECCION DE AGUA

Se considera que la inyección de agua en la industria petrolífera inicio cuando se percataron que el agua proveniente de algunas arenas acuíferas o pequeños reservorios de agua superficiales se desplazaba a través de las formaciones petrolíferas, generando un incremento en la producción de los pozos petroleros y se determinó que bajo condiciones favorables este método podría recuperar la presión en los reservorios, permitiendo extraer casi en su totalidad el crudo de los pozos. Pero no fue hasta hace unos años que este método comenzó a utilizarse para disponer de las aguas provenientes del proceso de extracción de crudo. Entre los métodos más comunes se encuentran los siguientes:

4.1.1 Inyección por espacio anular Esta se ha utilizado en varios pozos petroleros y en si es muy similar a la de inyección en pozo somero o poco profundo, esta consiste en dirigir el fluido a la primera zona permeable debajo de la primera tubería de revestimiento. [1].

4.1.2 Inyección en pozo poco profundo La inyección en pozo profundo es la más popular en el mundo y como su nombre lo indica consiste en inyectar agua en lugares o espacios superficiales pero el riesgo de contaminación es alto ya que esta se puede filtrar por las capas freáticas. [1].

4.1.3 Inyección en pozo profundo Se llama inyección en zonas profundas a aquellas que se realizan a más de 2000 pies o 600 metros de profundidad distintas del pozo productor y es muy utilizado en lugares donde las autoridades ambientales cuentan con un sistema de leyes muy estrictos. Cada pozo profundo dispuesto para esta actividad deberá contar con un permiso especial que debe describir el lugar en el cual el agua será alojada y la entidad tendrá que asegurar que en esa zona o se encuentran hidrocarburos económicamente recuperables por ejemplo 5 kilómetros y que las aguas dispuestas no podrán moverse a otro lugar. [1].

4.2 Problemática ambiental Estas aguas contienen cantidades variables de sales, gases disueltos, metales pesados, hasta 180.000 ppm de cloruros y posiblemente niveles de excesivos de estroncio y radio. Gran parte de las fuentes hídricas mundiales se encuentran a pocos metros bajo tierra, por lo que disponer de estas aguas contaminadas sin ningún tratamiento previo sería catastrófico para las comunidades que habitan el sector y es ahí cuando las autoridades gubernamentales diseñaron planes para mitigar los efectos producidos por este proceso. [1].

4.2.1 Tipos de tratamientos requeridos antes de la disposición del fluido Los tratamientos dependen directamente de las propiedades del fluido extraído pero los sistemas más convencionales cuentan con separadores de agua libre, de tres fases, tratadores para separar el agua del aceite, tanques desnatadoras, interceptores de placas paralelas, celdas de flotación por gas, coalescedores y hidrociclones. [1].

4.2.2 Deshidratadores mecánicos y separadores de tres fases Aquellos pozos que producen cantidades moderadas de agua permiten la separación del agua y el aceite del gas mediante pequeñas caídas de presión con el uso de estranguladores, luego se separa el agua del aceite pasando inicialmente estos dos por una cámara de gravedad con salidas independientes para el aceite y el agua que son controladas por medio de válvulas de flotación individuales. Estas prácticas son efectivas para la separación de agua contaminada con bajos volúmenes o para pruebas de pozos individuales. [1].

4.2.3 Tratadores Utilizan la emulsión que no es más que la combinación de dos o más líquidos no miscibles o que no se mezclan bajo condiciones normales, uno de estos líquidos se esparce por el otro en forma de gotitas de diferentes tamaños y se requieren tres condiciones para realizar una emulsión estable:

- ✓ Los líquidos no pueden ser miscibles
- ✓ Debe existir la agitación necesaria para dispersar uno del otro en forma de gotitas
- ✓ Debe estar presente un agente emulsificador o emulsificante

Factores adicionales como el uso de temperaturas altas, agentes químicos, dispositivos mecánicos adicionales o hasta el uso de electricidad pueden llegar a facilitar el proceso. [1].

4.2.4 Remoción del gas disuelto Consiste en verificar que el fluido esté libre de dióxido de carbono, calcio, hierros y azufre mediante un proceso de extracción con el fin de eliminar posibles daños por oxidación en el sistema [1].

4.2.5 Remoción de sólidos por suspensión Se usan varios tipos de filtros para retirar los sólidos del fluido pues estos son muy perjudiciales, existen varios métodos de filtrado como de alta velocidad, graduado, por medio de tierra diatomácea, sedimentación entre otros que dependen directamente de lo que se quiera conseguir. [1].

4.2.6 Uso de bacterias Se deben añadir biosidas al agua para eliminar la presencia de bacterias en el agua, pues estas pueden duplicar su población en menos de 20 minutos y pueden conducir a serios problemas al lugar de disposición o a la tubería [1].

4.3 ANALISIS DE CAUSA RAIZ (RCA)

Durante el transcurso de los años y el avance de la tecnología el mantenimiento ha tomado diferentes conceptos y estrategias comenzando por el mantenimiento correctivo reactivo en donde se esperaba que el equipo fallará para su

intervención, posteriormente ingresó el mantenimiento preventivo y predictivo junto con los análisis de modo de falla [2].

El RCA es una metodología utilizada principalmente para la solución de problemas, que consiste en el análisis de las causas o acontecimientos que se presentan alrededor de ese problema. Este método se destaca porque pretende resolver o eliminar las causas que originan el problema y no en simplemente tratar los síntomas; esto con el fin de minimizar la repetición del evento y reconoce que esta no puede ser resuelta en una sola iteración. Es usado como una herramienta de mejora continua. [3] y [4].

Considerado como un método reactivo el análisis de los problemas se desarrolla después de que el evento pasó, desarrollándose en tres etapas o planteándose las tres preguntas básicas:

¿Cuál es el problema?

¿Porque ocurrió?

¿Cómo resolverlo?

Adoptado por varias compañías e implementado en diversos ambientes laborales el (RCA) ha evolucionado dando origen a distintos tipos de herramientas que facilitan su implementación, como las siguientes:

4.3.1 Los 5 ¿Porque? Desarrollada por la compañía TOYOTA en sus orígenes y actualmente durante sus procesos de fabricación, consiste en realizar preguntas para explorar las relaciones causa-efecto que generan un evento en particular. Para iniciar a ejecutar este método se recomienda iniciar con una descripción clara con todo el equipo del problema a resolver, recordando que ninguna idea es mala hasta que sea descartada con argumentos; no olvide tomar nota y realizar una lluvia de ideas constante. Luego de plantearse las 5 preguntas se recomienda comprobar si las respuestas a estas preguntas fue la causa de lo sucedido y si se tiene control de esas variables se podría decir que el problema fue solucionado. [3] y [4].

4.3.2 Metodología 5 M's Este es un método que se fija estudiar el problema alrededor de 5 pilares fundamentales de los cuales pueden estar las posibles causas:

Máquina: se debe analizar las entradas y salidas de los equipos que se están estudiando cómo los parámetros de operación y los resultados obtenidos del equipo, en muchas ocasiones es difícil realizar esta labor pero es recomendable aislar partes y dividir las en subgrupos para una mejor interpretación de cada uno.

Método: cuestionar la forma en la que se están ejecutando las actividades. Revisar materiales, tecnología, conocimiento entre otros.

Mano de obra: los operadores en muchas ocasiones pueden ser los causantes de los fallos así que se debe preguntar si esto ocurre por el talento humano involucrado.

Medio ambiente: las condiciones ambientales en las que se encuentra el desarrollo de la actividad son fundamentales y por lo tanto se debe evaluar

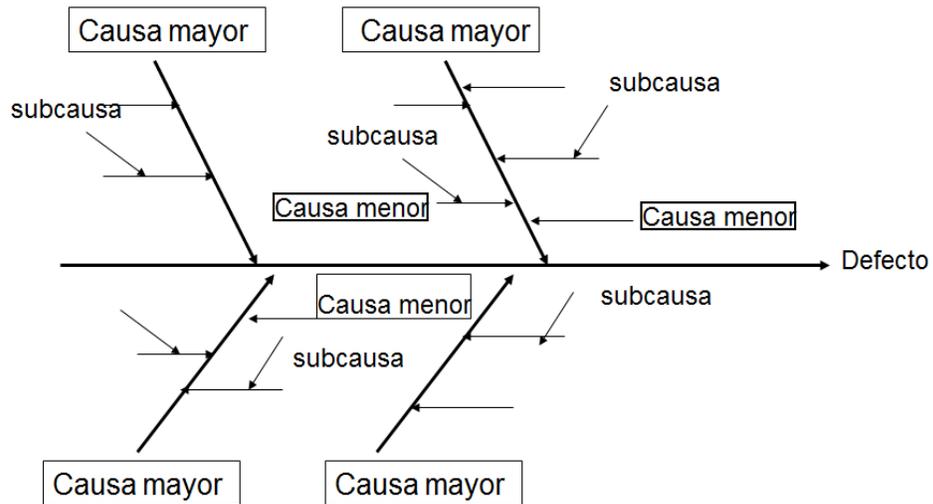
Materia prima: todos los insumos utilizados como entrada en el proceso se deben revisar, así como la cadena de suministros.

Diseñar un análisis bien estructurado permite atacar áreas concretas para iniciar a plantear una posible solución al problema y se recomienda el uso de un análisis de costos simultáneo para definir cuál evento debe ser atacado primero y obtener resultados visibles para los interesados. [5] y [6].

4.3.3 Metodología Ishikawa El método de análisis de causa y efecto Ishikawa o comúnmente llamada espina de pescado es una herramienta por la cual es posible identificar las posibles causas de eventos específicos a analizar; brinda un apoyo gráfico entre los efectos y las causas. Un diagrama ishikawa se elabora de la siguiente manera [7]

- Determine el problema a solucionar en un equipo de trabajo
- Identificar las causas de mayor relevancia dentro del problema, teniendo en cuenta las conocidas 5'M (mano de obra, materiales, equipos, métodos de trabajo, medio ambiente)
- Definir las subcausas

Figura 1 Diagrama espina de pescado [7]



Notas:

- Las ideas de cada miembro del equipo debe tener un fundamento con el fin de evitar soluciones incoherentes.
- Se debe ser puntual al exponer las ideas.
- Cuanto más ramificado sea el Ishikawa, es señal de que existe una mayor diversidad de causas identificadas.

4.4 DISTRIBUCIÓN PARETO

La regla del 80-20, análisis ABC o mejor conocida como Pareto, fue introducida por Vilfredo Pareto en 1987 [8] quien analizó que el 20% de la población tiene el 80% de la riqueza, principalmente la importancia de esta distribución se centró en su aplicación para los estudios socioeconómicos, pero esta es frecuentemente utilizada en modelos de análisis en áreas incluyendo distribución de población, fluctuación de precios, se ha encontrado que la distribución de Pareto es una muy buena aproximación para distribuciones con asimetría positiva [8].

Esta metodología permite comparar, priorizar e identificar por medio de un análisis gráfico cuales son los ítems más relevantes según sea el caso analizado, tiene como beneficio que es sencilla y tiene un gran impacto visual lo que hace que sea fácil de comprender los pocos vitales y los muchos triviales.[9] Se ha demostrado

que la causa de los problemas relacionados a un sistema se debe a un pequeño subconjunto de factores y mediante este método pueden ser identificados para posteriormente corregirlos y mejorar el rendimiento en general del sistema.

Un error común en la implementación del diagrama de Pareto es la categorización de los datos, ya que en muchos casos al utilizar una definición demasiado corta o extensa de estos, puede generar resultados no muy precisos y se debe redefinir las categorías durante el proceso de implementación para rectificar el análisis final. Una buena herramienta para corregir esta problemática es el análisis de las entradas y las ideas relacionadas mediante el uso de una lluvia de ideas o diagramas de causa y efecto asociadas con los factores significativos de lo que se va analizar.

Para aplicar la metodología se requiere seguir los siguientes pasos:

- Organizar los datos por frecuencia de falla (categoría) de mayor a menor.
- Calcular el porcentaje de cada categoría representada sobre el total
- Calcular el porcentaje acumulado de cada categoría de la lista
- Crear un gráfico en donde:
 - Eje X (horizontal): Las categorías/fallas
 - Eje Y (vertical): Magnitud del problema estudiado (izquierdo)
Magnitud de los porcentajes acumulados (derecho)
- Análisis según los resultados de la gráfica anterior.

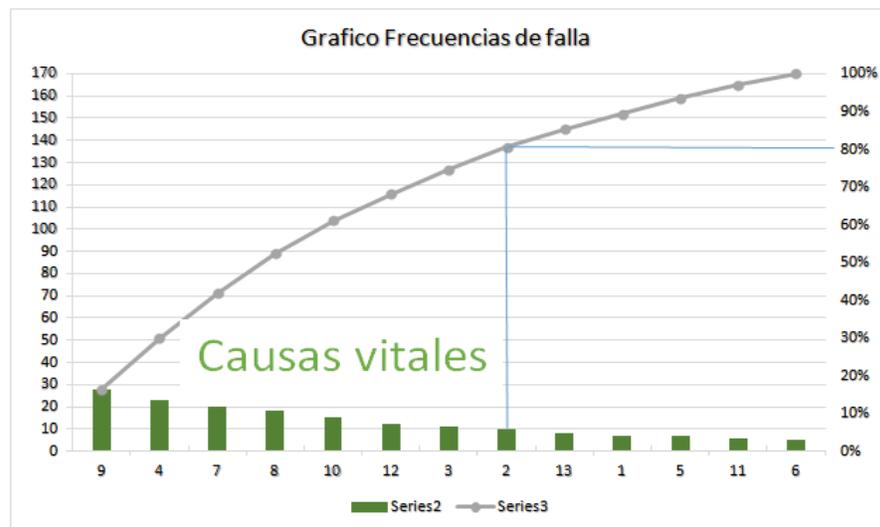
A Continuación se presenta un ejemplo de un diagrama de Pareto realizada durante un taller del seminario de Mantenimiento Preventivo de la especialización de la gerencia de Mantenimiento 2016.

Tabla 1 Frecuencias de fallas de una flota de camiones

ítem	placa	FRECUENCIA FALLAS/AÑO	% de falla	% acumulado
9	BZT199	28	16%	16%
4	BZT194	23	14%	30%
7	BZT197	20	12%	42%

8	BZT198	18	11%	52%
10	BZT200	15	9%	61%
12	BZT202	12	7%	68%
3	BZT193	11	6%	75%
2	BZT192	10	6%	81%
13	BZT203	8	5%	85%
1	BZT191	7	4%	89%
5	BZT195	7	4%	94%
11	BZT201	6	4%	97%
6	BZT196	5	3%	100%

Figura 2 Distribución Pareto flota de camiones

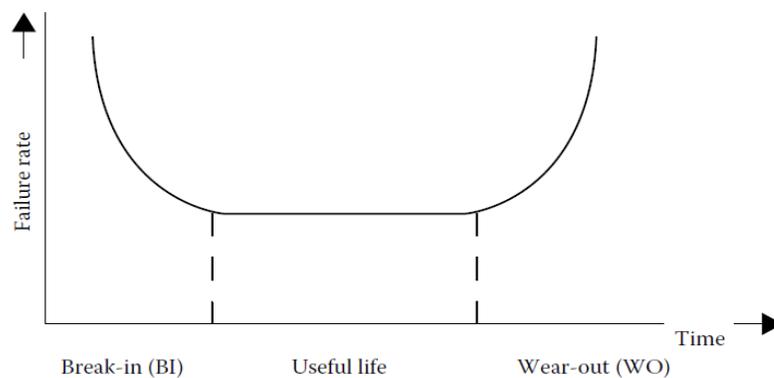


4.5 DISTRIBUCION DE WEIBULL

Es un modelo desarrollado para estimar características importantes durante la vida útil de un activo o equipo asociado a una empresa, este método permite realizar predicciones de forma estadística a los datos más representativos como lo son fallos, vida media del producto, confiabilidad y tasa de fracaso. [10]. Fue inventado

por Waloddi Weibull en Suecia en 1939 y ha sido utilizado en diversas áreas de ingeniería especialmente en el ámbito de confiabilidad [11]. Weibull introdujo esta distribución principalmente al análisis empírico y a ciertos ensayos de vida que se comporta de manera exponencial y está dividida en tres fases distribuidas de la siguiente manera: (BI) tasa de fallo decreciente, la etapa de vida útil y (WO) periodo de desgaste, a esta distribución gráfica se le denomina la curva de la bañera. [12]

Figura 3 Diagrama de la bañera de Weibull



Esta se compone de dos parámetros principales

$$f(T) = \frac{\beta * ((t)^{\beta-1})}{\eta^{\beta}} * e\left(-\left(\frac{(t)}{\eta}\right)^{\beta}\right) \quad (13)$$

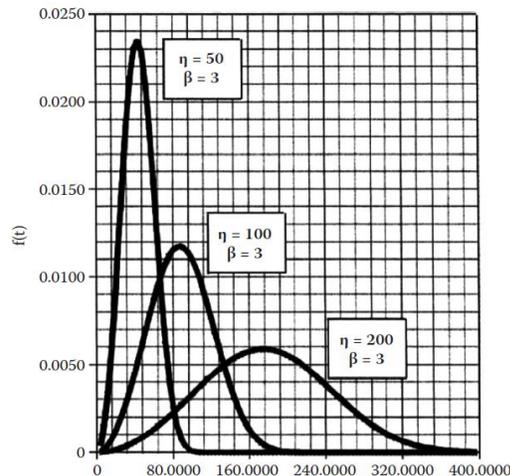
Donde, β es el parámetro de forma; η es el parámetro de escala

$$\eta = \left[\sum_{i=1}^N \frac{t_i^{\beta}}{r} \right]^{1/\beta} \quad (13.1)$$

Se considera que cuando; $\beta < 1$ Tasa de fallo decreciente
 $\beta = 1$ Fallas aleatorias o vida útil
 $\beta > 1$ Periodo de desgaste

La forma de la distribución exponencial es siempre la misma aunque las tres distribuciones descritas a continuación demuestran el efecto que tiene la forma, la escala y la ubicación de los parámetros dentro de la distribución de Weibull.

Figura 4 Diagrama influenciado por el parámetro escala Weibull



En la figura 3 se puede apreciar cuando el valor η es el punto en tiempo que corresponde a 63,2% del valor del rango medio. La distribución acumulativa de Weibull puede representarse gráficamente como una línea recta cuando se traza en papel cuadrículado Weibull y ha sido diseñado para simplificar la interpretación de los resultados utilizando escalas para "Vida" y "Porcentaje Fallido" para lograr una línea.

Cabe recordar que la probabilidad de falla se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$F(t) = 1 - e^{\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right)} \quad (33)$$

La confiabilidad vs tiempo

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right)} \quad (34)$$

Probabilidad de falla vs tiempo

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (33)$$

Función de probabilidad de falla

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\beta(t^{\beta-1})}{\eta^\beta} * e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (32)$$

Ritmo de falla vs tiempo

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\beta(t^{\beta-1})}{\eta^\beta} \quad (35)$$

4.5.1 Indicadores claves de desempeño Los Indicadores de gestión son importantes para tener el control sobre el desarrollo y la efectividad del programa de mantenimiento, estos cuantifican la variable a monitorear mostrándonos si hay cambios en algún determinado tiempo, es de gran importancia tener la documentación de estos y realizar la divulgación dentro del grupo de trabajo. Algunos de los KPI (key Performance indicator) más utilizados son:

- MTBF (Mean Time Between Failures): Es el tiempo promedio de un equipo funcionará antes de fallar [13]
- Confiabilidad: Es la probabilidad que un activo realice su función para la cual fue diseñado en un intervalo de tiempo, en condiciones normales de operación. [14].
- Disponibilidad: Es la probabilidad que un activo pueda ser operado cuando se requiera en un intervalo de tiempo. [2].
- Mantenibilidad: Es la probabilidad que un activo pueda regresar a su estado de funcionamiento después de una reparación o falla [14].

5. RESEÑA DE LA COMPAÑÍA

La empresa del presente trabajo pertenece al sector de hidrocarburos, es una de las mayores empresas del sector con presencia en diferentes países; la compañía cuenta con más de 30 años durante los cuales ha aportado gran desarrollo para nuestro País con la generación de empleos, regalías y su compromiso con la comunidad. Adicional cabe resaltar que tiene un alto grado de responsabilidad con la seguridad industrial y el medio ambiente.

Podemos ver que es una empresa con pilares sólidos los cuales se han fortalecido con el pasar de los años, en este 2017 se está realizando una campaña cultural basada en nuestros valores que son: el Compromiso, Innovación, Liderazgo y Colaboración. También se están implementando programas como el de las 5 Eses Japonesas y para las instalaciones administrativas las cuales se encuentran en Bogotá no son la excepción, se realizará una jornada de limpieza liderada por el Presidente de la compañía con el eslogan: “Cada cosa en su lugar”.

El objetivo de la compañía es garantizar una operación segura y confiable.

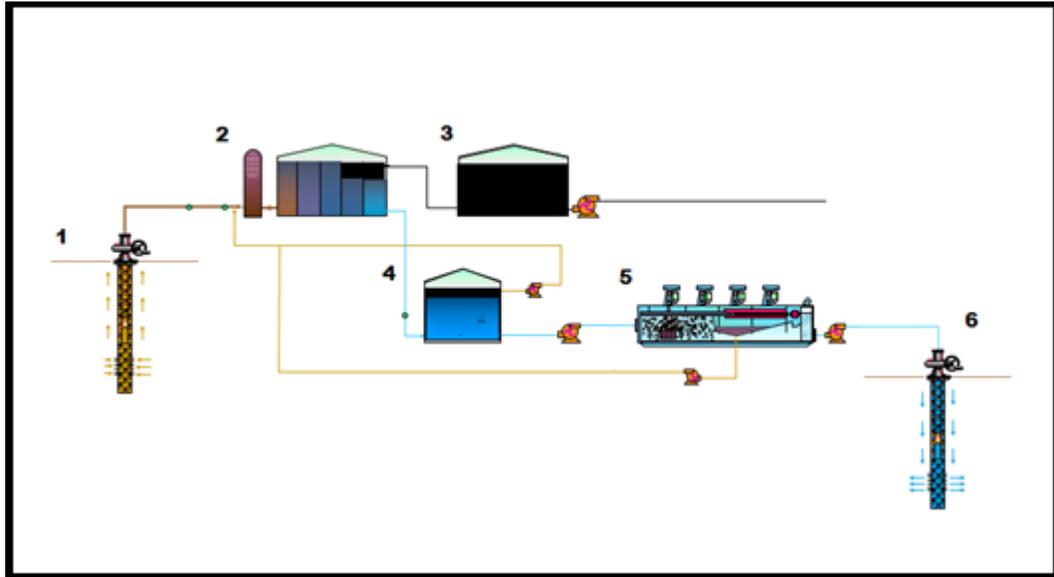
En cuanto a lo que corresponde con el área de mantenimiento la compañía cuenta con un programa con 10 procedimientos establecidos los cuales aplican para todas las unidades de negocio a nivel mundial, dentro de estos procedimientos se encuentran: La clasificación de equipos (críticos, Alto Valor y No críticos) para los cuales se tienen definidos criterios y parámetros que son de carácter mandatorio, también se encuentra el programa de preventivo y predictivo, uso y gestión del CMMS, manejo de paradas de planta, aplazamientos, gestión de las deficiencias...entre otros.

Cada año se cuenta con una auditoría interna en donde se evalúan que cada una de las áreas cumplan con los estándares y procedimientos corporativos, las áreas evaluadas son: Manejo de Riesgos, Mantenimiento, Integridad Mecánica, Seguridad Industrial y Medio Ambiente. Adicional cada 4 años se realiza una auditoría por parte de la casa matriz quien trae expertos de otras unidades para realizar esta inspección [16]

La locación donde se encuentran las unidades de inyección de agua del sistema en estudio tienen 10 años de funcionamiento, en dicha planta el agua no puede ser vertida a esteros o ríos después de su proceso de tratamiento el cual consiste en la separación del fluido agua en un 90% y crudo en 10% todo esto debido a temas ambientales ya que no se cuenta con el licenciamiento para esto. Uno de los mayores pilares con los que cuenta esta empresa es su alto compromiso con el medio ambiente, teniendo estándares de estricto cumplimiento por tal razón el

sistema de inyección es de gran importancia para esta planta debido a que en caso de falla o de no disponibilidad de alguno de los skids se ve directamente afectada la producción y operación del campo.

Figura 5 Proceso del fluido extraído [16]



En la Figura 5 se pueden identificar los procesos que conforman el tratamiento del fluido extraído del pozo hasta su disposición final, a continuación una pequeña descripción de cada sub-proceso:

1. Corresponde a la extracción del fluido del subsuelo para esto existen diversos métodos como bombeo electro-sumergible y/o bombeo mecánico como lo son el caso de los machines, el método utilizado es seleccionado por los geólogos quienes son los que conocen las formaciones del suelo.

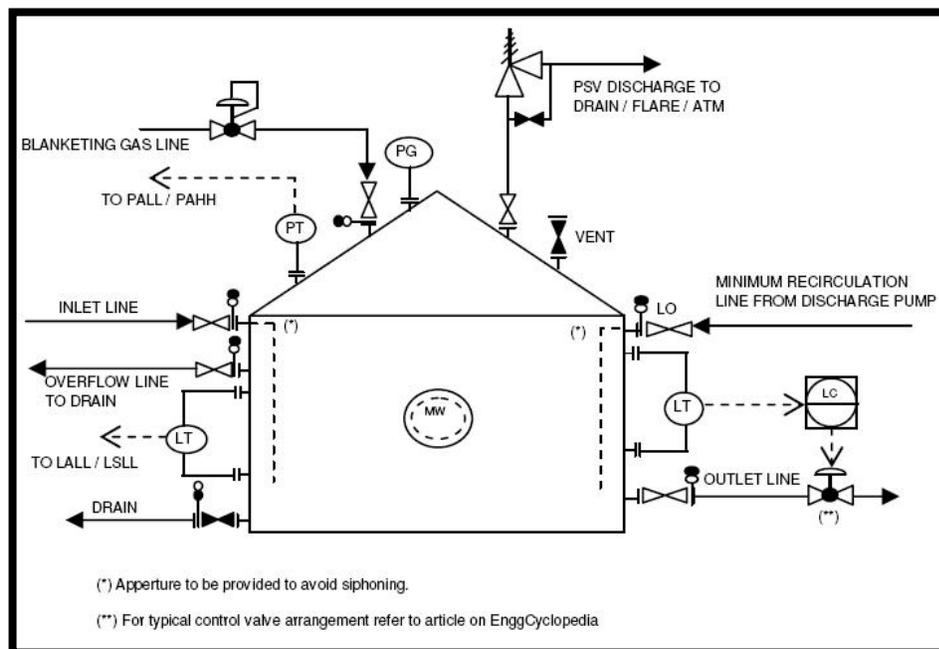
Figura 6 Machine de extracción de crudo [17]



Fuente: Fundación Viztaz

2. Separación de crudo y agua, esto se realizan en tanques conocidos como tanques Fwkos por sus siglas en inglés (Free Water knock-out) los cuales utilizan el método de separación gravitatoria estos pueden ser recipientes horizontales o verticales, son muy buenos en remover grandes cantidades de agua libre con tiempo de residencia muy cortos.

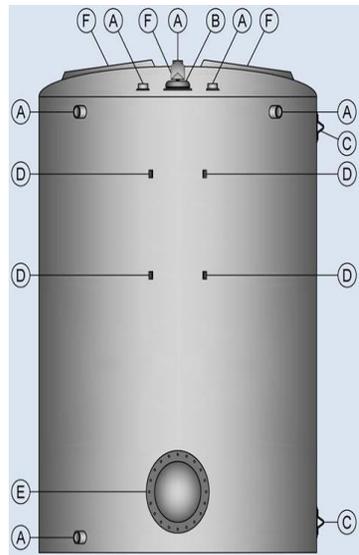
Figura 7 Salidas y entradas tanque Fwkos [18]



Fuente Enggcyclopedia.com

3. Tanques de producción, estos tanques tienen la función de almacenar el crudo separado el cual se encuentra listo para enviar por los oleoductos. Estos se encuentran diseñados bajo normas internacionales como la API, además cuentan con sistemas de sobreprotección por medio de una válvula de presión y vacío PSVs.

Figura 8 Tanque de producción [19]

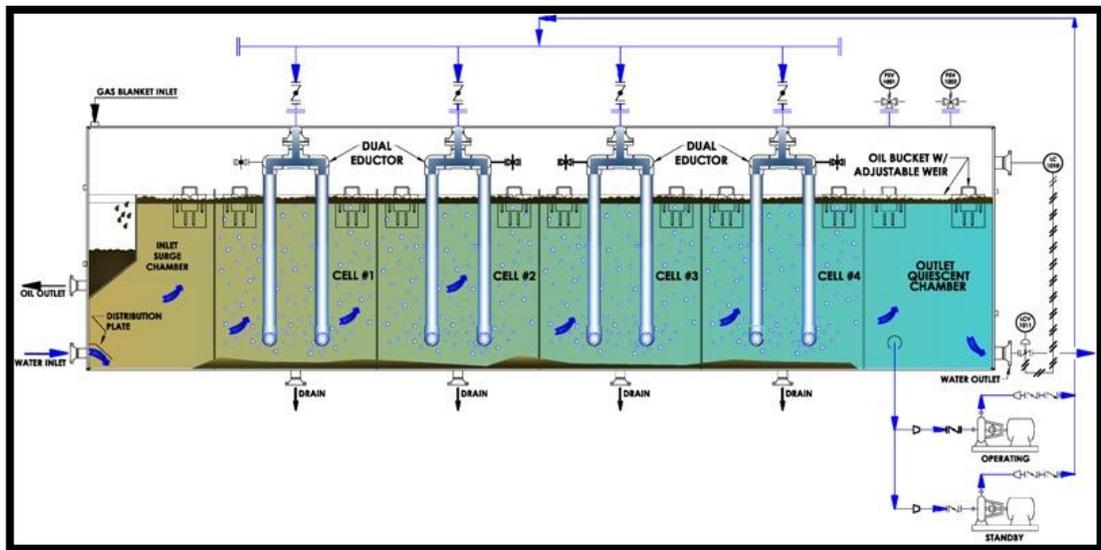


Stock & Water Tanks		
Item	Qty	Description
A	5	4" Dia. FRP NPT Coupling
B	1	8" Thief Hatch
C	3	Lifting Lugs
D	4	Walkway Lugs
E	1	24" Manway w/ Cover
F	4	FRP Rib

Fuente. Fiber tank Solutions

4. Tanques cabezas de agua, son tanques atmosféricos, con venteo tipo cuello ganso, los cuales están diseñados para recibir el fluido (mayormente agua) que provienen de los tanques Fwkos y su objetivo es separar las partículas con diámetros mayores a 50 micrones.
5. Celdas de flotación: Su función es agitar por medio de aire mecánicamente inducido para remover el agua del crudo, los rotores inducen un flujo recirculante de aire en la mezcla logrando que se esto dispersa pequeñas burbujas en todas partes del volumen de tanque y el material suspendido es llevado a la superficie, donde son recuperados, también se le adicionan químicos para facilidad de la separación de las moléculas.

Figura 9 Celdas de flotación [20]



Fuente. Enviro-Tech System

6. Sistema de inyección: El sistema de inyección está compuesto por bombas quienes toman el agua tratada para realizar el proceso de inyección de ésta a los pozos dispuestos para este fin.

Figura 10 Sistema de inyección [21]

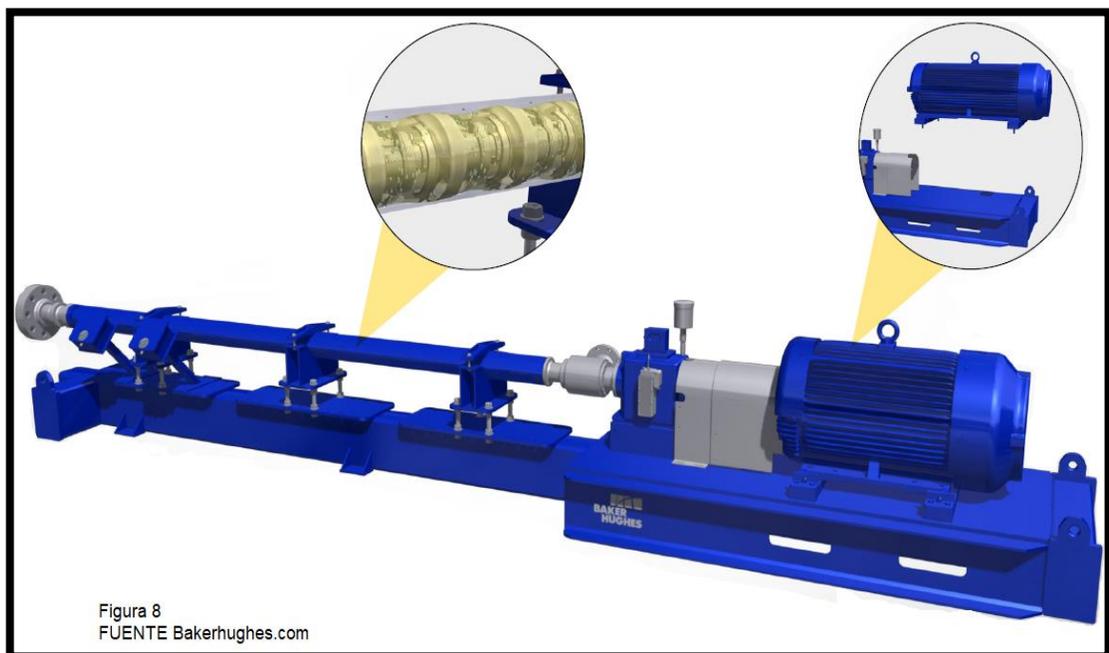


Fuente. Schlumberger company

6. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS

Es un sistema de bombeo de superficie horizontal marca BAKER HUGHES Modelo HC2000 seleccionado por la compañía porque ofrece una vida útil más larga y menores costos de mantenimiento que las bombas de desplazamiento positivo y de cavidad progresiva, este equipo está diseñado especialmente para manejar condiciones de calor y frío, temperaturas de fluidos calientes y sólidos de hasta 100 ppm. Tiene conexiones de 8" bridadas de cara realzada (RF) en la succión y 6" en la descarga, una presión de succión de 150 psi, 3000 psi de descarga y una capacidad de 20000 BWPD. La temperatura de operación de 200°F y la temperatura de diseño de 220 °F. Sus principales componentes son un patín de acero, un motor eléctrico, una bomba centrífuga multietapa, cámara de empuje e instrumentación asociada.

Figura 11 Ensamble bomba horizontal BAKER HUGHES [22]

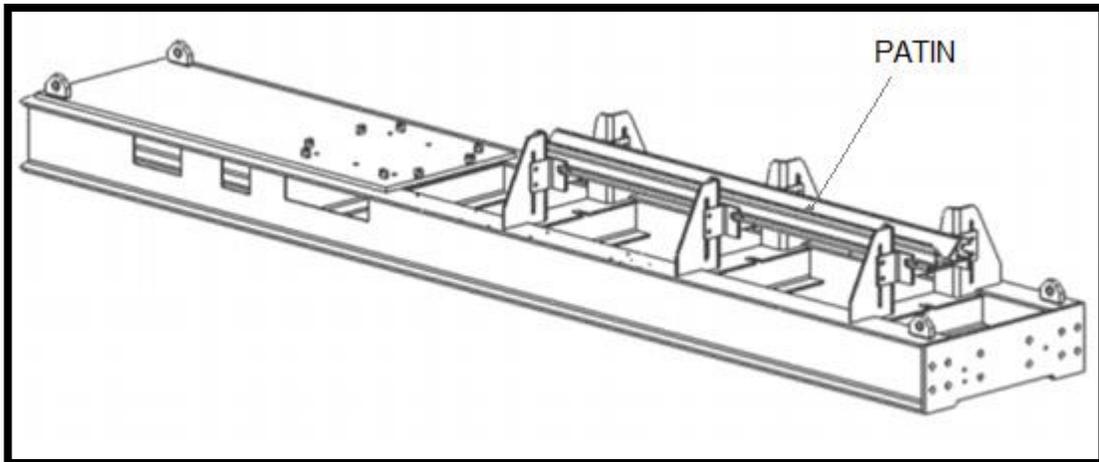


Fuente. Bakerhughes

6.1 PATIN

Está fabricado completamente en acero para ofrecer rigidez y soporte al instalar el controlador o la instrumentación necesaria para el equipo. La rigidez del patín minimiza la desalineación pero para mayor seguridad se suele alinear con un láser durante todo su proceso de fabricación. El lugar donde se ubica la bomba está compuesto por elementos independientes en forma de V y cuentan con unas tapas sujetas con abrazaderas que permite realizar ajustes verticales y horizontales para facilitar las labores de instalación de las bombas conocidas como cuna.

Figura 12 Patín [23]

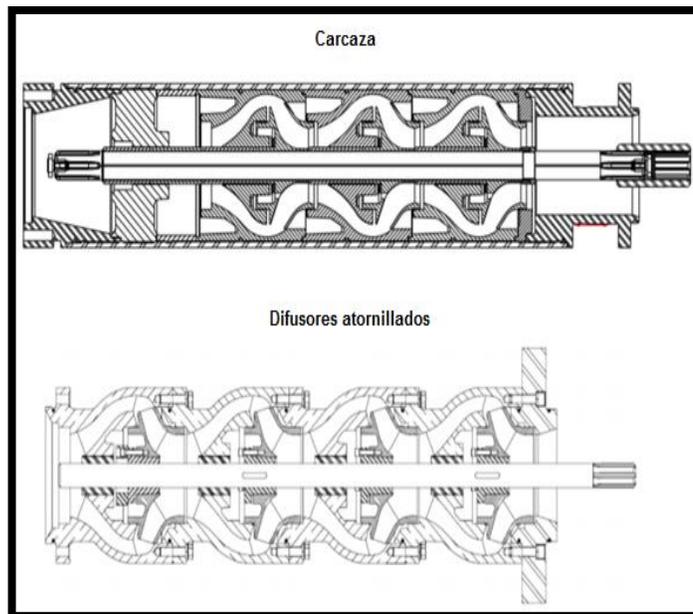


Fuente. Bakerhughes

6.2 BOMBA HORIZONTAL

Consta de impulsores colocados en varias etapas que comparten un mismo eje y es instalada de forma horizontal. Estas bombas sacan provecho de la suma de presión lograda al pasar por cada una de las etapas ya que cada impulsor aumenta la presión de la etapa anterior. La cabeza de la bomba se acopla a la brida de descarga y la base al conjunto de admisión. Estas pueden ser de dos tipos: carcasa o de difusores atornillados.

Figura 13 Bomba horizontal de carcasa o difusores atornillados [23]

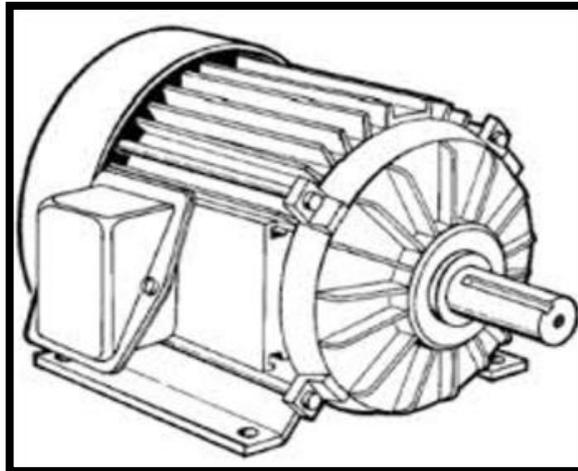


Fuente. Bakerhughes

6.3 MOTOR ELECTRICO

Es un motor eléctrico marca siemens con una potencia de 1250 HP, a 4160 V y 151 Amp, de dos polos a 3600 RPM, trifásico a 60 Hz con un factor de servicio 1.15 y temp max operación 40°C de fabricación americana. Con un cojinete tipo manguito en cada extremo del eje y está conectado a la cámara de empuje mediante la carcasa de la campana del motor junto a un aumentador de velocidad de eje paralelo montado por separado.

Figura 14 Motor eléctrico [24]

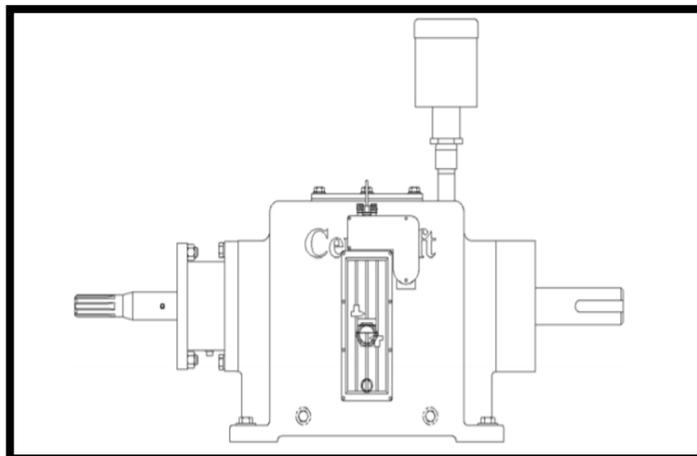


Fuente. Bakerhughes

6.4 CAMARA DE EMPUJE HORIZONTAL

Es un dispositivo lubricado con aceite que sirve para transmitir el par del motor a la bomba, aislar el motor del empuje producido por la bomba y sellar el fluido bombeado del ambiente. Contiene instrumentación asociada para monitorear nivel de aceite y temperatura.

Figura 15 Cámara de empuje [23]

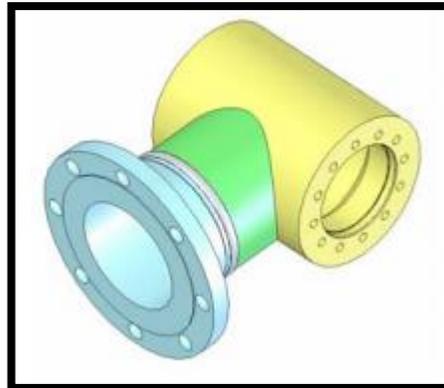


Fuente. Bakerhughes

6.5 CONJUNTO DE ADMISION

Está conectado entre la bomba y la cámara de empuje, esta permite la entrada del fluido a la bomba. La entrada del agua es a 90° del montaje y tiene conexiones de 8 pulgadas.

Figura 16 Conjunto de admisión [23]

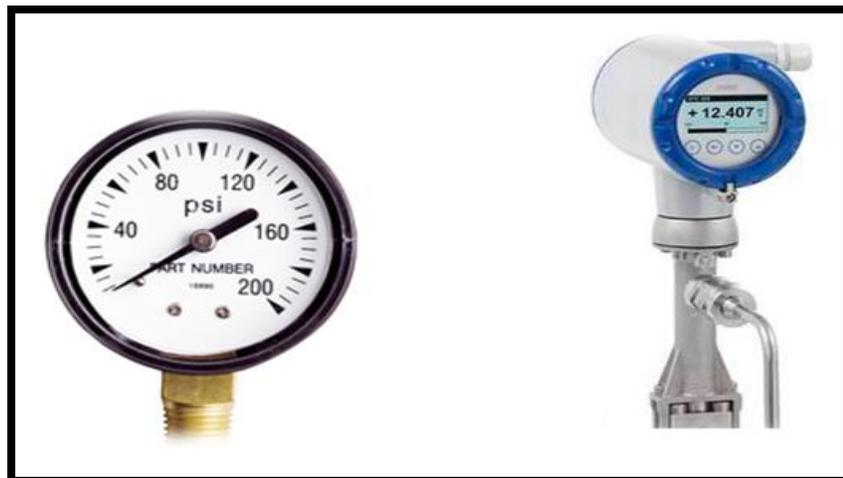


Fuente. Bakerhughes

6.6 INSTRUMENTACION ASOCIADA

El sistema contiene componentes asociados para monitorear el nivel de aceite en la cámara de empuje, medidor de flujo, Switch de baja presión y alta presión de descarga manómetros en la admisión y descarga del fluido.

Figura 17 Manómetro y flujómetro [25]



Fuente. Vortex industry direct

7. CONDICIONES OPERACIONALES

Las bombas tienen las siguientes características:

Tipo:	Centrífuga Horizontal
Capacidad:	20.000 BPD@ 3000 psi
Presión de succión:	150 psi
Motor:	1250 HP

Estas bombas tienen un cabezal de succión en 12" el cual está provisto de un transmisor e indicador de presión que reporta señal directa al sistema de control de proceso. Cada una de las succiones de estas bombas principales, está provista de un switch de baja presión de succión con disparo a la bomba respectiva.

De igual manera cuentan las líneas de succión de cada bomba, con un indicador y transmisor de flujo con sus respectivas alarmas de bajo y alto flujo y un totalizador de flujo FQI.

También las bombas cuentan cada una con un switch de alta presión, un transmisor indicador de presión y un transmisor de presión común en la línea de descarga de las mismas.

En la línea de descarga cada bomba cuenta con una válvula de control de presión, que permiten recircular el flujo de cada bomba al tanque cabeza de agua cuando hay detección de flujo mínimo o en el proceso de arranque de una bomba y la otra se encuentra en operación hasta igualar las presiones de descarga.

Estas bombas de inyección descargan en la línea de inyección de 8" con destino a la plataforma de los pozos inyectoros [16].

Esta línea de 8" cuenta con la siguiente instrumentación:

- Indicador de presión local.
- Indicador Transmisor de Presión.
- Termo pozo con indicación de temperatura local.
- Switch de baja, baja presión.
- Transmisor indicador de presión
- Switch de alta, alta presión
- Válvula Crash valve.

8. IMPLEMENTACIÓN ANÁLISIS DE FALLA

8.1 ANALISIS POR DISTRIBUCION DE PARETO

Con la información primaria recolectada y utilizando la metodología de Pareto se procedió a ejecutar la identificación de los equipos críticos del sistema, la data seleccionada es del año 2012 hasta junio del 2017 y está contiene: Identificación de la orden de trabajo, descripción, tipo de mantenimiento, equipo asociado, estado de la orden, cantidad de horas invertidas, fecha de intervención.

Pasos:

- Organizar los datos por frecuencia de falla (categoría) de mayor a menor.
- Calcular el porcentaje de cada categoría representada sobre el total
- Calcular el porcentaje acumulado de cada categoría de la lista
- Crear una gráfico en donde:
 - Eje X (horizontal): Las categorías/fallas
 - Eje Y (vertical): Magnitud del problema estudiado (izquierdo)
Magnitud de los porcentajes acumulados (derecho)

Se realizó un primer análisis de los datos tomando como variable a analizar el número de mantenimientos correctivos realizados en todo el sistema durante el intervalo de tiempo, teniendo como resultado la figura 19, en esta grafica podemos observar que el equipo que ocasiona el 20% de las intervenciones es la 1P-547, posteriormente le siguen las 1P-541, 1P-542, 1P-545, 1P-546, 1P-549, 1P-548, las cuales generan el 80% de las intervenciones, a continuación se encuentra la tabla realizada junto con las respectivas gráficas.

Tabla 2 Frecuencias de intervenciones correctivas por SKID

NOMBRE DEL EQUIPO	FRECUENCIA TOTAL DE INTERVENCIONE S	% DE FALL A	% ACUMULAD O
1P-547	28	16%	16%
1P-541	25	14%	30%
1P-542	19	11%	41%
1P-545	19	11%	52%
1P-546	15	9%	61%
1P-549	14	8%	69%

1P-548	13	7%	76%
1P-551	12	7%	83%
1P-550	11	6%	90%
1P-553	11	6%	96%
1P-552	7	4%	100%

Figura 18 Gráfico de correctivos realizados por bomba

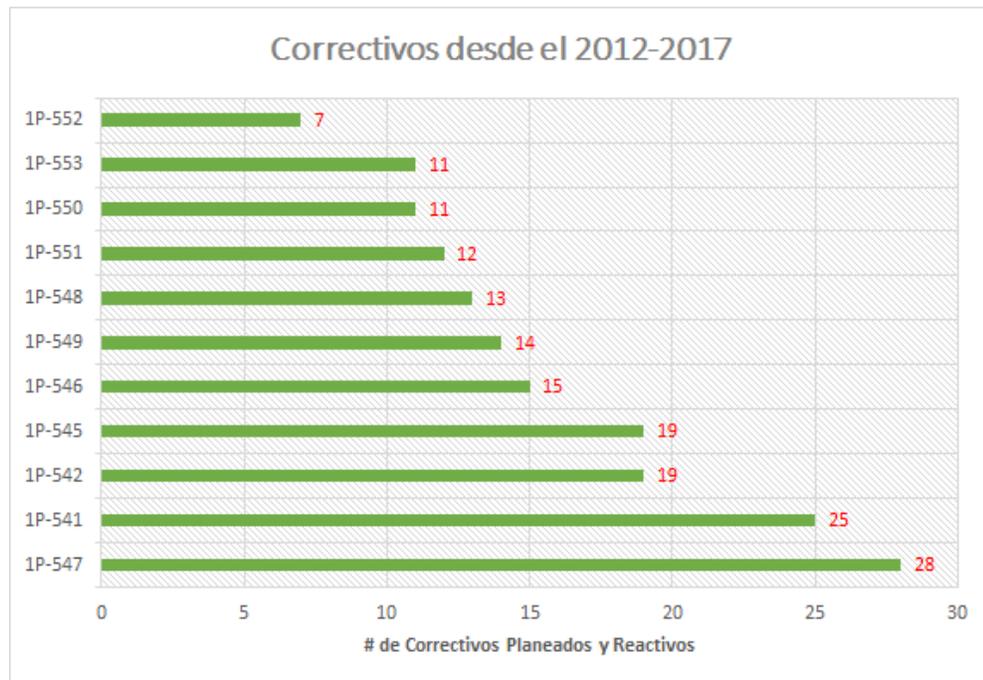
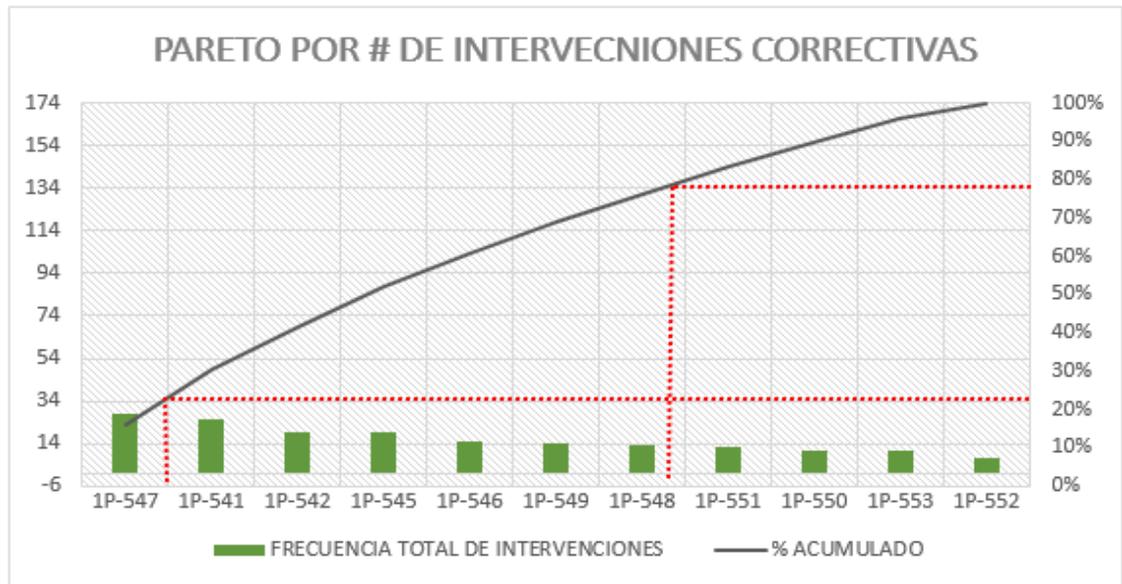


Figura 19 Resultado análisis de Pareto N° Intervenciones correctivas



Posterior al primer análisis, se decidió realizar el ejercicio pero tomando como variable a analizar todas las HH invertidas en cada una de estas actividades en todo el sistema durante el intervalo de tiempo, teniendo como resultado la figura 20, en esta grafica podemos observar que el equipo que ocasiona el 20% de las intervenciones es nuevamente la 1P-547, posteriormente le siguen las 1P-545, 1P-541, 1P-546, 1P-542, las cuales generan el 80% de las intervenciones, a continuación se encuentra la tabla realizada junto con las respectivas gráficas.

Tabla 3 Tabla Pareto por número de Horas invertidas en Correctivos

NOMBRE DEL EQUIPO	HORAS HOMBRE INTERVENIDAS	% DE HH Intervenciones	% ACUMULADO
1P-547	986	23%	23%
1P-545	625.5	15%	38%
1P-541	616.5	14%	52%
1P-546	494	12%	64%
1P-542	417.5	10%	73%
1P-548	252.5	6%	79%
1P-553	205.5	5%	84%
1P-550	200.5	5%	89%
1P-549	196.5	5%	93%
1P-551	169	4%	97%
1P-552	122	3%	100%

Figura 20 Resultado análisis de Pareto HH

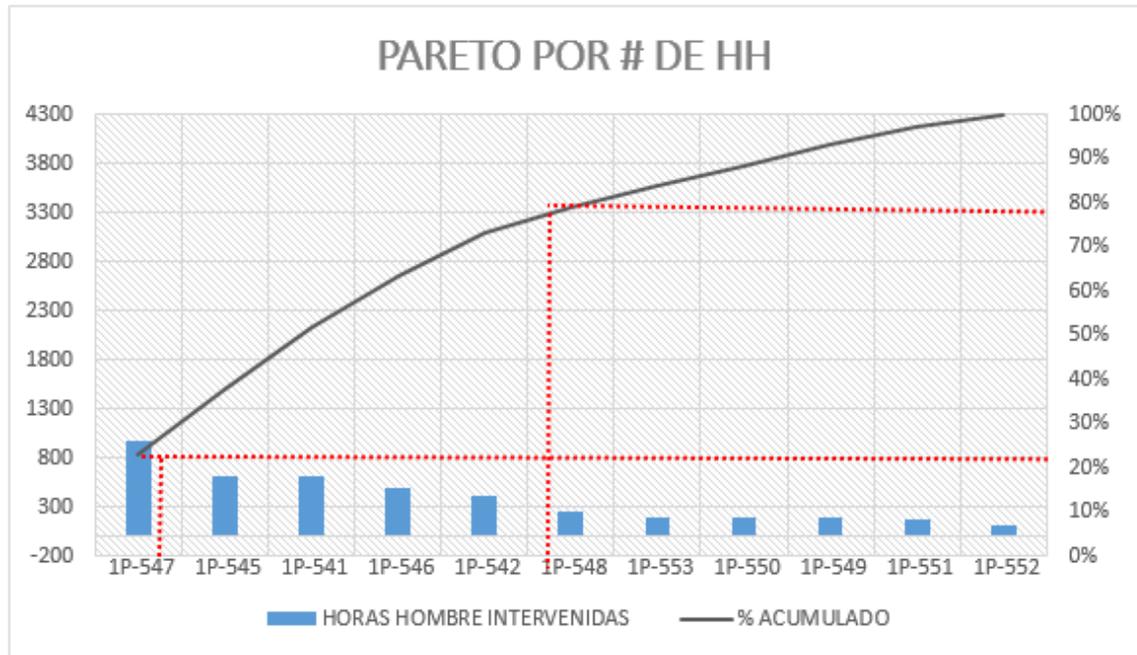


Figura 21 Gráfico de HH realizados por bomba asociados a Correctivos

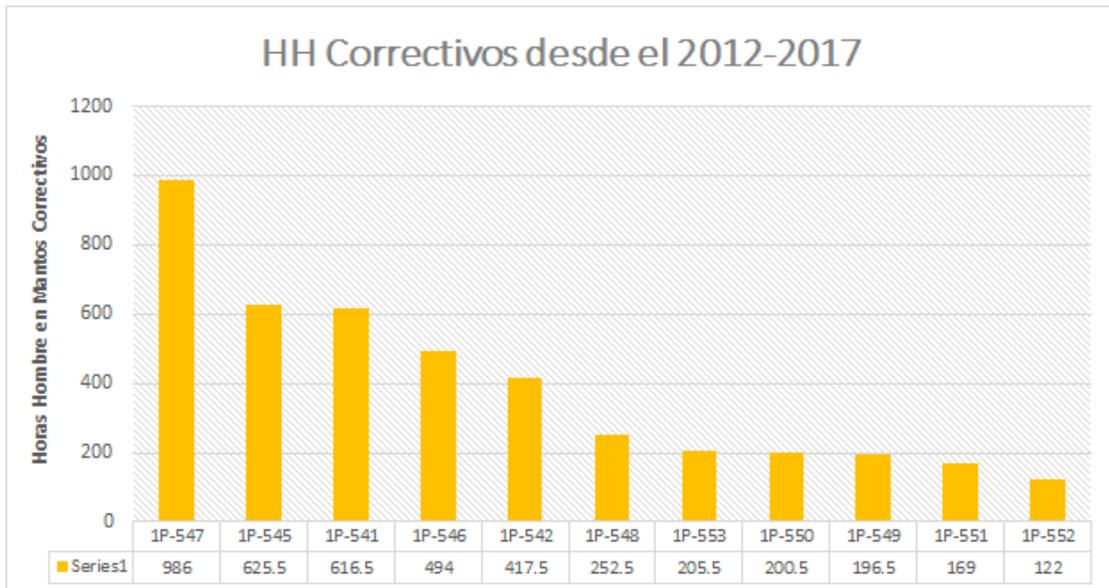


Figura 22 Número de Órdenes de Trabajo de intervenciones correctivas por año



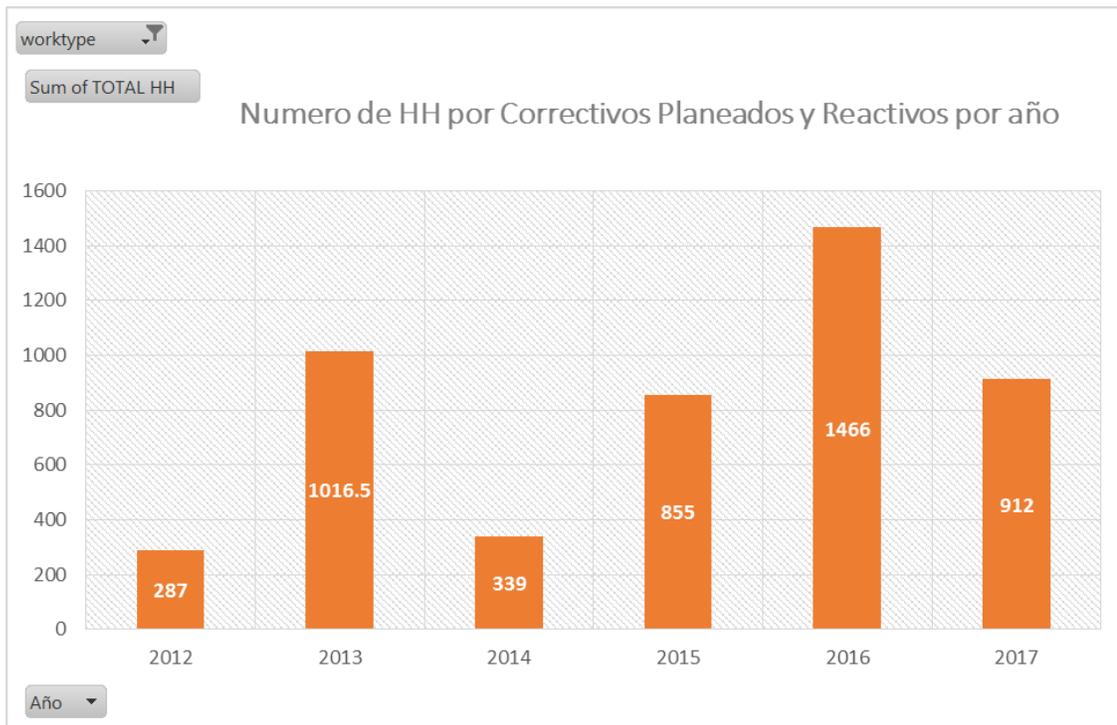
Figura 23 Horas Hombre de intervenciones correctivas por año



Figura 24 Número de correctivos por año



Figura 25 Total Horas Hombre de correctivos por año



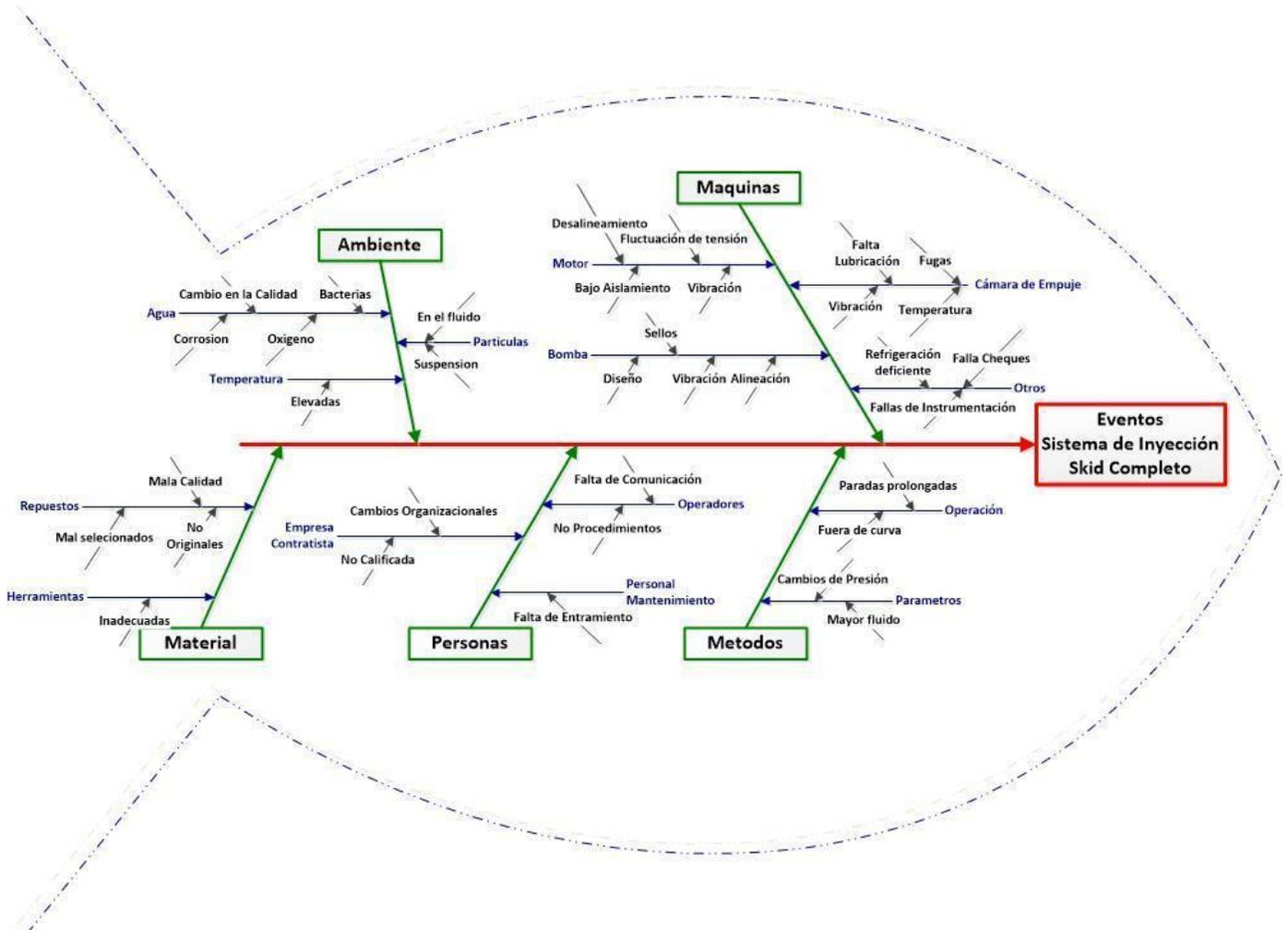
Conclusión

Vemos que en los dos Paretos realizados observamos que están en común la bomba 16P-3547 como el equipo más crítico, posteriormente las unidades 1P-541/2/5/6/ quienes serían los segundos equipos más importantes a analizar, en la próxima sección se desarrollará un análisis de falla para identificar el componente más relevante en los eventos registrados y las posibles causas.

Cabe resaltar que tanto en el número de Ordenes de Trabajo de Tipo Correctivo Planeado y Reactivo y por la cantidad de Horas invertidas en estos, durante el 2016 se presenta el mayor número de trabajos ejecutados durante estos 5 años, debido a esto se ratifica la necesidad de encontrar el origen de estos eventos.

8.2 ANALISIS DE FALLA DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Figura 35 Diagrama de Ishikawa para SKIDS



Durante el desarrollo del diagrama de causa y efecto se pudo concluir con el equipo que el componente más vulnerable por las condiciones operaciones es la bomba horizontal multietapas y como resultado se dieron las siguientes recomendaciones:

Medio Ambiente: Tener controles más estrictos con el control del agua ya que esta puede estar atacando los materiales de la bomba (se han encontrado signos de corrosión en algunos elementos), en el caso que se requiera se debe aplicar tratamiento químico.

Máquinas: Una de las mayores actividades que se presentan dentro de los trabajos correctivos planteados es la alineación y un síntoma de este es las vibraciones que se reportan, se propone una campaña de verificación de alineación de las cunas y bombas junto con el sistema de anclaje.

Métodos: Implementar algún tipo de control ya sea por el sistema de supervisión para monitorear en qué punto de operación de la curva se encuentra cada bomba, en caso de ser posible tener una indicación cuando el fluido inyectado supere los valores nominales ya que se puede generar un desgaste severo de las bombas por tenerlas trabajando en upthrust.

Personal (MAN): Revisar si las capacidades técnicas del personal de mantenimiento por la empresa contratista son las adecuadas para realizar esta actividad.

Material: Dentro del contrato actual con la empresa contratista, se recomienda llevar a cabo la inclusión de certificación del material de los acoples ya que dichos elementos durante los últimos teardown han presentado signos de corrosión. Adicional se recomienda revisar los insumos de lubricación para ratificar si son estos los adecuados para este tipo de equipos.

Posterior del análisis realizados de las 5Ms y verificado alguna de las posibles hipótesis de las fallas se descarta las variables de método y personal ya que la experiencia y las aptitudes tanto de los operadores como del equipo de mantenimiento son las idóneas. Como conclusión el daño de las bombas se deben a la combinación de las variables de Ambiente (corrosión), Máquinas (desalineación y vibraciones) y por ultimo Material (Acoples).

8.3 IMPLEMENTACION ANALISIS DE WEIBULL

Los equipos evaluados a continuación son los que se fijaron mediante el uso de la metodología de Pareto como críticos, esto con el fin de encontrar su probabilidad de falla o establecer si se encuentra en una etapa de fallos infantiles, etapa productiva o si ya cumplió su ciclo de vida. Los datos considerados para el análisis fueron los mantenimientos correctivos que generaron paradas de emergencia o salidas temporales de funcionamiento.

8.3.1 Análisis del skid 1P-541 En la siguiente gráfica se observan todas las intervenciones del skid total durante el periodo de tiempo 2012 hasta 2017

Tabla 4 Tipos y descripción de fallas SKID 1P-541

SKID COMPLETO				
1P-541				
ITEM	Tipo	FECHA FALLA	DESCIPCION	DIAS
1	Tipo 2	6/04/2012	Bomba con alta vibración y ruido (Bujes y etapas desgastadas)	-
2	Tipo 2	26/08/2012	Bomba 1 Con alta vibración y ruido anormal	142
3	Tipo 3	6/05/2013	Fuga de agua por sello/ reemplazo cámara de empuje	253
4	Tipo 2	11/05/2013	Ruido anormal bomba de inyección y disparo motor	5
5	Tipo 2	10/07/2013	Revisar alineamiento	60
6	Tipo 2	29/11/2013	Cambio de bomba sección 2 por ruido anormal	142
7	Tipo 1	12/01/2014	Cambio de rodamiento motor auxiliar	44
8	Tipo 3	4/06/2014	Fuga de agua por sello mecánico	143
9	Tipo 2	30/11/2014	Limpieza radiadores de las bombas de inyección	179
10	Tipo 4	20/04/2015	Cambio de válvula de recirculación	141
11	Tipo 4	2/07/2015	Cambio de válvula de recirculación	73
12	Tipo 3	27/12/2015	Cambio de CE por ruido anormal	178
13	Tipo 2	22/08/2016	Revision por alta vibracion	239
14	Tipo 4	13/10/2016	Cambio de válvula cheque y descarga	52
15	Tipo 4	16/10/2016	Falla de posición PVC	3
16	Tipo 3	17/10/2016	Disparo por alta vibración en la CE	1
17	Tipo 1	1/12/2016	Reparación de motor	45

18	Tipo 3	31/12/2016	Fuga por sello mecánico en la CE	30
19	Tipo 4	30/06/2017	Cambio de mangueras del sistema de aceite en la cámara de empuje	181

Figura 26 Confiabilidad vs tiempo y Probabilidad de falla vs tiempo Skid 1P-541

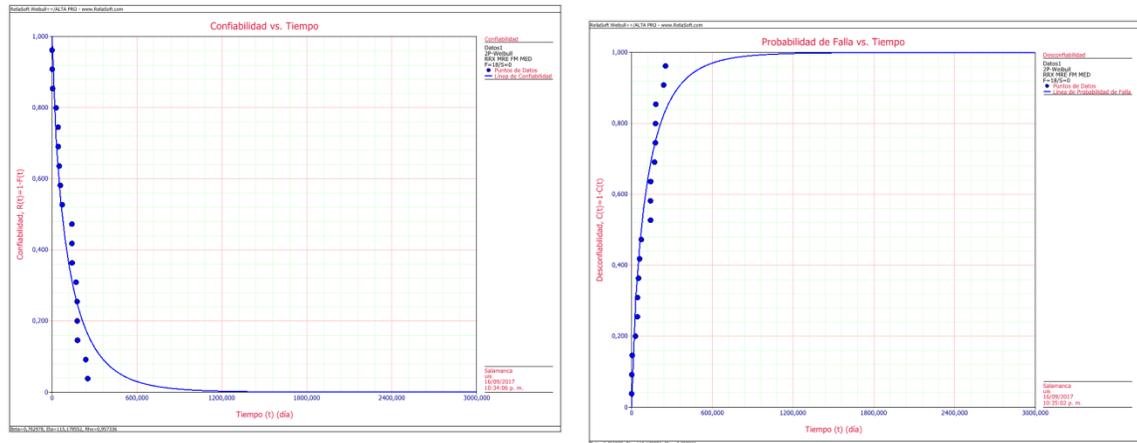


Tabla 5 Resumen de resultados análisis de Weibull SKID 1P-541

CONFIABILIDAD = 18%
 PROBABILIDAD FALLA = 82%
 MTTF = 271 Dias

Resumen del Análisis	
Parámetros	
Beta	1,024133
Eta (día)	108,667845
Otra	
Val. de V	-102,243881

En la siguiente gráfica se observan todas las intervenciones asociadas a las bombas multietapas durante el periodo de tiempo 2012 hasta 2017

Tabla 6 Tipos y descripción de fallas Bomba SKID 1P-541

BOMBA MULTIETAPAS				
1P-541				
ITEM	Tipo	FECHA FALLA	DESCIPCION	DIA S
1	Tipo 2	6/04/2012	Bomba con alta vibración y ruido (Bujes y	-

			etapas desgastadas)	
2	Tipo 2	26/08/2012	Bomba 1 Con alta vibración y ruido anormal	142
4	Tipo 2	11/05/2013	Ruido anormal bomba de inyección y motor	258
6	Tipo 2	29/11/2013	Cambio de bomba sección 2 por ruido anormal	202
9	Tipo 2	30/11/2014	Limpieza radiadores bombas de inyección	366
13	Tipo 2	22/08/2016	Revisión por alta vibración	631

Figura 27 Confiabilidad vs tiempo y Probabilidad de falla vs tiempo Bomba 1P-541

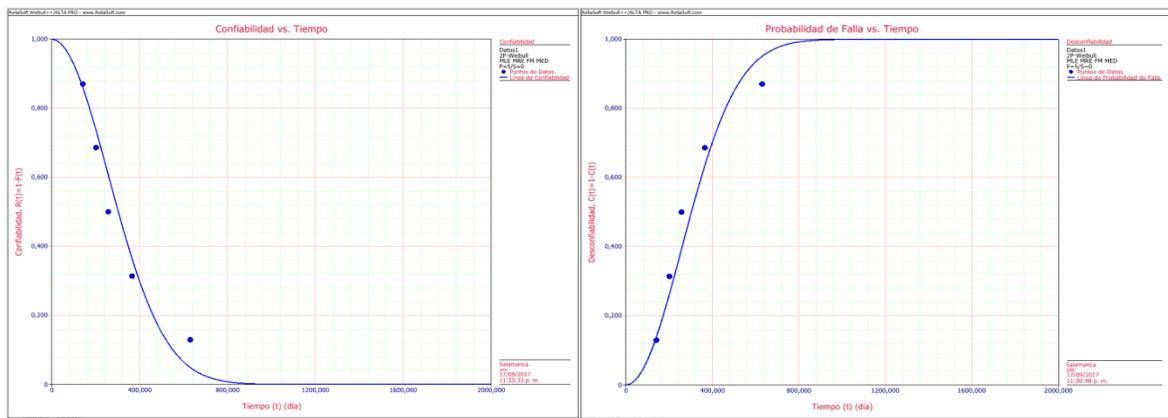


Tabla 7 Resumen de resultados análisis de Weibull Bomba SKID 1P-541

Resumen del Análisis	
Parámetros	
Beta	2,006817
Eta (día)	363,512761
Otra	
Val. de V	-32,317346

CONFIABILIDAD = 77%

PROBABILIDAD FALLA = 23%

MTTF = 322 Dias

8.3.2 Análisis del skid 1P-542 En la siguiente gráfica se observan todas las intervenciones del skid total durante el periodo de tiempo 2012 hasta 2017

Tabla 8 Tipos y descripción de fallas SKID 1P-542

SKID COMPLETO				
1P-542				
ITEM	Tipo	FECHA FALLA	DESCIPCION	DIA S
1	Tipo 2	26/04/2012	Desmante cuerpos de la bomba para stand by P-541	-
2	Tipo 1	24/10/2012	Falla de motor bomba lubricación	181
3	Tipo 3	7/06/2013	Fuga de agua por el sello mecanico	226
4	Tipo 3	27/10/2013	Aceite con agua cámara de empuje	142
5	Tipo 3	1/11/2013	Fuga por sello mecánico	5
6	Tipo 3	15/03/2014	Cambio camara de empuje por sello de alta plan 23	134
7	Tipo 3	15/06/2014	Fuga por sello mecánico	92
8	Tipo 2	7/08/2014	Cambio de bomba por sonido anormal	53
9	Tipo 1	10/08/2014	Cambio de motor auxiliar bomba de aceite por recomendación de inspecciones	3
10	Tipo 4	14/08/2015	Pase valvula chque de descarga	369
11	Tipo 3	13/09/2015	Fuga de agua por sello mecánico	30
12	Tipo 3	10/03/2016	Fuga de agua por sello mecanico	179
13	Tipo 3	24/08/2016	Cambio de la cámara de empuje por fuga en sello mecanico	167
14	Tipo 2	27/09/2016	Disparo unidad de vibración- ruido anormal camara de empuje y bomba	34
15	Tipo 3	17/10/2016	Disparo unidad por vibración y ruido anormal entre la camara de empuje	20
16	Tipo 3	23/10/2016	Fuga de agua por sello mecánico	6
17	Tipo 1	31/10/2016	Motor enfriador aceite camara empuje, ruido rodamientos y roce ventilador	8

Figura 28 Confiabilidad vs tiempo y Probabilidad de falla vs tiempo skid 1P-542

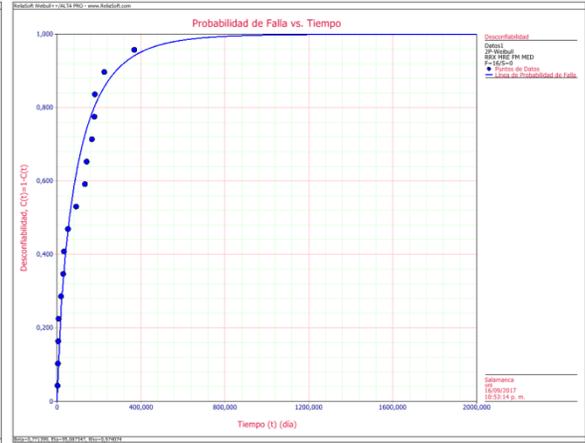
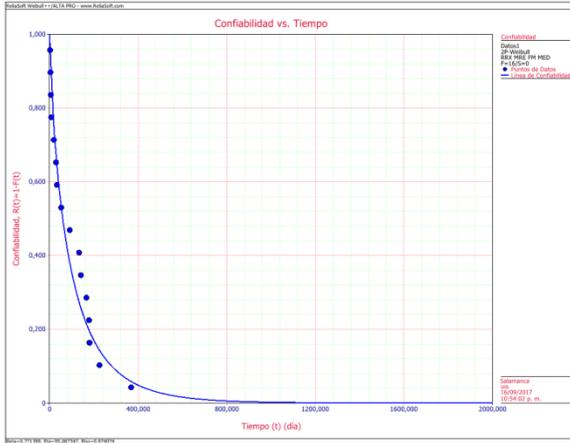


Tabla 9 Resumen de resultados análisis de Weibull SKID 1P-542

CONFIABILIDAD = 17%
 PROBABILIDAD FALLA = 83%
 MTTF = 103 Dias

Resumen del Análisis	
Parámetros	
Beta	0,852299
Eta (día)	95,515554
Otra	
Val. de V	-89,841842

8.3.3 Análisis del skid 1P-545 En la siguiente gráfica se observan todas las intervenciones del skid total durante el periodo de tiempo 2012 hasta 2017

Tabla 10 Tipos y descripción de fallas SKID 1P-545

SKID COMPLETO				
1P-545				
ITEM	Tipo	FECHA FALLA	DESCIPCION	DIA S
1	Tipo 2	19/02/2013	Cambio de posición	
2	Tipo 1	24/03/2013	Falla de rodamiento buje-motor	33
3	Tipo 1	9/04/2013	Falla de rodamiento buje-motor	16
4	Tipo 2	31/03/2014	Cambio de bombas por baja eficiencia	356
5	Tipo 3	18/07/2014	Fuga de sello mecánico	109
6	Tipo 1	22/08/2014	Alta vibracion en motor	35
7	Tipo 4	28/04/2016	Revisión de indicadores de presión y medida de flujo	615

8	Tipo 4	6/08/2016	Instalación RTD en camara de empuje	100
9	Tipo 2	8/11/2016	Actualización de las bombas 16000 a 20000	94
10	Tipo 4	8/12/2016	Actuador válvula sistema bypass en mal estado	30
11	Tipo 2	9/03/2017	Revisión acoples secciones bomba	91
12	Tipo 1	15/05/2017	Falla en el sistema de refrigeración	67

Figura 29 Confiabilidad vs tiempo y Probabilidad de falla vs tiempo skid 1P-545

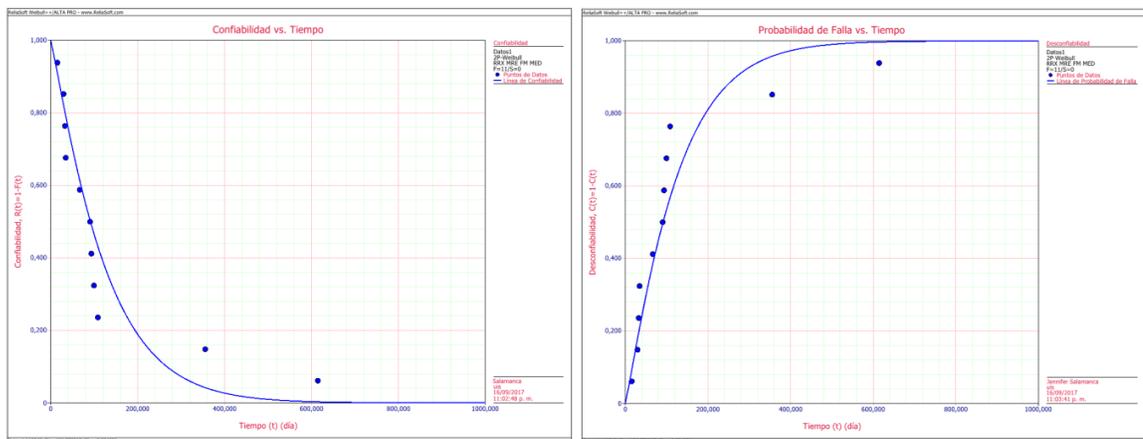


Tabla 11 Resumen de resultados análisis de Weibull SKID 1P-545

Resumen del Análisis	
Parámetros	
Beta	0,933170
Eta (día)	135,303794
Otra	
Val. de V	-65,348949

CONFIABILIDAD = 26%
 PROBABILIDAD FALLA = 74%
 MTTF = 139 Días

En la siguiente gráfica se observan todas las intervenciones asociadas a las bombas multietapas durante el periodo de tiempo 2012 hasta 2017

Tabla 12 Tipos y descripción de fallas Bomba SKID 1P-545

BOMBA MULTIETAPAS				
1P-545				
ite	Tipo	FECHA	DESCIPCION	DIA

m		FALLA		S
1	Tipo 2	19/02/2013	Cambio de posición	
4	Tipo 2	31/03/2014	Cambio de bombas por baja eficiencia	405
9	Tipo 2	8/11/2016	Actualización de las bombas 16000 a 20000	953
11	Tipo 2	9/03/2017	Revisión acoples secciones bomba	121

Figura 30 Confiabilidad vs tiempo y Probabilidad de falla vs tiempo Bomba 1P-545

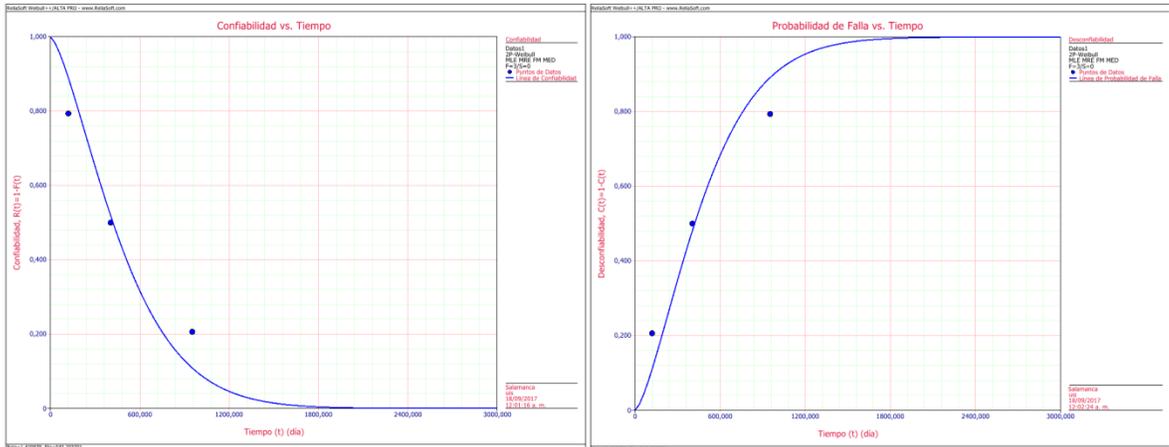


Tabla 13 Resumen de resultados análisis de Weibull Bomba SKID 1P-545

Resumen del Análisis	
Parámetros	
Beta	1,420879
Eta (día)	543,203701
Otra	
Val. de V	-21,357637

CONFIABILIDAD = 80%
 PROBABILIDAD FALLA = 20%
 MTTF = 493 Dias

8.3.4 Análisis del skid 1P-546 En la siguiente grafica se observan todas las intervenciones del skid total durante el periodo de tiempo 2012 hasta 2017

Tabla 14 Tipos y descripción de fallas SKID 1P-546

SKID COMPLETO				
1P-546				
ITE M	Tipo	FECHA FALLA	DESCIPCION	DIAS

1	Tipo 2	1/12/2013	Verificación alineación bombas 1P-545 y 1P-546	-
2	Tipo 2	7/06/2015	Cambio de bomba por incremento de capacidad	553
3	Tipo 2	21/01/2016	1P546 Revisión por apertura del interruptor	228
4	Tipo 2	31/01/2016	Cambio de las 3 secciones de bomba por disparo	10
5	Tipo 2	6/02/2016	Verificación alineamiento del equipo	6
6	Tipo 1	16/05/2016	1P-546-2. Cambiar rodamientos del motor bomba de aceite	100
7	Tipo 4	7/06/2016	1P-546. Fuga por válvula de línea de recirculación	22
8	Tipo 4	16/06/2016	1P-546. Revisión válvula desmontada	9
9	Tipo 2	4/03/2017	1P-546 Cambio de posición secciones bombas y revisión de integridad de acoples.	261
10	Tipo 1	15/05/2017	1P-546. Cambio de motor por alta vibración y falla en rodamientos	72
11	Tipo 1	26/05/2017	1P-546. Cambio de motor por muy alta vibración	11
12	Tipo 2	11/07/2017	1P-546. Cambio secciones de bomba y cámara de empuje por muy baja eficiencia	46

Figura 31 Confiabilidad vs tiempo y Probabilidad de falla vs tiempo skid 1P-546

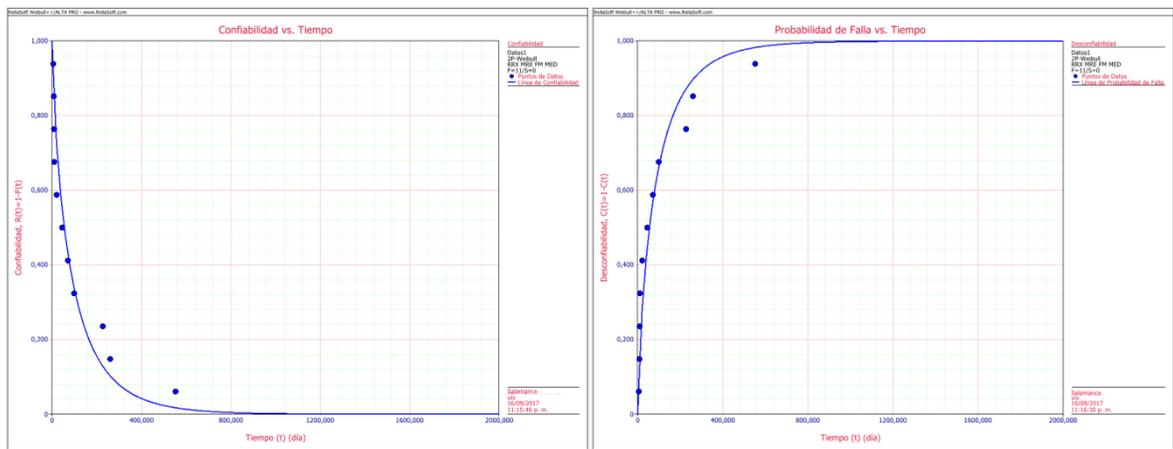


Tabla 15 Resumen de resultados análisis de Weibull SKID 1P-546

Resumen del Análisis	
Parámetros	
Beta	0,767151
Eta (día)	88,925593
Otra	
Rho	0,943277
Val. de V	-62,504160

CONFIABILIDAD = 20%
 PROBABILIDAD FALLA = 80%
 MTTF = 117 Días

En la siguiente grafica se observan todas las intervenciones asociadas a las bombas multietapas durante el periodo de tiempo 2012 hasta 2017

Tabla 16 Tipos y descripción de fallas Bomba SKID 1P-546

BOMBA MULTIETAPAS				
1P-546				
ITEM	Tipo	FECHA FALLA	DESCIPCION	DIAS
1	Tipo 2	1/12/2013	Verificación alineación bombas 1P-545 y 1P-546	-
2	Tipo 2	7/06/2015	Cambio de bomba por incremento de capacidad	553
3	Tipo 2	21/01/2016	1P546 Revisión por apertura del interruptor	228
4	Tipo 2	31/01/2016	Cambio de las 3 secciones de bomba por disparo	10
5	Tipo 2	6/02/2016	Verificación alineamiento del equipo	6
9	Tipo 2	4/03/2017	1P-546 Cambio de posición secciones bombas y revisión de integridad de acoples.	392
12	Tipo 2	11/07/2017	1P-546. Cambio secciones de bomba y cámara de empuje por muy baja eficiencia	129

Figura 32 Confiabilidad vs tiempo y Probabilidad de falla vs tiempo Bomba 1P-546

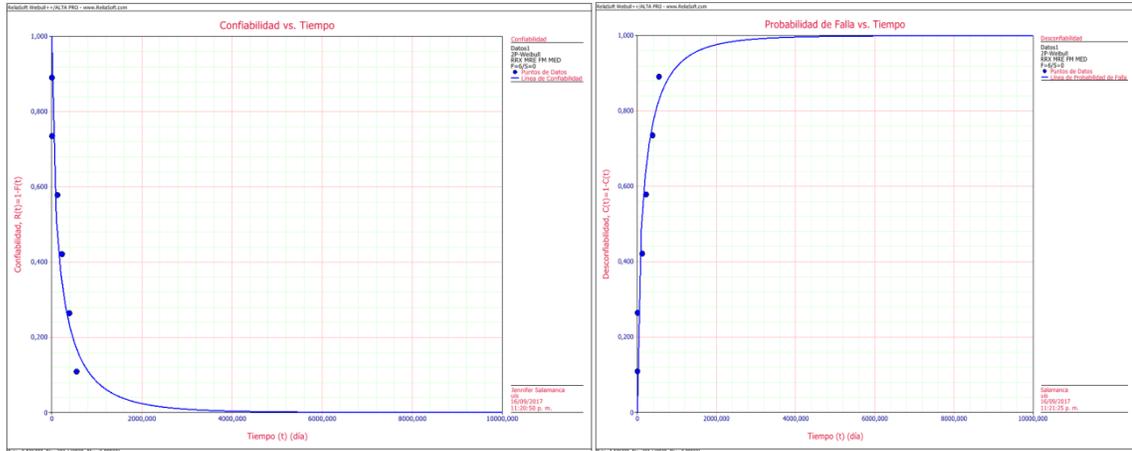


Tabla 17 Resumen de resultados análisis de Weibull Bomba SKID 1P-546

Resumen del Análisis	
Parámetros	
Beta	0,766659
Eta (día)	193,278576
Otra	
Val. de V	-38,032280

CONFIABILIDAD = 38%
 PROBABILIDAD FALLA = 62%
 MTTF = 226 Días

8.3.5 Análisis del skid 1P-547 En la siguiente grafica se observan todas las intervenciones del skid total durante el periodo de tiempo 2012 hasta 2017

Tabla 18 Tipos y descripción de fallas SKID 1P-547

SKID COMPLETO				
1P-547				
ITEM	Tipo	FECHA FALLA	DESCIPCION	DIA S
1	Tipo 1	5/03/2012	Revisión alineación en caliente conjunto motor- cámara de empuje	-
2	Tipo 2	25/09/2012	Alineación conjunto motor-bomba	204
3	Tipo 4	13/02/2013	Corrección de pase de válvula de recirculación	141
4	Tipo 1	14/02/2013	Falla motor por alta vibración	1
5	Tipo 1	17/04/2013	Fallo de rodamiento acople	62
6	Tipo 2	30/05/2013	Cambio bomba de 30 etapas ajuste y configuración	43
7	Tipo 1	20/06/2013	Cambio de motor eléctrico por alta	21

			vibración	
8	Tipo 1	26/06/2013	Cambio de rodamientos por alta vibración	6
9	Tipo 2	9/07/2013	Verificar alineación	13
10	Tipo 2	2/10/2013	Vibración anormal	85
11	Tipo 4	21/08/2015	Ventilador de refrigeración sello	688
12	Tipo 1	18/11/2015	Cambio de motor por daño en los rodamientos	89
13	Tipo 2	25/11/2015	Cambio de las 3 secciones de la bomba para aumento de capacidad	7
14	Tipo 3	27/11/2015	Cambio de CE por cambio de bombas	2
15	Tipo 1	2/02/2016	Revisión de rodamiento libre por ruido anormal	67
16	Tipo 1	8/02/2016	Soporte cambio de motor y revisión medidor de flujo	6
17	Tipo 1	16/07/2016	Cambio de motor por ruido en los rodamientos	159
18	Tipo 4	9/02/2017	Cambio de la platina de orificio para medición de flujo	208
19	Tipo 4	2/03/2017	Cambio de válvula de succión	21
20	Tipo 2	31/03/2017	Disparo bomba vibración y ruido anormal	29

Figura 33 Confiabilidad vs tiempo y Probabilidad de falla vs tiempo skid 1P-547

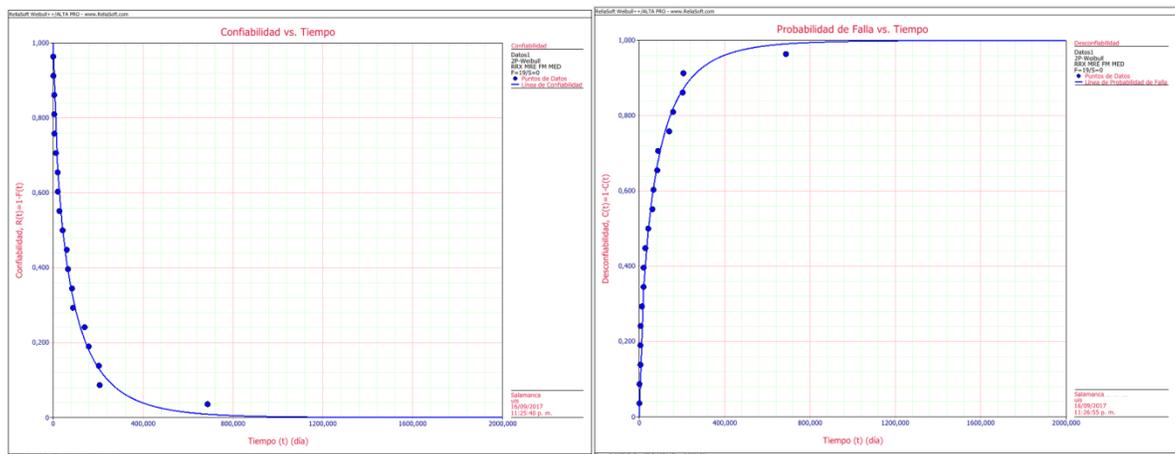


Tabla 19 Resumen de resultados análisis de Weibull SKID 1P-547

Resumen del Análisis	
Parámetros	
Beta	0,684834
Eta (día)	73,954088
Otra	
Val. de V	-103,139511

CONFIABILIDAD = 16%
 PROBABILIDAD FALLA = 84%
 MTTF = 95 Días

En la siguiente grafica se observan todas las intervenciones asociadas a las bombas multietapas durante el periodo de tiempo 2012 hasta 2017

Tabla 20 Tipos y descripción de fallas Bomba SKID 1P-547

BOMBA MULTIETAPAS				
1P-547				
ITE M	Tipo	FECHA FALLA	DESCIPCION	DIAS
2	Tipo 2	25/09/2012	Alineación conjunto motor-bomba	
6	Tipo 2	30/05/2013	Cambio bomba de 30 etapas ajuste y PM	247
9	Tipo 2	9/07/2013	Verificar alineación	40
10	Tipo 2	2/10/2013	Vibración anormal	85
13	Tipo 2	25/11/2015	Cambio de las 3 secciones de la bomba para aumento de capacidad	784
20	Tipo 2	31/03/2017	Disparo bomba por alta vibración y ruido	492

Figura 34 Confiabilidad vs tiempo y Probabilidad de falla vs tiempo Bomba 1P-547

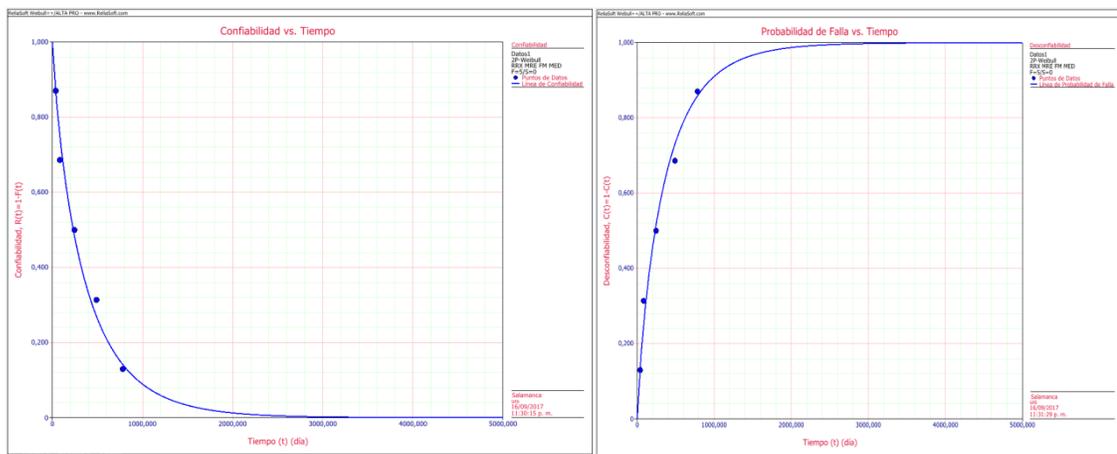


Tabla 21 Resumen de resultados análisis de Weibull Bomba SKID 1P-547

Resumen del Análisis	
Parámetros	
Beta	1,099110
Eta (día)	341,414870
Otra	
Val. de V	-33,956788

CONFIABILIDAD = 60%
 PROBABILIDAD FALLA = 40%
 MTTF = 329 Días

8.3.6 Resumen

Tabla 22 Resumen general resultados de los SKIDS

		Beta	Eta Días	Confiabilidad %	P. Falla %
1P-541	Skid	1.02	108.6	18	82
	Bomba	2.00	363.5	77	23
1P-542	Skid	0.85	95.5	17	83
	Bomba	N/A	N/A	N/A	N/A
1P-545	Skid	0.93	135.3	26	74
	Bomba	1.42	543.2	80	20
1P-546	Skid	0.76	88.9	20	80
	Bomba	0.76	193.2	38	62
1P-547	Skid	0.69	73.95	16	84
	Bomba	1.09	341.4	60	40

8.3.7 Indicadores

Tabla 23 Indicadores generales de cada SKID

		Disponibilidad %	Confiabilidad %	MTBF N/A Días	MTTF Días
1P-541	Skid	99	18	107.8	107.6
	Bomba	99	77	266.5	268
1P-542	Skid	99	17	103.06	103.7
	Bomba	N/A	N/A	N/A	N/A
1P-545*	Skid	98	26	140.5	139
	Bomba	99	80	493	493.9
1P-546*	Skid	99	20	119.8	117
	Bomba	99	38	219	226
1P-547*	Skid	99	15	97.47	95
	Bomba	99	60	329.6	329.52

* aplica solamente para las bombas ya que a estas se les realizó el Upgrade

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1. Durante el ejercicio de análisis de Pareto podemos concluir que la unidad con mayor número de intervenciones asociados a correctivos planeados y reactivos es la unidad 1P-547, es decir este equipo es el más crítico de todo el sistema de inyección
2. También se encontraron que las unidades 1P-541-2-5-6 son los siguientes equipos más importantes posterior a la unidad 1P-547, estos estuvieron dentro del 80% de las intervenciones y de la cantidad de Horas Hombre asociados a correctivos.
3. Se realizó análisis de RCA basado en las 5Ms y el método gráfico de Ishikawa obteniendo recomendaciones en cada una de las cinco variables.
4. Se da como conclusión que los eventos presentados en el sistema de inyección es la combinación de varios factores y variables como:

Medio Ambiente: debido al agua y su gran corrosión se recomienda realizar control mediante tratamiento químico así como monitoreo permanentes a la calidad de agua.

Máquinas: debido a vibración y desalineación de los equipos (cunas) y desajustes en los anclajes, estas actividades son el problema más típico y usual entre las ordenes de trabajo tipo correctivo analizadas dentro de la información primaria recolectada. Se requiere de realizar una campaña de alineación y revisión de ajustes lo más pronto posible.

Material: Solicitar a la empresa contratista (manufacturera del equipo) que revise internamente sus proveedores de los repuestos (acoples) si se están presentando anomalías en estos, adicional se deberá solicitar a la empresa los certificados de material de los acoples que sean comprados por la compañía.

5. En los skids analizados con el método de weibull se puede concluir que como conjunto la mayoría de estos presentan una confiabilidad baja, debido a que los diferentes subsistemas pueden presentar daños de cualquier tipo y detener la operación.

6. Las Bombas 1P-541/2/5 presentan un beta superior a 1, indicándonos que se encuentra en su etapa de desgaste normal.

7. La unidad 1P-547 se encuentra en casi beta igual a uno, esto quiere decir que existe una mezcla de modos fallas y pueden ocasionar fallas aleatorias independientemente del tiempo.

8. Las bombas a las cuales se les realizó el upgrade 1 presentan fallas repentinas de baja periodicidad, con un beta menor a uno, lo que significa que aún se encuentran pasando su etapa de mortalidad infantil.

9. Es de resaltar que se tiene como resultado una disponibilidad bastante buena debido a que se cuenta con un conjunto de stand by (motor, cámara de empuje, bombas, acoples) en la bodega de mantenimiento haciendo que en caso de falla se realice el cambio del elemento afectado sin mayores traumatismos para la operación, el tiempo aproximado en habilitar una unidad es de 12 horas.

10. Se propone realizar un análisis económico para evaluar la factibilidad de poder tener un skid de stand by en línea para facilitar tareas de mantenimiento ya que existe la negativa de operación en entregar los equipos para preventivos.

11. Podemos apreciar que el MTBF de las bombas se encuentran entre 200 a 400 días, superando en algunos casos el año.

12. La bomba del 1P-546 presenta la confiabilidad más baja con el 38%, con un MTBF de 219 Días, cabe resaltar que esta es una de las bombas a las cuales se les realizó el upgrade y se encuentran en mortalidad infantil.

BIBLIOGRAFÍA

Ingeniero Ambiental. Tomado de:

<http://www.ingenieroambiental.com/4000/GUIA%2001%20-%20OK.pdf>

Borras Pinilla, C. Mantenimiento Preventivo, Especialización Gerencia de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander, 2016.

Espinosa, F, pequeñas charlas para gestión del mantenimiento tomado de: <http://www.ridssso.com/documentos/muro/fbe6005572088684d7d45c9bcf0436ee.pdf>

Olguin, V, Analisis de Causa raíz (five why's), tomado de

<https://es.slideshare.net/volguin80/anlisis-y-solucin-de-problemas-5-porques>

Herrero, P, Las 5 “M” como método para localizar la causa raíz de un problema, tomado de: <http://blog.sage.es/innovacion-tecnologia/las-5-m-como-metodo-para-localizar-la-causa-raiz-de-un-problema/>

Días, C, Ingeniería y Gerencia XXI, Método de las 5 M. tomado de: <http://ingenieriayperenciaxxi.blogspot.com.co/2012/07/metodo-de-las-5-m.html>

Pertuz, A. Material Seminario Integridad y Confiabilidad Operacional de Equipos, Especialización Gerencia de Mantenimiento, 2016.

Soliman AA. Bayes prediction in Pareto lifetime models with random sample size. J Egypt Math Soc 1999;7(2):209–23.

Borras Pinilla, C. Material Seminario Mantenimiento Preventivo, Especialización Gerencia de Mantenimiento, 2016.

Rinne, H. (2009). Definition and properties of the WEIBULL distribution. *The Weibull Distribution: A Handbook*.

Jaramillo, J. Material Seminario Mantenimiento Predictivo, Especialización Gerencia de Mantenimiento, 2016. J

ANEXOS. CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Ingeniero Ambiental. Tomado de:
<http://www.ingenieroambiental.com/4000/GUIA%2001%20-%20OK.pdf>
- [2]. Borrás Pinilla, C. Mantenimiento Preventivo, Especialización Gerencia de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [3]. Espinosa, F, pequeñas charlas para gestión del mantenimiento tomado de:
<http://www.ridsso.com/documentos/muro/fbe6005572088684d7d45c9bcf0436ee.pdf>
- [4]. Olguin, V, Analisis de Causa raíz (five why's), tomado de
<https://es.slideshare.net/volguin80/anlisis-y-solucin-de-problemas-5-porques>
- [5] Herrero, P, Las 5 “M” como método para localizar la causa raíz de un problema, tomado de: <http://blog.sage.es/innovacion-tecnologia/las-5-m-como-metodo-para-localizar-la-causa-raiz-de-un-problema/>
- [6]. Días, C, Ingeniería y Gerencia XXI, Método de las 5 M. tomado de:
<http://ingenieriayperenciaxxi.blogspot.com.co/2012/07/metodo-de-las-5-m.html>
- [7] Pertuz, A. Material Seminario Integridad y Confiabilidad Operacional de Equipos, Especialización Gerencia de Mantenimiento, 2016.
- [8] Soliman AA. Bayes prediction in Pareto lifetime models with random sample size. *J Egypt Math Soc* 1999;7(2):209–23.
- [9] Borrás Pinilla, C. Material Seminario Mantenimiento Preventivo, Especialización Gerencia de Mantenimiento, 2016.
- [10]. Group, Francis. (2008). Weibull distribution, chapter 12-15.
- [11]. Group, Francis. (2008). Weibull distribution: A tool for Engineers, chapter 19.
- [12]. Rinne, H. (2009). Definition and properties of the WEIBULL distribution. *The Weibull Distribution: A Handbook*.
- [13]. Guide, M. U., & Time, M. M. (n.d.). MTBF User Guide : Measuring Mean, 283–284, Chapter 17.

- [14]. Jaramillo, J. Material Seminario Mantenimiento Predictivo, Especialización Gerencia de Mantenimiento, 2016. J
- [15] Failure, C., Mode, C. F., & Map, C. S. (n.d.). Andon (J), (1), 315–317
- [16]. Información perteneciente a la empresa en estudio.
- [17] Fundación Viztaz, Media Colombia, tomado de: fotoshttp://vitztaz.com.co/colombia/banco/picture.php?/2857
- [18]. EnggCyclopedia, tomado de: <http://www.enggcyclopedia.com/typical-pid-arrangements-symbols/>
- [19]. Fiberglass Tank Solutions, tomado de: <http://fgtsolutions.com/oil-field-production-tanks.html>
- [20]. Enviro-Tech Systems tomado de: <http://envirotechsystems.com/produced-water-equipment/enviro-cell/>
- [21]. Schlumberger company tomado de http://www.slb.com/services/production/artificial_lift/multistage-centrifugal-horizontal-pumps.aspx
- [22]. Bakerhughes tomado de: <https://www.bakerhughes.com/products-and-services/production/artificial-lift/horizontal-surface-pumping-systems>
- [23]. Manual de fabricante BAKER HUGHES tomado de: <http://calroc.ca/equipment/media/Baker-Hughes-HPump-Operation-and-Maintenance-Manual.pdf>
- [24] Diseños en 3D bibliocad tomado de: http://www.bibliocad.com/biblioteca/control-motor-dc_35057
- [25] Vortex industry direct tomado de: <http://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/vortex-flow-meter-71987.html>